



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΣΤΙΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΞΗΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

ΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

ΥΠΟΨΗΦΙΟΣ ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ

ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣ Ν. ΣΤΡΑΤΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΙΩΑΝΝΗΣ Γ. ΣΑΡΙΔΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ, 2017

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε ως μέρος των απαιτήσεων για την απόκτηση του Διδακτορικού Διπλώματος στην κατεύθυνση **Εφαρμοσμένα Μαθηματικά στις Επιστήμες Μηχανικών** της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Πίνακας 1: Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή ορισμένη κατά την 358η Συνεδρίαση της Συγκλήτου του Πολυτεχνείου Κρήτης στις 04-07-2013.

ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ	ΘΕΣΗ, ΙΔΡΥΜΑ
Ιωάννης Σαριδάκης (Επιβλέπων)	Καθηγητής, Μ.Π.Δ., Πολυτ. Κρήτης
Γεώργιος Καρατζάς	Καθηγητής, ΜΗ.ΠΕΡ., Πολυτ. Κρήτης
Ανάργυρος Δελής	Αν. Καθηγητής, Μ.Π.Δ., Πολυτ. Κρήτης

Πίνακας 2: Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή ορισμένη κατά την 1η Γενική Συνέλευση Ειδικής Σύγκλησης της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης στις 06-09-2016.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ	ΘΕΣΗ, ΙΔΡΥΜΑ
Ιωάννης Σαριδάκης (Επιβλέπων)	Καθηγητής, Μ.Π.Δ., Πολυτ. Κρήτης
Γεώργιος Καρατζάς	Καθηγητής, ΜΗ.ΠΕΡ., Πολυτ. Κρήτης
Έλενα Παπαδοπούλου	Καθηγήτρια, ΜΗΧ.Ο.Π., Πολυτ. Κρήτης
Αντώνιος Βαφείδης	Καθηγητής, ΜΗΧ.Ο.Π., Πολυτ. Κρήτης
Ανάργυρος Δελής	Αν. Καθηγητής, Μ.Π.Δ., Πολυτ. Κρήτης
Παναγιώτα Τσομπανοπούλου	Αν. Καθηγήτρια, Τ.Η.Μ.Μ.Υ., Πανεπ. Θεσσαλίας
Εμμανουήλ Μαθιουδάκης	Επ. Καθηγητής, ΜΗΧ.Ο.Π., Πολυτ. Κρήτης

Η έγκριση της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής από τη Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, άρθρο 202, παρ. 2).

Τμήμα της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής εκπονήθηκε υπό την αιγίδα και χρηματοδότηση των ακόλουθων ερευνητικών προγραμμάτων:

- (06/2012-05/2014)

Ειδικός Λογαριασμός Κονδυλίων Έρευνας Πολυτεχνείου Κρήτης.

Πρόγραμμα βασικής έρευνας 80794.

Τίτλος έργου: Ενίσχυση ερευνητικών δραστηριοτήτων ΠΚ 2012.

Τίτλος εργασίας: Υψηλής τάξης προσεγγίσεις και στοχαστική βελτιστοποίηση για μοντέλα υφαλμύρισης υπόγειων υδροφορέων.



Σχήμα 1: Ειδικός Λογαριασμός Κονδυλίων Έρευνας Πολυτεχνείου Κρήτης.

- (07/2014-08/2015)

ΘΑΛΗΣ - MATENVMED. Πλατφόρμα προηγμένων μαθηματικών μεθόδων και λογισμικού για την επίλυση προβλημάτων πολλαπλών πεδίων (multiphysics, multidomain) σε σύγχρονες υπολογιστικές αρχιτεκτονικές: Εφαρμογή σε προβλήματα Περιβαλλοντικής Μηχανικής και Ιατρικής.

ΕΣΠΑ 2007-2013, Τομεακά Επιχειρησιακά Προγράμματα, ΕΠ Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση, Άξονας Προτεραιότητας 10.



Σχήμα 2: Επιχειρησιακό Πρόγραμμα ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ, Ε.Σ.Π.Α. 2007-2013.

*Στους δύο πνευματικούς μου πατέρες
σε αυτό το δύσκολο αλλά και όμορφο ταξίδι,
Καθηγητές κ. Ιωάννη Σαριδάκη και κ. Απόστολο Χατζηδήμο.*

Ευχαριστίες

Νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή και επιβλέποντα της Διατριβής μου, κ. Ιωάννη Σαριδάκη, τόσο για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου προσφέροντάς μου τη δυνατότητα να ασχοληθώ με ένα εξαιρετικά ενδιαφέρον θέμα ιδιαίτερης περιβαλλοντικής σημασίας, όσο και για την ακούραστη καθοδήγηση και υποστήριξη που μου προσέφερε σε κάθε δύσκολο σημείο της προσπάθειάς μου αυτής. Τα τελευταία χρόνια της στενότερης συνεργασίας μας απέκτησα κοντά του πολύτιμες γνώσεις που διαμόρφωσαν τον τρόπο σκέψης μου, διέυρυναν τους επιστημονικούς μου ορίζοντες και έθεσαν τα θεμέλια για την επιστημονική μου εξέλιξη.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στη Δρ. κα. Μαρία Ζαχυνθινάκη για τις συμβουλές, τη συνεργασία και την καταλυτική βοήθεια που μου προσέφερε κατά την εκπόνηση της Διατριβής μου. Χωρίς τη συμβολή της η αποπεράτωση της Διατριβής μου θα ήταν αδύνατη.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω τόσο στον Καθηγητή κ. Γεώργιο Καρατζά όσο και στη Δρ. κα. Ζωή Δόκου. Η καθοδήγησή τους στη θεωρία υπογείων υδάτων και στη φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παρήχθησαν καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνάς μου, ήταν καθοριστική για την εξέλιξη και ολοκλήρωση της Διατριβής μου.

Ευχαριστώ επίσης τον Επ. Καθηγητή κ. Εμμανουήλ Μαθιουδάκη και την Καθηγήτρια κα. Έλενα Παπαδοπούλου για την άψογη συνεργασία και τις κατευθυντήριες συμβουλές σε κάθε δύσκολο σημείο αυτής της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Αν. Καθηγητή κ. Ανάργυρο Δελή, μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής μου, όπως και στα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής για τον χρόνο που αφιέρωσαν κατά τον έλεγχο της Διατριβής μου, για τις πολύτιμες διορθώσεις και συμβουλές τους.

Θέλω επίσης να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στους εξαίρετους φίλους και συναδέλφους Δρ. κ. Αναστάσιο Σηφαλάκη και Δρ. κα. Μαριάννα Παπαδομανωλάκη καθώς και τους υποψήφιους Διδάκτορες κ. Ιωάννη Αθανασάκη, κ. Νικόλαο Βιλανάκη, κ. Βασίλειο Μανδίκη και κ. Γεώργιο Κοκκινάκη. Η φιλία μας και η συνεργασία μου μαζί τους υπήρξε ιδιαίτερα

εμπυχωτική και εποικοδομητική για εμένα, καθώς σε κάθε δύσκολη στιγμή αυτής της προσπάθειας, οι φίλοι μου αυτοί με το ήθος τους και τις μαθηματικές τους γνώσεις κατάφερναν να με βοηθούν.

Οι γονείς μου, Νικόλαος και Αργυρώ, καθώς και η αδελφή μου Μαρία υπήρξαν για μένα καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής μου η κινητήριος δύναμή μου. Δρώντες ως παράγοντες ψυχολογικής και ηθικής υποστήριξης ήταν κοντά μου σε κάθε δύσκολη στιγμή με αμέριστη συμπαράσταση, αγάπη και την προτροπή τους να συνεχίζω. Προφανώς η ευγνωμοσύνη μου προς αυτούς είναι δεδομένη.

Θα ήθελα τέλος να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη σύντροφό μου υποψήφια Διδάκτορα κα. Παναγιώτα Θεοδωρίδου για την απερίγραπτη στοργή, υπομονή και επιμονή, με τις οποίες συνόδευσε όλες τις προσπάθειές της για εμπύχωσή μου σε κάθε βήμα της εργασίας μου αυτής.

Χανιά, 2017

Παρασκευάς Ν. Στρατής

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xxiii
Περίληψη	1
Abstract	5
1 Εισαγωγή	9
1.1 Υδροφόρο σύστημα	10
1.2 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης	10
1.2.1 Αιτίες δημιουργίας του φαινομένου	11
1.2.2 Είδη υφαλμύρισης	12
1.2.3 Επιπτώσεις της υφαλμύρισης	13
1.2.4 Το φαινόμενο της αλάτωσης	14
1.2.5 Κινητική της υφαλμύρισης	15
1.2.6 Πολυπλοκότητα του προβλήματος	16
1.2.7 Τρόποι αντιμετώπισης	17
1.3 Τρόποι προσομοίωσης της διεπιφάνειας	19
1.3.1 Διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους σταθερής πυκνότητας	20
1.3.2 Διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους μεταβλητής πυκνότητας	21
1.3.3 Απότομη διεπιφάνεια	24
1.4 Εξίσωση των Ghyben-Herzberg	24
2 Μαθηματική μοντελοποίηση του φαινομένου	27
2.1 Υφαλμύριση παράκτιων υδροφορέων	27
2.2 Παραδοχές εφαρμογής του μοντέλου	31
2.3 Εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου	32
2.4 Αναλυτική λύση	36
2.4.1 Εξιδανικευμένος υδροφορέας κατηγορίας I	36
2.4.2 Εξιδανικευμένος υδροφορέας κατηγορίας II	38
2.4.3 Εξιδανικευμένος υδροφορέας κατηγορίας III	39

3	Το πρόβλημα βελτιστοποίησης	43
3.1	Μοντελοποίηση του προβλήματος της υφαλμύρισης	43
3.2	Οι παράμετροι ενδιαφέροντος	44
3.3	Η αντικειμενική συνάρτηση	44
3.3.1	Αντικειμενική συνάρτηση γραμμικής μορφής	46
3.3.2	Αντικειμενική συνάρτηση εκθετικής μορφής	47
3.4	Οι φυσικοί περιορισμοί του προβλήματος	51
3.4.1	Περιορισμοί όγκου άντλήσεων	51
3.4.2	Περιορισμοί μετατόπισης	53
3.5	Η τελική μορφή του προβλήματος βελτιστοποίησης	54
4	Ο αλγόριθμος στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX	57
4.1	Εκδόσεις του ALOPEX	57
4.1.1	ALOPEX I	58
4.1.2	ALOPEX II	59
4.1.3	ALOPEX IIIa	60
4.1.4	ALOPEX III	61
4.1.5	ALOPEX IVa	61
4.1.6	ALOPEX IV	62
4.2	Ο αλγόριθμος στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX V	62
5	Ο αλγόριθμος στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX με χρήση περιορισμών	65
5.1	Κυρώσεις ελέγχου της επαναληπτικής διαδικασίας	65
5.1.1	Κυρώσεις ελέγχου μέγιστων και ελάχιστων δυνατών τιμών άντλησης	66
5.1.2	Κυρώσεις ελέγχου προσέγγισης των ενεργών περιοχών άντλησης	69
5.1.3	Κυρώσεις ελέγχου δυναμικού ροής στις ενεργές περιοχές άντλησης	73
5.2	Οι συμμετέχοντες όροι στην επαναληπτική διαδικασία ALOPEX	74
5.2.1	Ο παράγοντας μνήμης κατά την επαναληπτική διαδικασία ALOPEX V	75
5.2.2	Ο παράγοντας θορύβου κατά την επαναληπτική διαδικασία ALOPEX V	77
5.3	Κριτήριο ολοκλήρωσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης	79
6	Ο παράκτιος υδροφορέας γλυκού νερού στην περιοχή Βαθύ Καλύμνου	83
6.1	Υδραυλικά χαρακτηριστικά και περιγραφή του υδροφορέα	85
6.1.1	Η προσέγγιση του εξιδανικευμένου υδροφορέα	86
6.1.2	Φυσική υφαλμύριση στον υδροφορέα της Καλύμνου	90
6.1.3	Ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα	91
6.2	Παράμετροι ελέγχου της διαδικασίας βελτιστοποίησης	93
6.2.1	Οι κυρώσεις ελέγχου της επαναληπτικής διαδικασίας	93

6.2.2	Περιοχές ασφαλείας και θέσεις κρίσιμων σημείων στο εσωτερικό του υδροφορέα	97
6.2.3	Ο περιορισμός του δυναμικού ροής	105
6.2.4	Το κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης	110
6.3	Σενάρια αντλήσεων	111
6.3.1	Περίπτωση Ia: Υδροφορέας 2 ενεργών γεωτρήσεων	115
6.3.2	Περίπτωση Ib: Υδροφορέας 2 ενεργών γεωτρήσεων	124
6.3.3	Περίπτωση IIa: Υδροφορέας 3 ενεργών γεωτρήσεων	130
6.3.4	Περίπτωση IIb: Υδροφορέας 3 ενεργών γεωτρήσεων	139
6.3.5	Περίπτωση III: Υδροφορέας 5 ενεργών γεωτρήσεων	146
6.3.6	Περίπτωση IV: Υδροφορέας 11 ενεργών γεωτρήσεων	152
6.4	Οι παραγόμενες λύσεις από τον αλγόριθμο στοχαστικής βελτιστοποίησης A-LOPEX V	156
6.4.1	Υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας βελτιστοποίησης	156
6.4.2	Κρίσιμα σημεία της διαδικασίας βελτιστοποίησης	160
6.4.3	Ανάλυση ευαισθησίας των παραγόμενων λύσεων	163
6.5	Υδροφορέας Καλύμνου: Συμπεράσματα	169
7	Ο παράκτιος υδροφορέας γλυκού νερού στην περιοχή Χερσονήσος του Ηρακλείου Κρήτης	179
7.1	Εισαγωγή: Γενικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα	179
7.2	Princeton Transport Code	183
7.2.1	Οι εξισώσεις του PTC	183
7.2.2	Συνοριακές συνθήκες ροής	185
7.3	Η επιλογή του υδροφορέα της Χερσονήσου	187
7.4	Σενάρια αντλήσεων και ανατροφοδότησης του παράκτιου υδροφορέα	190
7.5	Στρατηγική προστασίας του υδροφορέα	194
7.6	Περίπτωση I: Υδροφορέας 5 ενεργών γεωτρήσεων	196
7.6.1	Summer_V: Καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης	196
7.6.2	Winter_V: Χειμερινό σενάριο ανατροφοδότησης	204
7.7	Περίπτωση II: Υδροφορέας 4 ενεργών γεωτρήσεων	210
7.7.1	Summer_IV: Καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης	210
7.8	Περίπτωση III: Υδροφορέας 6 ενεργών γεωτρήσεων	216
7.8.1	Summer_VIa: Καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης	217
7.8.2	Summer_VIb: Καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης	223
7.9	Υδροφορέας Χερσονήσου. Συμπεράσματα	230
8	Λογισμικά και υλικό στην παρούσα εργασία	237
9	Συναφείς δημοσιεύσεις	239

Βιβλιογραφία	240
9.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	241
9.2 Ελληνική βιβλιογραφία	247
9.3 Χρήσιμοι ιστότοποι	249

Κατάλογος Σχημάτων

1	Ειδικός Λογαριασμός Κονδυλίων Έρευνας Πολυτεχνείου Κρήτης.	iii
2	Επιχειρησιακό Πρόγραμμα ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ, Ε.Σ.Π.Α. 2007-2013.	iii
1.1	Διατομή υπό γωνία παράκτιου υδροφορέα γλυκού νερού. Είσοδος υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα (φαινόμενο υφαλμύρισης).	11
1.2	Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Κώνοι κατάπτωσης και ανύψωσης κατά τη διάρκεια αντλήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.	16
1.3	Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Περιορισμός του φαινομένου της υφαλμύρισης με χρήση υπόγειου αδιαπέρατου φράγματος κοντά στην ακτή. . .	18
1.4	Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Περιορισμός του φαινομένου της υφαλμύρισης μέσω αντλήσεων υφάλμυρου νερού από υφαλμυρισμένες περιοχές του υδροφορέα.	19
1.5	Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Περιορισμός του φαινομένου της υφαλμύρισης χρησιμοποιώντας γεωτρήσεις εμπλουτισμού σε γλυκό νερό στο εσωτερικό του υδροφορέα.	20
1.6	Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Θεώρηση υφάλμυρης διεπιφάνειας πεπερασμένου πλάτους.	22
1.7	Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας. . .	24
1.8	Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Εφαρμογή της εξίσωσης των Ghyben-Herzberg στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας.	25
2.1	Διατομή υπό γωνία παράκτιου υδροφορέα. Εισαγωγή της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του ως συνέπεια αντλήσεων γλυκού νερού.	27
2.2	Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Γραφική απεικόνιση παραμέτρων μοντελοποίησης.	29

2.3	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα. Θέσεις ενεργών γεωτρήσεων και αντίστοιχες θέσεις κρίσιμων σημείων και υφάλμυρης σφήνας.	33
2.4	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα ορθογώνιας γεωμετρίας. Φανταστικές γεωτρήσεις άντλησης αλλά και ανατροφοδότησης σε συμμετρικές αποστάσεις από τη μοναδική πραγματική γεώτρηση του υδροφορέα, σύμφωνα με τη μέθοδο των Εικόνων.	34
2.5	Κατηγορία I. Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα απείρων διαστάσεων.	36
2.6	Κατηγορία II. Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα απείρου μήκους και πεπερασμένου πλάτους.	38
2.7	Κατηγορία III. Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα πεπερασμένων διαστάσεων και ορθογώνιας γεωμετρίας.	40
3.1	Γραφικές παραστάσεις των υποψήφιων κανονικοποιημένων αντικειμενικών συναρτήσεων δύο μεταβλητών $[Q_1^{min}, Q_1^{max}] \times [Q_2^{min}, Q_2^{max}] \equiv [0, 1] \times [0, 1]$. . .	49
3.2	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα. Θέσεις γεωτρήσεων, υφάλμυρης σφήνας και περιμετρικές περιοχές ασφαλείας.	53
5.1	MODULE I. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας κυρώσεων ελέγχου κατά τον έλεγχο των μέγιστων και ελάχιστων τοπικών και ολικών άντλησεων.	68
5.2	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα. Θέση υφάλμυρης σφήνας και αποστάσεις ασφαλείας από τις περιοχές ενεργών γεωτρήσεων.	70
5.3	MODULE II. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας κυρώσεων ελέγχου κατά τον έλεγχο προσέγγισης των περιοχών ενεργούς άντλησης.	72
6.1	Το ελληνικό νησί της Καλύμνου στο νοτιοανατολικό Αιγαίο και η περιοχή Βαθύς στο ανατολικό τμήμα αυτού (Google map).	84
6.2	Κάτοψη πραγματικής γεωμετρίας (κόκκινη τεθλασμένη καμπύλη) και ορθογώνιας προσέγγισης αυτής (γαλάζιο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο) του υδροφορέα της περιοχής Βαθύς στο ελληνικό νησί της Καλύμνου (Google map). .	85

6.3	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου. Περιοχές με διαφορετικούς συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας K (m/day) και επιφανειακής ανατροφοδότησης N ($mm/year$) στο εσωτερικό του υδροφορέα (Google map).	86
6.4	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου. Περιοχές ενιαίας τιμής υδραυλικής αγωγιμότητας και διαφορετικής επιφανειακής ανατροφοδότησης.	88
6.5	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου. Φαινόμενο φυσικής υφαλμύρισης στο εσωτερικό του υδροφορέα όπου δεν πραγματοποιείται καμία άντληση, θεωρώντας είτε ότι όλες οι γεωτρήσεις είναι ανενεργές είτε ότι δεν υπάρχει καμία θέση γεώτρησης.	91
6.6	Κάθετη διατομή του παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου. Κώνος κατάπτωσης και περιοχή ασφαλείας περιμετρικά της θέσεως ενεργούς γεώτρησης.	101
6.7	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, μεγέθυνση Σχήματος 3.2. Κυκλικός δίσκος ασφαλείας περιμετρικά της θέσεως μιας ενεργούς γεώτρησης. . .	104
6.8	Συμπεριφορά της συνάρτησης του δυναμικού ροής υπό την ισχύ διαφορετικών τιμών άντλησης για τη μοναδική γεώτρηση του υδροφορέα. Η τιμή του δυναμικού ροής στη θέση ελέγχου γειτονικά της γεώτρησης διατηρείται θετική.106	
6.9	Συμπεριφορά της συνάρτησης του δυναμικού ροής υπό την ισχύ διαφορετικών τιμών άντλησης για τη μοναδική γεώτρηση του υδροφορέα. Η τιμή του δυναμικού ροής στη θέση ελέγχου γειτονικά της γεώτρησης είναι αρνητική. .	107
6.10	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση Ia. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές αντλήσεων.	118
6.11	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.	119
6.12	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Συνεισφορά παραγόντων μνήμης και θορύβου στην κατασκευή των νέων τιμών άντλησης, κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.	120

6.13	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση Ia, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες τιμές αντλήσεων.	122
6.14	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων. . .	123
6.15	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση Ib. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές αντλήσεων.	126
6.16	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.	127
6.17	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Συνεισφορά παραγόντων μνήμης και θορύβου στην κατασκευή των νέων τιμών άντλησης, κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.	128
6.18	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση Ib, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες τιμές αντλήσεων.	129
6.19	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων. . .	130
6.20	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση IIa. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές αντλήσεων.	133
6.21	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIa. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.	134

6.22	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIa. Συνεισφορά παραγόντων μνήμης και θορύβου στην κατασκευή των νέων τιμών άντλησης, κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.	135
6.23	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση IIa, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες τιμές άντλησεων.	137
6.24	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIa, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους άντλησεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων. . .	138
6.25	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση IIb. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές άντλησεων.	141
6.26	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους άντλησεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.	142
6.27	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Συνεισφορά παραγόντων μνήμης και θορύβου στην κατασκευή των νέων τιμών άντλησης, κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.	143
6.28	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση IIb, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις ολικά βέλτιστες τιμές άντλησεων.	144
6.29	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους άντλησεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων. . .	145
6.30	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση III. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές άντλησεων.	149

6.31	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση III. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.	150
6.32	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση IV. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές αντλήσεων.	154
6.33	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IV. Στοχαστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης ALOPEX V 500 επαναλήψεων.	155
6.34	Υδροφορέας Καλύμνου, Προφίλ Μοντελοποίησης I: Ανάλυση ευαισθησίας για την Περίπτωση III, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της ανατροφοδότησης N του υδροφορέα.	164
6.35	Υδροφορέας Καλύμνου, Προφίλ Μοντελοποίησης I: Ανάλυση ευαισθησίας για την Περίπτωση IV, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της ανατροφοδότησης N του υδροφορέα.	165
6.36	Υδροφορέας Καλύμνου, Προφίλ Μοντελοποίησης II: Ανάλυση ευαισθησίας για την Περίπτωση III, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της ανατροφοδότησης N του υδροφορέα.	166
6.37	Υδροφορέας Καλύμνου, Προφίλ Μοντελοποίησης II: Ανάλυση ευαισθησίας για την Περίπτωση IV, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της ανατροφοδότησης N του υδροφορέα.	167
7.1	Η νήσος Κρήτη στη νότια Ελλάδα και η περιοχή του Δήμου Χερσονήσου στο βόρειο τμήμα αυτής (Google map).	180
7.2	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα γλυκού νερού (κόκκινη τεθλασμένη γραμμή) στο Δήμο Χερσονήσου Κρήτης (Google map).	181
7.3	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Περιοχές διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας καθώς και οι θέσεις των 5 ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του.	182

7.4	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Συνοριακές συνθήκες 1ου και 2ου τύπου περιμετρικά του υδροφορέα, ο οποίος είναι διακριτοποιημένος από τον κώδικα PTC σε δύο κατακόρυφα στρώματα με 1050 κόμβους και 1984 τριγωνικά χωρία το καθένα.	186
7.5	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα, λαμβάνοντας υπόψη τη φυσική υφαλμύριση αλλά και χρησιμοποιώντας τόσο τις τρέχουσες όσο και τις SIMPLEX βέλτιστες αντλήσεις από τη βιβλιογραφία. Η θέση του υφάλμυρου μετώπου υπό την ισχύ των DE βέλτιστων αντλήσεων σχεδόν ταυτίζεται με το αντίστοιχο γράφημα των λύσεων της SIMPLEX, γι' αυτό και παραλείπεται.	189
7.6	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Πλαϊνές υπεδάφειες εισροές γλυκού νερού (σε m^3/day) στο καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης του υδροφορέα.	192
7.7	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Πλαϊνές υπεδάφειες εισροές γλυκού νερού (σε m^3/day) στο χειμερινό σενάριο ανατροφοδότησης του υδροφορέα, προσαυξημένες κατά 20% σε σχέση με το αντίστοιχο καλοκαιρινό σενάριο.	193
7.8	Κόμβοι ασφαλείας περιμετρικά κάθε θέσεως ενεργούς γεώτρησης στο εσωτερικό του υδροφορέα της Χερσονήσου.	195
7.9	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης του φαινομένου της φυσικής υφαλμύρισης υπό την ισχύ του καλοκαιρινού σεναρίου ανατροφοδότησης του υδροφορέα.	196
7.10	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης της φυσικής υφαλμύρισης αλλά και του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις.	200

7.11 Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις αλλά και τις βέλτιστες τεχνητά προσαυξημένες κατά 10%.	201
7.12 Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Μεγέ- θυνση του Σχήματος 7.11.	202
7.13 Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC 500 επαναλήψεων.	203
7.14 Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης της φυσικής υφαλμύρισης αλλά και του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις.	206
7.15 Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις αλλά και τις βέλτιστες τεχνητά προσαυξημένες κατά 10%.	207
7.16 Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Μεγέθυ- νη του Σχήματος 7.15.	208
7.17 Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC 500 επαναλήψεων.	209
7.18 Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης της φυσικής υφαλμύρισης αλλά και του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις.	212
7.19 Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις αλλά και τις βέλτιστες τεχνητά προσαυξημένες κατά 10%.	213
7.20 Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Μεγέ- θυνση του Σχήματος 7.19.	214

7.21	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC 500 επαναλήψεων.	215
7.22	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Πλαϊνές ανατροφοδοτήσεις (συνοριακές συνθήκες) και θέσεις των 6 ενεργών γεωτρήσεων εντός του διακριτοποιημένου πλέγματος του υδροφορέα.	218
7.23	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις αλλά και τις βέλτιστες τεχνητά προσαυξημένες κατά 10%.	220
7.24	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Μεγέθυνση του Σχήματος 7.23.	221
7.25	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC 500 επαναλήψεων.	222
7.26	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Πλαϊνές ανατροφοδοτήσεις (συνοριακές συνθήκες) και θέσεις των 6 ενεργών γεωτρήσεων εντός του διακριτοποιημένου πλέγματος του υδροφορέα.	224
7.27	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις αλλά και τις βέλτιστες τεχνητά προσαυξημένες κατά 10%.	227
7.28	Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Μεγέθυνση του Σχήματος 7.27.	228
7.29	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC 500 επαναλήψεων.	229

Κατάλογος Πινάκων

1	Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή ορισμένη κατά την 358η Συνεδρίαση της Συγκλήτου του Πολυτεχνείου Κρήτης στις 04-07-2013.	i
2	Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή ορισμένη κατά την 1η Γενική Συνέλευση Ειδικής Σύνθεσης της Σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης στις 06-09-2016.	i
2.1	Παράμετροι περιγραφής παράκτιου υδροφορέα ορθογώνιας γεωμετρίας.	30
6.1	Παράκτιος υδροφορέας Καλύμνου. Περιοχές με διαφορετικές τιμές στους συντελεστές της υδραυλικής αγωγιμότητας και της επιφανειακής ανατροφοδότησης στο εσωτερικό του, όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 6.3.	87
6.2	Χαρακτηριστικές ιδιότητες του εξιδανικευμένου υδροφορέα της Καλύμνου, όπως αυτός απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4.	88
6.3	Τιμές παραμέτρων των κυρώσεων ελέγχου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης.	95
6.4	Εποπτική ονοματολογία κυρώσεων ελέγχου και τιμές τους κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων στον υδροφορέα της Καλύμνου.	96
6.5	Τιμές παραμέτρων του κριτηρίου τερματισμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης.	111
6.6	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.	115
6.7	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.	116
6.8	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.7.	117

6.9	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.	117
6.10	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.	124
6.11	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.	125
6.12	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.11.	125
6.13	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.	126
6.14	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIa. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.	131
6.15	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIa. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.	132
6.16	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIa. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.15.	132
6.17	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIa. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.	133
6.18	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.	139
6.19	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.	139

6.20	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.19.	140
6.21	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.	140
6.22	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση III. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.	146
6.23	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση III. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.	147
6.24	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση III. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.23.	148
6.25	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση III. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.	148
6.26	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IV. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.	152
6.27	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IV. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.	153
6.28	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IV. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.	154
6.29	Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IV. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.27.	156
6.30	Ολικά βέλτιστες τιμές άντλησης για όλες τις περιπτώσεις μελέτης, έπειτα από έλεγχο που ακολουθεί την ολοκλήρωση του συνόλου των 500 επαναλήψεων.	158

6.31	Βέλτιστες τιμές άντλησης για όλες τις περιπτώσεις μελέτης, υπό την ισχύ εφαρμογής του κριτηρίου τερματισμού.	159
6.32	Τετμημένες των κρίσιμων σημείων $(x_{\tau,j}, y_j)$, $j \in \{1, \dots, M\}$, της υφάλμυρης σφήνας απέναντι από κάθε θέση ενεργούς γεώτρησης, χρησιμοποιώντας τις ολικά βέλτιστες τιμές άντλησης για όλες τις περιπτώσεις μελέτης.	161
6.33	Τετμημένες των κρίσιμων σημείων $(x_{s,j}, y_{s,j})$, $j \in \{1, \dots, M\}$, απέναντι από κάθε θέση ενεργούς γεώτρησης, χρησιμοποιώντας τις ολικά βέλτιστες τιμές άντλησης για όλες τις περιπτώσεις μελέτης.	162
7.1	Παράμετροι εξισώσεων κώδικα PTC.	184
7.2	Παράκτιος υδροφορέας Χερσονήσου. Αποτελέσματα αντλήσεων χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες χρησιμοποιούμενες τιμές αλλά και τις βέλτιστες προτεινόμενες τιμές των μεθόδων SIMPLEX και DE αντίστοιχα.	188
7.3	Μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές δυνατότητες άντλησης στις 5 περιοχές ενεργών γεωτρήσεων.	198
7.4	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC.	198
7.5	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX-PTC που περιγράφεται στον Πίνακα 7.4.	199
7.6	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC.	205
7.7	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX-PTC που περιγράφεται στον Πίνακα 7.6.	205
7.8	Μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές δυνατότητες άντλησης στις περιοχές γεωτρήσεων. Η γεώτρηση No 1 επιλέγουμε να είναι ανενεργή, ώστε να μη συμμετέχει στην κατασκευή του πλάνου αντλήσεων του υδροφορέα.	210

7.9	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC.	211
7.10	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX-PTC που περιγράφεται στον Πίνακα 7.9.	211
7.11	Μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές δυνατότητες άντλησης στις 6 θέσεις ενεργών γεωτρήσεων.	218
7.12	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC.	219
7.13	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX-PTC που περιγράφεται στον Πίνακα 7.12.	219
7.14	Μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές δυνατότητες άντλησεων στις 6 περιοχές ενεργών γεωτρήσεων.	225
7.15	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC.	225
7.16	Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX-PTC που περιγράφεται στον Πίνακα 7.15.	226
7.17	Παράκτιος υδροφορέας Χερσονήσου. Συγκριτική παρουσίαση των διαχειριστικών πλάνων άντλησης Summer_V, Summer_IV και Winter_V.	231
7.18	Παράκτιος υδροφορέας Χερσονήσου. Συγκριτική παρουσίαση των διαχειριστικών πλάνων άντλησης Summer_VIa και Summer_VIb.	232

Περίληψη

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης υδροφορέων γλυκού νερού αποτελεί ένα ιδιαίτερης σημασίας πρόβλημα, εμφανιζόμενο κυρίως σε παράκτιες περιοχές, με τάσεις έντονα αυξητικές κατά τα τελευταία χρόνια. Το φαινόμενο αυτό αντιπροσωπεύει το σύνολο των ενεργειών δια μέσου των οποίων υποβαθμίζεται η ποιότητα του νερού στο εσωτερικό ενός υδροφορέα, με συνέπεια ο ίδιος να καθίσταται μη ωφέλιμος για οποιαδήποτε ανθρώπινη δραστηριότητα.

Η χημική σύσταση του νερού στο εσωτερικό ενός υδροφορέα επηρεάζεται τόσο από την δράση διάφορων καταστρεπτικών φυσικών φαινομένων, όπως είναι παραδείγματος χάριν οι σεισμοί και οι πλημμύρες, όσο και από την ανθρώπινη δραστηριότητα στην περιοχή. Υπό κανονικές συνθήκες ένα υδροφόρο σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση δυναμικής ισορροπίας μακράς διάρκειας. Δηλαδή, σε οποιοδήποτε δεδομένο χρονικό διάστημα ο συνολικός όγκος νερού που εισέρχεται στο σύστημα ισούται με τον όγκο νερού που εξέρχεται από αυτό, με μικρές πάντοτε διακυμάνσεις. Έτσι, ο συνολικός όγκος γλυκού νερού στο εσωτερικό του παραμένει σχεδόν σταθερός. Αυτή λοιπόν η ισορροπία διακόπτεται βίαια έπειτα από ανθρώπινη παρέμβαση, υπό τη μορφή αντλήσεων νερού για την ύδρευση και άρδευση γειτονικών περιοχών. Είναι επίσης σαφές ότι το φαινόμενο της υφαλμύρισης εντείνεται κατά τη διάρκεια των καλοκαιρινών μηνών, όπου μεγιστοποιείται η ζήτηση σε γλυκό νερό εξαιτίας τόσο των αυξημένων τουριστικών αναγκών όσο και της ανάγκης εντονότερης άρδευσης των καλλιεργειών.

Η διαχείριση των αντλήσεων γλυκού νερού είναι, ως εκ τούτου, απολύτως επιβεβλημένη με σκοπό τη διατήρηση της ποιότητας του νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα και κατά συνέπεια, την αποφυγή των αρνητικών οικονομικών συνεπειών που προκύπτουν από την υποβάθμισή του. Το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας σε αυτό το πρόβλημα παραμένει αμείωτο για πάνω από έναν αιώνα, ενώ ιδιαίτερα κατά τα τελευταία χρόνια η έρευνα σχετικά με τη βελτιστοποίηση του συνολικού πλάνου αντλήσεων σε παράκτιες περιοχές έχει εντατικοποιηθεί. Σε αυτήν ακριβώς την ερευνητική προσπάθεια εντάσσεται και η παρούσα Διατριβή, με στόχο να συνεισφέρει στη διαδικασία ελέγχου των αντλήσεων ενός υδροφορέα,

παρουσιάζοντας ένα μαθηματικό αλγόριθμο αποτελεσματικής διαχείρισής τους.

Η ροή του νερού στο εσωτερικό ενός υδροφορέα είναι μια σύνθετη διαδικασία, καθώς συνυπάρχουν περισσότερες από μία φάσεις του νερού, γλυκό και αλατισμένο σε διάφορα στάδια, ενώ ταυτόχρονα οι υδραυλικές παράμετροί του παρουσιάζουν μεγάλη χωρική μεταβλητότητα. Ωστόσο, διάφοροι παράγοντες όπως η δυσκολία και η αβεβαιότητα στη δημιουργία αξιόπιστων εκτιμήσεων των παραμέτρων του προβλήματος, καθώς και το υπολογιστικό κόστος, έχουν οδηγήσει την επιστημονική κοινότητα σε ορισμένες απαραίτητες απλουστεύσεις του μοντέλου ροής. Η χρήση αυτών, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, μπορεί να μας παρέχει μια ρεαλιστική και ταυτόχρονα ικανοποιητική προσέγγιση του φαινομένου της ροής του νερού στο εσωτερικό ενός υδροφορέα. Μας δίνεται έτσι η δυνατότητα να κατασκευάσουμε ένα μοντέλο προσομοίωσης της υδραυλικής συμπεριφοράς ενός παράκτιου υδροφορέα και κατά συνέπεια, τον αντίστοιχο μαθηματικό αλγόριθμο αποτελεσματικής διαχείρισής του.

Στόχος λοιπόν αυτής της Διατριβής είναι η κατασκευή ενός αποτελεσματικού μαθηματικού αλγορίθμου, τον οποίο εφαρμόζοντας σε έναν παράκτιο υδροφορέα να μπορούμε να εξασφαλίσουμε τα εξής:

- τη μεγιστοποίηση των αντλήσεων γλυκού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα, με στόχο την κάλυψη των αναγκών σε γλυκό νερό των γειτονικών περιοχών, και
- την προστασία των γεωτρήσεων του υδροφορέα από το καταστρεπτικό φαινόμενο της υφαλμύρισης.

Ως βασικό εργαλείο της διαδικασίας μοντελοποίησης των αντλήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα προτείνουμε και εφαρμόζουμε μία κατάλληλα τροποποιημένη έκδοση του αλγορίθμου στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX, προσαρμοσμένη στα υδραυλικά χαρακτηριστικά του προβλήματος. Πρόκειται για έναν σχετικά απλό αλλά ιδιαίτερα αποδοτικό αλγόριθμο, γνωστό στη βιβλιογραφία από προηγούμενη εφαρμογή του σε πλήθος σχετικών προβλημάτων μοντελοποίησης και στοχαστικής βελτιστοποίησης. Ταυτόχρονα, κατασκευάζουμε ένα πλήθος κυρώσεων ελέγχου της συμπεριφοράς του αλγορίθμου, έτσι ώστε οι αναγκαίοι από τη φύση του προβλήματος περιορισμοί να λαμβάνονται υπόψη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης και ταυτόχρονα να την καθοδηγούν κατάλληλα.

Η εφαρμογή του αλγορίθμου στοχαστικής βελτιστοποίησης, συνδυαζόμενου με ένα πλήθος απαραίτητων κυρώσεων ελέγχου, πραγματοποιείται μέσω μιας μεθοδολογίας δύο βημάτων, που περιγράφεται ως εξής:

- Αρχικά, με στόχο τη διερεύνηση της συμπεριφοράς και της υπολογιστικής αποδοτικότητας συνολικά της διαδικασίας βελτιστοποίησης, εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο στοχαστικής βελτιστοποίησης *AL.O.P.EX.* σε έναν εξιδανικευμένο παράκτιο υδροφορέα γλυκού νερού. Ο υδροφορέας αυτός, με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά την ορθογώνια γεωμετρία του σχήματός του, καθώς και την ομοιογένεια των υδραυλικών χαρακτηριστικών στο εσωτερικό του, προσομοιώνει έναν πραγματικό υδροφορέα της περιοχής Βαθύ στο Ελληνικό νησί της Καλύμνου. Όπως μάλιστα μπορούμε να δούμε και στη σχετική βιβλιογραφία, αυτός, ο τρόπον τινά *εξιδανικευμένος* υδροφορέας έχει χρησιμοποιηθεί και παλαιότερα σε ερευνητικές εργασίες ως μοντέλο εφαρμογής και ελέγχου διαδικασιών διαχείρισης των αντλήσεων γλυκού νερού στο εσωτερικό του. Έτσι, στην παρούσα εργασία εξετάζουμε διαφορετικά σενάρια αντλήσεων, υπό την έννοια της μεταβολής των καιρικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή, των ενδεχόμενων διαφορετικών θέσεων των γεωτρήσεων άντλησης, αλλά και των αναγκών σε γλυκό νερό από τις γειτονικές περιοχές. Ως συνέπεια αυτού, προκύπτουν ιδιαίτερα σημαντικά συμπεράσματα τόσο για την αξιοπιστία της εφαρμοζόμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης, όσο και για την ίδια τη διαχείριση των αντλήσεων γλυκού νερού στο εσωτερικό του συγκεκριμένου υδροφορέα.
- Στη συνέχεια, ως επόμενο βήμα επεκτείνουμε την εφαρμογή του αλγορίθμου μεγιστοποίησης αντλήσεων σε υδροφορείς που δεν πληρούν τις συνθήκες της ορθογώνιας γεωμετρίας ή της ομοιογένειας των υδραυλικών χαρακτηριστικών στο εσωτερικό τους. Πρόκειται για ρεαλιστικούς υδροφορείς, όπου ως χαρακτηριστικό παράδειγμα επιλέγουμε την περίπτωση του παράκτιου υδροφορέα γλυκού νερού στο Δήμο Χερσονήσου στο Ηράκλειο Κρήτης. Στο σημείο αυτό, η διαδικασία ασφαλούς διαχείρισης των αντλήσεων στο εσωτερικό του είναι προϊόν συνδυασμού του αλγορίθμου στοχαστικής βελτιστοποίησης *ALOPEX*, πλαισιωμένου φυσικά με το απαραίτητο πλήθος κυρώσεων ελέγχου που αναφέραμε και προηγουμένως, με έναν υβριδικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων

και πεπερασμένων διαφορών γνωστό ως *Princeton Transport Code* (P.T.C.). Μέσω του συνδυασμού αυτού καθίσταται δυνατή η εκτίμηση της θέσεως του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό του υδροφορέα, υπό την ισχύ πάντοτε συγκεκριμένων καιρικών συνθηκών αλλά και τιμών άντλησης από τις γεωτρήσεις του υδροφορέα. Έτσι, επιτυγχάνουμε την αποτελεσματική διαχείρισή του, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα την προστασία του από το καταστρεπτικό φαινόμενο της υφαλμύρισης.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διερευνώνται σενάρια άντλήσεων σε εξιδανικευμένους αλλά και σε ρεαλιστικούς παράκτιους υδροφορείς γλυκού νερού. Στόχος μας είναι η συνεισφορά στη διεθνή προσπάθεια ασφαλούς διαχείρισης των αντλήσεων σε παράκτιους υδροφορείς ανά τον κόσμο, με ουσιαστική συνέπεια τη βελτίωση της καθημερινής ποιότητας της ζωής μας.

Abstract

The phenomenon of saltwater intrusion in freshwater aquifers is a crucial problem, occurring mainly in coastal areas, with particular growth trends in recent years. This phenomenon represents the set of actions through which the water quality is degraded within an aquifer, thus it becomes not useful for any human activity.

The chemical composition of the water within an aquifer is affected both by the action of various destructive natural phenomena, such as for example earthquakes and floods, as well as by human activity in the region. Normally an aquifer system is in a state of dynamic long term equilibrium. That is, at any given time, the total volume of water entering the system equals the volume of water that comes out of it, of course with slight volume fluctuations. Thus, the total volume of fresh water in the interior remains almost constant. This balance is interrupted violently after human intervention in the form of pumping water for water supply and irrigation of adjacent areas. It is also clear that the saltwater intrusion phenomenon intensifies during the summer months, when demand for freshwater is increasing both because of increased tourism needs and the stronger crop irrigation needs.

The management of fresh water pumping is therefore absolutely essential, in order to maintain water quality within the aquifer and thus avoid all the adverse economic consequences. The interest of the scientific community on this issue remains undiminished for more than a century, and particularly in recent years research on the optimization of the overall plan of pumping in coastal areas has intensified. This research effort is precisely the aim of the present work, in order to contribute to the pumping control process of the aquifer, presenting a mathematical algorithm for effective risk management.

The flow of water within an aquifer is a complex process, where more than one phases of water (sweet and salty at different stages) coexist, with hydraulic parameters presenting large spatial variability. Also, various factors such as the difficulty and uncertainty

in establishing reliable estimates of the parameters of the problem and the relevant computational cost, have led the scientific community in some necessary simplifications of the flow model. These model simplifications, under certain conditions, can provide us with a realistic, and simultaneously, satisfactory approach of the saltwater intrusion phenomenon within an aquifer. We thus have the opportunity to build a simulation model of the hydraulic behavior of a coastal aquifer and therefore a corresponding mathematical algorithm of effective pumping management.

The application of stochastic optimization algorithm, combined with a number of necessary control sanctions, is via a two-step methodology, described as follows:

- Initially, in order to investigate the conduct and the computational efficiency of the whole optimization process, we apply *the stochastic optimization algorithm AL.O.P.EX.* in a test-case coastal freshwater aquifer. This aquifer, presenting some special features like rectangular geometry and homogeneity of the hydraulic characteristics, is simulating the real-case aquifer of Vathi area at the Greek island of Kalymnos. This *idealized* aquifer is known in the literature from previous research, where it was also used as an aquifer testing model for pumping management processes. So, in this work, we investigate the fresh water pumping procedure through different pumping scenarios, where variable weather conditions and active well locations are considered, in combination with the fresh water needs of the neighboring regions. As a consequence, a number of important conclusions arising both for the reliability of the applied optimization process and for the actual management of fresh water pumping inside the aquifer.
- Then, as the logical next step, we expand the application of the optimization algorithm tuned in the previous section, in coastal aquifers that do not meet the ideal conditions of the rectangular geometry or the homogeneity of the hydraulic characteristics within them. These are real-case aquifers, where as an example we choose to investigate the case of the coastal freshwater aquifer in the Municipality of Hersonissos in the Greek island of Crete. At this point, the process of safe pumping management inside the aquifer is achieved through a combination of the stochastic

optimization algorithm ALOPEX, framed of course with the essential control functions mentioned above, and a hybrid finite element and finite difference algorithm known as Princeton Transport Code (PTC). Through this combination it becomes possible to estimate the position of saltwater front inside the aquifer, under specific weather conditions, fresh water recharging conditions and pumping values for the active wells of the aquifer. Thus, we achieve an effective pumping management, while ensuring protection from the damaging effect of saltwater intrusion.

As part of this work pumping scenarios investigated in idealized and realistic coastal freshwater aquifers. Our goal is to contribute to the international effort of creating a secure management pumping plan in coastal aquifers around the world, with significant positive impact in quality of human daily life.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η διείσδυση αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς αποτελεί ιδιαίτερα κατά το τελευταίο χρονικό διάστημα αντικείμενο μιας εντατικής ερευνητικής προσπάθειας, μιας και η ανάγκη αυξημένης ζήτησης σε νερό για άρδευση και για ύδρευση έχει ενισχύσει αισθητά το ενδιαφέρον για την επίλυση αυτού του προβλήματος. Η ορθή πρόβλεψη των αλλαγών στην αλμυρότητα των υδροφορέων και των πηγών προέλευσής τους κρίνεται ως απαραίτητη για τη διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής.

Οι παράκτιες περιοχές φιλοξενούν συνήθως ένα σημαντικό αριθμό πηγών ρύπανσης, που η εκδήλωσή τους συνδέεται τόσο με διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, κυρίως αγροτικές και αστικές, όσο και με την παρουσία φυσικών πηγών ρύπανσης. Για την κατανόηση της αλληλεξάρτησης μεταξύ ενός υφαλμυρισμένου υπόγειου υδροφορέα και της εντατικοποίησης της εκμετάλλευσής του απαιτείται ολοκληρωμένη γνώση του συνόλου του συστήματος, δηλαδή του συνόλου των τοπικών υδρογεωλογικών συνθηκών. Η ορθή γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής όπου εντοπίζεται το πρόβλημα της υφαλμύρισης εξασφαλίζει την αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των στοιχείων της υδροχημικής ανάλυσης του υδροφορέα, αποφεύγοντας εσφαλμένα συμπεράσματα σχετικά με την προέλευση του προβλήματος (Ι. Διαμαντής, Χ. Πεταλάς και Φ. Πλιάκας [58]).

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία συναντάται ένας τεράστιος όγκος μελετών σε υδροφορείς που υπόκεινται σε διάφορα στάδια υφαλμύρισης. Οι μελέτες αυτές πέραν από τη διαπίστωση του ίδιου του προβλήματος, προτείνουν και αντίστοιχες μεθοδολογίες αντιμετώπισής του. Πρόκειται για μεθοδολογίες που προσεγγίζουν την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου είτε από τη σκοπιά της Χημείας είτε από τη σκοπιά των Μαθηματικών είτε είναι συνδυασμοί και των δύο αυτών προσεγγίσεων.

1.1 Υδροφόρο σύστημα

Ο όρος *υδροφόρο σύστημα* αναφέρεται σε μια περιοχή περικλειόμενη από όρια, τα οποία συνιστούν εμπόδιο σε κάθε μετάδοση υδραυλικής επίδρασης, και της οποίας όλα τα τμήματα βρίσκονται σε συνεχή υδραυλική διασύνδεση. Τα όρια αυτά μπορούν να είναι είτε αδιαπέρατα με επιβαλλόμενο σταθερό υδραυλικό δυναμικό, δηλαδή αδιαπέρατα στρώματα, είτε θαλάσσιες και λιμναίες ακτές.

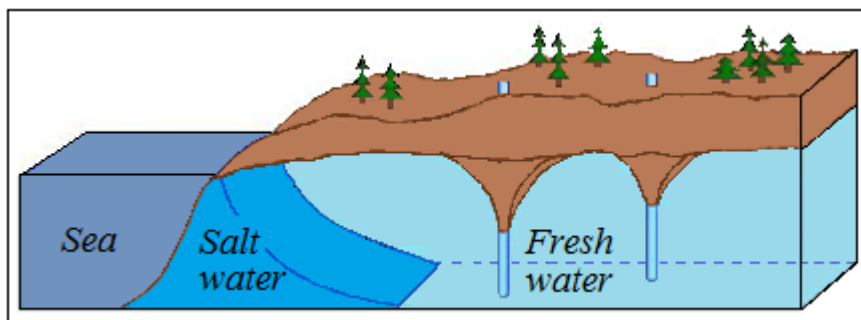
Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό, κάθε ενέργεια-δράση (υποχώρηση ή άνοδος στάθμης, άντληση, τροφοδοσία κλπ.) σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος και αν συμβεί, επιδρά μόνο εντός των ορίων αυτού. Πρόκειται δηλαδή για μια ανεξάρτητη υδρολογικά περιοχή, που μπορεί να υποστεί μεταβολές μόνο μετά από ανθρώπινη επέμβαση. Σε μη καρστικές περιοχές το υδροφόρο σύστημα συμπίπτει με την λεκάνη απορροής (ή αλλιώς υδρολογική λεκάνη), ενώ σε καρστικές περιοχές και γενικά σε περιοχές με περατούς σχηματισμούς που έχουν επιφανειακή εμφάνιση και μεγάλο πάχος, οι συνθήκες γίνονται περίπλοκες (Γ.Κ. Σούλιος [71]).

1.2 Το φαινόμενο της υφαλμύρισης

Η εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειων υδροφόρων συστημάτων είναι άμεσα συνδεδεμένη με το φαινόμενο της υφαλμύρισης που συχνά συναντάμε σε αυτούς.

Με τον όρο *υφαλμύριση* ενός υπόγειου υδροφορέα αναφερόμαστε στη διείσδυση του αλμυρού νερού στο γλυκό, με ταυτόχρονη αύξηση της αλατότητας σε δεδομένη τοποθεσία και βάθος (Σχήμα 1.1). Η ύπαρξη υφάλμυρου νερού παρατηρείται τόσο σε ελεύθερους όσο και σε περιορισμένους παράκτιους υδροφορείς, δημιουργώντας προβλήματα στην ποιότητα του υπόγειου νερού που χρησιμοποιείται για κάθε είδους ανάγκη. Ακόμη και ελάχιστες ποσότητες θαλασσινού νερού μπορούν να προκαλέσουν την ποιοτική υποβάθμιση των πολύτιμων υδροφόρων στρωμάτων και τη μείωση των ποσοτήτων των φρέσκων υδάτων. Το φαινόμενο αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί αναστρέψιμο, με συνέπεια η αντιμετώπισή του να συνδέεται πρακτικά με τις διαδικασίες της πρόβλεψης και ορθής διαχείρισης.

Η εισροή αλμυρού νερού στο γλυκό απασχολεί την επιστημονική κοινότητα εδώ και



Σχήμα 1.1: Διατομή υπό γωνία παράκτιου υδροφορέα γλυκού νερού. Είσοδος υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα (φαινόμενο υφαλμύρισης).

αρκετά χρόνια, με αποτέλεσμα να έχει παρουσιαστεί ένα πλήθος διαφορετικών μοντέλων για την ποιοτική και ποσοτική ερμηνεία των ζωνών ανάμειξης αλμυρού και γλυκού νερού. Επί παραδείγματι αναφέρουμε σχετικές εργασίες των M.K. Hubbert [24], N.J. Luszczynski [35], R.E. Glover [17], Jr.H.H. Cooper [10] και O.D.L. Strack [45, 46]. Όσον αφορά τη μελέτη του φαινομένου από νεότερους ερευνητές, πάλι επιλεκτικά, αναφέρουμε τις εργασίες των A.H.-D. Cheng και D. Ouazar [8, 9], K. Katsifarakis [27], A. Mantoglou and M. Papantoniou [37] και άλλων.

Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό, ότι όπως αναφέραμε προηγουμένως ο όρος *υφαλμύριση* περιγράφει τη διαδικασία ή την κατάσταση μετατροπής του γλυκού νερού σε υφάλμυρο. Προέρχεται από την πρόθεση *υπό* και το ρήμα *αλμυρίζω*. Το ρήμα *αλμυρίζω* είναι αρχαιοελληνικό (κατά το λεξικό του Χ. Πάτση, 1969), απαντά στον Αριστοτέλη, ενώ χρησιμοποιείται και σήμερα. Ρήματα *αλμυρώνω* ή *αλμυρύνω*, που θα δικαιολογούσαν τους διαδεδομένους τύπους *υφαλμύρωση* και *υφαλμύρυνση* δεν υπάρχουν ούτε στην αρχαία ούτε στη νέα ελληνική.

1.2.1 Αιτίες δημιουργίας του φαινομένου

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης συναντάται συνήθως σε παράκτιες περιοχές όπου η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων προκαλεί τη διείσδυση του θαλασσινού νερού μέσα στους υπόγειους υδροφορείς.

Σε ρηχούς υδροφορείς στην ενδοχώρα η υφαλμύριση παρουσιάζεται κυρίως από εκκενώσεις αποβλήτων στην επιφάνεια, ενώ στους παράκτιους προκαλείται από την εισβολή θαλασσινού ύδατος.

Σε βαθείς υδροφορείς, μπορεί να προκληθεί από την άνοδο των αλμυρών υδάτων διαμέσου μιας γεωλογικής προέλευσης σε μεγαλύτερο βάθος, όπως για παράδειγμα διαμέσου ανθρακικών πετρωμάτων. Μπορεί επίσης να προκληθεί και από κανάλια που καταλήγουν στον πυθμένα της θάλασσας, έστω και μακριά από την ακτή.

Σε αρκετές περιπτώσεις το φαινόμενο της υφαλμύρισης οφείλεται σε ανθρώπινη επέμβαση. Ωστόσο, ορισμένες φορές το φαινόμενο αυτό δύναται να έχει και θετική επίδραση, όπως παραδείγματος χάρη σε άνυδρες περιοχές, όπου μιας τέτοιας μορφής νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στις βιομηχανικές διαδικασίες της ψύξης και αφαλάτωσης (Γ. Καλλιάνης και Κ. Χατζηθεοχάρους [65]).

Γενικά, το υφάλμυρο νερό που παρατηρείται σε υδροφορείς μπορεί να προέρχεται από τις ακόλουθες πηγές (Η. Μαριολάκος [69]):

- θαλασσινό νερό στις περιπτώσεις παράκτιων υδροφορέων,
- αλάτι προερχόμενο από τη διάλυση διάφορων γεωλογικών σχηματισμών,
- νερό επαναφοράς από αρδευόμενη γη σε χειμάρρους,
- υπολείμματα εξάτμισης νερού σε παλιρροϊκές λίμνες,
- απόβλητα βιομηχανιών ή λύματα υψηλής αλατότητας ανθρώπινης προέλευσης και
- ανύψωση της στάθμης της θάλασσας ή καθοδικές κινήσεις ξηράς.

1.2.2 Είδη υφαλμύρισης

Η φυσική ισορροπία των παράκτιων υδροφορέων μπορεί να ανατραπεί όταν η ροή του γλυκού νερού μειώνεται εξαιτίας των υπεραντλήσεων ή της μείωσης στη διαδικασία του φυσικού εμπλουτισμού τους. Έτσι, η διείσδυση του αλμυρού νερού μπορεί να χαρακτηριστεί ως:

- **παθητική**, αν με οποιοδήποτε τρόπο αλλάζουν οι ποσότητες νερού που φυσικά τροφοδοτούν τα υπόγεια στρώματα (μεταβολή του φυσικού εμπλουτισμού του υδροφορέα). Συνέπεια των αλλαγών αυτών είναι η μετατόπιση της διεπιφάνειας υφάλμυρου νερού προς την ενδοχώρα, κυρίως λόγω διακυμάνσεων ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, κλιματικών αλλαγών ή μετατόπισης του επιπέδου της θάλασσας.
- **ενεργητική**, όταν προκύπτει μετά από τεχνητή παρέμβαση στις διακινούμενες ποσότητες νερού (περίπτωση υπεραντλήσεων). Η σημειακή εξαγωγή υπόγειου νερού, δηλαδή η διαδικασία της άντλησης, δημιουργεί ένα βαθύ *κώνο κατάπτωσης* του εδάφους (cone of depression), αλλάζοντας έτσι την υδραυλική κλίση καθώς η ζώνη του ορίου μετακινείται προς την ενδοχώρα. Η μετακίνηση αυτή θα σταματήσει μόνο όταν φτάσει το χαμηλότερο σημείο της υδραυλικής κλίσης στο κέντρο της άντλησης. Προκαλείται έτσι μια ανάστροφη ροή των υπόγειων υδάτων με αποτέλεσμα τη διείσδυση θαλασσινού νερού στην περιοχή ενεργούς άντλησης (Ι. Διαμαντής, Χ. Πεταλάς και Φ. Πλιάκας [58]).

1.2.3 Επιπτώσεις της υφαλμύρισης

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης συνοδεύεται από ιδιαίτερα αρνητικές συνέπειες για τις ευρύτερες περιοχές υδροφορέων όπου εμφανίζεται. Οι πιο προφανείς από αυτές είναι οι ακόλουθες:

- προβλήματα στην ποιότητα του αντλούμενου νερού εξαιτίας της ανάμιξης γλυκού και αλμυρού νερού,
- πτώση της στάθμης του γλυκού νερού στις πληγείσες περιοχές,
- επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα της ευρύτερης περιοχής,
- υποβάθμιση της ποιότητας των εδαφών, παραδείγματος χάρη εμφάνιση του φαινομένου της αλάτωσης,
- αύξηση του κινδύνου του φαινομένου ερημοποίησης σε γειτονικές περιοχές,
- δυσχέρεια στην εκμετάλλευση των κοντινών πηγαδιών προς άρδευση και ύδρευση,

- και φυσικά ως συνδυασμός όλων των παραπάνω, ιδιαίτερα αρνητικές επιπτώσεις στην τοπική οικονομία.

1.2.4 Το φαινόμενο της αλάτωσης

Ένα χαρακτηριστικό φαινόμενο που παρουσιάζεται ως συνέπεια της διαδικασίας των υπερβολικών αντλήσεων στην περιοχή ενός υδροφορέα είναι το φαινόμενο της αλάτωσης. Ο όρος *αλάτωση* χρησιμοποιείται για να περιγράψουμε τη διαδικασία συσσώρευσης αλάτων στο έδαφος, μέσω του μηχανισμού της εξάτμισοδιαπνοής. Κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου η υγρασία της ανώτερης εδαφικής ζώνης, η οποία αποτελείται από λεπτόκοκκο υλικό, παρασύρει το αλάτι που δεν αποπλένεται επαρκώς κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου (Γ. Καλλιάνης και Κ. Χατζηθεοχάρους [65]). Με την πάροδο των χρόνων το άλας συσσωρεύεται με διάφορους ρυθμούς που εξαρτώνται από το έδαφος και το κλίμα, προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο υποβάθμιση του εδάφους. Η συσσώρευση άλατος στα υψηλότερα τμήματα του εδάφους μπορεί να παρατηρηθεί σε ξηρές, αλλά και ημίξηρες περιοχές, όπου τα διαλυτά άλατα κατακρανίζονται μέσα στο έδαφος ή στην επιφάνειά του. Κατά βάση, η αλάτωση συμβαίνει εκεί όπου η ισορροπία μεταξύ των βροχοπτώσεων, της άρδευσης και της εξάτμισης τείνει προς την εξάτμιση, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους και της στάθμης των υπόγειων υδάτων.

Η αύξηση των επιπέδων των αλάτων στις ανώτερες εδαφικές στρώσεις της επιφάνειας μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών και την παραγωγικότητα, σε σημείο που να οδηγήσει στην καταστροφή των φυτών. Οι υψηλές συγκεντρώσεις διαφόρων αλάτων (π.χ. χλωριούχου νατρίου, θειικού μαγνησίου και διττανθρακικών αλάτων) επηρεάζουν την ανάπτυξη των φυτών άμεσα με την τοξικότητά τους αλλά και έμμεσα, αυξάνοντας το δυναμικό της όσμωσης και μειώνοντας την απορρόφηση του νερού από την ρίζα. Η συσσώρευση αλάτων στο έδαφος είναι το τελικό προϊόν διαφορετικών διεργασιών. Έτσι, ο όρος αλάτωση μπορεί να περικλείει διαφορετικές διεργασίες, που υποκινούνται από διαφορετικά αίτια, αλλά που να επιφέρουν το ίδιο αποτέλεσμα. Η αλάτωση λόγω υφαλμύρισης κατηγοριοποιείται ως δευτερογενής, όπου οι ανθρώπινες δραστηριότητες παίζουν βασικό ρόλο.

Η αύξηση των αλάτων στα υπόγεια νερά επηρεάζει την παραγωγικότητα των αρδευόμενων

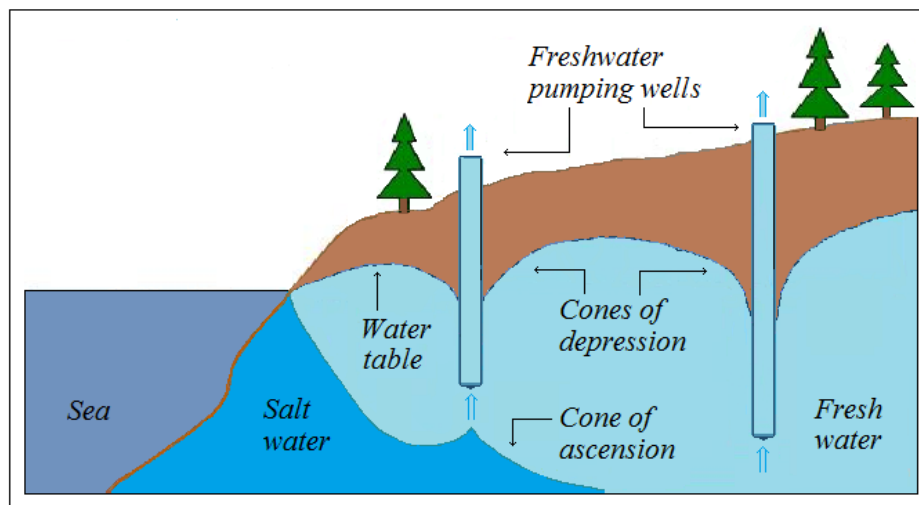
καλλιεργειών, συμβάλλοντας έτσι στη δευτερογενή αλάτωση του εδάφους. Ωστόσο, ανάλογα με τις μεθόδους άρδευσης και τις συνθήκες ξηρασίας, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιείται για χρόνια από τους αγρότες νερό πλούσιο σε άλατα αλλά να μην επέλθει αλάτωση στις αντίστοιχες περιοχές, ενώ μπορεί να αναφερθεί μέτρια αλάτωση σε περιοχές που αρδεύονται με καλής ποιότητας νερό. Φαίνεται δηλαδή ξεκάθαρα ότι μια διαφορετική ιδιαίτερη ισορροπία μεταξύ των διαφορετικών παραγόντων επηρεάζει τη διεργασία αλάτωσης.

Σύμφωνα με τα σημερινά σενάρια των κλιματικών μεταβολών, η αναμενόμενη αύξηση της θερμοκρασίας και η άνοδος της στάθμης της θάλασσας ενδέχεται να συμβάλουν στην περαιτέρω ανάπτυξη της αλάτωσης. Υπολογίζεται πως το φαινόμενο αυτό δύναται στο μέλλον να επεκταθεί και σε άλλες παράκτιες περιοχές στην περίπτωση που το πρόβλημα της διείσδυσης υφάλμυρου νερού δεν αντιμετωπιστεί κατάλληλα, αφού ο όγκος του βρόχινου νερού κατά την περίοδο των βροχοπτώσεων δεν είναι ικανός να διαλύσει και να παρασύρει ικανοποιητική ποσότητα άλατος που βρίσκεται συσσωρευμένη στα ανώτερα στρώματα του υπεδάφους.

1.2.5 Κινητική της υφαλμύρισης

Σύμφωνα με το επικρατέστερο μοντέλο, κάτω από δυναμικές συνθήκες το θαλασσινό νερό δεν είναι στατικό αλλά ρέει αδιάκοπα από τη θάλασσα προς το εσωτερικό του υδροφορέα και αντίστροφα. Δημιουργείται έτσι μια ενδιάμεσης αλμυρότητας ζώνη (διεπιφάνεια ή ζώνη διάχυσης) μεταξύ του γλυκού νερού του υδροφορέα και του θαλασσινού νερού. Στην ζώνη αυτή υπάρχει πλήρης διαβάθμιση της αλμυρότητας από εκείνη του γλυκού νερού σε αυτή του θαλασσινού (Jr.H.H. Cooper [10]).

Στη ζώνη διάχυσης θαλασσινό και γλυκό νερό αναμιγνύονται. Μία ποσότητα του αραιωμένου θαλασσινού νερού καθώς γίνεται αραιότερο μετατοπίζεται προς το εσωτερικό του υδροφορέα, ενώ μια άλλη ποσότητά του επιστρέφει στη θάλασσα, μειώνοντας έτσι τον όγκο των αλάτων που είχαν εισέλθει στην περιοχή του γλυκού νερού. Αιτία δημιουργίας της ζώνης αυτής είναι η κίνηση του μετώπου του αλμυρού νερού, οφειλόμενη σε παλιρροϊκά φαινόμενα σε συνδυασμό με τη διακύμανση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Όταν ένας υδροφορέας περιέχει ένα υποκείμενο στρώμα αλμυρού νερού και αντλείται από υδρογεώτρηση που εισχωρεί μόνο στο ανώτερο μέρος του που περιέχει γλυκό νερό, τότε παρατηρείται μία τοπική



Σχήμα 1.2: Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Κώνοι κατάπτωσης και ανύψωσης κατά τη διάρκεια αντλήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

ανύψωση της διεπιφάνειας κάτω από την υδρογεώτρηση με την μορφή ενός ανεστραμμένου κώνου κατάπτωσης, δηλαδή ενός κώνου ανύψωσης της διεπιφάνειας (cone of ascension). Έτσι, ενώ η διεπιφάνεια τη στιγμή έναρξης της άντλησης είναι σχεδόν οριζόντια, με τη συνεχιζόμενη άντληση ανεβαίνει σε διαδοχικά υψηλότερα επίπεδα, δημιουργώντας έναν κώνο ανύψωσης και κινδυνεύοντας να φτάσει στην υδρογεώτρηση (Σχήμα 1.2). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να διακοπεί η άντληση, ώστε το βαρύτερο αλμυρό νερό να επιστρέψει στην αρχική του θέση.

Σημειώνουμε ότι μια αναλυτική περιγραφή της κινητικής του φαινομένου της υφαλμύρισης παρουσιάζεται στην ενότητα 6.2.3, χρησιμοποιώντας την έννοια του δυναμικού ροής στο εσωτερικό ενός υδροφορέα, έννοια που θα ορίσουμε στη συνέχεια.

1.2.6 Πολυπλοκότητα του προβλήματος

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης φαίνεται να είναι αρκετά περίπλοκο. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους (Α. Μαντόγλου και Π. Γιαννουλόπουλος [68]), οι βασικότεροι των οποίων είναι οι ακόλουθοι:

- Στο εσωτερικό του υδροφορέα συνυπάρχουν δύο φάσεις ρευστών και μια ενδιάμεση

ζώνη ανάμειξης μεταξύ των φάσεων αυτών.

- Η κίνηση και η διασπορά του ενός ρευστού στο άλλο εξαρτάται από την πυκνότητα των ρευστών στη ζώνη υφαλμύρισης, η θέση της οποίας μεταβάλλεται συναρτήσει του χώρου και του χρόνου και εξαρτάται από τις συνθήκες ροής.
- Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι μη γραμμικές και απαιτούν δαπανηρές αριθμητικές μεθόδους με διαδοχικές προσεγγίσεις και αρκετές επαναλήψεις.
- Η ανομοιογένεια των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα περιπλέκει την περιγραφή του φυσικού φαινομένου.
- Η ανάμιξη γλυκού και αλμυρού νερού σε καρστικούς υδροφορείς είναι διαφορετικής φύσης από αυτήν σε ομοιογενείς και ισότροπους πορώδεις υδροφορείς.

1.2.7 Τρόποι αντιμετώπισης

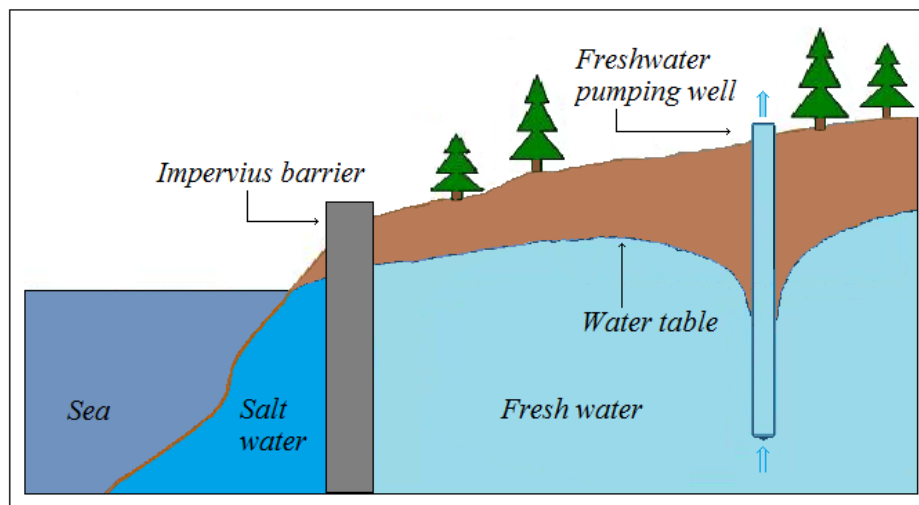
Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η αναχαίτιση της υφαλμύρισης είναι αρκετά χρονοβόρα και δαπανηρή, ενώ σε πολλές περιπτώσεις αδύνατη. Στις περιπτώσεις που το φαινόμενο βρίσκεται ακόμη στην αρχή, έχουν βρεθεί κάποιες τεχνικές που μπορούν να συμβάλλουν σημαντικά στον περιορισμό της διείσδυσης αλμυρού νερού μέσα σε γλυκό. Οι τεχνικές αυτές ποικίλλουν ανάλογα με την έκταση της μόλυνσης, τη γεωλογία της περιοχής και τη χρήση του νερού, ενώ θα λέγαμε ότι διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Δημιουργία υπόγειου φράγματος.

Κατασκευάζοντας ένα στεγανό διάφραγμα, παράλληλο προς την ακτή και σε όλο το πάχος του υδροφορέα, μπορεί να περιοριστεί η διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Ωστόσο, η τεχνική αυτή μειονεκτεί καθώς τα διαφράγματα είναι ευπαθή σε σεισμούς και χημικές διαβρώσεις, ενώ ταυτόχρονα είναι αρκετά δαπανηρά (Σχήμα 1.3).

- Φράγμα από άντληση υφάλμυρου νερού κοντά στην ακτή.

Η συνεχής άντληση από μια σειρά υφαλμυρισμένων γεωτρήσεων σε επιλεγμένες θέσεις



Σχήμα 1.3: Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Περιορισμός του φαινομένου της υφαλμύρισης με χρήση υπόγειου αδιαπέρατου φράγματος κοντά στην ακτή.

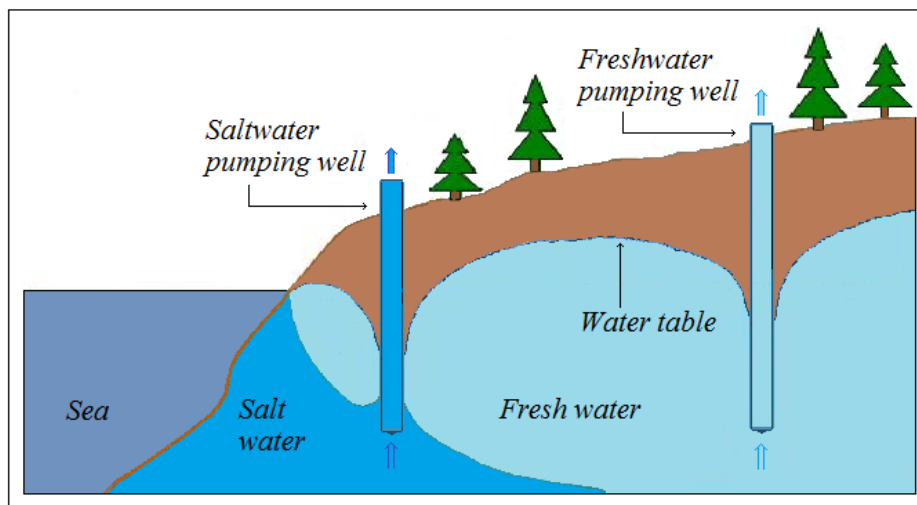
κοντά στη θάλασσα, δημιουργεί ροή του υφάλμυρου νερού που βρίσκεται στο εσωτερικό του υδροφορέα προς τη συστοιχία αυτών των γεωτρήσεων. Δημιουργείται έτσι μια διαδικασία αποσυμφόρησης του υφάλμυρου νερού εντός του υδροφορέα (Σχήμα 1.4).

- Φράγμα από τεχνητό εμπλουτισμό.

Με τη χρήση νερού υψηλής ποιότητας (παραδείγματος χάρη νερό αστικών λυμάτων μετά από τριτοβάθμια επεξεργασία) δημιουργείται ένα υδάτινο στρώμα υψηλής πιεζομετρικής στάθμης, κατά μήκος μιας συστοιχίας γεωτρήσεων εμπλουτισμού, που βρίσκεται κοντά και παράλληλα στην ακτή. Το νερό που διαβιβάζεται στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού ρέει προς τη θάλασσα και προς το εσωτερικό της λεκάνης, αυξάνοντας το υδραυλικό ύψος και σπρώχνοντας το μέτωπο της υφαλμύρισης προς τη θάλασσα (Σχήμα 1.5).

- Βελτιστοποίηση του γενικού σχεδίου άντλησης.

Με κατάλληλη μαθηματική μοντελοποίηση μπορούν να προβλεφθούν οι ενδεικνυόμενες θέσεις γεωτρήσεων (είτε για κατασκευή νέων πηγαδιών είτε για μετακίνηση παλαιότερων προβληματικών) αλλά και οι βέλτιστες αντλήσεις που θα αποτρέπουν τη διείσδυση αλμυρού νερού στο γλυκό. Η επιλογή της κατάλληλης κατά περίπτωση μαθηματικής



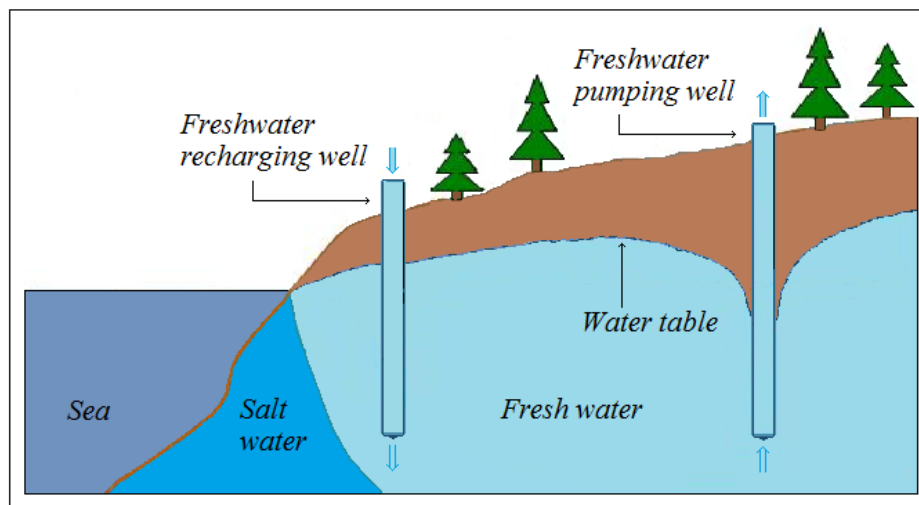
Σχήμα 1.4: Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Περιορισμός του φαινομένου της υφαλμύρισης μέσω αντλήσεων υφάλμυρου νερού από υφαλμυρισμένες περιοχές του υδροφορέα.

μεθόδου απαιτεί τη γνώση μιας σειράς παραμέτρων-χαρακτηριστικών του υδροφορέα. Ωστόσο, σημαντικό ρόλο παίζει στη διαδικασία αυτή ο τρόπος προσομοίωσης της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού (Μ. Δεττοράκη [57]), αντικείμενο το οποίο θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

1.3 Τρόποι προσομοίωσης της διεπιφάνειας

Με στόχο την επιλογή της κατάλληλης διαδικασίας μοντελοποίησης, μέσω της οποίας θα βελτιστοποιήσουμε το συνολικό πλάνο αντλήσεων του υδροφορέα, παρουσιάζουμε στο σημείο αυτό τις τρεις θεωρήσεις που συναντάμε στην βιβλιογραφία σχετικά με τη δομή της υφάλμυρης διεπιφάνειας, σύμφωνα με την Ελληνική Υδροτεχνική Ένωση (Ε.Υ.Ε. [59]). Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους και σταθερής πυκνότητας.
- Θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους και μεταβλητής πυκνότητας.
- Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας, εάν το πάχος αυτής είναι μικρό σε σχέση με το πάχος



Σχήμα 1.5: Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Περιορισμός του φαινομένου της υφαλμύρισης χρησιμοποιώντας γεωτρήσεις εμπλουτισμού σε γλυκό νερό στο εσωτερικό του υδροφορέα.

του υδροφορέα.

Εξετάζουμε στη συνέχεια αναλυτικά τις θεωρήσεις αυτές.

1.3.1 Διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους σταθερής πυκνότητας

Στη θεωρήση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους και σταθερής πυκνότητας (Σχήμα 1.6) η διεξόδυση αλμυρού νερού σε υπόγειους υδροφορείς αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Γίνονται λοιπόν οι ακόλουθες παραδοχές:

- Υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά με σταθερές τιμές πυκνότητας.
- Επιλύεται σαν πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση c , εξαρτώμενη από την πυκνότητα ρ (για κορεσμένη ροή).
- Άγνωστοι του προβλήματος στις διάφορες θέσεις \vec{r} του πεδίου ροής για διάφορους χρόνους t είναι η συγκέντρωση $c = c(\vec{r}, t)$, η ταχύτητα $V = V(\vec{r}, t)$, η πίεση $p = p(\vec{r}, t)$ και η πυκνότητα $\rho = \rho(\vec{r}, t)$.

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι:

- Η εξίσωση διατήρησης μάζας.
- Η εξίσωση υδροδυναμικής διασποράς.
- Οι εξισώσεις κίνησης σύμφωνα με το νόμο του Darcy.

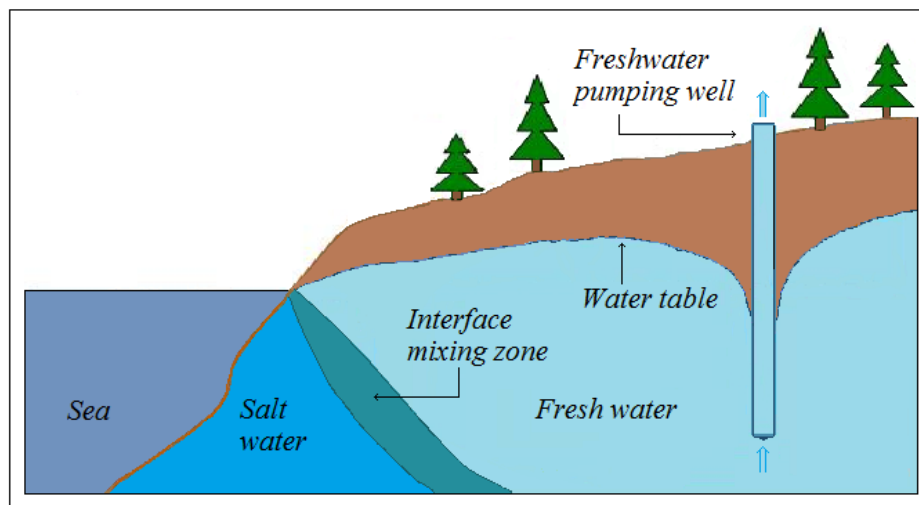
1.3.2 Διεπιφάνεια πεπερασμένου πάχους μεταβλητής πυκνότητας

Σύμφωνα με την προσέγγιση αυτή, το σύστημα γλυκού-θαλασσινού νερού προσδιορίζεται από ένα αναμίξιμο ρευστό που μεταφέρει ένα ρυπαντή (αλάτι), ο οποίος επηρεάζει την πυκνότητα και το ιζώδες του ρευστού, ενώ η ζώνη αλάτωσης έχει σημαντικό πάχος (Σχήμα 1.6). Η προσέγγιση αυτή, ενώ ομοίως με πριν στηρίζεται στο φαινόμενο μεταφοράς ρύπων, είναι σαφώς πιο ρεαλιστική σε σχέση με την προηγούμενη θεώρηση, διότι η ανάμειξη των δύο ρευστών, γλυκό και αλμυρό νερό, δημιουργεί ένα συνεχές πεδίο στο οποίο η συγκέντρωση του ρύπου (ιόντα χλωρίου) είναι πλέον μεταβλητή. Να σημειώσουμε επίσης ότι στην προσέγγιση αυτή απαιτείται η ταυτόχρονη επίλυση των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του νερού και των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του ρύπου με μεταφορά και διασπορά, διότι η πυκνότητα είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης (Γ. Κουράκος [66]).

Η πρώτη προσπάθεια να γίνει μια τέτοιου είδους μοντελοποίηση έγινε το 1964 από τον H.R. Henry [20], ενώ το 1990 οι R. Schincariol και F. Schwartz [50] έκαναν κάποια πειράματα με στόχο να ερευνήσουν την εξαρτώμενη από την πυκνότητα ροή σε ετερογενή πορώδη μέσα, αποδεικνύοντας την ευαισθησία της ροής στην υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα.

Η προσέγγιση αυτή απαιτεί τις εξής παραδοχές (W. Guo and C.D. Langevin [18]):

- Ισχύει η εξίσωση του Darcy.
- Είναι εφικτή η έκφραση της ειδικής αποθηκευτικότητας σε περιορισμένους υδροφορείς.
- Το φαινόμενο της διάχυσης μπορεί να προσεγγισθεί από τη μεταφορά ρύπων με διασπορά, βάση του νόμου του Fick.



Σχήμα 1.6: Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Θεώρηση υφάλμυρης διεπιφάνειας πεπερασμένου πλάτους.

- Η θερμοκρασία του νερού παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων.
- Το πορώδες μέσο θεωρείται πλήρως κορεσμένο.
- Το νερό θεωρείται πλήρως αναμίξιμο και πολύ μικρής συμπιεστότητας.

Υπό τις παραπάνω συνθήκες το φαινόμενο της υφαλμύρισης μπορεί να περιγραφεί διαμέσου της ταυτόχρονης επίλυσης των εξισώσεων που περιγράφουν την κίνηση του υπόγειου νερού μεταβλητής πυκνότητας και της μεταφοράς διαλυμένης μάζας μέσα στο πορώδες μέσο. Η περιγραφή της κίνησης αυτής με όρους ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου και πυκνότητας του υγρού παρουσιάζεται αναλυτικά από τον Γ. Κουράχο [66].

Το 2012 οι Ζ. Δόκου και Γ. Καρατζάς [12] χρησιμοποίησαν την προσέγγιση αυτή για να μοντελοποιήσουν το φαινόμενο της διείσδυσης αλμυρού νερού σε έναν καρστικό υδροφορέα, με το πρόγραμμα προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων FEFLOW σε 2 και 3 διαστάσεις. Το συγκεκριμένο μοντέλο απαιτεί την εισαγωγή του υδραυλικού ύψους του γλυκού νερού. Επομένως χρειάζεται να υπολογιστεί ένα ισοδύναμο υδραυλικό ύψος όταν εφαρμόζονται οριακές συνθήκες (σταθερές συνοριακές συνθήκες κατά μήκος του ορίου της ακτογραμμής)

και όταν συγκρίνονται τα αποτελέσματα του μοντέλου με τα δεδομένα πεδίου. Ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση, υποθέτοντας ότι η πυκνότητα του αλμυρού νερού μεταβάλλεται γραμμικά με το βάθος:

$$h_{eq} = (1 + \delta)h - \delta z, \quad (1.1)$$

όπου h_{eq} το ισοδύναμο ύψος γλυκού νερού, h το μετρούμενο ύψος, δ ο λόγος της διαφοράς πυκνοτήτων και z το υψόμετρο.

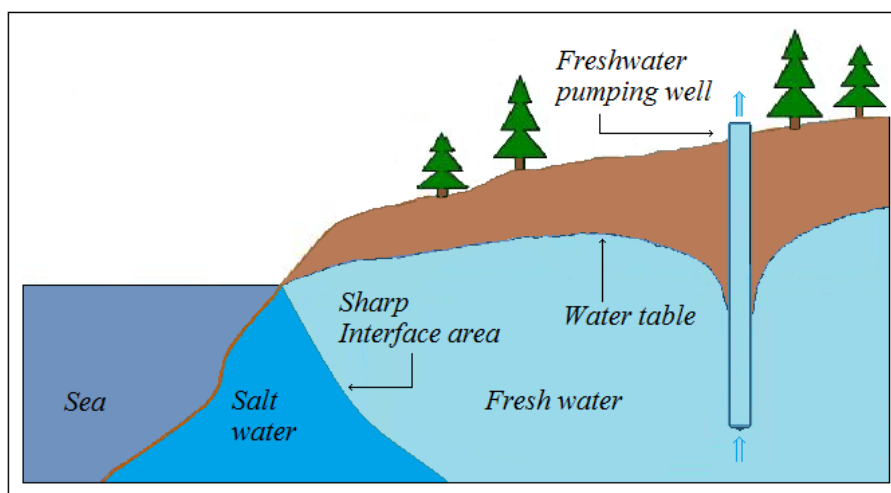
Για να υπολογιστεί ο λόγος της διαφοράς πυκνοτήτων για τα δεδομένα πεδίου, χρειάζεται η πυκνότητα του μείγματος γλυκού-αλμυρού νερού σε κάθε ενεργή γεώτρηση. Αν μετρηθεί η συγκέντρωση του χλωρίου για κάποια γεώτρηση, τότε αυτή η τιμή χρησιμοποιείται για να υπολογισθεί η πυκνότητα και έπειτα το ισοδύναμο υδραυλικό ύψος στη γεώτρηση αυτή. Εναλλακτικά χρησιμοποιούνται συγκεντρώσεις από γειτονικές γεωτρήσεις.

Σε τυπικά προβλήματα διείσδυσης αλμυρού νερού, οι συνοριακές συνθήκες γλυκού-αλμυρού νερού παίζουν σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο και πρέπει η διαχείρισή τους να είναι ιδιαίτερα προσεκτική. Δεδομένου ότι οι συγκεντρώσεις στο ανώτερο όριο της θάλασσας αλλάζουν δυναμικά (όταν το νερό εισχωρεί στο πεδίο έχει συγκέντρωση γλυκού νερού ενώ όταν απομακρύνεται από το πεδίο έχει άγνωστη συγκέντρωση, η οποία πρέπει να υπολογισθεί από το μοντέλο), χρησιμοποιούνται συνοριακές συνθήκες σταθερής συγκέντρωσης επιβάλλοντας ταυτόχρονα επιπρόσθετο περιορισμό ροής μηδενικής μάζας στο ίδιο όριο (H.-J.G. Diersch και O. Kolditz [11]). Αυτός ο περιορισμός έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης άλατος στα ανώτερα μέρη του υδροφορέα λόγω της μηδενικής διασποράς ροής κατά μήκος της ακτογραμμής (Γ. Κοψιάτης και Α. Μαντόγλου [31]).

Μερικές φορές, υψηλές συγκεντρώσεις χλωρίου δίπλα σε παράκτιες ζώνες μπορεί να μην είναι αποτέλεσμα της διείσδυσης αλμυρού νερού, αλλά να προέρχονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Για να χρησιμοποιηθούν οι σωστές συνοριακές συνθήκες μάζας είναι σημαντικό να μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ των δύο αυτών παραγόντων. Ένας τρόπος να γίνει αυτός ο διαχωρισμός είναι η χρήση ενός δείκτη, της αναλογίας Mg/Ca. Η αναλογία αυτή βοηθάει καθώς στο αλμυρό νερό το Mg^{2+} βρίσκεται σε περίσσεια έναντι του Ca^{2+} , ενώ το Ca^{2+} κυριαρχεί στο γλυκό νερό, όταν δεν έχει μολυνθεί από άλλες ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Ζ. Δόκου και Γ. Καρατζάς [12]).

1.3.3 Απότομη διεπιφάνεια

Η προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας (sharp interface approach) δέχεται ότι το φυσικό σύστημα αποτελείται από δύο εντελώς μη αναμίξιμα υγρά με διαφορετικές σταθερές πυκνότητες, γλυκό και αλατισμένο νερό (Σχήμα 1.7), τα οποία σχηματίζουν μια ζώνη ανάμιξης που περιορίζεται σε μια διασύνδεση με μικρό πεπερασμένο πλάτος (T. Reilly και A. Goodman [44]). Σε περίπτωση συνθηκών μη μόνιμης κατάστασης, σημαντικές ποσότητες θαλασσινού νερού κινούνται από ή προς τον υδροφορέα και η θέση της διεπιφάνειας εξαρτάται από τη δυναμική του γλυκού και του αλμυρού νερού. Αντίθετα, η προσέγγιση αυτή είναι πιο κατάλληλη όταν έχουμε συνθήκες μόνιμης κατάστασης (steady state conditions), όπου η διεπιφάνεια θεωρείται πρακτικά ως σταθερή και ακίνητη. Τότε δύναται να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση των *Ghyben-Herzberg*, σύμφωνα με την οποία το γλυκό νερό ρέει οριζόντια πάνω από το ακίνητο θαλασσινό νερό (Γ. Κουράκος [66]).



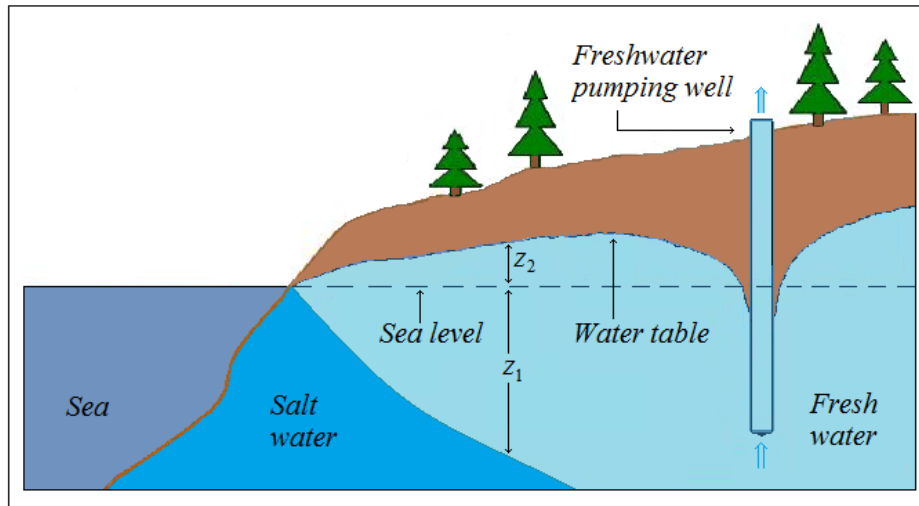
Σχήμα 1.7: Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Θεώρηση απότομης διεπιφάνειας.

1.4 Εξίσωση των Ghyben-Herzberg

Το 1888 ο W.B. Ghyben [16] και λίγο αργότερα το 1901 ο A. Herzberg [21] απέδειξαν ανεξάρτητα το γεγονός ότι η στάθμη του θαλασσινού νερού στο υπέδαφος δεν βρίσκεται

στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό, 40 περίπου φορές τη διαφορά στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η σχέση αυτή, γνωστή με το όνομα εξίσωση των *Ghyben-Herzberg* (εξίσωση 1.4), βασιζόμενη στο γεγονός της υδροστατικής ισορροπίας μεταξύ αλμυρού και γλυκού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα, κατασκευάζεται λαμβάνοντας υπόψη τις εξής παραδοχές:

- Η υφάλμυρη σφήνα παραμένει ακίνητη.
- Η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές, δηλαδή $p_s = p_f$.
- Ισχύει η παραδοχή του Dupuit.



Σχήμα 1.8: Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Εφαρμογή της εξίσωσης των Ghyben-Herzberg στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας.

Ορίζοντας ως z_2 το ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας και ως z_1 την απόσταση της υφάλμυρης διεπιφάνειας από αυτήν (Σχήμα 1.8), προκύπτει ότι:

$$z_1 = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} z_2. \quad (1.2)$$

Μάλιστα, για δεδομένες πυκνότητες αλμυρού και γλυκού νερού ίσες με $\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$ και $\rho_f = 1 \text{ g/cm}^3$ αντίστοιχα, βλέπουμε ότι:

$$\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = 0.025 \Rightarrow \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} = 40. \quad (1.3)$$

Έτσι, η τελική εξίσωση για τον υπολογισμό της θέσης του υφάλμυρου μετώπου είναι η ακόλουθη:

$$z_1 = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} z_2 = 40 z_2. \quad (1.4)$$

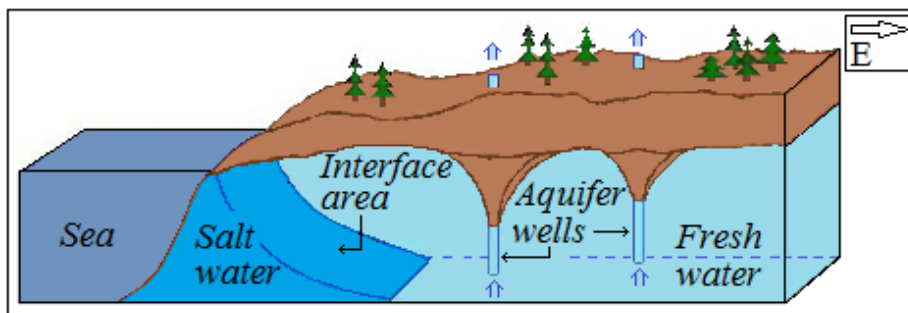
Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης της διεπιφάνειας μόνο από τη στάθμη του γλυκού νερού στα φρέατα παρατήρησης.

Κεφάλαιο 2

Μαθηματική μοντελοποίηση του φαινομένου

2.1 Υφαλμύριση παράκτιων υδροφορέων

Θεωρούμε τον υδροφορέα γλυκού νερού του Σχήματος 2.1. Πρόκειται για έναν παράκτιο υδροφορέα με τη θάλασσα να βρίσκεται στο δυτικό του άκρο, ενώ τα τρία άλλα σύνορά του (ανατολικό, βόρειο και νότιο) βρίσκονται στην ενδοχώρα, δεν βρίσκονται δηλαδή σε επαφή με τη θάλασσα. Το θαλασσινό νερό κινούμενο στην κατεύθυνση Δύση-Ανατολή εισέρχεται στο εσωτερικό του υδροφορέα, προκαλώντας το καταστρεπτικό φαινόμενο της υφαλμύρισης που παρουσιάσαμε προηγουμένως.



Σχήμα 2.1: Διατομή υπό γωνία παράκτιου υδροφορέα. Εισαγωγή της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του ως συνέπεια αντλήσεων γλυκού νερού.

Ο συγκεκριμένος τύπος υδροφορέα επιλέγουμε να αποτελεί μια εξιδανικευμένη περίπτωση, τόσο ως προς τη γεωμετρία του όσο και ως προς τα υδραυλικά χαρακτηριστικά στο εσωτερικό του. Πιο συγκεκριμένα, μελετάμε έναν παράκτιο υδροφορέα με σχήμα που προσεγγίζεται από ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο, στο εσωτερικό του οποίου οι τιμές των σχετικών

υδραυλικών παραμέτρων παραμένουν αμετάβλητες στο χώρο και στο χρόνο. Πρόκειται για έναν καρστικό, ελεύθερο, ομοιογενή και ισότροπο υδροφορέα, μέσω του οποίου μας δίνεται η δυνατότητα κατασκευής ενός μοντέλου περιγραφής και διαχείρισής του, το οποίο με τις κατάλληλες τροποποιήσεις δύναται να μας επιτρέψει την περιγραφή πιο σύνθετων γεωμετριών και κατά συνέπεια πιο ρεαλιστικών μοντέλων υδροφορέων.

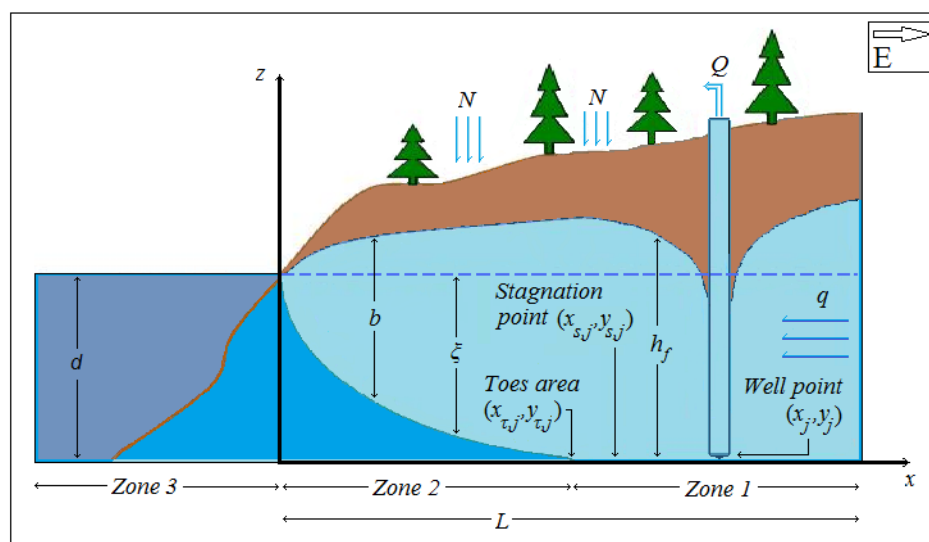
Παραθέτουμε στο σημείο αυτό συνοπτικά την ερμηνεία των εννοιών που χρησιμοποιήσαμε για να περιγράψουμε τον συγκεκριμένο υδροφορέα. Έτσι, ένας υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως:

- *καρστικός* (karstic aquifer), όταν στο εσωτερικό του συναντάμε καρστικά πετρώματα (όπως είναι παραδείγματος χάρη αυτά που περιέχουν ασβεστόλιθο, δολομίτη, γύψο, ανυδρίτες κ.α.), δηλαδή στερεά πετρώματα με κοιλότητες - φρεάτια προερχόμενες από χημική διάβρωση (International Association of Hydrogeologists [76]),
- *ελεύθερος* (unconfined aquifer), όταν το κατώτερο όριο του είναι ένα στεγανό στρώμα, ενώ η ανώτερη επιφάνεια του είναι ο υδροφόρος ορίζοντας (Α. Χατζάκης [74]),
- *ομοιογενής* (homogeneous aquifer), όταν έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του (Π. Κουτάντου [67]) και
- *ισότροπος*, όταν σε οποιοδήποτε σημείο του έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες προς όλες τις κατευθύνσεις (Π. Κουτάντου [67]).

Στο υπόλοιπο τμήμα της εργασίας αυτής οι παράκτιοι υδροφορείς τους οποίους μελετάμε θεωρούμε ότι διαθέτουν όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά, εκτός αν απαιτείται σε συγκεκριμένο σημείο κάποια διαφοροποίηση αυτών την οποία και θα δηλώνουμε κατηγορηματικά. Θα αναφερόμαστε λοιπόν σε αυτούς με το λακωνικό χαρακτηρισμό *παράκτιοι υδροφορείς*.

Από τη φυσική του φαινομένου συνάντησης δύο υγρών με διαφορετικές πυκνότητες, γνωρίζουμε ότι στο εσωτερικό του υδροφορέα δημιουργείται μια περιοχή ενδιάμεσης πυκνότητας σε αλάτι μεταξύ του γλυκού νερού του υδροφορέα και του θαλασσινού νερού. Η περιοχή αυτή, όπως απεικονίζεται και στο Σχήμα 2.1, βρίσκεται σε διαρκή κίνηση από και προς το εσωτερικό του υδροφορέα, διακινδυνεύοντας την υφαιμύριση των γεωτρήσεων του. Πιο

συγκεκριμένα, όταν η υφάλμυρη σφήνα προσεγγίζει ανεξέλεγκτα και σε ιδιαίτερα μικρή απόσταση τη θέση μιας γεώτρησης του υδροφορέα, υφάλμυρο νερό εισέρχεται στο εσωτερικό της, με συνέπεια να καθίσταται η ίδια πλέον μη-ωφέλιμη για χρήση. Οπότε, η διαρκής μελέτη και ο έλεγχος της θέσεώς της αποτελεί το βασικό στόχο της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 2.2: Κάθετη διατομή παράκτιου υδροφορέα. Γραφική απεικόνιση παραμέτρων μοντελοποίησης.

Στην περιοχή του παράκτιου υδροφορέα, όπως παρατηρούμε και στο Σχήμα 2.2, δημιουργούνται τρεις ζώνες ενδιαφέροντος:

- Η Ζώνη No 1 (Zone 1), η οποία αντιπροσωπεύει την ενδότερη περιοχή του υδροφορέα, όπου συναντάμε μονάχα γλυκό νερό. Αυτή είναι η περιοχή την οποία προσπαθούμε να προστατεύσουμε από το φαινόμενο της υφαλμύρισης.
- Η Ζώνη No 2 (Zone 2), όπου εκεί συναντάμε μια σφήνα υφάλμυρου νερού, μια ενδιάμεση κατάσταση δηλαδή μεταξύ του γλυκού νερού του υδροφορέα και του αλμυρού νερού της θάλασσας.
- Η Ζώνη No 3 (Zone 3), όπου βρίσκεται το δυτικό άκρο της υφάλμυρης σφήνας της Ζώνης 2 καθώς και η θάλασσα.

Ως (x_τ, y_τ) ορίζουμε τα σημεία της υφάλμυρης σφήνας που βρίσκονται σε επαφή με τον πυθμένα του υδροφορέα. Όταν στον υδροφορέα δεν πραγματοποιείται καμία άντληση τότε ο γεωμετρικός τύπος των σημείων αυτών είναι ένα ευθύγραμμο τμήμα παράλληλο με την θαλάσσια ακτογραμμή. Όταν όμως οι αντλήσεις στον υδροφορέα είναι ενεργές ο γεωμετρικός αυτός τύπος είναι ένα τεθλασμένο ευθύγραμμο τμήμα, με καμπύλωση εξαρτώμενη από τις τιμές των αντλήσεων των γεωτρήσεων του υδροφορέα αλλά και των θέσεών τους στο εσωτερικό του. Οι παράμετροι δε συνολικά, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της κίνησης του νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Παράμετροι περιγραφής παράκτιου υδροφορέα ορθογώνιας γεωμετρίας.

Παράμετροι	Περιγραφή
x, y, z	Άξονες Καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων
L	Μήκος υδροφορέα
W	Πλάτος υδροφορέα
d	Ύψος υδροφορέα από τον πυθμένα του μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας
$b = b(x, y)$	Απόσταση της υφάλμυρης σφήνας από την ελεύθερη επιφάνεια του γλυκού νερού
$\xi = \xi(x, y)$	Απόσταση της υφάλμυρης σφήνας από την επιφάνεια της θάλασσας
$h_f = h_f(x, y)$	Πιεζομετρική κεφαλή, με σημείο αναφοράς τον πυθμένα του υδροφορέα
M	Πλήθος ενεργών γεωτρήσεων στην περιοχή του υδροφορέα
(x_j, y_j)	Συντεταγμένες της j -οστής γεώτρησης του υδροφορέα
(x_τ, y_τ)	Συντεταγμένες των σημείων της Toes area
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$	Συντεταγμένες του σημείου της Toes area απέναντι από την j -οστή γεώτρηση
$(x_{s,j}, y_{s,j})$	Συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου απέναντι από την j -οστή γεώτρηση
Q_j	Ρυθμός άντλησης της j -οστής ενεργούς γεώτρησης του υδροφορέα
$Q = \sum_{j=1}^M Q_j$	Συνολικός ρυθμός άντλησης όλων των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα
$N = N(x, y)$	Επιφανειακή ανατροφοδότηση του υδροφορέα, μέσω του φαινομένου των βροχοπτώσεων
$K = K(x, y)$	Υδραυλική αγωγιμότητα του υπεδάφους στο εσωτερικό του υδροφορέα
$q = q(x, y)$	Οριζόντια εκροή νερού ανά μονάδα πλάτους του υδροφορέα.

Ιδιαίτερη αναφορά οφείλουμε στο σημείο αυτό να κάνουμε στην ύπαρξη των σημείων $(x_{s,j}, y_{s,j})$, για $j \in \{1, \dots, M\}$, που συναντάμε στον παραπάνω Πίνακα 2.1. Πρόκειται για τα κρίσιμα σημεία του δυναμικού ροής, μιας συνάρτησης υψίστης σημασίας για την ακολουθούμενη διαδικασία μοντελοποίησης, τον αναλυτικό ορισμό της οποίας παρουσιάζουμε στη συνέχεια στην ενότητα 2.3. Έτσι, υπό τη μορφή μονάχα ενός συνοπτικού προλόγου, θα

λέγαμε ότι τόσο ο προσδιορισμός των θέσεων των σημείων αυτών σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας, όσο και ο εφαρμοζόμενος αλγόριθμος αποτροπής της επαφής τους με το κινούμενο υφάλμυρο μέτωπο, αποτελεί δίχως υπερβολή το θεμελιώδη λίθο της διαδικασίας μοντελοποίησης και ταυτόχρονα ασφαλούς μεγιστοποίησης των αντλήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, που παρουσιάζουμε στην παρούσα Διατριβή.

2.2 Παραδοχές εφαρμογής του μοντέλου

Η ροή του νερού στο εσωτερικό ενός υδροφορέα είναι μια σύνθετη διαδικασία, καθώς συνυπάρχουν διαφορετικές καταστάσεις του νερού (γλυκό νερό και αλατισμένο νερό σε διάφορα στάδια), με υδραυλικές ιδιότητες που εμφανίζουν μεγάλη διακύμανση κατά μήκος του υδροφορέα. Στην παρούσα εργασία ακολουθούμε τη μοντελοποίηση που συναντάμε στην εργασία του Α. Μαντόγλου [36], η οποία βασίζεται:

- στην προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας, δηλαδή δεχόμαστε ότι δεν υπάρχει απευθείας ανάμιξη γλυκού και αλμυρού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα,
- στην εξίσωση (2.2) των Ghyben-Herzberg, δηλώνοντας έτσι ότι η ροή του νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα προσεγγίζει συνθήκες μόνιμης (ή σταθερής) κατάστασης.

Πιο αναλυτικά, η προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας είναι μια υδραυλική προσέγγιση, όπου μόνο οι τιμές της υδραυλικής κεφαλής στην περιοχή του υδροφορέα απαιτούνται για τον υπολογισμό της έκτασης της υφάλμυρης εισβολής, σε αντίθεση με άλλες προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν μετρήσεις χλωριούχων αλάτων ή μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η κύρια υπόθεση είναι ότι η ζώνη ανάμιξης μεταξύ των δύο μη αναμίξιμων υγρών (φρέσκο και αλατούχο νερό), τα οποία έχουν διαφορετικές πυκνότητες, περιορίζεται σε μια περιοχή μικρού πλάτους. Η θέση δε αυτής της περιοχής μικρού πλάτους μεταξύ των δύο ρευστών, καθορίζεται από τη διαφορά των τιμών των υδραυλικών κεφαλών μεταξύ του υφάλμυρου και του γλυκού νερού καθώς από τον όγκο του γλυκού νερού που ρέει προς την ακτογραμμή από το εσωτερικό της χώρας (T. Reilly και A. Goodman [44]). Η θέση του υφάλμυρου

μετώπου προσεγγίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.4) με τις ακόλουθες αντικαταστάσεις:

$$z_1 = \xi \text{ και } z_2 = h_f - d. \quad (2.1)$$

Προκύπτει έτσι η εξειδικευμένη για το πρόβλημά μας (Σχήμα 2.2) μορφή της εξίσωσης των Ghyben-Herzberg:

$$h_f - d = \delta \xi, \quad (2.2)$$

όπου ρ_s και ρ_f δηλώνουν τις πυκνότητες του αλατισμένου και του γλυκού νερού αντίστοιχα, με $\delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = 0.025$.

2.3 Εξισώσεις του μαθηματικού μοντέλου

Διαθέτουμε τον ελεύθερο υδροφορέα όπως αυτός παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2, όπου σύμφωνα με την παραδοχή της απότομης διεπιφάνειας που παρουσιάσαμε προηγουμένως, το πλάτος της επιφάνειας της υφάλμυρης σφήνας θεωρείται αμελητέο ως προς το μέγεθος του υδροφορέα. Δεν υφίσταται λοιπόν κάποια αξιοσημείωτη περιοχή ανάμειξης μεταξύ του γλυκού νερού του υδροφορέα και του υφάλμυρου νερού της ενδιάμεσης (υφάλμυρης) σφήνας στη Ζώνη 2.

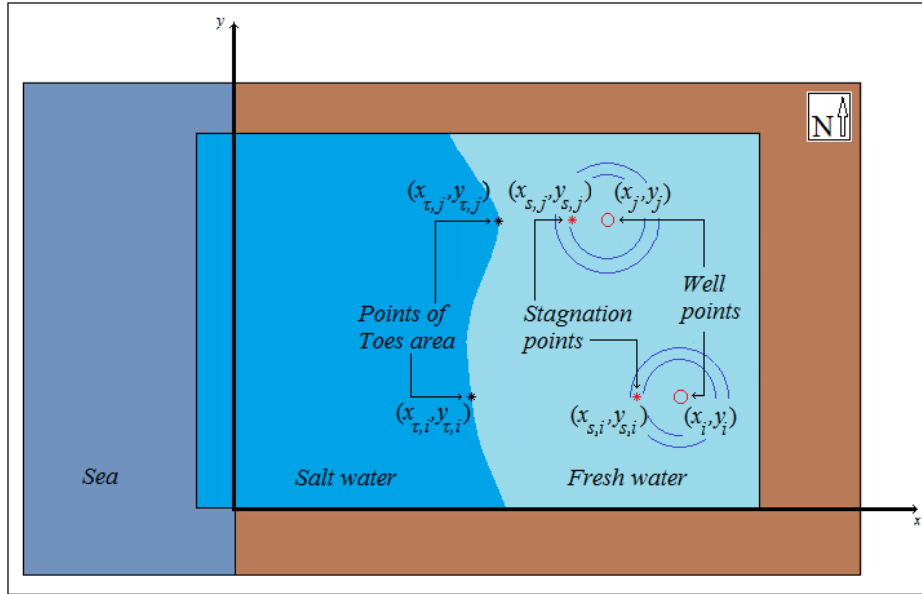
Οι γεωτρήσεις του υδροφορέα θεωρούμε ότι είναι ενεργές, με συνέπεια η άντληση γλυκού νερού από τη Ζώνη 1 να προκαλεί τη μετακίνηση της υφάλμυρης σφήνας, κίνηση κατά τον άξονα Δύση-Ανατολή, με κατεύθυνση προς το εσωτερικό του υδροφορέα. Η κίνηση αυτή, πρέπει να σημειώσουμε, ότι αναχαιτίζεται είτε από τον περιορισμό των αντλήσεων, είτε από την ανατροφοδότηση του υδροφορέα σε γλυκό νερό, διαμέσου του φαινομένου των βροχοπτώσεων ($N \neq 0$) αλλά και τυχόν πλαϊνών επιστροφών γλυκού νερού από γειτονικά ποτάμια και λίμνες, στο εσωτερικό των Ζωνών 1 και 2.

Ταυτόχρονα με τη κίνηση της υφάλμυρης σφήνας προς το εσωτερικό του υδροφορέα, ο γεωμετρικός τόπος των κρίσιμων σημείων (x_s, y_s) μπροστά από κάθε γεώτρηση του κινείται σε αντίθετη κατεύθυνση, δηλαδή προς το μέτωπο της θάλασσας. Θεωρούμε λοιπόν ότι η j -οστή γεώτρηση του υδροφορέα, με $j \in \{1, \dots, M\}$, βρίσκεται σε κίνδυνο επιχείμενης

υφαλμύρισης όσο το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας πλησιάζει το αντίστοιχο κρίσιμο σημείο της (Σχήμα 2.3), με άμεση υφαλμύριση στην ταύτιση των σημείων αυτών, δηλαδή:

$$\begin{aligned} x_{\tau,j} &= x_{s,j} \\ y_{\tau,j} &= y_{s,j}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \end{aligned} \quad (2.3)$$

όπου $(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$ οι συντεταγμένες του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας (toes area) απέναντι από την j -οστή γεώτρηση και $(x_{s,j}, y_{s,j})$ οι συντεταγμένες του κρίσιμου σημείου μπροστά από την ίδια γεώτρηση.

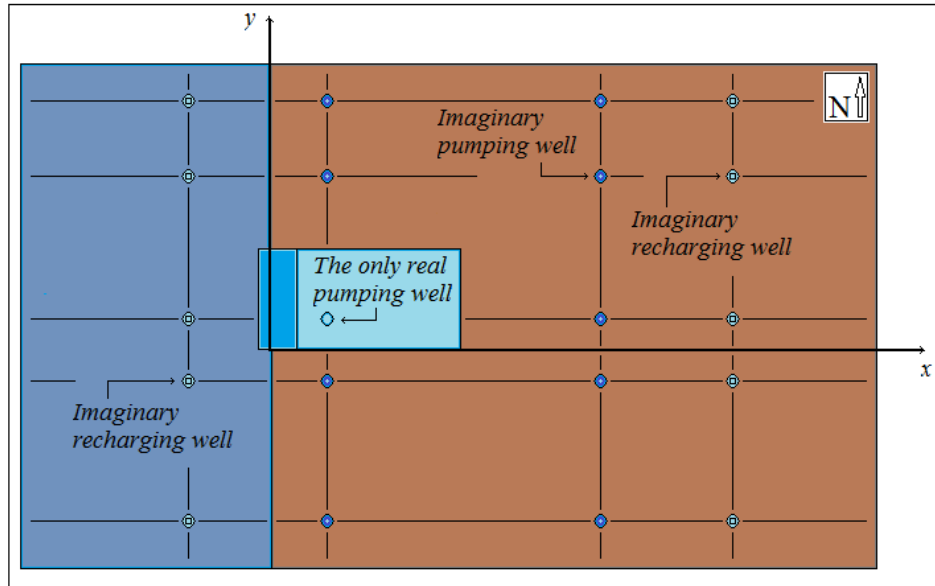


Σχήμα 2.3: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα. Θέσεις ενεργών γεωτρήσεων και αντίστοιχες θέσεις κρίσιμων σημείων και υφάλμυρης σφήνας.

Επομένως, ο διαρκής προσδιορισμός της θέσεως του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας, αλλά και των θέσεων των κινούμενων κρίσιμων σημείων μπροστά από κάθε γεώτρηση του υδροφορέα, με συνέπεια τον έλεγχο της μεταξύ τους απόστασης, αποτελεί τον αντικειμενικό μας στόχο στη μελέτη και παράλληλα αντιμετώπιση του προβλήματος της υφαλμύρισης.

Ο Ο.Δ.Λ. Strack το 1976 [45] εργαζόμενος προς την κατεύθυνση αυτή, χρησιμοποιώντας την παραδοχή της απότομης διεπιφάνειας, την εξίσωση των Ghyben-Herzberg αλλά και την υδραυλική παραδοχή του Dupuit, κατασκεύασε ένα δύο διαστάσεων μονού-δυναμικού μοντέλο, το οποίο σε συνδυασμό με τη μέθοδο των Εικόνων (Σχήμα 2.4), χρησιμοποίησε για

να περιγράψει αναλυτικά την κίνηση της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα. Από τότε, πάρα πολλοί συγγραφείς (Α.Η.-D. Cheng και D. Ouazar [8], Α. Μαντόγλου [36], Α. Μαντόγλου, Μ. Παπαντωνίου και Π. Γιαννουλόπουλος [38], C. Park και M. Aral [40], Α. Μαντόγλου και Π. Γιαννουλόπουλος [37], Α.Η.-D. Cheng, D. Halhal, A. Naji και D. Ouazar [7], Κ. Κατσιφαράκης [27] και Ε. Σιδηρόπουλος και Π. Τολίκας [52]), χρησιμοποίησαν αυτή τη μεθοδολογία για να μελετήσουν το πρόβλημα της υφαλμύρισης παράκτιων υδροφορέων.



Σχήμα 2.4: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα ορθογώνιας γεωμετρίας. Φανταστικές γεωτρήσεις άντλησης αλλά και ανατροφοδότησης σε συμμετρικές αποστάσεις από τη μοναδική πραγματική γεώτρηση του υδροφορέα, σύμφωνα με τη μέθοδο των Εικόνων.

Πιο συγκεκριμένα, γνωρίζουμε ότι η βασική εξίσωση ροής στο εσωτερικό ενός ελεύθερου υδροφορέα (O.D.L. Strack [46], Α. Μαντόγλου [36]) είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(Kb \frac{\partial h_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(Kb \frac{\partial h_f}{\partial y} \right) + N - Q = 0, \quad (2.4)$$

όπου το $b = b(x, y)$ ικανοποιεί τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \text{Zone 1: } b &= h_f, \\ \text{Zone 2: } b &= h_f - d + \xi. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Το δυναμικό ροής $\phi = \phi(x, y)$ σύμφωνα με τον O.D.L. Strack [46] στο εσωτερικό του υδροφορέα ορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Zone 1: } \phi &= \frac{1}{2}(h_f^2 - (1 + \delta)d^2), \\ \text{Zone 2: } \phi &= \frac{1+\delta}{2\delta}(h_f - d)^2, \end{aligned} \quad (2.6)$$

και αποτελεί μια συνεχή και ομαλή συνάρτηση κατά μήκος του συνόρου των Ζωνών 1 και 2, ικανοποιώντας την εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K\frac{\partial\phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K\frac{\partial\phi}{\partial y}\right) + N - Q = 0, \quad (2.7)$$

με Dirichlet συνοριακές συνθήκες $\phi = 0$ κατά μήκος της ακτογραμμής ($x = 0$) και Neumann συνοριακές συνθήκες $\phi_{\vec{n}} = 0$ (\vec{n} είναι το κανονικοποιημένο κάθετο διάνυσμα) στις περιοχές όπου δεν εμφανίζεται εισροή ύδατος στον υδροφορέα.

Επιπροσθέτως, στην περιοχή του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας, όπου

$$\xi = d \text{ και } h_f = (1 + \delta)d, \quad (2.8)$$

ισχύει ότι:

$$\phi_\tau = \phi(x_\tau, y_\tau) = \frac{(1 + \delta)\delta}{2}d^2. \quad (2.9)$$

Εάν οι τιμές των παραμέτρων K , N , Q και οι συνοριακές συνθήκες είναι γνωστές, η προηγούμενη εξίσωση (2.7) μπορεί να επιλυθεί ως προς $\phi = \phi(x, y)$, χρησιμοποιώντας αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους.

Έτσι, από τη στιγμή που η συνάρτηση $\phi = \phi(x, y)$ έχει υπολογισθεί, η θέση $z = z(x, y)$ της επιφάνειας της υφάλμυρης σφήνας όπως και η πιεζομετρική επιφάνεια $h_f = h_f(x, y)$ μπορούν να υπολογιστούν σαν συνάρτηση του ϕ , σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} \text{Zone 1: } z &= 0, \quad h_f = \sqrt{2\phi + (1 + \delta)d^2}, \quad \text{για } \frac{(1+\delta)\delta}{2}d^2 \leq \phi, \\ \text{Zone 2: } z &= d - \xi, \quad \xi = \sqrt{\frac{2\phi}{\delta(1+\delta)}} \text{ και } h_f = \sqrt{\frac{2\delta\phi}{1+\delta}} + d, \quad \text{για } 0 \leq \phi \leq \frac{(1+\delta)\delta}{2}d^2. \end{aligned} \quad (2.10)$$

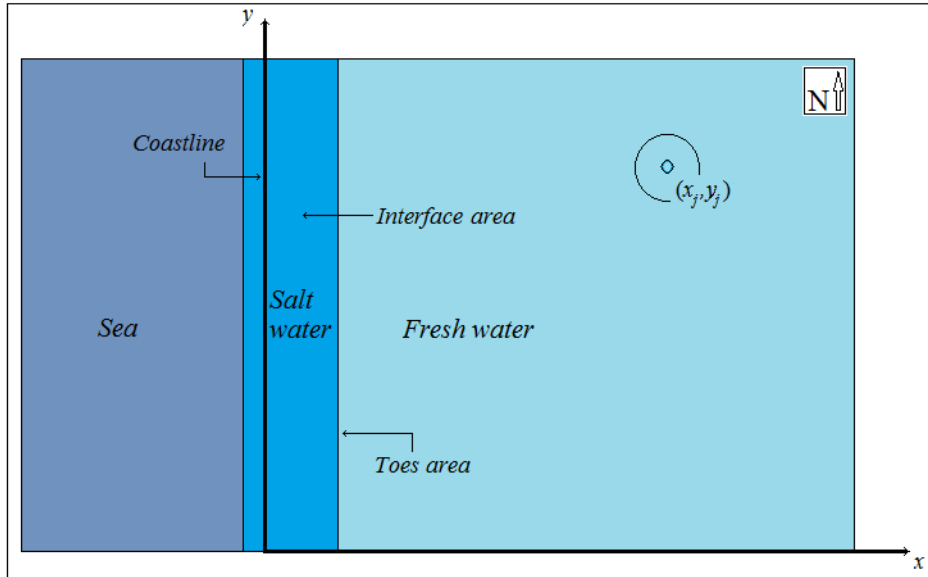
Τέλος, το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας (toes area) (x_τ, y_τ) μπορεί να υπολογισθεί, επιλύοντας ως προς x_τ την μη-γραμμική εξίσωση (2.9) που παρουσιάσαμε παραπάνω.

2.4 Αναλυτική λύση

Εξετάζουμε διάφορες κατηγορίες παράκτιων υδροφορέων, για τους οποίους συναντάμε στη βιβλιογραφία αναλυτική λύση του δυναμικού ροής που παρουσιάσαμε προηγουμένως. Πιο συγκεκριμένα μπορούμε να αναφέρουμε τις περιπτώσεις:

2.4.1 Εξιδανικευμένος υδροφορέας κατηγορίας I

Θεωρούμε την περίπτωση ενός ελεύθερου, ομοιογενούς και ισότροπου υδροφορέα ως προς τη συμπεριφορά και τις τιμές των υδραυλικών παραμέτρων στο εσωτερικό του, απείρου μήκους και πλάτους (Σχήμα 2.5), όπου ο μοναδικός του περιορισμός βρίσκεται στο δυτικό του σύνορο με τη θάλασσα. Στο εσωτερικό του υπάρχουν M σε πλήθος ενεργές γεωτρήσεις, με αντίστοιχους ρυθμούς άντλησης Q_j , $j \in \{1, \dots, M\}$, ενώ η επιφανειακή του ανατροφοδότηση ισούται με μηδέν, δηλαδή $N = 0 \text{ m}^3/\text{day}$.



Σχήμα 2.5: Κατηγορία I. Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα απείρων διαστάσεων.

Από τον O.D.L. Strack [46] γνωρίζουμε ότι η αναλυτική λύση του δυναμικού ροής $\phi =$

$\phi(x, y)$ σε κάθε σημείο στο εσωτερικό του υδροφορέα είναι η ακόλουθη:

$$\phi(x, y) = \frac{q}{K}x + \sum_{j=1}^M \frac{Q_j}{4\pi K} \ln \left[\frac{a_{1,j}(x) + b_j(y)}{a_{2,j}(x) + b_j(y)} \right], \quad (2.11)$$

όπου

$$\begin{aligned} a_{1,j}(x) &:= (x - x_j)^2, & b_j(y) &:= (y - y_j)^2, \\ a_{2,j}(x) &:= (x + x_j)^2. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Τα Q_j δηλώνουν ρυθμούς άντλησης (m^3/day) της j -οστής ενεργούς γεώτρησης με συντεταγμένες (x_j, y_j) , $j \in \{1, \dots, M\}$.

Η λύση αυτή κατασκευάστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις υδραυλικές εξισώσεις του Thiem (1906) και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Εικόνων. Πιο συγκεκριμένα, με άξονα συμμετρίας τον άξονα των y , κατασκευάστηκε ένα πλήθος υποθετικών γεωτρήσεων στις θέσεις $(-x_j, y_j)$, $j \in \{1, \dots, M\}$, συμμετρικές δηλαδή ως προς τις πραγματικές θέσεις των γεωτρήσεων (x_j, y_j) , $j \in \{1, \dots, M\}$, του υδροφορέα. Να σημειώσουμε ακόμη, ότι ο όρος $\frac{q}{K}x$ προστέθηκε στην παραπάνω λύση σύμφωνα με τη μέθοδο υπέρθεσης των λύσεων, με στόχο να περιγράψει την υπάρχουσα περιβαλλοντική ροή του νερού.

Στην περίπτωση όπου στο εσωτερικό του υδροφορέα δεν παρατηρείται καμία άντληση, από τις εξισώσεις (2.9) και (2.11) προκύπτει ότι το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας είναι παράλληλο προς τη θαλάσσια ακτογραμμή, σε απόσταση

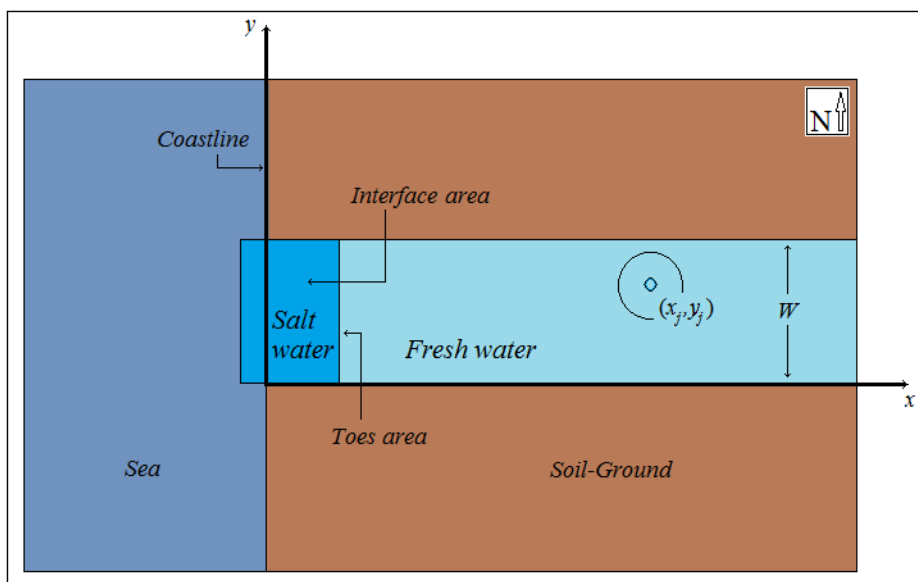
$$x_\tau = x_{min} = \frac{(1 + \delta)\delta d^2 K}{2q} \quad (2.13)$$

από τον άξονα των y . Από τη στιγμή όμως που οι γεωτρήσεις του υδροφορέα καθίστανται ενεργές, το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας κινείται προς το εσωτερικό του και η ακριβής του θέση του μπορεί να υπολογισθεί, επιλύοντας την εξίσωση (2.9) ως προς x_τ , θεωρώντας ότι $y_\tau = y_j$, $j \in \{1, \dots, M\}$.

Πρέπει να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι η κατηγορία που μόλις περιγράψαμε αντιπροσωπεύει μια μη-ρεαλιστική περίπτωση παράκτιων υδροφορέων, εξαιτίας φυσικά των άπειρων διαστάσεών του. Ωστόσο, προκύπτει ένα σύνολο εξισώσεων, των οποίων η κατάλληλη γενίκευση θα μας δώσει τη δυνατότητα μελέτης περιπτώσεων πραγματικών υδροφορέων.

2.4.2 Εξιδανικευμένος υδροφορέας κατηγορίας II

Στην περίπτωση αυτή, ομοίως με πριν, μελετάμε έναν ελεύθερο, ομοιογενή και ισότροπο υδροφορέα ως προς τη συμπεριφορά και τις τιμές των υδραυλικών παραμέτρων στο εσωτερικό του, αλλά απείρου μήκους και πεπερασμένου πλάτους W (Σχήμα 2.6). Πιο συγκεκριμένα, ο παράκτιος αυτός υδροφορέας έχει αδιαπέρατα σύνορα σε Βορρά και Νότο, η θάλασσα βρίσκεται στο δυτικό του σύνορο, ενώ δεν παρουσιάζει κανέναν περιορισμό στο μήκος του προς τα ανατολικά. Στο εσωτερικό του υπάρχουν M ενεργές γεωτρήσεις, με αντίστοιχους ρυθμούς άντλησης Q_j , $j \in \{1, \dots, M\}$, ενώ η επιφανειακή του ανατροφοδότηση του ισούται με μηδέν, δηλαδή $N = 0 \text{ m}^3/\text{day}$. Επειδή τα βόρεια και νότια σύνορα του υδροφορέα



Σχήμα 2.6: Κατηγορία II. Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα απείρου μήκους και πεπερασμένου πλάτους.

είναι παράλληλα μεταξύ τους, μέσω της μεθόδου των Εικόνων μπορούμε να θεωρήσουμε την ύπαρξη άπειρων σε πλήθος ανακλάσεων, με συνέπεια την κατασκευή άπειρων σε πλήθος υποθετικών γεωτρήσεων, εντός και εκτός του υδροφορέα. Επιλέγουμε στο σημείο αυτό την παρουσίαση της απλούστερης δυνατής περίπτωσης, όπου μόνο μία ανάκλαση ορίζεται κατά μήκος του άξονα Βορρά-Νότου, όπως και μονάχα μία ανάκλαση κατά μήκος του άξονα Ανατολή-Δύση. Αυτό, έχει ως συνέπεια την κατασκευή 11 υποθετικών γεωτρήσεων στην

περιοχή του υδροφορέα για κάθε μία πραγματική γεώτρηση στο εσωτερικό του. Να σημειωθεί ότι στις 12 αυτές συνολικά γεωτρήσεις οι 6 αποτελούν γεωτρήσεις άντλησης γλυκού νερού, ενώ οι άλλες 6 γεωτρήσεις επαναφοράς (γεωτρήσεις εμπλουτισμού) γλυκού νερού στον υδροφορέα. Το δυναμικό ροής σε κάθε σημείο (x, y) του υδροφορέα ορίζεται ως εξής:

$$\phi(x, y) = \frac{q}{K}x + \sum_{k=1}^6 \sum_{j=1}^M \frac{Q_j}{4\pi K} \ln \left[\frac{a_{1,j}(x) + b_{k,j}(y)}{a_{2,j}(x) + b_{k,j}(y)} \right], \quad (2.14)$$

όπου

$$\begin{aligned} a_{1,j}(x) &:= (x - x_j)^2, & b_{1,j}(y) &:= (y - y_j)^2, \\ a_{2,j}(x) &:= (x + x_j)^2, & b_{2,j}(y) &:= (y + y_j)^2, \\ & & b_{3,j}(y) &:= (y - (2W - y_j))^2, \\ & & b_{4,j}(y) &:= (y - (2W + y_j))^2, \\ & & b_{5,j}(y) &:= (y + (2W - y_j))^2, \\ & & b_{6,j}(y) &:= (y + (2W + y_j))^2. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Τα Q_j δηλώνουν ρυθμούς άντλησης (m^3/day) της j -οστής ενεργούς γεώτρησης με συντεταγμένες (x_j, y_j) , $j \in \{1, \dots, M\}$.

Και η παρούσα περίπτωση υδροφορέα μπορεί να χαρακτηριστεί ως μη ρεαλιστική, εξαιτίας φυσικά του μη-πεπερασμένου ενός εκ των διαστάσεων του.

2.4.3 Εξιδανικευμένος υδροφορέας κατηγορίας III

Εξετάζουμε στη συνέχεια μια τρίτη κατηγορία παράκτιων υδροφορέων, σαφώς ρεαλιστικότερη των προηγούμενων. Πιο συγκεκριμένα, αναφερόμαστε όπως και στις προηγούμενες δύο περιπτώσεις σε ελεύθερους, ομοιογενείς και ισότροπους ως προς τις υδραυλικές παραμέτρους υδροφορείς, με τη διαφοροποίηση πλέον των συνολικά πεπερασμένων διαστάσεων και ορθογώνιας γεωμετρίας, όπου το ένα άκρο είναι στη θάλασσα και τα τρία άλλα είναι αδιαπέρατα σύνορα (Σχήμα 2.7).

Η αναλυτική λύση του δυναμικού ροής, όπως αυτή παρουσιάζεται στις εργασίες των O.D.L. Strack [46] και Α. Μαντόγλου [36], προϊόν συνδυασμού πάλι των μεθόδων των Εικόνων και της υπέρθεσης λύσεων, χρησιμοποιείται στο σημείο αυτό ως βασική εξίσωση

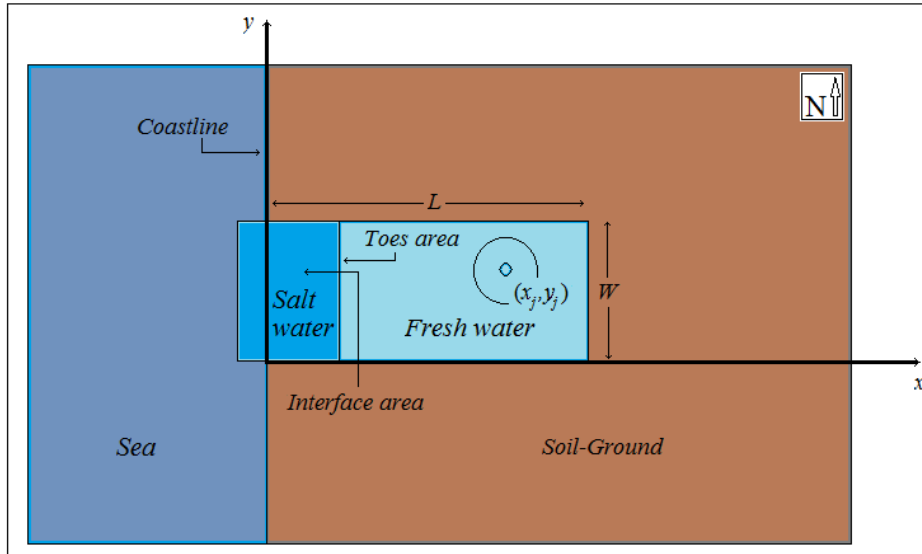
εργασίας:

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = & \frac{q}{K}x + \frac{N}{K}x(L - \frac{x}{2}) + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^M \frac{Q_j}{4\pi K} \ln \left[\frac{a_{2i-1,j}(x) + b_{k,j}(y)}{a_{2i,j}(x) + b_{k,j}(y)} \right] + \\ & + \sum_{n=1}^2 \sum_{k=3}^6 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^M \frac{Q_j}{4\pi K} \ln \left[\frac{a_{2i-1,j}(x) + b_{k,n,j}(y)}{a_{2i,j}(x) + b_{k,n,j}(y)} \right], \end{aligned} \quad (2.16)$$

όπου

$$\begin{aligned} a_{1,j}(x) &:= (x - x_j)^2, & b_{1,j}(y) &:= (y - y_j)^2, \\ a_{2,j}(x) &:= (x + x_j)^2, & b_{2,j}(y) &:= (y + y_j)^2, \\ a_{3,j}(x) &:= (x - (2L - x_j))^2, & b_{3,n,j}(y) &:= (y - (2nW - y_j))^2, \\ a_{4,j}(x) &:= (x - (2L + x_j))^2, & b_{4,n,j}(y) &:= (y - (2nW + y_j))^2, \\ a_{5,j}(x) &:= (x + (2L + x_j))^2, & b_{5,n,j}(y) &:= (y + (2nW - y_j))^2, \\ a_{6,j}(x) &:= (x + (2L - x_j))^2, & b_{6,n,j}(y) &:= (y + (2nW + y_j))^2. \end{aligned} \quad (2.17)$$

Τα Q_j δηλώνουν ρυθμούς άντλησης (m^3/day) της j -οστής ενεργούς γεώτρησης με συντεταγμένες (x_j, y_j) , $j \in \{1 \dots, M\}$.



Σχήμα 2.7: Κατηγορία III. Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα πεπερασμένων διαστάσεων και ορθογώνιας γεωμετρίας.

Να σημειώσουμε δε ότι στην κατασκευή της παραπάνω λύσεως η μέθοδος των Εικόνων, λαμβάνει υπόψη της 2 ανακλάσεις τόσο κατά μήκος του άξονα Βορρά-Νότου όσο και κατά

μήκος του άξονα Δύση-Ανατολή, ορίζοντας έτσι 59 υποθετικές γεωτρήσεις (άντλησης γλυκού νερού αλλά και ανατροφοδότησης) για κάθε μία από τις πραγματικές γεωτρήσεις του υδροφορέα.

Η συγκεκριμένη κατηγορία παράκτιων υδροφορέων, αν και τρόπον τινά εξιδανικευμένη εξαιτίας του παραλληλόγραμμου σχήματός τους, μπορεί να αποτελέσει μια εξαιρετική προσέγγιση πραγματικών υδροφορέων ανά τον κόσμο, όπου το σχήμα τους πλησιάζει την ορθογώνια γεωμετρία που περιγράψαμε παραπάνω. Με τον τρόπο αυτό, μας δίδεται η δυνατότητα μελέτης της θέσεως της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα, μέσω της επίλυσης μιας αναλυτικής εξίσωσης και όχι της εφαρμογής μιας υπολογιστικά δαπανηρής αριθμητικής μεθόδου.

Κεφάλαιο 3

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης

3.1 Μοντελοποίηση του προβλήματος της υφαλμύρισης

Όπως αναφέραμε και στις προηγούμενες παραγράφους, στόχος της εργασίας μας αυτής δεν είναι άλλος από τη διαχείριση των αντλήσεων στο εσωτερικό ενός παράκτιου υδροφορέα, με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται η ποσότητα του αντλούμενου γλυκού νερού, ενώ ταυτόχρονα να προστατεύονται οι γεωτρήσεις του υδροφορέα από το καταστρεπτικό φαινόμενο της υφαλμύρισης. Κινούμενοι λοιπόν σε αυτήν τη κατεύθυνση, ορίζουμε ένα πρόβλημα μαθηματικής βελτιστοποίησης ικανό να προσομοιάσει τη πραγματοποιούμενη διαδικασία αντλήσεων, περιγράφοντας τα φυσικά της χαρακτηριστικά και εξάγοντας χρήσιμα συμπεράσματα για την αποτελεσματικότερη διαχείριση του υδροφορέα.

Ως απαραίτητα βήματα αυτής της διαδικασίας κρίνουμε ότι είναι τα επόμενα.

- Κατ' αρχάς προσδιορίζουμε εκείνα τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας αντλήσεων, τα οποία κρίνονται απαραίτητα στη διαχείριση του υδροφορέα και μπορούν να μοντελοποιηθούν μαθηματικά. Αναφερόμαστε προφανώς σε φυσικά μεγέθη σχετιζόμενα με τον όγκο των πραγματοποιούμενων αντλήσεων, αλλά και σε φυσικά μεγέθη που περιγράφουν τη θέση, τη γεωμετρία και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.
- Στη συνέχεια ορίζουμε την αντικειμενική συνάρτηση, η οποία περιέχει επακριβώς την πληροφορία για τις αντλήσεις που θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε. Δηλαδή, η μεγιστοποίηση των τιμών της μαθηματικής αυτής συνάρτησης οφείλει να ταυτίζεται με τη μεγιστοποίηση των αντλήσεων των γεωτρήσεων του υδροφορέα.

- Επιλέγουμε τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα υπό μελέτη, τα οποία θα εισάγουμε στη διαδικασία βελτιστοποίησης με τη μορφή κατάλληλων περιορισμών. Η μαθηματική μοντελοποίηση αυτών των φυσικών περιορισμών πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγείται σε ένα σύνολο εφικτών λύσεων, οι οποίες θα έχουν ρεαλιστικό υπόβαθρο. Δεν αρκεί δηλαδή το σύνολο των εφικτών λύσεων να είναι μαθηματικά επαρκώς στοιχειοθετημένο, αλλά πρέπει οι λύσεις αυτές να αντιστοιχούν σε πραγματικές λύσεις, αντλήσεων γλυκού νερού στην περίπτωση μας.
- Εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης που κατασκευάσαμε σε δοκιμαστικούς υδροφορείς, ελέγχοντας διεξοδικά τις παραμέτρους που εισάγαμε στο πρόβλημα. Έπειτα, αξιολογούμε τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, υπό την έννοια του ρεαλισμού αλλά και της εφαρμοσιμότητάς τους στην έρευνα μας.
- Ως τελευταίο βήμα της όλης διαδικασίας ορίζουμε την εφαρμογή των παραπάνω συμπερασμάτων υφαλμύρωση σε πραγματικούς υδροφορείς, με τελική αξιολόγηση των παραγόμενων αποτελεσμάτων.

3.2 Οι παράμετροι ενδιαφέροντος

Οι φυσικές παράμετροι που αναλαμβάνουν να οριοθετήσουν τη διαδικασία διαχείρισης των αντλήσεων σε έναν παράκτιο υδροφορέα κατά το βέλτιστο δυνατό, παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 2.1 που είδαμε προηγουμένως, ενώ στο Σχήμα 2.2 γίνεται η αναπαράστασή τους.

3.3 Η αντικειμενική συνάρτηση

Η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης αποτελεί ένα θέμα ιδιαίτερης σημασίας, αφού η ίδια καθορίζει στη συνέχεια την όλη μεθοδολογία εύρεσης των βέλτιστων λύσεων, υπό την έννοια ότι οι συνοδευτικοί περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης τροποποιούνται και εφαρμόζονται ανάλογα με τη μορφή της συνάρτησης αυτής. Έχουμε τη δυνατότητα λοιπόν να ακολουθήσουμε τις παρακάτω μεθοδολογίες ως προς την επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης:

- Μπορούμε ως μία πρώτη επιλογή να κατασκευάσουμε μια αντικειμενική συνάρτηση, εντός της οποίας να ενσωματώνονται όλοι οι φυσικοί περιορισμοί του προβλήματος. Δηλαδή, η αντικειμενική αυτή πρέπει κατ' αρχάς να αποτελεί συνάρτηση τόσο των πραγματοποιούμενων αντλήσεων Q_j , $j \in \{1, \dots, M\}$, από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις, όσο και συνάρτηση των αποστάσεων $x_j - x_{\tau,j}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, των γεωτρήσεων αυτών από το κινούμενο μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας (Σχήματα 2.2 και 2.3). Έπειτα, η συνάρτηση αυτή πρέπει να είναι κατάλληλα ορισμένη, ώστε αφενός να μεγιστοποιεί τις πραγματοποιούμενες αντλήσεις και αφετέρου να ελέγχει τις αποστάσεις των γεωτρήσεων από το υφάλμυρο μέτωπο. Τόσο η κατασκευή της περιοχής των εφικτών λύσεων όσο και ο έλεγχος για τη βέλτιστη ή βέλτιστες εξ αυτών πρέπει να πραγματοποιούνται από την ίδια τη συνάρτηση. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται δραστικά οι συνοδευτικοί περιορισμοί που πρέπει να χρησιμοποιήσουμε στο συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης, αφού οι περισσότερες λεπτομέρειες ρυθμίζονται από την ίδια την αντικειμενική συνάρτηση.
- Η δεύτερη επιλογή έγκειται στην κατασκευή μιας απλούστερης τρόπον τινά αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία θα περιέχει μονάχα πληροφορίες για τις αντλήσεις των υφιστάμενων γεωτρήσεων, τις οποίες και πρέπει να μεγιστοποιεί. Οι απαραίτητοι περιορισμοί του προβλήματος, σχετικοί τόσο με τον όγκο των πραγματοποιούμενων αντλήσεων όσο και με τον έλεγχο των θέσεων της κινούμενης υφάλμυρης σφήνας, προστίθενται ξεχωριστά στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ως συνοδευτικοί περιορισμοί, αναλαμβάνοντας να καθοδηγήσουν την αντικειμενική συνάρτηση σε μια περιοχή εφικτών λύσεων, από όπου επιλέγεται η καλύτερη εξ αυτών.

Στην παρούσα Διατριβή επιλέγουμε να ακολουθήσουμε τη δεύτερη από τις παραπάνω επιλογές. Χρησιμοποιούμε, όπως αναλυτικά θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια, μια κατάλληλα επιλεγμένη αντικειμενική συνάρτηση όχι κάποιας ιδιαίτερα εξειδικευμένης μορφής, που σε συνδυασμό με τους μη ενσωματωμένους σε αυτήν απαραίτητους περιορισμούς, παρέχει τη δυνατότητα κατασκευής μιας απλής αλλά ταυτόχρονα ιδιαίτερα αποδοτικής διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η επιλογή και χρήση αντίστοιχα μιας πιο σύνθετης αντικειμενικής συνάρτησης με ενσωματωμένους περιορισμούς, αποτελεί αντικείμενο μελέτης των πιο πρόσφατων

εργασιών μας, τις οποίες επιφυλασσόμαστε να παρουσιάσουμε στο άμεσο μέλλον.

3.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση γραμμικής μορφής

Όσον αφορά τις δυνατές επιλογές για τη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης, η απλούστερη εξ αυτών δεν είναι άλλη από μια γραμμική συνάρτηση του αθροίσματος των αντλήσεων, συνάρτηση που λαμβάνει μοναδικό ολικό μέγιστο προφανώς στο σημείο όπου όλες οι αντλήσεις ταυτόχρονα μεγιστοποιούνται. Για την απλοποίηση των συμβολισμών χρησιμοποιούμε τις ακόλουθες συντομογραφίες:

$$\begin{aligned} \mathbf{Q} &:= (Q_1, \dots, Q_M), \\ \mathbf{Q}^{max} &:= (Q_1^{max}, \dots, Q_M^{max}), \\ \mathbf{Q}^{min} &:= (Q_1^{min}, \dots, Q_M^{min}), \end{aligned} \tag{3.1}$$

με συνέπεια

$$\begin{aligned} S(\mathbf{Q}) &:= \sum_{j=1}^M Q_j, \\ S(\mathbf{Q}^{max}) &:= \sum_{j=1}^M Q_j^{max}, \\ S(\mathbf{Q}^{min}) &:= \sum_{j=1}^M Q_j^{min}, \end{aligned} \tag{3.2}$$

όπου Q_j , Q_j^{max} και Q_j^{min} με $j \in \{1, \dots, M\}$, είναι αντίστοιχα η πραγματοποιούμενη, η μέγιστη και η ελάχιστη δυνατή τιμή άντλησης για την j -οστή γεώτρηση του υδροφορέα.

Έτσι, για $0 \leq Q_j^{min} \leq Q_j \leq Q_j^{max}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, η αντικειμενική συνάρτηση γραμμικής μορφής είναι η ακόλουθη:

$$Version\ 1 : P(\mathbf{Q}) = S(\mathbf{Q}) \in [S(\mathbf{Q}^{min}), S(\mathbf{Q}^{max})]. \tag{3.3}$$

Εναλλακτικά, με στόχο την κανονικοποίηση των αποτελεσμάτων της συνάρτησης αυτής, μπορούμε να επιλέξουμε να έχει την επόμενη μορφή (3.4), όπου το συνολικό ποσό των πραγματοποιούμενων αντλήσεων διαιρείται με το άθροισμα των μέγιστων δυνατών αντλήσεων. Έτσι, η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει τιμές εντός του διαστήματος $[\frac{S(\mathbf{Q}^{min})}{S(\mathbf{Q}^{max})}, 1]$, με συνέπεια να είναι αριθμητικά καλύτερα διαχειρίσιμη.

$$Version\ 1\ (normalized) : P(\mathbf{Q}) = \frac{S(\mathbf{Q})}{S(\mathbf{Q}^{max})} \in [\frac{S(\mathbf{Q}^{min})}{S(\mathbf{Q}^{max})}, 1]. \tag{3.4}$$

Σημειώνουμε ότι και οι δύο παραπάνω εκφράσεις της αντικειμενικής συνάρτησης είναι αύξουσες συναρτήσεις των μεταβλητών ελέγχου Q_j , για $j \in \{1, \dots, M\}$, λαμβάνοντας η κάθε μία την ολικά μέγιστη τιμή της όταν $Q_j = Q_j^{max}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$.

Μπορούμε ωστόσο στο σημείο αυτό να ελέγξουμε την ταχύτητα με την οποία η αντικειμενική συνάρτηση κατευθύνεται προς το ολικό της μέγιστο, επεμβαίνοντας στην ίδια τη συνάρτηση. Πιο συγκεκριμένα, μπορούμε να επιλέξουμε στη θέση της παραπάνω γραμμικής αντικειμενικής μια νέα συνάρτηση με ταχύτερη σύγκλιση προς το συνολικό της μέγιστο, όπου κλασική επιλογή αποτελεί μια εκθετικής μορφής συνάρτηση.

3.3.2 Αντικειμενική συνάρτηση εκθετικής μορφής

Επιλέγοντας μια αντικειμενική συνάρτηση εκθετικής μορφής εντός ενός πεδίου ορισμού πεπερασμένου μήκους, μπορούμε να εξασφαλίσουμε ότι η σύγκλισή της προς το ολικό της μέγιστο επιτυγχάνεται σαφώς ταχύτερα σε σχέση με μια γραμμική συνάρτηση. Το γεγονός αυτό ενισχύεται κυρίως στην περιοχή του ολικού μεγίστου, όπως μπορούμε να δούμε και στο Σχήμα 3.1 παρακάτω.

Για $0 \leq Q_j^{min} \leq Q_j \leq Q_j^{max}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, παρουσιάζουμε στη συνέχεια ορισμένα παραδείγματα εκθετικών συναρτήσεων:

$$\text{Version 2: } P(\mathbf{Q}) = e^{S(\mathbf{Q})} \in [e^{S(\mathbf{Q}^{min})}, e^{S(\mathbf{Q}^{max})}], \quad (3.5)$$

$$\text{Version 3: } P(\mathbf{Q}) = e^{-[S(\mathbf{Q})]^2} \in [e^{-[S(\mathbf{Q}^{max})]^2}, e^{-[S(\mathbf{Q}^{min})]^2}], \quad (3.6)$$

$$\text{Version 4: } P(\mathbf{Q}) = e^{-S(\mathbf{Q}^2)} \in [e^{-S([\mathbf{Q}^{max}]^2)}, e^{-S([\mathbf{Q}^{min}]^2)}], \quad (3.7)$$

όπου προφανώς $[S(\mathbf{Q})]^2 = [\sum_{j=1}^M Q_j]^2$ και $[S(\mathbf{Q}^{max})]^2 = [\sum_{j=1}^M Q_j^{max}]^2$, ενώ $S(\mathbf{Q}^2) := \sum_{j=1}^M Q_j^2$ και $S([\mathbf{Q}^{max}]^2) = \sum_{j=1}^M (Q_j^{max})^2$. Παρατηρούμε στο σημείο αυτό ότι η Version 2 είναι αύξουσα συνάρτηση των μεταβλητών ελέγχου Q_j , για $j \in \{1, \dots, M\}$, λαμβάνοντας την ολικά μέγιστη τιμή της όταν $Q_j = Q_j^{max}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$. Δεν ισχύει όμως το ίδιο και για τις εκφράσεις Version 3 και Version 4. Πρόκειται για φθίνουσες συναρτήσεις των μη αρνητικών εφαρμοζόμενων τιμών άντλησης, όπου πλέον λαμβάνει η κάθε μία την ολικά μέγιστη τιμή της όταν $Q_j = Q_j^{min}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$.

Αντίστοιχα, κατάλληλα τροποποιημένες εκφράσεις των παραπάνω συναρτήσεων, έχοντας υποστεί μετατόπιση στους άξονες των αντλήσεων και ταυτόχρονα κανονικοποίηση, είναι οι ακόλουθες:

$$\text{Version 2 (normalized)} : P(\mathbf{Q}) = e^{S(\mathbf{Q}-\mathbf{Q}^{max})} \in [e^{S(\mathbf{Q}^{min}-\mathbf{Q}^{max})}, 1], \quad (3.8)$$

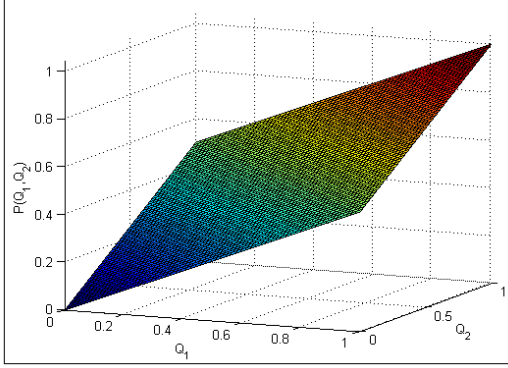
$$\text{Version 3 (normalized)} : P(\mathbf{Q}) = e^{-\left[\frac{S(\mathbf{Q}-\mathbf{Q}^{max})}{S(\mathbf{Q}^{max})}\right]^2} \in \left[e^{-\left[\frac{S(\mathbf{Q}^{min}-\mathbf{Q}^{max})}{S(\mathbf{Q}^{max})}\right]^2}, 1\right], \quad (3.9)$$

$$\text{Version 4 (normalized)} : P(\mathbf{Q}) = e^{-\frac{S([\mathbf{Q}-\mathbf{Q}^{max}]^2)}{S([\mathbf{Q}^{max}]^2)}} \in \left[e^{-\frac{S([\mathbf{Q}^{min}-\mathbf{Q}^{max}]^2)}{S([\mathbf{Q}^{max}]^2)}}, 1\right], \quad (3.10)$$

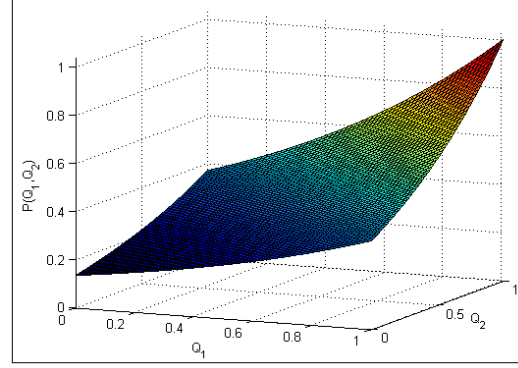
όπου προφανώς $S(\mathbf{Q}-\mathbf{Q}^{max}) = \sum_{j=1}^M (Q_j - Q_j^{max})$ και $S([\mathbf{Q}-\mathbf{Q}^{max}]^2) = \sum_{j=1}^M (Q_j - Q_j^{max})^2$. Παρατηρούμε ότι και οι τρεις αυτές συναρτήσεις είναι αύξουσες συναρτήσεις των μεταβλητών ελέγχου Q_j , για $j \in \{1, \dots, M\}$, με συνέπεια να λαμβάνει η κάθε μία την ολικά μέγιστη τιμή της όταν $Q_j = Q_j^{max}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$.

Στη βιβλιογραφία οι εργασίες που μελετούν το φαινόμενο της υφαλμύρισης υδροφορέων ως ένα πρόβλημα διαχείρισης και βελτιστοποίησης του πλάνου αντλήσεων, χρησιμοποιούν συνήθως ως αντικειμενική συνάρτηση μια γραμμικής μορφής. Η στρατηγική αυτή επιλέγεται διότι αφενός η γραμμική συνάρτηση αποτελεί την απλούστερη δυνατή και ταυτόχρονα αποτελεσματική επιλογή, αφετέρου οι απαραίτητοι φυσικοί περιορισμοί του προβλήματος ενσωματώνονται και λαμβάνονται υπόψη στη διαδικασία βελτιστοποίησης υπό τη μορφή κατάλληλων περιορισμών. Με παρόμοιο σκεπτικό λοιπόν, αλλά προσπαθώντας ταυτόχρονα να αυξήσουμε την ταχύτητα σύγκλισης της διαδικασίας, επιλέγουμε στην παρούσα Διατριβή να χρησιμοποιήσουμε μια εκθετικής μορφής αντικειμενική και πιο συγκεκριμένα την εξίσωση (3.9) της Version 3 (normalized). Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι τα πειράματα που περιγράφουμε στη συνέχεια υλοποιήθηκαν και υπό την ισχύ τόσο των υπολοίπων εκθετικών συναρτήσεων όσο και της γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης, που παραπάνω παρουσιάσαμε, διατηρώντας τους ίδιους περιορισμούς. Παρατηρήσαμε λοιπόν, ως προς την επιλογή των εκθετικών συναρτήσεων παρόμοια μεταξύ τους αποτελέσματα, σαφώς όμως ταχύτερα σε σχέση με την επιλογή της γραμμικής συνάρτησης.

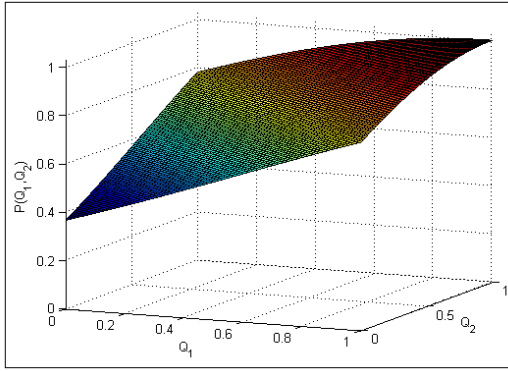
Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζουμε τις γραφικές παραστάσεις των παραπάνω υποψήφιων κανονικοποιημένων αντικειμενικών συναρτήσεων, για την πιο απλή περίπτωση ύπαρξης δύο μονάχα γεωτρήσεων με τρέχουσες αντλήσεις Q_1 και Q_2 αντίστοιχα στο εσωτερικό του υπό



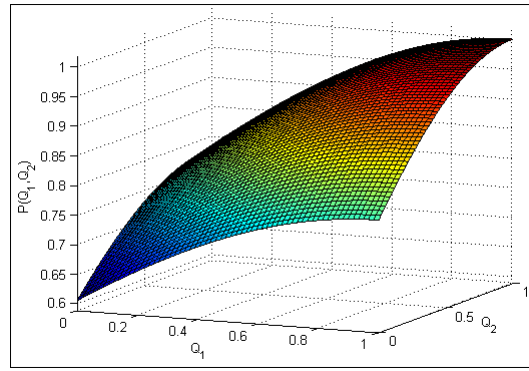
(α') Version 1 (normalized). Αντικειμενική συνάρτηση γραμμικής μορφής.



(β') Version 2 (normalized). Αντικειμενική συνάρτηση εκθετικής μορφής.



(γ') Version 3 (normalized). Αντικειμενική συνάρτηση εκθετικής μορφής.



(δ') Version 4 (normalized). Αντικειμενική συνάρτηση εκθετικής μορφής.

Σχήμα 3.1: Γραφικές παραστάσεις των υποψήφιων κανονικοποιημένων αντικειμενικών συναρτήσεων δύο μεταβλητών $[Q_1^{min}, Q_1^{max}] \times [Q_2^{min}, Q_2^{max}] \equiv [0, 1] \times [0, 1]$.

μελέτη υδροφορέα, γραφικές παραστάσεις που αντιστοιχούν στις εξισώσεις (3.4), (3.8), (3.9) και (3.10) που περιγράψαμε προηγουμένως. Όσον αφορά τις δύο μεταβλητές ελέγχου Q_1 και Q_2 δεχόμαστε ότι το υποθετικό πεδίο ορισμού τους είναι το $[Q_1^{min}, Q_1^{max}] \times [Q_2^{min}, Q_2^{max}] \equiv [0, 1] \times [0, 1]$.

Είναι εύκολα αντιληπτό από τις γραφικές παραστάσεις αυτές, ότι τόσο η γραμμική μορφή (Σχήμα 3.1α') όσο και η πρώτη εκθετική (Σχήμα 3.1β') παρουσιάζουν μικρότερη ταχύτητα σύγκλισης στο ολικό τους μέγιστο, σε σχέση με τις επόμενες δύο εκθετικές συναρτήσεις

(Σχήματα 3.1γ' και 3.1δ'). Όσον αφορά δε τις εκθετικές συναρτήσεις Version 3 (normalized) και Version 4 (normalized), παρατηρούμε ότι ενώ παρουσιάζουν και οι δύο μοναδικό ολικό μέγιστο στο σημείο όπου όλες οι μεταβλητές ελέγχου λαμβάνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη τιμή τους, διαφοροποιούνται ως προς τη διαδικασία της μεγιστοποίησης. Πράγματι, στη συνάρτηση Version 3 (normalized) επιχειρείται η μεγιστοποίηση της συνολικής άντλησης μεγιστοποιώντας το άθροισμα των πραγματοποιούμενων αντλήσεων, ενώ στην περίπτωση της συνάρτησης Version 4 (normalized) η ίδια μεγιστοποίηση λαμβάνει χώρα ξεχωριστά για κάθε μία από τις επιμέρους αντλήσεις. Όμως, προφανώς το άθροισμα των αντλήσεων είναι αύξουσα συνάρτηση των επιμέρους τιμών άντλησης, με συνέπεια οι δύο αυτές αντικειμενικές συναρτήσεις να είναι ισοδύναμες μεταξύ τους. Επιλέγουμε λοιπόν να χρησιμοποιήσουμε τη συνάρτηση Version 3 (normalized) (εξίσωση 3.9) ως αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης των αντλήσεων σε έναν παράκτιο υδροφόρεα, για το σύνολο των προσομοιώσεων που θα παρουσιάσουμε στη συνέχεια.

Σχετικά με τον υπολογισμό των κρίσιμων σημείων της επιλεγμένης αντικειμενικής συνάρτησης $P = P(\mathbf{Q})$, ακολουθούμε την παρακάτω μεθοδολογία:

$$\begin{aligned} \nabla P(\mathbf{Q}) = \vec{0} &\Leftrightarrow \frac{\partial P(\mathbf{Q})}{\partial Q_j} = 0, \quad j \in \{1, \dots, M\} \\ &\Leftrightarrow -\frac{2S(\mathbf{Q} - \mathbf{Q}^{max})}{[S(\mathbf{Q}^{max})]^2} P(\mathbf{Q}) = 0, \quad j \in \{1, \dots, M\} \\ &\Leftrightarrow S(\mathbf{Q}) = S(\mathbf{Q}^{max}), \end{aligned} \quad (3.11)$$

με την ιδιότητα:

$$\text{sign} \frac{\partial P(\mathbf{Q})}{\partial Q_j} = \text{sign}[S(\mathbf{Q}^{max}) - S(\mathbf{Q})], \quad j \in \{1, \dots, M\}. \quad (3.12)$$

Επομένως, είναι εύκολα αντιληπτό ότι η γραφική παράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζει τα εξής χαρακτηριστικά:

$$\begin{aligned} P(\mathbf{Q}) &\uparrow (\text{αύξουσα}), \quad \text{για } S(\mathbf{Q}) < S(\mathbf{Q}^{max}), \\ P(\mathbf{Q}) &\downarrow (\text{φθίνουσα}), \quad \text{για } S(\mathbf{Q}) > S(\mathbf{Q}^{max}) \\ \text{και } \nabla P(\mathbf{Q}) &= \vec{0} \Leftrightarrow S(\mathbf{Q}) = S(\mathbf{Q}^{max}). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Επιβεβαιώσαμε λοιπόν ότι η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της όταν το άθροισμα των πραγματοποιούμενων αντλήσεων μεγιστοποιείται. Δηλαδή ισχύει ότι:

$$\max_{\mathbf{Q}} P(\mathbf{Q}) = 1, \quad \text{όταν } S(\mathbf{Q}) = S(\mathbf{Q}^{max}). \quad (3.14)$$

3.4 Οι φυσικοί περιορισμοί του προβλήματος

Η αντικειμενική συνάρτηση στην οποία αφιερώσαμε την προηγούμενη ενότητα πρέπει να συνοδεύεται από ένα πλήθος κατάλληλων περιορισμών, ώστε να ανταποκρίνεται στις πραγματικές διαστάσεις του μοντελοποιούμενου προβλήματος. Η μαθηματική μοντελοποίηση δε αυτών των φυσικών περιορισμών πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγείται σε ένα σύνολο εφικτών λύσεων, οι οποίες θα έχουν ρεαλιστικό υπόβαθρο.

Οι περιορισμοί του προβλήματος της υφαλμύρισης που εδώ μελετάμε, μπορούν να ταξινομηθούν ως προς τη φύση τους σε δύο κατηγορίες:

- περιορισμοί όγκου αντλήσεων και
- περιορισμοί μετατόπισης.

Οι περιορισμοί του όγκου αντλήσεων έχουν ως αντικείμενο τον έλεγχο των πραγματοποιούμενων αντλήσεων, υπό το πρίσμα του περιορισμού τους εντός κάποιων κατώτερων και ανώτερων επιτρεπτών ορίων. Τα όρια αυτά προκύπτουν έπειτα από σχετικές πληροφορίες ως προς τις ικανότητες του υδροφορέα να αντεπεξέλθει στις ανάγκες άντλησης, αλλά και στις τοπικές ανάγκες της περιοχής σε γλυκό νερό. Οι περιορισμοί μετατόπισης αναλαμβάνουν στη συνέχεια να διατηρούν τη θέση της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα σε θέσεις μη επικίνδυνες για την ακεραιότητα των γεωτρήσεων του υδροφορέα.

3.4.1 Περιορισμοί όγκου αντλήσεων

Πιο αναλυτικά, ένας απαραίτητος αρχικός περιορισμός οφείλει να ελέγχει το συνολικό όγκο νερού που μπορούμε να αντλήσουμε από ολόκληρο τον υδροφορέα υπό μελέτη. Το μέγεθός του και η σύσταση των πετρωμάτων του δημιουργούν αυτόματα ένα ανώτερο όριο ημερήσιων, μηνιαίων και ετήσιων αντλήσεων. Μπορούμε έτσι να θεωρήσουμε τον περιορισμό:

$$0 \leq S(\mathbf{Q}) \leq Q_A^{max} - Q_A^{safety}, \quad (3.15)$$

όπου $S(\mathbf{Q}) = \sum_{j=1}^M Q_j$ το άθροισμα των συνολικών ημερήσιων, μηνιαίων ή και ετήσιων αντλήσεων ανάλογα με το χρονικό προσδιορισμό του προβλήματος που μελετάμε, Q_A^{max} οι

συνολικές δυνατότητες ανατροφοδότησης του υδροφορέα σε γλυκό νερό στο ίδιο χρονικό διάστημα και $Q_A^{safety} \geq 0$ μία μη αρνητική ποσότητα άντλήσεων, χρησιμοποιούμενη ως όριο ασφαλείας.

Επίσης, τα μεγέθη των χρησιμοποιούμενων σωληνώσεων αλλά και οι τοπικές γεννήτριες άντλησης ορίζουν κάποια ανώτερα όρια όσον αφορά την άντληση από την εκάστοτε γεώτρηση. Θεωρούμε λοιπόν ότι:

$$Q_j \leq Q_j^{max} - Q_j^{safety}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (3.16)$$

όπου Q_j η τρέχουσα άντληση από την j -οστή γεώτρηση, Q_j^{max} η αντίστοιχη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή άντλήσεων από τη συγκεκριμένη γεώτρηση και $Q_j^{safety} \geq 0$ ένα μη αρνητικό φράγμα ασφαλείας.

Κατά αναλογία με το ανώτερο φράγμα άντλησης για κάθε γεώτρηση ορίζουμε και ένα κατώτερο, υπό την έννοια ότι οι τροφοδοτούμενες περιοχές από το γλυκό αυτό νερό έχουν κάποιες ελάχιστες ανάγκες υδροδότησης. Δηλαδή, είτε αναφερόμαστε σε ύδρευση ενός τμήματος μιας αστικής περιοχής, είτε πρόκειται για άρδευση συγκεκριμένων καλλιεργειών απαιτείται κάποια ελάχιστη ποσότητα σε γλυκό νερό για την τροφοδοσία της περιοχής. Επομένως, θα λέγαμε ότι:

$$Q_j \geq Q_j^{min} + Q_j^{safety}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (3.17)$$

όπου Q_j η τρέχουσα άντληση από την j -οστή γεώτρηση, Q_j^{min} η αντίστοιχη ελάχιστη επιτρεπτή τιμή άντλήσεων από τη συγκεκριμένη γεώτρηση και $Q_j^{safety} \geq 0$ το μη αρνητικό φράγμα ασφαλείας που εισάγαμε προηγουμένως.

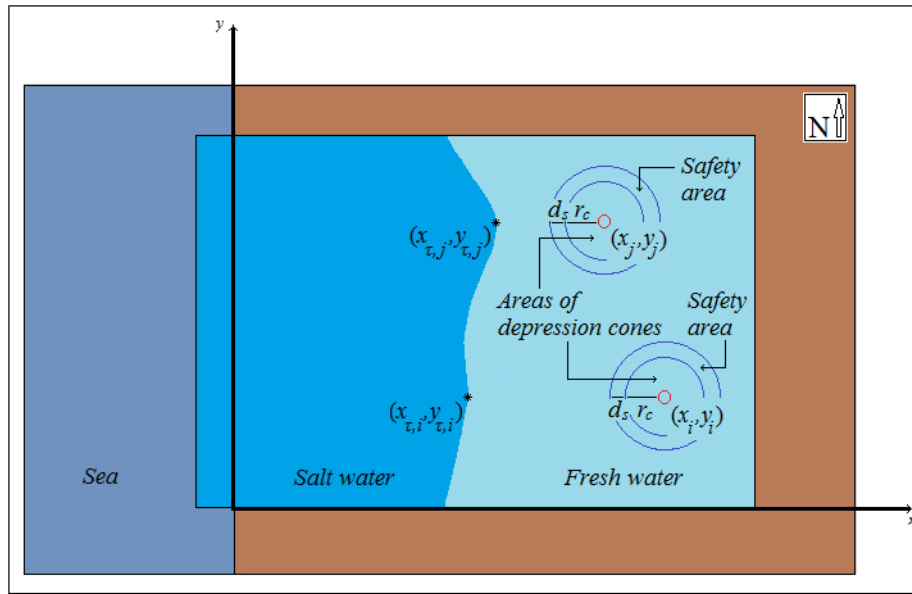
Τέλος, οι πραγματοποιούμενες αντλήσεις δεν μπορούν να έχουν αρνητικό πρόσημο, απαιτούμε δηλαδή να ισχύει:

$$Q_j \geq 0, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (3.18)$$

υπό την έννοια ότι πρόκειται για εξαγωγή γλυκού νερού από τον υδροφορέα και όχι επανεισαγωγή του. Το φαινόμενο της ανατροφοδότησης του υδροφορέα δεχόμαστε ότι πραγματοποιείται μέσω του φαινομένου των βροχοπτώσεων και της γειτνίασης του υδροφορέα με ποτάμια και λίμνες, όπου ένα τμήμα του γλυκού νερού τους επιστρέφει σε αυτόν.

3.4.2 Περιορισμοί μετατόπισης

Κατάλληλοι περιορισμοί στη μετατόπιση της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα είναι εξίσου απαραίτητοι για την επιτυχημένη διεξαγωγή της όλης διαδικασίας. Η σφήνα αυτή όπως περιγράψαμε και προηγουμένως, κινούμενη στο εσωτερικό του υδροφορέα απειλεί την ακεραιότητα των γεωτρήσεων. Η αύξηση των αντλήσεων επιταχύνει την κίνησή της προς την περιοχή των γεωτρήσεων, οπότε ο διαρκής έλεγχος της θέσεώς της κρίνεται απαραίτητος. Θεωρώντας μια κυκλική περιοχή ακτίνας $r_c \geq 0$ και μια κατάλληλη απόσταση ασφαλείας $d_s \geq 0$ περιμετρικά κάθε γεώτρησης, επιβάλουμε περιορισμό στη μετακίνηση της σφήνας, έτσι ώστε όταν πλησιάζει επικίνδυνα κοντά στις περιοχές αυτές, να τροποποιούνται οι πραγματοποιούμενες αντλήσεις (Σχήμα 3.2).



Σχήμα 3.2: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα. Θέσεις γεωτρήσεων, υφάλμυρης σφήνας και περιμετρικές περιοχές ασφαλείας.

Κατασκευάζουμε έτσι τον περιορισμό:

$$x_{\tau,j} \leq x_j - (r_c + d_s), \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (3.19)$$

όπου $(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$ οι συντεταγμένες της Toes area απέναντι από το j -οστή γεώτρηση, ενώ (x_j, y_j) , $j \in \{1, \dots, M\}$, οι συντεταγμένες της γεώτρησης αυτής. Με την επιβολή του

συγκεκριμένου περιορισμού, τα σημεία της υφάλμυρης σφήνας που βρίσκονται απέναντι από τα σημεία ενεργών γεωτρήσεων παραμένουν σε απόσταση ασφαλείας μακριά από τις γεωτρήσεις αυτές, σε κάθε βήμα της διαδικασίας διαχείρισης και μεγιστοποίησης των αντλήσεων του υδροφορέα.

3.5 Η τελική μορφή του προβλήματος βελτιστοποίησης

Το πρόβλημα διαχείρισης και ταυτόχρονα ασφαλούς μεγιστοποίησης της διαδικασίας αντλήσεων, έπειτα από την παρουσίαση της επιλεγόμενης αντικειμενικής συνάρτησης αλλά και των συνοδευτικών περιορισμών, λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{Q}} P(\mathbf{Q}) &= e^{-\left[\frac{S(\mathbf{Q}-\bar{\mathbf{Q}})}{S(\bar{\mathbf{Q}})}\right]^2} \in [0, 1] \\ \text{s.t. : } 0 &\leq \underline{Q}_j \leq Q_j \leq \bar{Q}_j < Q_A, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \\ x_{\tau,j} &\leq x_j - (r_c + d_s), \quad j \in \{1, \dots, M\}, \end{aligned} \quad (3.20)$$

όπου

$$\begin{aligned} \bar{Q}_j &:= Q_j^{max} - Q_j^{safety}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \\ \underline{Q}_j &:= Q_j^{min} + Q_j^{safety}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \\ Q_A &:= Q_A^{max} - Q_A^{safety}, \\ S(\mathbf{Q}) &= \sum_{j=1}^M Q_j \leq Q_A, \\ S(\bar{\mathbf{Q}}) &= \sum_{j=1}^M \bar{Q}_j \leq Q_A, \\ r_c, d_s, Q_j^{safety}, Q_A^{safety} &\geq 0, \quad j \in \{1, \dots, M\}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Υπενθυμίζουμε ότι η μεταβλητή $P = P(\mathbf{Q})$ αντιπροσωπεύει την υπό μεγιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση, Q_j , \underline{Q}_j και \bar{Q}_j είναι αντίστοιχα η τρέχουσα άντληση, το ανώτερο κάτω φράγμα και το κατώτερο άνω φράγμα αντλήσεων για την j -οστή γεώτρηση, ενώ Q_A είναι η συνολική δυνατότητα άντλησης από ολόκληρο τον υδροφορέα. Επίσης, $x_{\tau,j}$ είναι η x -συντεταγμένη του υφάλμυρου μετώπου απέναντι από την j -οστή γεώτρηση με συντεταγμένες (x_j, y_j) , r_c είναι η ακτίνα μιας κυκλικής περιοχής ελέγχου γύρω από κάθε γεώτρηση, ενώ τέλος d_s μια προκαθορισμένη απόσταση ασφαλείας.

Να σημειώσουμε ότι μελετάμε ταυτόχρονα και την περίπτωση ενίσχυσης των παραπάνω περιορισμών εφαρμόζοντας τον παρακάτω περιορισμό δυναμικού, όπως αυτός προτείνεται σε σχετική εργασία [38] των Α. Μαντόγλου, Μ. Παπαντωνίου και Π. Γιαννουλόπουλου:

$$\phi(x_j, y_j) > 0, \quad j \in \{1, \dots, M\}. \quad (3.22)$$

Η χρήση του περιορισμού αυτού επηρεάζει το μέγεθος των πραγματοποιούμενων αντλήσεων, ορίζοντας όπως θα δούμε και στη συνέχεια νέες τιμές βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης που μελετάμε. Η αναλυτική παρουσίαση της δράσεως του συγκεκριμένου περιορισμού πραγματοποιείται στη συνέχεια, στην ενότητα 6.2.3.

Κεφάλαιο 4

Ο αλγόριθμος στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX

Ο αλγόριθμος *AL.O.P.EX.* (ALgorithm Of Pattern EXtraction) είναι μια στοχαστική διαδικασία βελτιστοποίησης, μέσω της οποίας μας δίνεται η δυνατότητα να υπολογίσουμε τις βέλτιστες τιμές μιας κατάλληλα ορισμένης αντικειμενικής συνάρτησης. Πρόκειται για έναν απλό αλλά ταυτόχρονα ιδιαίτερα αποδοτικό επαναληπτικό αλγόριθμο, ικανό σε σχετικά μικρό πλήθος επαναλήψεων να υπολογίσει τις τιμές εκείνες των χρησιμοποιούμενων φυσικών μεγεθών, που οδηγούν την αντικειμενική συνάρτηση στη βέλτιστή της τιμή, μέγιστη όταν πρόκειται για πρόβλημα μεγιστοποίησης και αντίστοιχα ελάχιστη όταν πρόκειται για πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι ότι σε κάθε επανάληψη όλες οι χρησιμοποιούμενες μεταβλητές αλλάζουν με μικρά βήματα.

4.1 Εκδόσεις του ALOPEX

Στη βιβλιογραφία (Μ. Ζακυνθινάκη [61]) συναντάμε έξι διαφορετικές εκδόσεις του αλγορίθμου αυτού, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση ενός πλήθους προβλημάτων με διαφορετικά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Συνοπτικά παρουσιάζουμε στη συνέχεια τις εκδόσεις αυτές, χρησιμοποιώντας τους συμβολισμούς $f^{(k)} := f(x_1^{(k)}, \dots, x_M^{(k)})$ για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης των μεταβλητών $x_1^{(k)}, \dots, x_M^{(k)}$ στην k -οστή επανάληψη με $k \in \mathbb{N}$, $\Delta x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} - x_j^{(k-2)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, για τη μεταβολή των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών και $\Delta f_j^{(k)} := f(x_j^{(k-1)}) - f(x_j^{(k-2)})$, $j \in \{1, \dots, M\}$, για τη μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης στην ίδια επανάληψη αντίστοιχα.

Να σημειώσουμε ότι η αρχική επανάληψη στην οποία δραστηριοποιούνται όλες οι παρακάτω εκδόσεις του αλγορίθμου είναι η επανάληψη $k = 3$ για τις εκδόσεις I, II, IIIa και III, ενώ η επανάληψη $k = 4$ για τις άλλες δύο εκδόσεις IVa και IV. Απαιτούνται δηλαδή 2 ή 3 αρχικές επαναλήψεις χωρίς την καθοδήγηση του ALOPEX, ώστε να δημιουργηθεί η κατάλληλη πληροφορία που απαιτείται για την εφαρμογή του αλγορίθμου.

4.1.1 ALOPEX I

Μια αρχική έκδοση του αλγορίθμου αυτού είναι ο ALOPEX I (M. Ζακυνθινάκη [61], T. Kalogeropoulos et al. [32], H. Harth and T. Kalogeropoulos [25], H. Harth et al. [22], T. Tzanakou et al. [54], H. Harth and E. Tzanakou [23]). Στην έκδοση αυτή οι μεταβλητές ελέγχου εντός της αντικειμενικής συνάρτησης στην k -οστή επανάληψη, με $k \in \{3, 4, \dots\}$, τροποποιούνται σύμφωνα με τη σχέση:

$$x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} + \delta_j^{(k)}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (4.1)$$

όπου

$$\delta_j^{(k)} = \begin{cases} \delta, & \text{με πιθανότητα } p_j^{(k)} \\ -\delta, & \text{με πιθανότητα } 1 - p_j^{(k)}. \end{cases} \quad (4.2)$$

Η πιθανότητα $p_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, υπολογίζεται ως εξής:

$$p_i^{(k)} = \begin{cases} 0.75, & \text{αν } \Delta x_j^{(k)} \Delta f_j^{(k)} < 0 \\ 0.25, & \text{αν } \Delta x_j^{(k)} \Delta f_j^{(k)} > 0. \end{cases} \quad (4.3)$$

Όπως παρατηρούμε, η νέα τιμή της μεταβλητής υπό μελέτη $x_j^{(k)}$ στην k -οστή επανάληψη, ισούται με την τιμή που είχε στην προηγούμενη επανάληψη $x_j^{(k-1)}$ συν ή πλην μία μη-αρνητική ποσότητα $\delta \geq 0$, η τιμή της οποίας προέρχεται από τον έλεγχο του γινομένου της διαφοράς των τιμών της μεταβλητής αυτής $\Delta x_j^{(k)}$, με τη διαφορά των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης $\Delta f_j^{(k)}$ στις προηγούμενες δυο επαναλήψεις. Η απόφαση δηλαδή για τη νέα τιμή της μεταβλητής που μελετάμε, απαιτεί τη γνώση της συμπεριφοράς της μεταβλητής και της αντικειμενικής συνάρτησης σε δύο προηγούμενες επαναλήψεις.

Το βήμα $\delta_j^{(k)}$ είναι μια ελεύθερη παράμετρος σε όλη τη διαδικασία. Σε αριθμητικές δοκιμές (Μ. Ζακυνθινάκη [61]) τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν με βήμα της τάξης του ενός εκατοστού της κλίμακας των παραμέτρων $x_j^{(k)}$, με $j \in \{1, \dots, M\}$ και $k \in \{3, 4, \dots\}$.

4.1.2 ALOPEX II

Οι μεταβλητές στο εσωτερικό της αντικειμενικής συνάρτησης για τη συγκεκριμένη έκδοση του ALOPEX (Μ. Ζακυνθινάκη [61], Τ. Kalogeropoulos et al. [32], Η. Harth and Ε. Tzanakou [23], Τ. Tzanakou et al. [54]), μεταβάλλονται σε κάθε επανάληψη σύμφωνα με τη σχέση:

$$x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} + c\Delta x_j^{(k)}\Delta f_j^{(k)} + g_j^{(k)}, \quad j \in \{1, \dots, M\}. \quad (4.4)$$

Η τιμή της παραμέτρου $x_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, στην k -οστή επανάληψη, με $k \in \{3, 4, \dots\}$, υπολογίζεται σαν το άθροισμα τριών επιμέρους παραγόντων. Ο πρώτος παράγοντας είναι η τιμή της ίδιας παραμέτρου στην μόλις προηγούμενη επανάληψη, δηλαδή ο όρος $x_j^{(k-1)}$. Ο δεύτερος όρος είναι το γινόμενο $c\Delta x_j^{(k)}\Delta f_j^{(k)}$, που εκφράζει την πληροφορία που μπορεί να αντλήσει ο αλγόριθμος από τα προηγούμενα δύο βήματά του, πολλαπλασιασμένος με μία σταθερά βαρύτητας $c \in \mathbb{R}$ του όρου αυτού. Πρόκειται, θα λέγαμε, για έναν *παράγοντα μνήμης* (feedback factor), όπου η μεταβολή της χρησιμοποιούμενης μεταβλητής $\Delta x_j^{(k)}$ πολλαπλασιάζεται με την αντίστοιχη μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης $\Delta f_j^{(k)}$ στις δύο προηγούμενες επαναλήψεις. Ο τελευταίος παράγοντας $g_j^{(k)}$ της σχέσεως (4.4) είναι ένας *όρος λευκού θορύβου* (white noise factor), απαραίτητος στην όλη διαδικασία, ώστε να της προσδίδει την έννοια της στοχαστικότητας. Πιο συγκεκριμένα, η χρήση του όρου αυτού προσδίδει στη διαδικασία την απαραίτητη διαταραχή, με συνέπεια η αντικειμενική συνάρτηση στην πορεία της προς την εύρεση του ολικού της μεγίστου, να μην εγκλωβίζεται σε τοπικά μέγιστα που τυχόν συναντά στη διαδικασία.

Πρέπει να σημειώσουμε στο σημείο αυτό, ότι η ισορροπία στην συνεισφορά των όρων μνήμης και λευκού θορύβου σε κάθε βήμα της διαδικασίας κρίνεται απαραίτητη. Το ποσοστό συμμετοχής καθενός από τους παραπάνω παράγοντες στην κατασκευή της νέας τιμής για την υπό μελέτη μεταβλητή, οφείλει να είναι εξ αρχής καθορισμένο, ώστε ο παράγοντας του θορύβου να μην είναι κυρίαρχος, υποβιβάζοντας έτσι τη διαδικασία βελτιστοποίησης σε μια απλή

διαδικασία τυχαίου περιπάτου (random walk). Ο ρόλος του όρου του λευκού θορύβου είναι να προσφέρει τις κατάλληλες διακυμάνσεις στις τιμές της μελετούμενης μεταβλητής, ώστε να μην εγκλωβίζεται η διαδικασία σε τιμές που αντιστοιχούν σε τοπικά μονάχα ακρότατα. Δεν πρέπει δηλαδή ο θόρυβος να κατευθύνει τη διαδικασία, αλλά με συνεισφορά μικρών τιμών να της δίνει την δυνατότητα να μπορεί να ελέγχει και γειτονικές πιθανόν καλύτερες τιμές. Σε αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή το πλάτους του θορύβου γίνει σημαντικά μεγαλύτερο από το μέγεθος του όρου μνήμης, η διαδικασία κατευθύνεται πλέον από τη συμπεριφορά του θορύβου. Ενδέχεται λοιπόν έτσι οι αυξομειώσεις που λαμβάνει η παράμετρος $x_j^{(k)}$ να είναι αρκετά έντονες, αποτρέποντας τον αλγόριθμο από το να ελέγχει για καλύτερες τιμές της παραμέτρου με την απαραίτητη ευαισθησία.

Ελέγχουμε επομένως τα ποσοστά συνεισφοράς των όρων μνήμης και λευκού θορύβου με κατάλληλη επιλογή της τιμής της σταθεράς c , όπως θα δούμε αναλυτικά και στη συνέχεια.

Τέλος, να συμπληρώσουμε ότι η σύγκλιση του αλγορίθμου ALOPEX II έχει αποδειχθεί θεωρητικά (M. Ζακυνθινάκη [61], T. Kalogeropoulos et al. [32]) απουσία θορύβου. Σε αριθμητικά πειράματα εκτιμήθηκε ότι τα βέλτιστα αποτελέσματα προκύπτουν για τιμές της c της τάξεως του δεκάτου των υπό μελέτη μεταβλητών. Ωστόσο, πλήθος πειραμάτων κατέδειξε τη διαφορετική συμπεριφορά που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, ανάλογα με την τιμή της σταθεράς αυτής. Αυτή είναι λοιπόν η αιτία ύπαρξης των υπολοίπων εκδόσεων του ALOPEX που παρουσιάζουμε στη συνέχεια.

4.1.3 ALOPEX IIIa

Στην περίπτωση της τρίτης αυτής εκδόσεως του αλγορίθμου ALOPEX, η εξίσωση κατασκευής της νέας τιμής της υπό μελέτης μεταβλητής $x_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$ στην k -οστή επανάληψη με $k \in \{3, 4, \dots\}$, είναι παρόμοια με την αντίστοιχη εξίσωση που συναντήσαμε την προηγούμενη έκδοση του αλγορίθμου, όπως βλέπουμε και στην εξίσωση που ακολουθεί:

$$x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} + c^{(k)} \Delta x_j^{(k)} \Delta f_j^{(k)} + g_j^{(k)}, \quad j \in \{1, \dots, M\}. \quad (4.5)$$

Η διαφορά τους έγκειται στις τιμές που λαμβάνει τώρα η σταθερά $c \in \mathbb{R}$, η οποία είναι πλέον μεταβαλλόμενη σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό

της τιμής της σε κάθε επανάληψη (Μ. Ζακυνθινάκη [61], Τ. Kalogeropoulos et al. [32]), χρησιμοποιούμε το παρακάτω σχήμα:

$$c^{(k)} = -\frac{\nabla f^{(k)T} \Delta \vec{x}_k}{\Delta \vec{x}_k^T H f^{(k)} \Delta f^{(k)}}, \quad (4.6)$$

όπου

$$\vec{x}_k = [x_1^{(k)}, \dots, x_M^{(k)}]^T, \quad \nabla f^{(k)} = \left[\frac{\partial f^{(k)}}{\partial x_1^{(k)}}, \dots, \frac{\partial f^{(k)}}{\partial x_M^{(k)}} \right]^T \quad (4.7)$$

το διάνυσμα των χρησιμοποιούμενων μεταβλητών και το διάνυσμα κλίσης της $f^{(k)}$ στο \vec{x}_k αντίστοιχα, ενώ

$$H f^{(k)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f^{(k)}}{\partial x_1^{(k)}} & \cdots & \frac{\partial f^{(k)}}{\partial x_M^{(k)}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f^{(k)}}{\partial x_1^{(k)}} & \cdots & \frac{\partial f^{(k)}}{\partial x_M^{(k)}} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

ο Hessian πίνακας της $f^{(k)}$ στο διάνυσμα \vec{x}_k .

4.1.4 ALOPEX III

Μια τροποποίηση της προηγούμενης εκδόσεως ως προς τη διαδικασία εύρεσης της τιμής της σταθεράς $c^{(k)}$ σε κάθε επανάληψη, αποτελεί η έκδοση αυτή. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές των μεταβλητών $x_j^{(k)}$ στην k -οστή επανάληψη με $k \in \{3, 4, \dots\}$, υπολογίζονται σύμφωνα με το σχήμα:

$$x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} + c^{(k)} \Delta x_j^{(k)} \Delta f_j^{(k)} + g_j^{(k)}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (4.9)$$

όπου οι τιμές των $c^{(k)}$ αποτελούν προσεγγίσεις μιας παρεμβολής 2ου βαθμού (Μ. Ζακυνθινάκη [61], Τ. Kalogeropoulos et al. [32]).

4.1.5 ALOPEX IVa

Στην παρούσα έκδοση του ALOPEX, αλλά και στην επόμενη, απαιτούνται 3 αρχικές γνωστές τιμές για τις παραμέτρους υπό μελέτη, πριν την αρχική εφαρμογή του αλγορίθμου. Αυτό διαπιστώνεται από την ύπαρξη του όρου $\Delta f_j^{(k-1)} = f_j^{(k-2)} - f_j^{(k-3)}$ στην παρακάτω εξίσωση:

$$x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} + c^{(k)} \Delta x_j^{(k)} \frac{\Delta f_j^{(k)}}{|\Delta f_j^{(k-1)}|} + g_j^{(k)}, \quad j \in \{1, \dots, M\}. \quad (4.10)$$

Η τιμή της σταθεράς $c^{(k)}$ σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται (Μ. Ζακυνθινάκη [61], Υ. Saridakis and Μ. Zakynthinaki [53]) κατ' αναλογία με την περίπτωση του αλγορίθμου ALOPEX IIIa, σύμφωνα με τη σχέση:

$$c^{(k)} = -\frac{\nabla f^{(k)T} \Delta \vec{x}_k}{\Delta \vec{x}_k^T H f^{(k)} \Delta f^{(k)}} |\Delta f^{(k-1)}|, \quad (4.11)$$

όπου $\nabla f^{(k)}$ και $H f^{(k)}$ το διάνυσμα κλίσης και ο Hessian πίνακας της $f^{(k)}$ αντίστοιχα στο διάνυσμα \vec{x}_k , με $k \in \{4, 5, \dots\}$.

4.1.6 ALOPEX IV

Η τελευταία γνωστή από τη βιβλιογραφία έκδοση του αλγορίθμου (Μ. Ζακυνθινάκη [61], Τ. Kalogeropoulos et al. [32]) που παρουσιάζουμε στο κεφάλαιο αυτό είναι μια παραλλαγή της προηγούμενης έκδοσης, όπου πλέον οι τιμές της σταθεράς $c \in \mathbb{R}$ δεν είναι μεταβαλλόμενες ανά επανάληψη. Ο παράγοντας $|\Delta f_j^{(k-1)}|$ στον παρονομαστή αποτελεί έναν παράγοντα κανονικοποίησης των αποτελεσμάτων, ενώ όπως και προηγουμένως απαιτούνται 3 αρχικές γνωστές τιμές για τις υπό μελέτη μεταβλητές πριν την αρχική εφαρμογή του αλγορίθμου, σύμφωνα με το σχήμα:

$$x_j^{(k)} = x_j^{(k-1)} + c \Delta x_j^{(k)} \frac{\Delta f_j^{(k)}}{|\Delta f_j^{(k-1)}|} + g_j^{(k)}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (4.12)$$

όπου $\nabla f^{(k)}$ και $H f^{(k)}$ το διάνυσμα κλίσης και ο Hessian πίνακας της $f^{(k)}$ αντίστοιχα στο διάνυσμα \vec{x}_k , με $k \in \{4, 5, \dots\}$.

4.2 Ο αλγόριθμος στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX V

Με στόχο την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης που παρουσιάσαμε προηγουμένως, χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX σε συνδυασμό με ένα σύστημα κατάλληλων περιορισμών που αντιπροσωπεύουν τις φυσικές διαστάσεις του

υπό μελέτη προβλήματος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το γεγονός ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι ήδη κανονικοποιημένη, ανάμεσα στις διαφορετικές επιλογές του αλγορίθμου, επιλέγουμε μια τροποποιημένη δηλαδή έκδοση του ALOPEX II, που θα χαρακτηρίζουμε στο εξής ως ALOPEX V.

Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε επαναληπτικό βήμα, η στοχαστική αυτή διαδικασία μεταβάλλει όλες τις παραμέτρους ελέγχου Q_j , $j \in \{1, \dots, M\}$, σύμφωνα με το διανυσματικό κανόνα:

$$\mathbf{Q}^{(k)} = \mathbf{Q}^{(k-1)} + c^{(k)} \Delta P^{(k-1)} \Delta \mathbf{Q}^{(k-1)} + \mathbf{g}^{(k)}, \quad k = 2, 3, \dots \quad (4.13)$$

όπου

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}^{(k)} &= (Q_1^{(k)}, \dots, Q_M^{(k)}) \\ \Delta \mathbf{Q}^{(k)} &= \mathbf{Q}^{(k)} - \mathbf{Q}^{(k-1)} \\ \Delta P^{(k)} &= P(\mathbf{Q}^{(k)}) - P(\mathbf{Q}^{(k-1)}) \end{aligned} \quad (4.14)$$

για δεδομένες αρχικές τιμές των μεταβλητών ελέγχου $\mathbf{Q}^{(k)}$, με $k = 0, 1$.

Η πραγματική παράμετρος $c^{(k)}$ ελέγχει το πλάτος του όρου μνήμης (feedback factor), ενώ η $\mathbf{g}^{(k)}$ ελέγχει το πλάτος του όρου θορύβου (noise factor). Επιλέγουμε δε να ισχύει ότι:

$$c^{(k)} = \frac{1}{|\Delta P^{(k-1)}|} \quad (4.15)$$

και

$$g_j^{(k)} = \gamma Q_j^{(k-1)} \mathcal{X}_j^{(k)}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (4.16)$$

όπου το γ αναφέρεται σε ένα μικρό ποσοστό 1% – 2% των $Q_j^{(k-1)}$ (εδώ χρησιμοποιούμε $\gamma = 0.015$), ενώ η $\mathcal{X}_j^{(k)}$ είναι μια τυχαία μεταβλητή με τιμές ομοιόμορφα κατανομημένες στο διάστημα $(-0.5, 1)$. Η επιλογή του συγκεκριμένου διαστήματος έγινε με στόχο η συνεισφορά του όρου θορύβου $g_j^{(k)}$ στην τυχαία επανάληψη k του αλγορίθμου να είναι στατιστικά δύο φορές θετικού και μία φορά αρνητικού προσήμου. Ζητούμενο είναι η δημιουργία μικρών διαταραχών, όπως αναφέραμε και στις προηγούμενες εκδόσεις του ALOPEX που περιέχουν όρο θορύβου, ώστε η διαδικασία να μην εγκλωβίζεται σε τοπικά ακρότατα. Αυτή η διαταραχή λοιπόν, με την επιλογή του συγκεκριμένου διαστήματος είναι με πιθανότητα $\frac{2}{3}$ θετικού προσήμου και με το υπόλοιπο $\frac{1}{3}$ αρνητικού. Έτσι, σε κάθε επανάληψη δίνουμε τη δυνατότητα

στον ALOPEX να ελέγχει εάν τυχόν ξεπέρασε κάποια ενδεχόμενη βέλτιστη τιμή. Τονίζουμε επίσης ότι η χρήση της σταθεράς $c^{(k)}$ με την παραπάνω μορφή (4.15) έχει το ρόλο του προσήμου στον όρο μνήμης του αλγορίθμου (4.13). Ισχύει δηλαδή ότι:

$$c^{(k)} \Delta P^{(k-1)} \Delta Q^{(k-1)} = \text{sign}(\Delta P^{(k-1)}) \Delta Q^{(k-1)}. \quad (4.17)$$

Παρουσιάζουμε αναλυτικά τη συμπεριφορά των όρων μνήμης και θορύβου του αλγορίθμου ALOPEX V στη συνέχεια, στις ενότητες 5.2.1 και 5.2.2.

Κεφάλαιο 5

Ο αλγόριθμος στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX με χρήση περιορισμών

5.1 Κυρώσεις ελέγχου της επαναληπτικής διαδικασίας

Στόχος μας στην παράγραφο αυτή είναι η κατασκευή ενός στρατηγικού σχεδίου καθοδήγησης της διαδικασίας βελτιστοποίησης προς την κατεύθυνση της ταχύτερης δυνατής σύγκλισης σε ένα βέλτιστο πλάνο αντλήσεων για τον εκάστοτε υδροφορέα υπό μελέτη. Υπό το πρίσμα αυτό, κατασκευάζουμε ένα πλαίσιο περιορισμών κατάλληλα επιλεγμένων, έτσι ώστε σε κάθε επαναληπτικό βήμα του ALOPEX, αφενός η διαδικασία να καθοδηγείται προς την κατεύθυνση μεγιστοποίησης των τιμών της χρησιμοποιούμενης αντικειμενικής συνάρτησης, αφετέρου να λαμβάνονται υπόψη οι σχετικοί φυσικοί περιορισμοί του προβλήματος.

Παρακολουθούμε στη συνέχεια τα αναλυτικά βήματα της διαδικασίας αυτής, η οποία διέπεται από το εξής βασικό χαρακτηριστικό. Σε κάθε επανάληψη του ALOPEX ελέγχονται οι τιμές όλων των μεταβλητών ελέγχου Q_j , $j \in \{1, \dots, M\}$, όπως ταυτόχρονα και η θέση της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες αντλήσεις. Αν λοιπόν ορισμένες εξ αυτών των τιμών άντλησης, ή και όλες, βρεθούν ότι παραβιάζουν κάποιον περιορισμό του προβλήματος βελτιστοποίησης, είτε αντίστοιχα διαπιστωθεί ότι η θέση της υφάλμυρης σφήνας βρίσκεται επικίνδυνα κοντά σε περιοχή ενεργούς άντλησης, μεταβάλλουμε τις τιμές των υφιστάμενων αντλήσεων κατά ένα ποσοστό %. Μειώνουμε δηλαδή

είτε αυξάνουμε τεχνητά τις τιμές τους, ώστε τόσο τα ίδια τα μεγέθη των αντλήσεων όσο και η θέση του υφάλμυρου μετώπου να βρίσκονται πλέον εντός αποδεκτών προκαθορισμένων οριακών τιμών.

5.1.1 Κυρώσεις ελέγχου μέγιστων και ελάχιστων δυνατών τιμών άντλησης

Η εφαρμογή των κυρώσεων ελέγχου ως προς τις ελάχιστες και μέγιστες δυνατές τιμές άντλησης πραγματοποιείται σε δύο βήματα.

- Αρχικά, εάν η τρέχουσα άντληση $Q_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, της j -οστής γεώτρησης προτεινόμενη από τον ALOPEX παραβιάζει τη μέγιστη ή την ελάχιστη δυνατή τιμή άντλησης, δηλαδή:

$$Q_j^{(k)} > \overline{Q}_j \text{ είτε } Q_j^{(k)} < \underline{Q}_j, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (5.1)$$

η τιμή της $Q_j^{(k)}$ τροποποιείται ως εξής:

$$Q_j^{(k)} = (1 - \lambda_j)\overline{Q}_j \text{ ή αντίστοιχα } Q_j^{(k)} = (1 + \mu_j)\underline{Q}_j, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (5.2)$$

με $\lambda_j, \mu_j \in (0, 1)$. Μειώνουμε δηλαδή κατά ένα ποσοστό $\lambda_j\%$ ή αυξάνουμε αντιστοίχως κατά ένα ποσοστό $\mu_j\%$ τις τιμές συγκεκριμένων αντλήσεων, όταν αυτές ξεπερνούν ή υπολείπονται των οριακών τιμών \underline{Q}_j και \overline{Q}_j , $j \in \{1, \dots, M\}$. Να σημειώσουμε ότι η επιλογή διαφορετικών σταθερών λ_j, μ_j , $j \in \{1, \dots, M\}$, μας παρέχει τη δυνατότητα να μπορούμε να επιλέγουμε διαφορετικά την κύρωση που εφαρμόζουμε σε κάθε ενεργή γεώτρηση. Μπορούμε δηλαδή να επιλέξουμε ορισμένες από τις μεταβλητές ελέγχου $Q_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, να επιβαρυνθούν ή να προσαυξηθούν σε μεγαλύτερο ποσοστό από κάποιες άλλες. Φυσικά η απλούστερη περίπτωση είναι η επιλογή ενιαίας τιμής για όλες τις σταθερές αυτές, δηλαδή να ισχύει ότι $\lambda := \lambda_j$ και $\mu := \mu_j$ για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, με $\lambda_j, \mu_j \in (0, 1)$, στην περίπτωση που επιθυμούμε να εφαρμόσουμε μια ενιαία ταχτική κυρώσεων σε όλες τις τιμές άντλησης.

Η συγκεκριμένη μορφή κυρώσεων ελέγχου αντιπροσωπεύει ένα αρχικό αλλά ταυτόχρονα ουσιαστικό μέτρο ελέγχου της διαδικασίας αντλήσεων, αφού με τη χρήση του εξαναγκάζουμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης να χρησιμοποιεί μονάχα αντλήσεις επιτρεπτές από τα φυσικά τοπικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα υπό μελέτη. Δηλαδή, υπό καμία έννοια δεν είναι επιτρεπτή η χρήση τιμών άντλησης που θα ξεπερνούν τις τοπικές δυνατότητες του υδροφορέα, δυνατότητες εξαρτώμενες από τα μεγέθη των μηχανικών αντλιών και των σωληνώσεων που χρησιμοποιούνται στις περιοχές ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα. Οι οριακές αυτές τιμές \underline{Q}_j , \overline{Q}_j , $j \in \{1, \dots, M\}$, θεωρούνται δεδομένες εξ αρχής, πριν από τη μελέτη βελτιστοποίησης του πλάνου αντλήσεων του υδροφορέα.

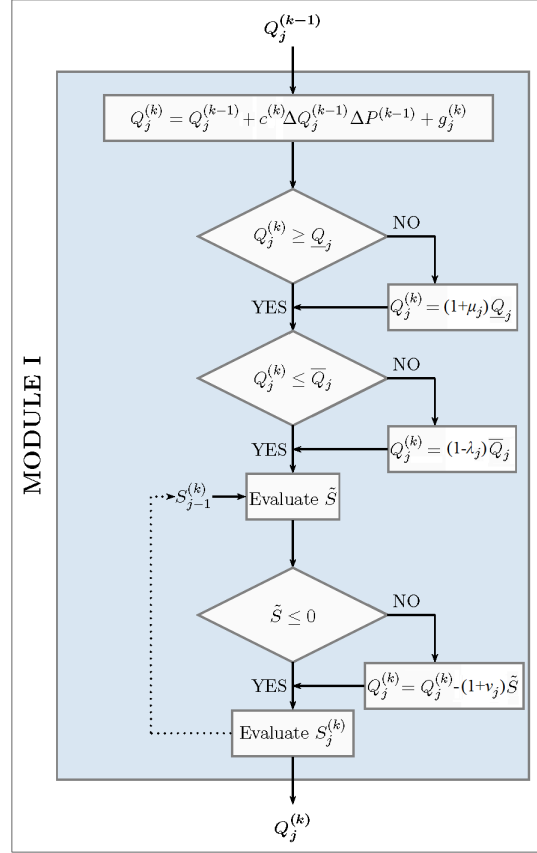
- Ως δεύτερο βήμα ορίζεται ο έλεγχος της παραβίασης του συνολικού όγκου νερού, που μπορεί να αντληθεί από τον υπό μελέτη υδροφορέα σε κάποιο χρονικό διάστημα. Έτσι, θεωρώντας ως γνωστές τις συνολικές δυνατότητες ανατροφοδότησης του υδροφορέα σε συγκεκριμένη χρονική βάση, αλλά και την υπάρχουσα ποσότητα γλυκού νερού στο εσωτερικό του, καθορίζουμε το μέγιστο δυνατό όγκο νερού Q_A , που μπορούμε να αντλήσουμε από αυτόν στην ίδια χρονική βάση. Η μεθοδολογία εφαρμογής του δεύτερου μέτρου κυρώσεων ελέγχου της διαδικασίας ακολουθεί. Θεωρούμε ότι η διαδικασία βελτιστοποίησης βρίσκεται στην k -οστή επανάληψη, με $k > 1$, όπου οι τιμές όλων μεταβλητών ελέγχου $Q_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, p-1\}$, $1 < p \leq M$, έχουν υπολογισθεί με επιτυχία. Ορίζουμε στο σημείο αυτό το άθροισμα:

$$S_{p-1}^{(k)} \equiv S(Q_1^{(k)}, \dots, Q_{p-1}^{(k)}, Q_p^{(k-1)}, \dots, Q_M^{(k-1)}) = \sum_{j=1}^{p-1} Q_j^{(k)} + \sum_{j=p}^M Q_j^{(k-1)} \quad (5.3)$$

με $S_0^{(k)} = S(Q_1^{(k-1)}, \dots, Q_M^{(k-1)})$, ενώ στη συνέχεια υπολογίζουμε την τιμή της μεταβλητής $Q_p^{(k)}$ χρησιμοποιώντας την εξίσωση (4.13). Ο έλεγχος του περιορισμού του συνολικού μεγίστου ακολουθεί. Θεωρούμε το παρακάτω άθροισμα:

$$\tilde{S} := S_{p-1}^{(k)} + \Delta Q_p^{(k)} - Q_A \quad (5.4)$$

και ελέγχουμε την τιμή του. Εάν διαπιστωθεί ότι η τιμή αυτή είναι μεγαλύτερη του



Σχήμα 5.1: MODULE I. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας κυρώσεων ελέγχου κατά τον έλεγχο των μέγιστων και ελάχιστων τοπικών και ολικών αντλήσεων.

μηδενός, δηλαδή $\tilde{S} > 0$, τότε η τιμή της μεταβλητής $Q_p^{(k)}$ τροποποιείται ως εξής:

$$Q_p^{(k)} = Q_p^{(k)} - (1 + \nu_p) \tilde{S} \quad (5.5)$$

με $\nu_p \in (0, 1)$. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι το να καταγραφεί η ακριβής αιτία παραβίασης του περιορισμού του συνολικού όγκου αντλήσεων από τον υδροφορέα που μελετάμε και η στοχευμένη διόρθωσή της. Θα μπορούσαμε δηλαδή σαν ένα άμεσο μέτρο ελέγχου της διαδικασίας, με την παραβίαση του περιορισμού που μελετάμε να μειώναμε αυτόματα όλες τις αντλήσεις του υδροφορέα κατά ένα μικρό ποσοστό %. Η κίνηση αυτή θα επίλυε το πρόβλημά μας. Ωστόσο, επιλέξαμε να εφαρμόσουμε μια τακτική που στηρίζεται σε πιο λεπτομερή ανάλυση του φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζουμε

με τη βοήθεια των προηγούμενων αθροισμάτων (5.3) και (5.4) επακριβώς την άντληση εκείνη, η αύξηση της οποίας οριακά οδηγεί στην παραβίαση του περιορισμού $\tilde{S} > 0$ και στη συνέχεια διορθώνουμε μονάχα τη μεταβλητή που αντιστοιχεί στην άντληση αυτή. Φυσικά, όπως και στην εφαρμογή των προηγούμενων κυρώσεων, η χρήση των σταθερών ν_p , $p \in \{1, \dots, M\}$, μας παρέχει τη δυνατότητα επέμβασης στις μεταβλητές ελέγχου $Q_p^{(k)}$, $p \in \{1, \dots, M\}$, με διαφορετικό ποσοστό κύρωσης σε καθεμιά από αυτές. Θα λέγαμε ότι η διαδικασία αυτή μπορεί να απλουστευθεί με τη χρήση ενιαίας τιμής $\nu := \nu_p$ για κάθε $p \in \{1, \dots, M\}$, με $\nu \in (0, 1)$.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζουμε το διάγραμμα ροής των κινήσεών μας κατά τη διάρκεια εφαρμογής των κυρώσεων ελέγχου τόσο για τις τοπικές μέγιστες και ελάχιστες τιμές άντλησεων όσο και για τη μέγιστη δυνατή άντληση.

5.1.2 Κυρώσεις ελέγχου προσέγγισης των ενεργών περιοχών άντλησης

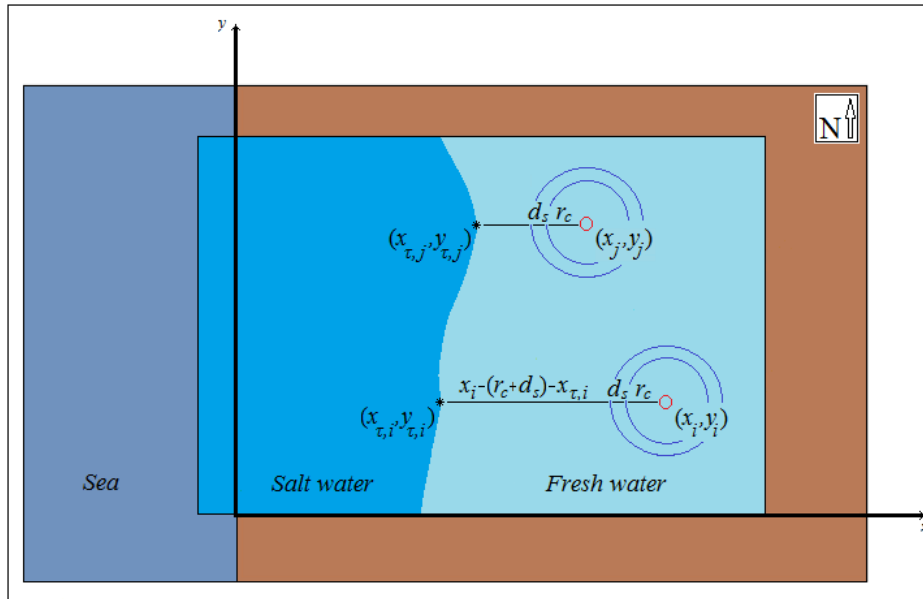
Έπειτα από την επιτυχή ολοκλήρωση του κύκλου ελέγχων και εφαρμογής κυρώσεων για τους περιορισμούς άντλησης που παρουσιάσαμε προηγουμένως, ο έλεγχος και ταυτόχρονα καθοδήγηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης άντλήσεων συνεχίζεται με ένα νέο κύκλο ελέγχων διαφορετικής σκοπιμότητας. Πιο αναλυτικά, το σημείο αναφοράς βρίσκεται τώρα στη μελέτη της θέσεως της υφάλμυρης σφήνας, υπό τη χρήση των τρεχουσών τιμών άντλησης όπως αυτές προτείνονται σε κάθε βήμα από τον επαναληπτικό αλγόριθμο ALOPEX. Εμφανίζεται στο σημείο αυτό η ανάγκη αντιμετώπισης του φαινομένου της διείσδυσης της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα σε περιοχές ιδιαίτερα κοντινές σε περιοχές ενεργών γεωτρήσεων, με άμεση επικινδυνότητα πλέον για την ακεραιότητα αυτών. Με στόχο τον έλεγχο αυτής της προσέγγισης, εφαρμόζουμε τις κυρώσεις ελέγχου που περιγράφουμε αναλυτικά στη συνέχεια. Η διαδικασία εφαρμογής τους πραγματοποιείται σε δύο βήματα.

- Θεωρούμε ότι ο επαναληπτικός αλγόριθμος ALOPEX βρίσκεται στην k -οστή επανάληψη, με $k > 2$, όπου έχουν προταθεί οι τιμές για όλες τις παραμέτρους ελέγχου $Q_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, και στη συνέχεια έχουν πραγματοποιηθεί επιτυχώς όλες οι

κυρώσεις ελέγχου των ελάχιστων και μέγιστων, τοπικών και ολικών τιμών άντλησης που περιγράψαμε προηγουμένως. Πραγματοποιείται τώρα ο έλεγχος πιθανούς επικίνδυνης προσέγγισης του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό του υδροφορέα σε μία ή περισσότερες περιοχές ενεργών γεωτρήσεων, ενώ πρόβλημα διαπιστώνεται όταν ισχύει ότι:

$$x_{\tau,j} > x_j - (r_c + d_s), \quad j \in \{1, \dots, M\}. \quad (5.6)$$

Υπενθυμίζουμε ότι (x_j, y_j) , $j \in \{1, \dots, M\}$, είναι οι συντεταγμένες των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα, ενώ $(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$, $j \in \{1, \dots, M\}$, είναι οι συντεταγμένες του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας ακριβώς απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις γεωτρήσεων. Επίσης, r_c και d_s είναι σταθερές που αντιπροσωπεύουν την κυκλική περιοχή ελέγχου και μια απόσταση ασφαλείας περιμετρικά των γεωτρήσεων αυτών (Σχήμα 5.2). Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος ακολουθεί.



Σχήμα 5.2: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα. Θέση υφάλμυρης σφήνας και αποστάσεις ασφαλείας από τις περιοχές ενεργών γεωτρήσεων.

Ορίζουμε ως πρώτο μέτρο ελέγχου της θέσεως της υφάλμυρης σφήνας τη μείωση των τιμών των πραγματοποιούμενων αντλήσεων ακριβώς σε εκείνες τις γεωτρήσεις που

βρίσκονται σε κίνδυνο προσέγγισης. Η επέμβαση αυτή πραγματοποιείται ως εξής:

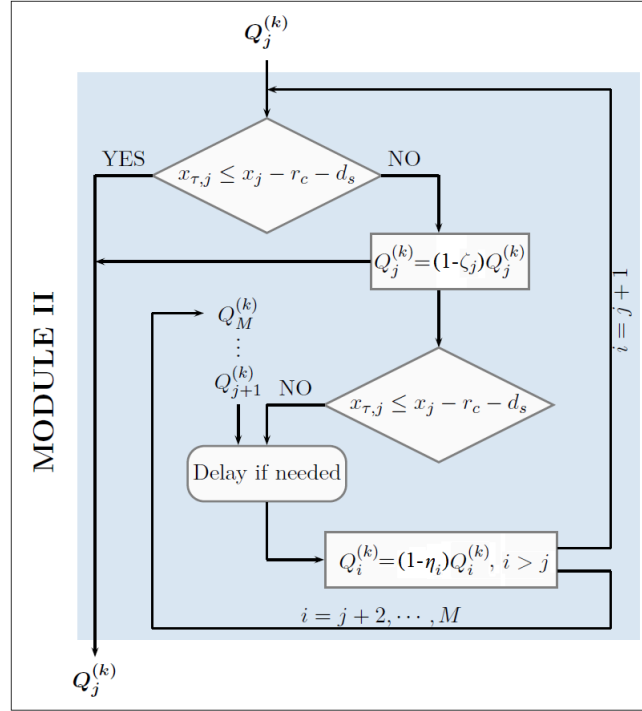
$$Q_j^{(k)} = (1 - \zeta_j)Q_j^{(k)}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (5.7)$$

όπου $\zeta_j \in (0, 1)$.

Πρόκειται στην ουσία για ένα λογικό και αναμενόμενο αντίμετρο, αφού είναι σαφές ότι η άντληση γλυκού νερού από μια συγκεκριμένη γεώτρηση αναπόφευκτα φέρει το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας κοντά της. Άρα, μειώνοντας την ποσότητα του αντλούμενου νερού τοπικά σε εκείνη τη γεώτρηση που άμεσα κινδυνεύει, αισιοδοξούμε ότι παρέχουμε μια άμεση, αλλά όχι και απαραίτητα οριστική, αντιμετώπιση του προβλήματος της επικείμενης υφαλμύρισης.

Να σημειώσουμε ότι ακολουθώντας την τακτική των προηγούμενων ελέγχων, η επέμβαση σε κάθε μία από τις γεωτρήσεις σε κίνδυνο μπορεί να πραγματοποιηθεί με κύρωση επί διαφορετικού ποσοστού επί της αρχικής της τιμής. Ωστόσο, είναι προφανώς δυνατή η επιλογή ενιαίας εφαρμογής σε όλες τις μεταβλητές ελέγχου $Q_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, του ίδιου ποσοστού κυρώσεως. Δηλαδή μπορούμε απλουστεύοντας τη διαδικασία να χρησιμοποιήσουμε $\zeta := \zeta_j$ για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, με $\zeta \in (0, 1)$.

- Παρουσιάζουμε στη συνέχεια το δεύτερο βήμα της διαδικασίας κυρώσεων ελέγχου προσέγγισης, τονίζοντας εξ αρχής ότι ενώ ο έλεγχος του βήματος αυτού είναι απαραίτητος σε κάθε επαναληπτικό βήμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, δεν ισχύει το ίδιο και για την εφαρμογή των αντίστοιχων κυρώσεων. Πιο συγκεκριμένα, η συνεισφορά αυτών των κυρώσεων ελέγχου στην καθοδήγηση της διαδικασίας ζητείται όταν η εφαρμογή του προηγούμενου βήματος του τοπικού ελέγχου δεν έχει αποδώσει τα προσδοκώμενα. Δηλαδή, παρά την εφαρμογή των τοπικών κυρώσεων στις τιμές άντλησης σε κάθε γεώτρηση που βρίσκεται σε κίνδυνο, το υφάλμυρο μέτωπο εξακολουθεί να προελαύνει στο εσωτερικό του υδροφορέα προς τις γεωτρήσεις αυτές. Η μείωση της πραγματοποιούμενης άντλησης σε κάποια γεώτρηση που περιγράψαμε στο προηγούμενο βήμα, δεν ανακόπτει επαρκώς την κίνηση του υφάλμυρου μετώπου, με συνέπεια να επίκειται η υφαλμύριση της. Προφανώς πρόκειται για την εμφάνιση του φυσικού και αναμενόμενου φαινομένου της υπεδάφιας διασύνδεσης όλων των περιοχών στο εσωτερικό



Σχήμα 5.3: MODULE II. Διάγραμμα ροής της διαδικασίας κυρώσεων ελέγχου κατά τον έλεγχο προσέγγισης των περιοχών ενεργούς άντλησης.

του υδροφορέα και την υδραυλική αλληλεπίδραση που υφίσταται μεταξύ περιοχών που βρίσκονται ακόμη και σε σημαντικές αποστάσεις μεταξύ τους.

Το φαινόμενο της επικίνδυνης προσέγγισης μιας ή περισσότερων περιοχών ενεργών γεωτρήσεων που περιγράφεται από τη σχέση (5.6), εξακολουθεί στο σημείο αυτό να υφίσταται. Εφαρμόζουμε λοιπόν μια πιο επιθετική τακτική με στόχο την αντιμετώπιση του, απαιτώντας τη μείωση των τιμών άντλησης σε όλες πλέον τις ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα.

$$Q_j^{(k)} = (1 - \eta_j) Q_j^{(k)}, \text{ για κάθε } j \in \{1, \dots, M\}, \quad (5.8)$$

με $\eta_j \in (0, 1)$. Φυσικά, το ποσοστό επέμβασης μας σε καθεμιά από αυτές μπορεί να είναι και ενιαίο, θεωρώντας ότι όλες οι μεταβλητές ελέγχου υφίστανται το ίδιο ποσοστό μείωσης, δηλαδή $\eta := \eta_j$ για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$.

Μια σημαντική παρατήρηση στο σημείο αυτό είναι ότι ενδεχομένως, η εφαρμογή μονάχα του δευτέρου βήματος των ελέγχων και γενικευμένων κυρώσεων προσέγγισης θα μπορούσε να επιλύσει το πρόβλημα της απειλητικής προσέγγισης της υφάλμυρης σφήνας σε μία ή περισσότερες γεωτρήσεις του υδροφορέα. Πρόκειται όμως για ένα ιδιαίτερα ισχυρό μέτρο, αφού ενδέχεται λόγου χάρη, για την προστασία μονάχα μιας γεώτρησης να επεμβαίνουμε δυναμικά στις τιμές όλων των αντλήσεων του υδροφορέα. Η κίνηση όμως αυτή εκ μέρους μας κρίνεται ως ιδιαίτερα επεμβατική στις προτεινόμενες από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης αντλήσεις. Δηλαδή, ενώ από τη μια μεριά ζητάμε από τον ALOPEX να προτείνει διαρκώς αυξανόμενες τιμές αντλήσεων, από την άλλη δραστηκά μειώνουμε τις τιμές αυτές σε κάθε βήμα του αλγορίθμου. Την απαιτούμενη λοιπόν ευαισθησία στη διαδικασία κυρώσεων προσέγγισης παρέχει το πρώτο και κατά συνέπεια απαραίτητο βήμα των τοπικών κυρώσεων. Αρχικά γίνεται μια προσπάθεια δηλαδή διόρθωσης του προβλήματος τοπικά και στη συνέχεια αν δεν επιτευχθεί η διόρθωση που ζητάμε, προχωράμε σε μια γενικευμένη και πιο δραστηκή μείωση των αντλήσεων.

Στο Σχήμα 5.3 παρουσιάζουμε το διάγραμμα ροής των κινήσεών μας κατά τη διάρκεια των ελέγχων και εφαρμογής των κυρώσεων προσέγγισης για τις τιμές αντλήσεων όλων των γεωτρήσεων του υδροφορέα.

5.1.3 Κυρώσεις ελέγχου δυναμικού ροής στις ενεργές περιοχές άντλησης

Μια εξίσου απλή αλλά αποτελεσματική διαδικασία κυρώσεων ελέγχου στις πραγματοποιούμενες αντλήσεις ακολουθείται στην περίπτωση παραβίασης του περιορισμού της θετικής τιμής του δυναμικού ροής, όπως το ορίσαμε προηγουμένως στο Κεφάλαιο 2.4.3. Πιο συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης έχει ολοκληρώσει όλους τους προηγούμενους ελέγχους αξιολόγησης της τελευταίας προτεινόμενης τιμής άντλησης για μια συγκεκριμένη γεώτρηση, γίνεται ο έλεγχος της τιμής του δυναμικού ροής σε καθεμία από τις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων. Εάν διαπιστωθεί λοιπόν ότι σε κάποια επανάληψη k , σε μία ή περισσότερες από τις θέσεις αυτές η τιμή του δυναμικού μηδενίζεται είτε γίνεται αρνητική, δηλαδή

$\phi(x_j, y_j) \leq 0$, για κάποιο $j \in \{1, \dots, M\}$, τότε εφαρμόζεται απευθείας η κύρωση ελέγχου:

$$Q_j^{(k)} = (1 - \xi_j)Q_j^{(k)}, \quad (5.9)$$

με $\xi_j \in (0, 1)$, στις αντλήσεις των γεωτρήσεων που παραβιάζουν τον περιορισμό που αναφέραμε παραπάνω. Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό, ότι χρησιμοποιώντας τις συντεταγμένες μιας οποιαδήποτε θέσεως ενεργούς γεώτρησης στο εσωτερικό της συνάρτησης (6.1), οδηγούμαστε σε μη αποδεκτούς απειρισμούς. Έτσι, με στόχο την αποφυγή αυτών, ο έλεγχος της τιμής του δυναμικού πραγματοποιείται οριακά κοντά στην ακριβή θέση της ίδιας της γεώτρησης, θεωρώντας δηλαδή μια μικρή απόσταση ασφαλείας $d_\phi > 0$ από αυτής. Έτσι, ορίζουμε τη μεταβλητή:

$$\tilde{x}_j := x_j - d_\phi, \quad (5.10)$$

όπου η τιμή της d_ϕ αντιστοιχεί συνήθως σε απόσταση μερικών μέτρων. Η πλήρης παρουσίαση του φαινομένου αυτού καθώς και η μεθοδολογία που χρησιμοποιούμε για την αντιμετώπισή του, παρουσιάζονται αναλυτικά στη συνέχεια στις ενότητες 6.2.2 και 6.2.3.

Να σημειώσουμε τέλος, ότι όπως και στην περίπτωση των προηγούμενων κυρώσεων ελέγχου, μπορούμε να επιλέξουμε την ομοιόμορφη εφαρμογή της παρούσας κύρωσης για όλες τις γεωτρήσεις του υδροφορέα, δηλαδή να ισχύει ότι $\xi := \xi_j$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$.

5.2 Οι συμμετέχοντες όροι στην επαναληπτική διαδικασία ALOPEX

Σε κάθε επαναληπτικό βήμα του αλγορίθμου στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο ότι η κατασκευή της νέας τιμής της μεταβλητής ελέγχου $Q_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$ πραγματοποιείται μέσω της συμμετοχής της τιμής της μεταβλητής ελέγχου στο προηγούμενο βήμα και δύο συμπληρωματικών όρων. Ο ένας είναι ο όρος μνήμης $c^{(k)} [P^{(k-1)} - P^{(k-2)}] [Q_j^{(k-1)} - Q_j^{(k-2)}]$ και ο άλλος είναι ο όρος θορύβου $g_j^{(k)}$, μέσω του οποίου όπως είπαμε η διαδικασία καθίσταται στοχαστική. Για δεδομένες τιμές των μεταβλητών ελέγχου στις δυο πρώτες επαναλήψεις, δηλαδή $Q_j^{(1)}$ και $Q_j^{(2)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$ γνωστές, ισχύει σε κάθε επόμενη

επανάληψη η παρακάτω σχέση:

$$Q_j^{(k)} = Q_j^{(k-1)} + c^{(k)} [P^{(k-1)} - P^{(k-2)}] [Q_j^{(k-1)} - Q_j^{(k-2)}] + g_j^{(k)} \quad (5.11)$$

για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$ και $k > 2$.

Αξιίζει στο σημείο αυτό να παρουσιάσουμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια τη συμπεριφορά αυτών των όρων.

5.2.1 Ο παράγοντας μνήμης κατά την επαναληπτική διαδικασία ALOPEX V

Ο παράγοντας μνήμης $c^{(k)} [P^{(k-1)} - P^{(k-2)}] [Q_j^{(k-1)} - Q_j^{(k-2)}]$ συνίσταται από το γινόμενο τριών επιμέρους όρων. Αυτοί είναι οι εξής:

- ο συντελεστής μνήμης $c^{(k)}$,
- η διαφορά των τιμών της μεταβλητής ελέγχου Q_j στις προηγούμενες δύο επαναλήψεις, δηλαδή $[Q_j^{(k-1)} - Q_j^{(k-2)}]$ και
- η διαφορά των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης P επίσης στις προηγούμενες δύο επαναλήψεις, δηλαδή $[P^{(k-1)} - P^{(k-2)}]$.

Όσον αφορά τις διαφορές των τιμών των αντλήσεων σε προηγούμενες επαναλήψεις και τις διαφορές των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης στις ίδιες επαναλήψεις χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές, η διαδικασία είναι δεν απαιτεί κάποια ιδιαίτερη αποσαφήνιση ή ερμηνεία. Η τιμή όμως της παραμέτρου $c^{(k)}$ χρήζει ιδιαίτερης σημασίας και πρέπει να την παρουσιάσουμε αναλυτικά.

Θεωρώντας δεδομένες τις τιμές των διαφορών των τιμών των αντλήσεων και της αντικειμενικής συνάρτησης, δεν θα ήταν λανθασμένο να θεωρήσουμε ότι το πλάτος του παράγοντα μνήμης συνολικά καθορίζεται από τον όρο $c^{(k)}$. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του ALOPEX είναι η απλότητά της κατασκευής του και το συνεπαγόμενο μικρό κόστος υπολογισμών. Οπότε, με στόχο τη διατήρηση των χαρακτηριστικών αυτών, χρησιμοποιούμε την επόμενη μεθοδολογία για τον καθορισμό της τιμής του όρου $c^{(k)}$.

Κατ' αρχάς η επαναληπτική εξίσωση του ALOPEX χωρίς τον όρο θορύβου έχει ως εξής:

$$Q_j^{(k)} = Q_j^{(k-1)} + c^{(k)} [P^{(k-1)} - P^{(k-2)}] [Q_j^{(k-1)} - Q_j^{(k-2)}] \quad (5.12)$$

για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$ και $k > 2$.

Χρησιμοποιώντας αθροίσματα όρων στην τελευταία βλέπουμε ότι:

$$S(Q_j^{(k)}) = S(Q_j^{(k-1)}) + c^{(k)} [P^{(k-1)} - P^{(k-2)}] [S(Q_j^{(k-1)}) - S(Q_j^{(k-2)})] \quad (5.13)$$

όπου $S(Q_j^{(k)}) = \sum_{j=1}^M Q_j^{(k)}$.

Όπως παρουσιάσαμε προηγουμένως στη σχέση (3.13) του κεφαλαίου 3.3.2, η αντικειμενική συνάρτηση είναι αύξουσα συνάρτηση του συνολικού όγκου αντλήσεων στην αντίστοιχη επανάληψη, όταν ο συνολικό όγκος αντλήσεων δεν υπερβαίνει το συνολικό μέγιστο δυνατό που μπορεί να αντληθεί από κάθε ενεργή γεώτρηση. Είναι σαφές λοιπόν ότι:

- η αύξηση του συνολικού όγκου αντλήσεων στις προηγούμενες δύο επαναλήψεις ισοδυναμεί με ταυτόχρονη αύξηση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης στις ίδιες επαναλήψεις. Δηλαδή τα πρόσημα των διαφορών $S(Q_j^{(k-1)}) - S(Q_j^{(k-2)})$ και $P^{(k-1)} - P^{(k-2)}$ είναι ταυτόχρονα θετικά.
- η μείωση αντίστοιχα του συνολικού όγκου αντλήσεων στις προηγούμενες δύο επαναλήψεις ισοδυναμεί με ταυτόχρονη μείωση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης στις ίδιες επαναλήψεις. Δηλαδή τα πρόσημα των διαφορών $S(Q_j^{(k-1)}) - S(Q_j^{(k-2)})$ και $P^{(k-1)} - P^{(k-2)}$ είναι πλέον ταυτόχρονα αρνητικά.

Σε κάθε περίπτωση δηλαδή ισχύει ότι:

$$[P^{(k-1)} - P^{(k-2)}] [S(Q_j^{(k-1)}) - S(Q_j^{(k-2)})] > 0 \quad (5.14)$$

με συνέπεια η σχέση (5.13) να μπορεί χωρίς βλάβη της γενικότητας να γραφεί ως εξής:

$$S(Q_j^{(k)}) = S(Q_j^{(k-1)}) + c^{(k)} |P^{(k-1)} - P^{(k-2)}| |S(Q_j^{(k-1)}) - S(Q_j^{(k-2)})|. \quad (5.15)$$

Επομένως είναι προφανές ότι το πρόσημο της τιμής του όρου $c^{(k)}$ καθορίζει το πρόσημο της διαφοράς $S(Q_j^{(k)}) - S(Q_j^{(k-1)})$. Δηλαδή:

$$c^{(k)} \geq 0 \Rightarrow S(Q_j^{(k)}) \geq S(Q_j^{(k-1)}). \quad (5.16)$$

χωρίς φυσικά τον υπολογισμό της τιμής του παράγοντα θορύβου. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι κανονικοποιημένη στη συγκεκριμένη έκδοση του ALOPEX που χρησιμοποιούμε, η επιλογή της τιμής του όρου $c^{(k)}$ ως εξής:

$$c^{(k)} = \frac{1}{|P^{(k-1)} - P^{(k-2)}|} \geq 1 \quad (5.17)$$

επιτρέπει στον παράγοντα μνήμης να συνδυάζεται αποτελεσματικά με τον παράγοντα θορύβου. Έτσι η διαδικασία περιέχει δύο κατάλληλα ισορροπημένους παράγοντες, όπου εξαιτίας ακριβώς της ισορροπίας αυτής η μέθοδος βελτιστοποίησης δεν ανάγεται ποτέ σε μια απλή διαδικασία τυχαίου περιπάτου.

5.2.2 Ο παράγοντας θορύβου κατά την επαναληπτική διαδικασία ALOPEX V

Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η συνεισφορά του παράγοντα θορύβου (noise factor) κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας είναι εξαιρετικά σημαντική, διότι επηρεάζει σε μέγιστο βαθμό τις παραγόμενες από τον αλγόριθμο λύσεις. Στο σημείο αυτό λοιπόν, περιγράφουμε τις δύο διαφορετικές στρατηγικές που μπορούμε να ακολουθήσουμε σε αυτό το τμήμα της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Οι διάφορες εκδόσεις του ALOPEX που εμπεριέχουν τον παράγοντα του θορύβου στο εσωτερικό τους και συναντώνται στη βιβλιογραφία, συνδυάζονται με μια *στρατηγική* εφαρμογής θορύβου *ομοιόμορφου πλάτους*. Έτσι, όλες οι μεταβλητές ελέγχου της διαδικασίας, στην περίπτωση μας οι τιμές των αντλήσεων $Q_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$ στην k -οστή επανάληψη, τροποποιούνται με την επέμβαση του παράγοντα θορύβου $g_j^{(k)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, κατά ένα ποσοστό εξαρτώμενο μονάχα από τη σταθερή συνολικά μέγιστη τιμή άντλησης της κάθε γεώτρησης. Ισχύει δηλαδή ότι:

$$g_j^{(k)} = \gamma_j \overline{Q_j} \mathcal{X}_j^{(k)}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (5.18)$$

όπου $\gamma_j \in (0, 1)$ είναι το οριζόμενο ποσοστό της μέγιστης δυνατής άντλησης $\overline{Q_j}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, της j -οστής ενεργούς γεώτρησης, ενώ $\mathcal{X}_j^{(k)}$ μια τυχαία μεταβλητή με τιμές ομοιόμορφα κατανοημένες στο διάστημα $(-0.5, 1)$. Αναλύοντας τη σχέση (5.18) θα λέγαμε

ότι σε κάθε επαναληπτικό βήμα ο παράγοντας θορύβου επεμβαίνει στην κατασκευή μιας νέας τιμής για τη μεταβλητή ελέγχου $Q_j^{(k)}$ κατά ένα ποσοστό ενός σταθερού και προκαθορισμένου μεγέθους \overline{Q}_j , με πιθανότητα θετικού προσήμου ίση με $2/3$ και αντίστοιχα αρνητικού ίση με $1/3$. Στατιστικά αυτό σημαίνει ότι σε κάθε 3 επαναληπτικά βήματα του αλγορίθμου ο παράγοντας αυτός προσφέρει διαταραχή προσθέτοντας θετική ποσότητα θορύβου σε δύο βήματα και αρνητική ποσότητα θορύβου σε ένα βήμα. Έτσι, δημιουργείται η τάση να προτείνονται διαρκώς αυξανόμενες τιμές για τις μεταβλητές ελέγχου, με συχνές όμως αρνητικές διαταραχές, που υποχρεώνουν τον αλγόριθμο να ελέγχει μήπως προσπέρασε χωρίς να μελετήσει κάποια βέλτιστη πιθανή λύση.

Κατά τη διάρκεια ωστόσο των αριθμητικών εφαρμογών που παρουσιάζονται σε αυτήν την εργασία, παρεκκλίνοντας από τη διαδεδομένη στη βιβλιογραφία διαδικασία που μόλις περιγράψαμε, εφαρμόζουμε μια εναλλακτική μεθοδολογία εφαρμογής του παράγοντα θορύβου. Πρόκειται για τη στρατηγική του λεγόμενου αποσβενόμενου θορύβου (annealing noise strategy) που παρουσιάζουμε στη συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγουμε το πλάτος του εφαρμοζόμενου θορύβου $g_j^{(k)}$ να είναι σε κάθε βήμα όχι πλέον σταθερό, αλλά μεταβαλλόμενο ανάλογα με τη συμπεριφορά των μεταβλητών ελέγχου του αλγορίθμου σε προηγούμενες επαναλήψεις. Ισχύει λοιπόν ότι:

$$g_j^{(k)} = \gamma_j Q_j^{(k-1)} \mathcal{X}_j^{(k)}, \quad j \in \{1, \dots, M\}, \quad (5.19)$$

όπου $\gamma_j \in (0, 1)$ είναι το οριζόμενο ποσοστό της τιμής άντλησης $Q_j^{(k-1)}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, της j -οστής ενεργούς γεώτρησης στο προηγούμενο επαναληπτικό βήμα, ενώ $\mathcal{X}_j^{(k)}$ μια τυχαία μεταβλητή με τιμές ομοιόμορφα κατανομημένες στο διάστημα $(-0.5, 1)$. Ο ρόλος των παραμέτρων γ_j και $\mathcal{X}_j^{(k)}$ παραμένει όμοιος με αυτόν που περιγράψαμε προηγουμένως.

Σύμφωνα με τη σχέση (5.19) είναι σαφές ότι το πλάτος του παράγοντα θορύβου δεν είναι πλέον σταθερό σε κάθε βήμα της διαδικασίας. Αντίθετα, λαμβάνεται υπόψη η τιμή της μεταβλητής ελέγχου στο αμέσως προηγούμενο βήμα, δημιουργώντας έτσι την αίσθηση μιας διαδικασίας μνήμης. Μάλιστα, αξίζει να παρατηρήσουμε ότι το πλάτος του θορύβου σε κάθε βήμα αποτελεί πλέον αύξουσα συνάρτηση των τιμών των αντλήσεων για κάθε γεώτρηση του υδροφορέα. Δηλαδή, όσο αυξάνουν οι τιμές των αντλήσεων σε μια ενεργή γεώτρηση, τόσο αυξάνει και το πλάτος του εφαρμοζόμενου θορύβου. Ανάλογα, η ενδεχόμενη μείωση των

τιμών των αντλήσεων από βήμα σε βήμα αντιστοιχεί σε μείωση του πλάτους του θορύβου που εφαρμόζεται σε αυτές. Κατά συνέπεια, η διαδικασία αυτή παρουσιάζει και το ακόλουθο χαρακτηριστικό. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι αντλήσεις σε μια ενεργή γεώτρηση, από κάποιο επαναληπτικό βήμα και μετά, εμφανίζουν την τάση διατήρησης των τιμών τους σε κάποια περιοχή γειτονικών τιμών. Τότε, ο παράγοντας θορύβου προσδίδει διαταραχή στην επαναληπτική διαδικασία, με πλάτος που επίσης παρουσιάζει εικόνα σύγκλισης σε κάποια περιοχή τιμών του αντίστοιχα.

5.3 Κριτήριο ολοκλήρωσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Η διαδικασία βελτιστοποίησης που παρουσιάζουμε στην παρούσα εργασία περιέχει ως ένα από τα δομικά της στοιχεία την έννοια του θορύβου. Πρόκειται για τον απαραίτητο θόρυβο που παρουσιάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, μέσω του οποίου μικρές διακυμάνσεις στη διαδικασία εύρεσης νέων αντλήσεων σε κάθε επαναληπτικό βήμα πετυχαίνουν τον απεγκλωβισμό του ALOPEX από περιοχές τιμών που αντιστοιχούν σε τοπικά μονάχα ακρότατα. Πρόκειται επομένως για μία στοχαστική διαδικασία, όπου είναι απαραίτητο να ορισθούν οι κατάλληλες συνθήκες που οριοθετούν την επιτυχή ολοκλήρωση της διαδικασίας. Αναφερόμαστε προφανώς σε κριτήρια διαπίστωσης της σύγκλισης της διαδικασίας βελτιστοποίησης σε ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων.

Με στόχο λοιπόν τη δημιουργία ενός αποτελεσματικού κριτηρίου ολοκλήρωσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης, χρησιμοποιούμε έναν συνδυασμό της τυπικής απόκλισης σ_Λ των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης στις τελευταίες Λ επαναλήψεις (όπου το Λ επιλέγεται να είναι σχετικά μικρός θετικός ακέραιος) και της διαφοράς των μέσων τιμών μ_Λ της αντικειμενικής συνάρτησης στο διάστημα των τελευταίων 2Λ επαναλήψεων. Πιο αναλυτικά βλέπουμε ότι:

$$\mu_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=k-\Lambda}^k P(\mathbf{Q}^{(i)}) \quad (5.20)$$

είναι η μέση τιμή των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης $P = P(\mathbf{Q})$ στις τελευταίες Λ

επαναλήψεις, με τρέχουσα επανάληψη την k -οστή και $k - 2\Lambda > 0$, ενώ αντίστοιχα:

$$\mu_{2\Lambda} = \frac{1}{\Lambda} \sum_{i=k-2\Lambda}^{k-\Lambda} P(\mathbf{Q}^{(i)}) \quad (5.21)$$

είναι η μέση τιμή των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης $P = P(\mathbf{Q})$ στις προτελευταίες Λ επαναλήψεις, με τρέχουσα πάντοτε επανάληψη την k -οστή και $k - 2\Lambda > 0$.

Επίσης

$$\sigma_{\Lambda} = \sqrt{\frac{1}{\Lambda} \sum_{i=k-\Lambda}^k (P(\mathbf{Q}^{(i)}) - \mu_{\Lambda})^2} \quad (5.22)$$

είναι η τυπική απόκλιση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης $P = P(\mathbf{Q})$ στις τελευταίες Λ επαναλήψεις, με τρέχουσα επανάληψη την k -οστή, με $k - 2\Lambda > 0$.

Τότε, η πραγματοποίηση του παρακάτω κριτηρίου:

$$(|\mu_{\Lambda} - \mu_{2\Lambda}| < \epsilon_1) \wedge (\sigma_{\Lambda} < \epsilon_2) \quad (5.23)$$

για σχετικά μικρές ανοχές $\epsilon_1 > 0$ και $\epsilon_2 > 0$, θεωρώντας επίσης ότι όλοι οι περιορισμοί που παρουσιάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια ικανοποιούνται, τερματίζει τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Αν στο σημείο αυτό θα έπρεπε να παρουσιάσουμε ένα σχόλιο σχετικά με την επιλογή του συγκεκριμένου κριτηρίου ολοκλήρωσης της διαδικασίας, θα λέγαμε ότι η ύπαρξη του παράγοντα του θορύβου σε κάθε επανάληψη του ALOPEX καθιστά αδύνατη τη σύγκλιση της διαδικασίας σε ένα μοναδικό σύνολο βέλτιστων λύσεων. Αντίθετα, κατασκευάζονται και προτείνονται από τον ALOPEX άπειρες, αλλά ισοδύναμες ως προς το συνολικό όγκο αντλούμενου νερού, βέλτιστες λύσεις. Οπότε, το κριτήριο που μόλις περιγράψαμε παραπάνω εφαρμόζει την εξής ισχυρισμό. Θεωρούμε ότι ο αλγόριθμος βρίσκεται σε καθεστώς σύγκλισης και οι περαιτέρω λύσεις του δεν πρόκειται να διαφέρουν ουσιαστικά από τις προηγούμενες, όταν για κάποιο αξιοσημείο πλήθος επαναλήψεων οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης μεταβάλλονται σε μικρό βαθμό. Αυτός δε ο μικρός βαθμός μεταβολής εξασφαλίζεται από την ταυτόχρονη ισχύ των δύο επιμέρους ανισώσεων που παρουσιάζουμε στη σχέση (5.23). Πιο συγκεκριμένα, απαιτούμε η διαφορά της μέσης τιμής των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης των τελευταίων Λ επαναλήψεων να μην διαφέρει σημαντικά από την

αντίστοιχη των προηγούμενων επίσης Λ επαναλήψεων. Έτσι, είναι κατανοητό ότι βρισκόμαστε σε κάποια επανάληψη όπου για το πλήθος των 2Λ τελευταίων επαναλήψεων, η διαδικασία βελτιστοποίησης οδηγείται σε λύσεις, όπου η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στην οποία αντιστοιχούν δεν μεταβάλλεται σημαντικά. Όμως, η μέση τιμή είναι στατιστικό μέτρο που μπορεί να επηρεαστεί λανθασμένα από ακραίες οριακές τιμές των μεταβλητών που μελετάει. Έτσι, συμπληρωματικά απαιτούμε και το στατιστικό μέτρο της απόκλισης των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης των τελευταίων Λ επαναλήψεων να είναι ιδιαίτερα μικρό, να μην απομακρύνονται δηλαδή οι τιμές της από τη μέση τιμή που υπολογίσαμε προηγουμένως στο ίδιο πλήθος επαναλήψεων. Στην περίπτωση αυτή εξασφαλίζουμε ότι το γράφημα της αντικειμενικής συνάρτησης βρίσκεται πλέον σε ένα μονοπάτι όπου όλες οι επόμενες τιμές του δεν πρόκειται να μεταβληθούν σημαντικά. Αυτή είναι η έννοια της σύγκλισης υπό την οποία δεχόμαστε την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

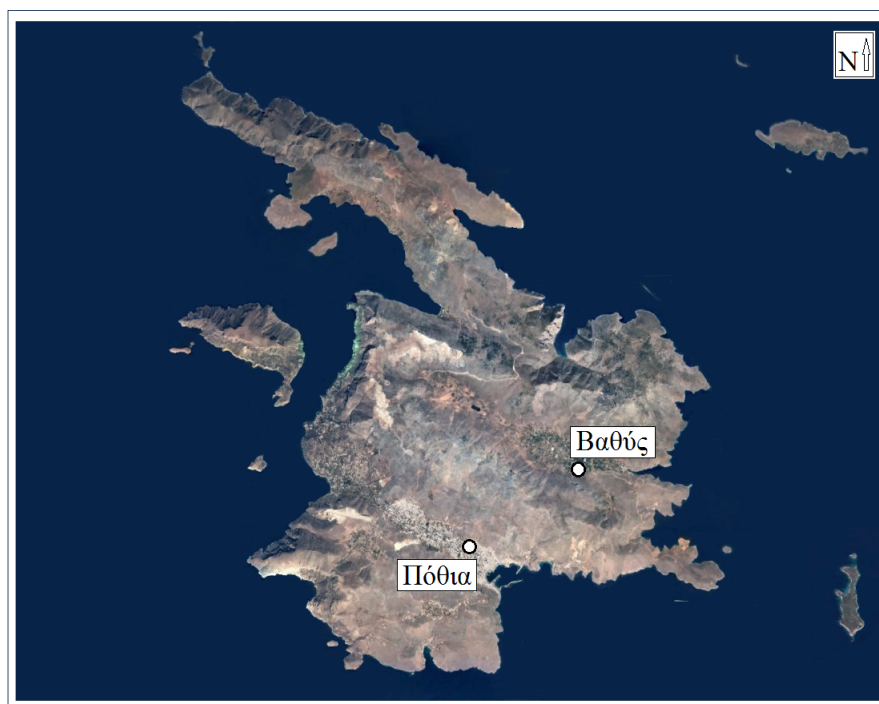
Κεφάλαιο 6

Ο παράκτιος υδροφορέας γλυκού νερού στην περιοχή Βαθύ Καλύμνου

Σε συνέχεια της αναλυτικής περιγραφής της διαδικασίας βελτιστοποίησης που παρουσιάσαμε προηγουμένως, εξετάζουμε στο παρόν κεφάλαιο τη ρεαλιστική εφαρμογή της σε πραγματικούς παράκτιους υδροφορείς γλυκού νερού. Ο στόχος μας είναι διπλός. Πρώτο μας μέλημα είναι ο σαφής καθορισμός και ταυτόχρονα έλεγχος των επιμέρους παραμέτρων της προτεινόμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης του *διαχειριστικού πλάνου αντλήσεων* στο εσωτερικό ενός παράκτιου υδροφορέα. Έπειτα, υπό τη συνθήκη ότι η εφαρμοζόμενη μαθηματική μοντελοποίηση των υδραυλικών χαρακτηριστικών του τον καθιστά αντιπροσωπευτικό υποψήφιο για την κατασκευή ενός πλάνου διαχείρισης των αντλήσεων στο εσωτερικό του, εστιάζουμε την προσπάθειά μας στη δημιουργία ενός πλάνου βελτιστοποιημένης και ταυτόχρονα ασφαλούς διαχείρισης των αντλήσεων αυτών. Υπενθυμίζουμε ότι ένα διαχειριστικό πλάνο αντλήσεων χαρακτηρίζεται ως *βέλτιστο* όταν μέσω αυτού επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή άντληση γλυκού νερού από τις γεωτρήσεις του υδροφορέα, ενώ αντίστοιχα χαρακτηρίζεται ως *ασφαλές* όταν προστατεύει τις γεωτρήσεις αυτές από το φαινόμενο της υφαλμύρισης.

Επιλέγουμε να μελετήσουμε το πρόβλημα βελτιστοποίησης του διαχειριστικού πλάνου αντλήσεων σε έναν παράκτιο υδροφορέα ενός ελληνικού νησιού του Αιγαίου πελάγους, όπου τα γεωλογικά και υδραυλικά του χαρακτηριστικά τον καθιστούν ιδανικό εκπρόσωπο για τη συγκεκριμένη μελέτη. Αντιμετωπίζουμε δε τον υδροφορέα αυτό ως έναν *ρεαλιστικό* αλλά ταυτόχρονα και *εξιδακτευμένο* υδροφορέα, όπως θα εξηγήσουμε αναλυτικά στη συνέχεια, έχοντας έτσι τη δυνατότητα να ρυθμίσουμε τις παραμέτρους της προτεινόμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης και να ελέγξουμε την αποτελεσματικότητά της.

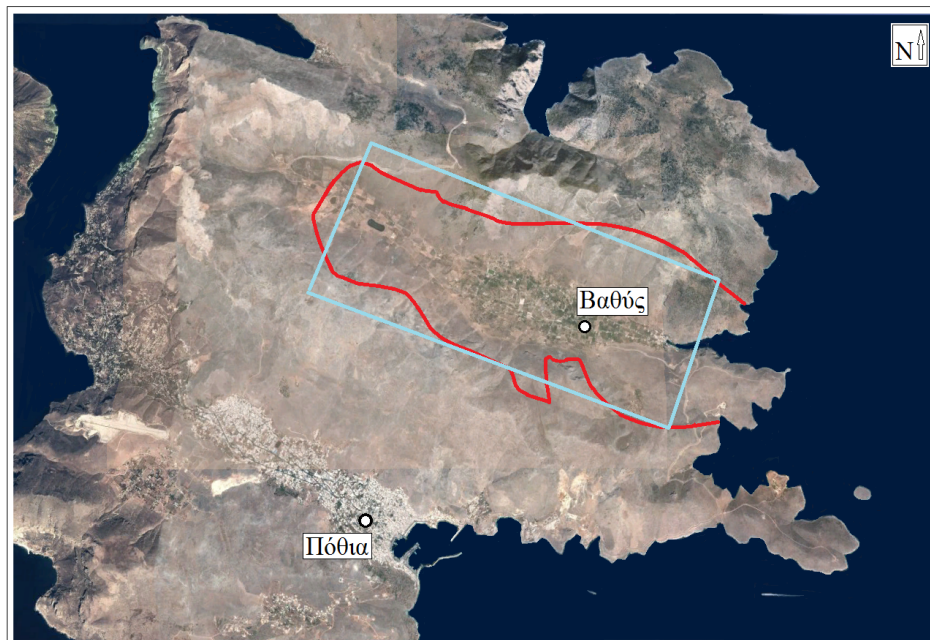
Ο υδροφορέας τον οποίο επιλέγουμε ως πρωταγωνιστή στη συγκεκριμένη ενότητα, στον οποίο και θα εφαρμόσουμε τη διαδικασία βελτιστοποίησης στο διαχειριστικό πλάνο των αντλήσεων του, είναι ο παράκτιος υδροφορέας γλυκού νερού στην περιοχή Βαθύ στο ελληνικό νησί της Καλύμνου (Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1: Το ελληνικό νησί της Καλύμνου στο νοτιοανατολικό Αιγαίο και η περιοχή Βαθύς στο ανατολικό τμήμα αυτού (Google map).

Η Κάλυμνος υπάγεται στον Δήμο Καλυμνίων του Νομού Δωδεκανήσου στην Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου, σύμφωνα με τη διοικητική διαίρεση της Ελλάδας όπως αυτή διαμορφώθηκε με το Πρόγραμμα Καλλικράτης. Η Κάλυμνος με έκταση 111.58 km^2 είναι το 26ο μεγαλύτερο ελληνικό νησί με πληθυσμό 16,179 άτομα, σύμφωνα με την απογραφή του 2011 (Ιστότοποι <https://en.wikipedia.org/wiki/Kalymnos> [77] και <https://kalymnos.gov.gr> [78]). Όσον αφορά την περιοχή του υδροφορέα, το Βαθύ ή ο Βαθύς, είναι ένα χωριό κτισμένο σε μια εύφορη κοιλάδα στην ανατολική πλευρά του νησιού και σε απόσταση 12 km βορειοανατολικά από την πρωτεύουσα του νησιού Πόθια. Η περιοχή διαθέτει ένα μικρό λιμάνι, τη Ρίνα, σε ένα στενό όρμο με ψηλά κι απότομα βράχια περιμετρικά του.

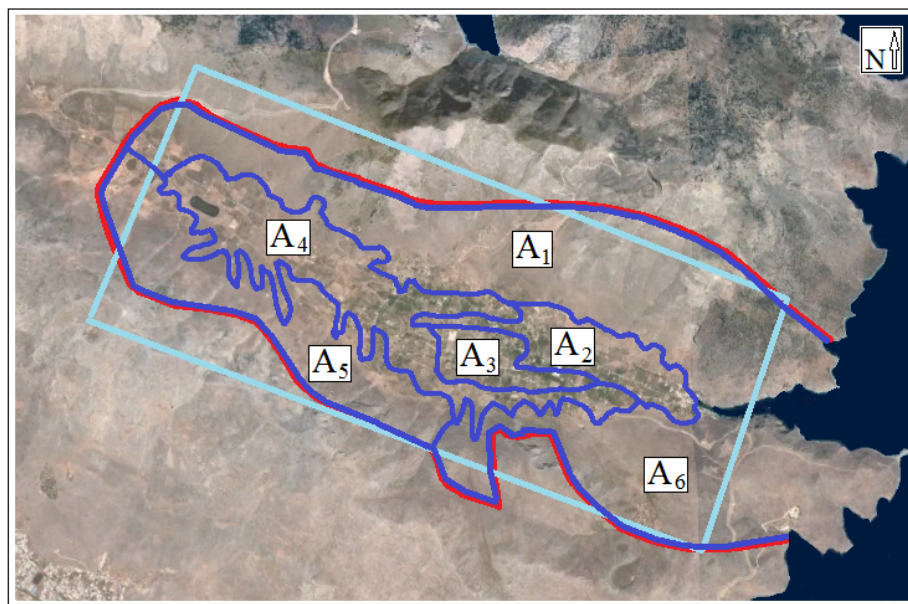
6.1 Υδραυλικά χαρακτηριστικά και περιγραφή του υδροφορέα



Σχήμα 6.2: Κάτοψη πραγματικής γεωμετρίας (κόκκινη τεθλασμένη καμπύλη) και ορθογώνιας προσέγγισης αυτής (γαλάζιο ορθογώνιο παραλληλόγραμμο) του υδροφορέα της περιοχής Βαθύς στο ελληνικό νησί της Καλύμνου (Google map).

Ο υδροφορέας υπό μελέτη είναι ένας καρστικός (φρεατικός) και ελεύθερος υδροφορέας, όπου η κάτοψη της πραγματικής του γεωμετρίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.2 με κόκκινη τεθλασμένη γραμμή. Στη βιβλιογραφία, στις εργασίες του Γ. Κουράκου [66] καθώς και των Α. Μαντόγλου, Μ. Παπαντωνίου και Π. Γιαννουλόπουλου [38], συναντάμε για τον υδροφορέα αυτό πληροφορίες σχετικές με τα υδραυλικά του χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται λεπτομέρειες σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων της υδραυλικής αγωγιμότητας και της επιφανειακής ανατροφοδότησης σε διαφορετικές περιοχές στο εσωτερικό του. Παρατηρούμε λοιπόν ότι στο εσωτερικό αυτού του υδροφορέα συναντάμε 4 περιοχές με διαφορετικές τιμές της παραμέτρου της υδραυλικής αγωγιμότητας K και 4 διαφορετικές περιοχές με μεταβολή στις τιμές της επιφανειακής του ανατροφοδότησης N . Συνοψίζοντας

τις πληροφορίες αυτές, συνδυάζουμε όλες τις περιοχές ενδιαφέροντος του υδροφορέα στο Σχήμα 6.3 καθώς και στον Πίνακα 6.1 που ακολουθούν.



Σχήμα 6.3: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου. Περιοχές με διαφορετικούς συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας K (m/day) και επιφανειακής ανατροφοδότησης N ($mm/year$) στο εσωτερικό του υδροφορέα (Google map).

6.1.1 Η προσέγγιση του εξιδανικευμένου υδροφορέα

Στη βιβλιογραφία ωστόσο, συναντάμε σε ορισμένες εργασίες, όπως παραδείγματος χάριν των Α. Μαντόγλου και Μ. Παπαντωνίου [36], [37], να ακολουθείται μια εναλλακτική μεθοδολογία περιγραφής του υδροφορέα αυτού. Πιο αναλυτικά, οι συγκεκριμένοι συγγραφείς επιλέγουν να προσεγγίσουν το μη-ομοιογενή παράκτιο αυτό υδροφορέα με έναν εξιδανικευμένο υδροφορέα, όπου η μεν παράμετρος της υδραυλικής αγωγιμότητας παραμένει σταθερή σε όλη την έκτασή του, η δε γεωμετρία του προσεγγίζεται από τη γεωμετρία ενός ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου διαστάσεων $7000 \times 3000 \times 25 \text{ m}$ (Σχήμα 6.2). Ο εξιδανικευμένος αυτός υδροφορέας, ομοίως με τον πραγματικό υδροφορέα της Καλύμνου, συνορεύει στο ένα άκρο του με τη θάλασσα, ενώ τα τρία άλλα σύνορά του βρίσκονται στην ενδοχώρα του νησιού. Στόχος

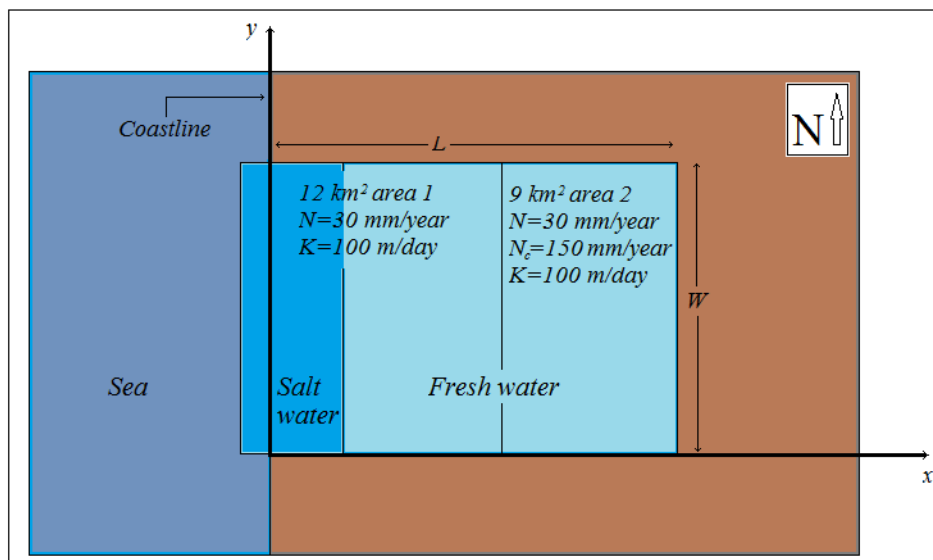
Πίνακας 6.1: Παράχτιος υδροφορέας Καλύμνου. Περιοχές με διαφορετικές τιμές στους συντελεστές της υδραυλικής αγωγιμότητας και της επιφανειακής ανατροφοδότησης στο εσωτερικό του, όπως αυτές απεικονίζονται στο Σχήμα 6.3.

Περιοχή υδροφορέα	Συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας	Συντελεστής επιφανειακής ανατροφοδότησης
A_1	$K_1 = 25.00 \text{ m/day}$	$N_1 = 150.00 \text{ mm/year}$
A_2	$K_2 = 35.00 \text{ m/day}$	$N_2 = 30.00 \text{ mm/year}$
A_3	$K_3 = 35.00 \text{ m/day}$	$N_3 = 0.00 \text{ mm/year}$
A_4	$K_4 = 35.00 \text{ m/day}$	$N_4 = 70.00 \text{ mm/year}$
A_5	$K_5 = 50.00 \text{ m/day}$	$N_5 = 150.00 \text{ mm/year}$
A_6	$K_6 = 75.00 \text{ m/day}$	$N_6 = 150.00 \text{ mm/year}$

των συγγραφέων με την επιλογή αυτής της απλοποιημένης περιγραφής του υδροφορέα, εν αντιθέσει με τη ρεαλιστικότερη μορφή του, είναι ότι έτσι καθίσταται δυνατή η μοντελοποίηση και η περιγραφή της υπόγειας ροής του γλυκού και του αλμυρού νερού στο εσωτερικό του χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του δυναμικού ροής που περιγράψαμε αναλυτικά στον Κεφάλαιο 2.4.3. Έτσι, ο υδροφορέας της Καλύμνου αντιμετωπίζεται ως ένας *εξιδανικευμένος* τύπου *III* υδροφορέας, με βασικό του πλέον χαρακτηριστικό την ομοιογένεια των υδραυλικών χαρακτηριστικών στο εσωτερικό του.

Αυτός λοιπόν είναι ο πρώτος υδροφορέας που επιλέγουμε να μελετήσουμε στην εργασία αυτή, έτσι ώστε να επιβεβαιώσουμε την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου βελτιστοποίησης του διαχειριστικού πλάνου αντλήσεων στο εσωτερικό του.

Όσον αφορά τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του ορθογώνιας γεωμετρίας εξιδανικευμένου παράχτιου υδροφορέα της Καλύμνου, χρησιμοποιούμε πληροφορίες από την εργασία του Α. Μαντόγλου [36], όπως αυτές συνοψίζονται στο Σχήμα 6.4 και στον Πίνακα 6.2. Πιο αναλυτικά σύμφωνα πάντοτε με τον Α. Μαντόγλου, η περιοχή του υδροφορέα συνολικού εμβαδού 21 km^2 μπορεί να θεωρηθεί ως η ένωση δύο μικρότερων επίσης ορθογώνιων περιοχών, περιοχές *area 1* και *area 2*, με εμβαδά 12 km^2 και 9 km^2 αντίστοιχα. Ο ρυθμός ανατροφοδότησης σε γλυκό νερό στα ανώτερα στρώματα του υδροφορέα προερχόμενος από βροχοπτώσεις, γειτονικές πηγές, ποτάμια και λίμνες, υπολογίζεται ότι είναι ίσος με $N_e = 150 \text{ mm/year}$, κατανεμημένος μονάχα στην περιοχή *area 2*, στην οποία συναντάμε κυρίως δασικές εκτάσεις. Ο συνολικός όγκος νερού που ανατροφοδοτεί τον υδροφορέα στη συγκεκριμένη περιοχή



Σχήμα 6.4: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου. Περιοχές ενιαίας τιμής υδραυλικής αγωγιμότητας και διαφορετικής επιφανειακής ανατροφοδότησης.

ισούται με $V_c = N_c A_c = 1.35 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{year}$, ορίζοντας μία οριζόντια εκροή ανά μονάδα πλάτους του υδροφορέα ίση με $q = \frac{V_c}{W} = 1.23 \text{ m}^2/\text{day}$. Επίσης, μια επιπλέον επιφανειακή ανατροφοδότηση $N = 30 \text{ mm/year}$ θεωρούμε ότι κατανέμεται ομοιόμορφα στα κατώτερα στρώματα ολόκληρου του υδροφορέα, δηλαδή και στις δυο περιοχές *area 1* και *area 2*.

Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες του εξιδανικευμένου υδροφορέα της Καλύμνου, όπως αυτός απεικονίζεται στο Σχήμα 6.4.

Χαρακτηριστικά υδροφορέα	Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων
$L = 7000 \text{ m}$	$Q_A = 10000 \text{ m}^3/\text{day}$
$W = 3000 \text{ m}$	$\bar{Q}_j = 2500 \text{ m}^3/\text{day}, \quad j \in \{1, \dots, M\}$
$d = 25 \text{ m}$	$\underline{Q}_j = 200 \text{ m}^3/\text{day}, \quad j \in \{1, \dots, M\}$
$K = 100 \text{ m/day}$	$r_c = 300 \text{ m}$
$q = 1.23 \text{ m}^2/\text{day}$	$d_s = 100 \text{ m}$
$N = 30 \text{ mm/year}$	M : πλήθος ενεργών γεωτρήσεων
$N_c = 150 \text{ mm/year}$	

Το σύνορο στη θάλασσα θεωρούμε ότι είναι σύνορο σταθερής υδραυλικής κεφαλής, ενώ τα σύνορα στο Βορρά και Νότο θεωρούνται αδιαπέρατα. Το ανατολικό σύνορο του υδροφορέα είναι διαπερατό, υπό την έννοια ότι δια μέσω αυτού είναι δυνατή η ανατροφοδότησή του από τις γειτονικές πηγές και λίμνες που περιγράψαμε προηγουμένως. Το ύψος του υδροφορέα από τον πυθμένα του έως την επιφάνεια της θάλασσας ισούται με $d = 25 \text{ m}$, ενώ η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας θεωρούμε ότι διατηρείται σταθερή σε όλη την περιοχή του υδροφορέα και ίση με $K = 100 \text{ m/day}$.

Το εξαιρετικό πλεονέκτημα που παρέχει ο χαρακτηρισμός του συγκεκριμένου υδροφορέα ως Τύπου III είναι ότι έτσι μπορούμε πλέον για τον υπολογισμό της θέσεως του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό του να χρησιμοποιούμε την παρακάτω εξίσωση του δυναμικού ροής:

$$\begin{aligned} \phi(x, y) = & \frac{q}{K}x + \frac{N}{K}x(L - \frac{x}{2}) + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^M \frac{Q_j}{4\pi K} \ln \left[\frac{a_{2i-1,j}(x) + b_{k,j}(y)}{a_{2i,j}(x) + b_{k,j}(y)} \right] + \\ & + \sum_{n=1}^2 \sum_{k=3}^6 \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^M \frac{Q_j}{4\pi K} \ln \left[\frac{a_{2i-1,j}(x) + b_{k,n,j}(y)}{a_{2i,j}(x) + b_{k,n,j}(y)} \right], \end{aligned} \quad (6.1)$$

όπου:

$$\begin{aligned} a_{1,j}(x) &:= (x - x_j)^2, & b_{1,j}(y) &:= (y - y_j)^2, \\ a_{2,j}(x) &:= (x + x_j)^2, & b_{2,j}(y) &:= (y + y_j)^2, \\ a_{3,j}(x) &:= (x - (2L - x_j))^2, & b_{3,n,j}(y) &:= (y - (2nW - y_j))^2, \\ a_{4,j}(x) &:= (x - (2L + x_j))^2, & b_{4,n,j}(y) &:= (y - (2nW + y_j))^2, \\ a_{5,j}(x) &:= (x + (2L + x_j))^2, & b_{5,n,j}(y) &:= (y + (2nW - y_j))^2, \\ a_{6,j}(x) &:= (x + (2L - x_j))^2, & b_{6,n,j}(y) &:= (y + (2nW + y_j))^2. \end{aligned}$$

Υπενθυμίζουμε ότι τα Q_j δηλώνουν ρυθμούς άντλησης (m^3/day) της j -οστής ενεργούς γεώτρησης με συντεταγμένες (x_j, y_j) , $j \in \{1, \dots, M\}$, ενώ $n = 2$ είναι το πλήθος των χρησιμοποιούμενων ανακλάσεων στον κατακόρυφο άξονα για την κατασκευή αυτής της αναλυτικής λύσεως σύμφωνα με τη μέθοδο των Εικόνων (O.D.L. Strack [46] και Α. Μαντόγλου [36]).

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή του δυναμικού ροής στον πόδα της υφάλμυρης σφήνας (Α. Μαντόγλου [36]) υπολογίζεται εύκολα από την εξίσωση:

$$\phi_\tau := \phi(x_\tau, y_\tau) = \frac{(1 + \delta)\delta}{2} d^2, \quad (6.2)$$

προκύπτει για $\delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = 0.025$ ότι $\phi_\tau = 8.0078 \text{ m}^2$. Αποκαλύπτεται έτσι η μεθοδολογία που ακολουθούμε για τον προσδιορισμό της θέσεως της υφάλμυρης σφήνας εντός του υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγοντας διαδοχικές τιμές για τη μεταβλητή $y \in [0, W]$, επιλύουμε την παρακάτω εξίσωση:

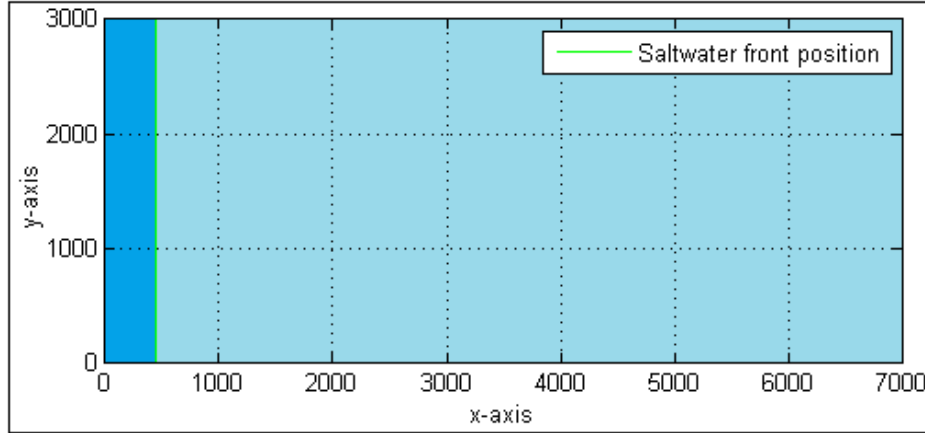
$$\phi(x, y) = \phi(x_\tau, y_\tau), \quad (6.3)$$

ως προς τη μεταβλητή $x \in [0, L]$, όταν L και W το μήκος και το πλάτος του υδροφορέα αντίστοιχα. Με την επαναλαμβανόμενη διαδικασία επίλυσεων αυτής της εξίσωσης υπολογίζονται οι συντεταγμένες κάθε σημείου (x_τ, y_τ) του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας. Είναι επομένως αντιληπτό ότι η αντιμετώπιση του συγκεκριμένου υδροφορέα ως εξιδανικευμένου τύπου III συνεπάγεται έναν ιδιαίτερα εύκολο υπολογισμό της θέσεως της κινούμενης υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του, χωρίς ιδιαίτερο υπολογιστικό κόστος το οποίο αντιστοιχεί στην επαναλαμβανόμενη επίλυση της εξίσωσης (6.3). Είναι σαφές ότι σε αντίθετη περίπτωση, εάν δηλαδή επιλέγαμε να χρησιμοποιήσουμε μια μεθοδολογία διακριτοποίησης του υδροφορέα σε συνδυασμό με μια μεθοδολογία επίλυσης διαφορικών εξισώσεων, ο υπολογιστικός φόρτος και η διάρκεια ολοκλήρωσης της διαδικασίας θα αύξανε σημαντικά.

6.1.2 Φυσική υφαλμύριση στον υδροφορέα της Καλύμνου

Η διείσδυση του υφάλμυρου νερού υπό τη μορφή σφήνας στο εσωτερικό ενός παράκτιου υδροφορέα είναι μια διαδικασία από την οποία προφανώς δεν ξεφεύγει ούτε ο υδροφορέας της Καλύμνου. Πρόκειται για φαινόμενο το οποίο παρουσιάζεται σε έναν υδροφορέα ακόμη και στις περιπτώσεις όπου στο εσωτερικό του δεν υπάρχουν τοποθετημένες γεωτρήσεις, είτε υπάρχουν θέσεις γεωτρήσεων αλλά όλες τους παραμένουν ανενεργές. Έτσι, χωρίς να πραγματοποιούνται αντλήσεις γλυκού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα, παρατηρείται η είσοδος της υφάλμυρης σφήνας εντός του σε κάποια αξιοσημείωτη απόσταση από την ακτογραμμή. Το φαινόμενο αυτό χαρακτηρίζεται ως *φυσική υφαλμύριση* του υδροφορέα και για την περίπτωση της Καλύμνου στο Σχήμα 6.5 απεικονίζεται η θέση του υφάλμυρου μετώπου.

Ο ακριβής υπολογισμός της θέσεως της υφάλμυρης σφήνας προκύπτει χρησιμοποιώντας



Σχήμα 6.5: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου. Φαινόμενο φυσικής υφαλμύρισης στο εσωτερικό του υδροφορέα όπου δεν πραγματοποιείται καμία άντληση, θεωρώντας είτε ότι όλες οι γεωτρήσεις είναι ανενεργές είτε ότι δεν υπάρχει καμία θέση γεώτρησης.

τη συνάρτηση του δυναμικού ροής $\phi = \phi(x, y)$ της εξίσωσης (6.1) και τη μεθοδολογία που παρουσιάσαμε προηγουμένως στο Κεφάλαιο 6.1.1. Ομοίως με πριν δηλαδή, επιλύουμε για διαδοχικές τιμές της μεταβλητής $y \in [0, W]$ την εξίσωση (6.3) ως προς τη μεταβλητή x , χρησιμοποιώντας όμως μηδενικές αντλήσεις για όλες τις γεωτρήσεις του υδροφορέα, δηλαδή $Q_j = 0 \text{ m}^3/\text{day}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$. Έτσι, το αποτέλεσμα της επαναλαμβανόμενης επίλυσης της παραπάνω εξίσωσης για τις διαδοχικές τιμές της συντεταγμένης y , παρουσιάζει τη μορφή ευθυγράμμου υφάλμυρου μετώπου, παράλληλο προς τη θαλάσσια ακτογραμμή (Σχήμα 6.5) σε σταθερή απόσταση 448.13 m από αυτήν.

Σημειώνουμε ότι στην περίπτωση όπου εντός του υδροφορέα δεν υπάρχουν τοποθετημένες θέσεις γεωτρήσεων, δηλαδή $M = 0$, η διαδικασία υπολογισμού της θέσεως του μετώπου φυσικής υφαλμύρισης οδηγείται ακριβώς στα ίδια αποτελέσματα.

6.1.3 Ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα

Στο εσωτερικό του υδροφορέα της Καλύμνου συναντάμε ενεργές γεωτρήσεις με διαφορετικό πλήθος και τοποθέτηση που ποικίλει, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη βιβλιογραφία. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι οι Α. Μαντόγλου και Μ. Παπαντωνίου στις εργασίες τους [36], [37] αναφέρονται σε 5 θέσεις ενεργών γεωτρήσεων, ενώ οι ίδιοι συγγραφείς σε συνεργασία με τον

Π. Γιαννουλόπουλο σε διαφορετική εργασία [38] εξετάζουν διαχειριστικά πλάνα άντλησης με 11 θέσεις ενεργών γεωτρήσεων. Οι θέσεις αυτές δεν παρουσιάζουν κάποια συσχέτιση μεταξύ τους και προφανώς έχουν προκύψει από αξιολόγηση διαφορετικών δεδομένων πεδίου σε καθεμιά από τις παραπάνω εργασίες. Στην παρούσα εργασία εξετάζουμε αναλυτικά και τις δύο αυτές τόσο διαφορετικές περιγραφές του υδροφορέα, κατασκευάζοντας ασφαλή και αποτελεσματικά διαχειριστικά πλάνα άντλησης σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο, για να μπορέσουμε να μελετήσουμε και να αξιολογήσουμε την ίδια τη διαδικασία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούμε, εξετάζουμε και ορισμένες υποθετικές περιπτώσεις με διαφορετική τοποθέτηση των ενεργών αυτών γεωτρήσεων, και με πλήθος αυτών μεταβαλλόμενο. Χαρακτηρίζουμε λοιπόν αυτές τις γεωτρήσεις ως υποθετικές, υπό την έννοια ότι εξετάζουμε υποθετικά σενάρια ύπαρξης τέτοιων γεωτρήσεων με κατάλληλο πλήθος και σε θέσεις που αναδεικνύουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά της εφαρμοζόμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης. Επίσης, με στόχο την ευκολότερη σύγκριση μεταξύ των παρουσιαζόμενων περιπτώσεων στη συνέχεια, επιλέγουμε όλες οι γεωτρήσεις αυτές να μοιράζονται τα ίδια υδραυλικά χαρακτηριστικά, όπως αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.2.

Ολοκληρώνουμε την εισαγωγική αυτή ενότητα περιγραφής του υδροφορέα με μια παράτηση στο σημείο αυτό. Ο πραγματικός υδροφορέας της Καλύμνου, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 6.2, έχει το νοτιοανατολικό του άκρο να συνορεύει με τη θάλασσα. Για λόγους μονάχα συνέπειας με τα Σχήματα που παρουσιάσαμε στα προηγούμενα Κεφάλαια, επιλέγουμε την παρουσίαση και μελέτη του αντίστοιχου εξιδανικευμένου υδροφορέα με πλέον το δυτικό του άκρο να συνορεύει με τη θάλασσα ακτογραμμή, ενώ τα άλλα τρία ορθογώνια και αδιαπέρατα σύνορά του παραμένουν σε Βορρά, Νότο και Ανατολή (Σχήμα 6.4). Οι δε θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του εξιδανικευμένου υδροφορέα, έχοντας υποστεί την απαραίτητη χωρική μετατόπιση, αντιστοιχούν πλήρως στις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων του πραγματικού υδροφορέα.

6.2 Παράμετροι ελέγχου της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Έχοντας ως στόχο την πειραματική εφαρμογή και μελέτη ενός πλήθους εναλλακτικών σεναρίων άντλησης στον παράκτιο υδροφορέα της Καλύμνου, πραγματοποιήσαμε ένα ιδιαίτερα μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων, όπου σε κάποιες μάλιστα από αυτές το πλήθος των χρησιμοποιούμενων επαναλήψεων έφτανε τις 20000. Αυτό που παρατηρήσαμε κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων αυτών, ήταν ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βελτιστοποίησης είναι ικανός να κατασκευάσει ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων σε πλήθος 60-100 επαναλήψεων κατά μέσο όρο σε κάθε περίπτωση. Κατά τη διάρκεια λοιπόν όλων των υπολοίπων επαναλήψεων που εμείς είχαμε ορίσει, ο αλγόριθμος διατηρώντας το στοχαστικό του χαρακτήρα επιδίωκε να βρει νέες ισοδύναμες βέλτιστες λύσεις, χρησιμοποιώντας μικρές διαταραχές θορύβου σε κάθε επανάληψη. Ενώ δηλαδή η σύγκλιση της διαδικασίας βελτιστοποίησης σε μια περιοχή βέλτιστων λύσεων είχε επιτευχθεί, στη συνέχεια όλοι οι επόμενοι έλεγχοι απλά επιβεβαίωναν τα αρχικά αποτελέσματα, κατασκευάζοντας ισοδύναμες λύσεις. Στην παρούσα εργασία λοιπόν επιλέγουμε να παρουσιάσουμε ορισμένες μονάχα από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε, θεωρώντας αυτές ως αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις, πλήθους 500 μονάχα επαναλήψεων. Πρόκειται δε για πλήθος επαναλήψεων τουλάχιστον 5-πλάσιο από το απαιτούμενο πλήθος σε κάθε περίπτωση για τη διαπίστωση της σύγκλισης της διαδικασίας. Χαρακτηρίζουμε αυτές τις προσομοιώσεις ως τυπικές, αφού περιέχουν όλες τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε για την αξιολόγηση κάθε περίπτωσης, ενώ ταυτόχρονα το υπολογιστικό τους κόστος δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο.

6.2.1 Οι κυρώσεις ελέγχου της επαναληπτικής διαδικασίας

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάσαμε διεξοδικά την επιλογή και τη λειτουργία των κυρώσεων ελέγχου που προτείνουμε, κατά τη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης σε έναν παράκτιο υδροφορέα, ο οποίος ικανοποιεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Στο παρόν Κεφάλαιο καλούμαστε να επιλέξουμε συγκεκριμένες τιμές για τα ποσοστά επίδρασης των κυρώσεων αυτών, έτσι ώστε να οδηγηθούμε σε βέλτιστα πλάνα διαχείρισης των αντλήσεων του υδροφορέα.

Μια πρώτη σημείωση είναι ότι η εφαρμογή των κυρώσεων αυτών επιλέγουμε να είναι ενιαία για όλες τις γεωτρήσεις του. Δηλαδή, εφαρμόζουμε το ίδιο ποσοστό κύρωσης ελέγχου σε όλες τις γεωτρήσεις του υδροφορέα, παραδείγματος χάριν για την περίπτωση που η τοπική άντληση υπερβαίνει τις μέγιστες τοπικές δυνατότητες της αντίστοιχης γεώτρησης. Ισχύει δηλαδή ότι $\lambda := \lambda_j$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$. Ομοίως, επιλέγουμε να ισχύει για την εφαρμογή και των υπολοίπων κυρώσεων ελέγχου ότι $\nu := \nu_j$, $\mu := \mu_j$, $\zeta := \zeta_j$, $\eta := \eta_j$ και $\xi := \xi_j$ για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, όπου M είναι το πλήθος των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα.

Μια δεύτερη σημείωση αφορά τις επιλεγόμενες τιμές για τις παραμέτρους αυτές. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε τη λεγόμενη *στρατηγική κυρώσεων του 5%*, η οποία μεταφράζεται σε ενιαία εφαρμογή όλων των αναγκαίων κυρώσεων ελέγχου σε κάθε γεώτρηση με σταθερό και ίδιο ποσοστό επίδρασης ίσο με 5%. Κάθε φορά δηλαδή που παραβιάζεται μία συνθήκη του προβλήματος βελτιστοποίησης, διαδοχικές κυρώσεις μεγέθους 5% η καθεμία αναλαμβάνουν να διατηρήσουν τη διαδικασία των προτεινόμενων αντλήσεων, εντός, προεπιλεγμένων από εμάς, ορίων τιμών. Έτσι, εάν παραδείγματος χάριν η τιμή άντλησης της j -οστής, $j \in \{1, \dots, M\}$, γεώτρησης του υδροφορέα υπερβαίνει σε κάποια επανάληψη την αντίστοιχη μέγιστη ονομαστική της τιμή \bar{Q}_j , τότε ο αλγόριθμος μειώνει κατά 5% τη συγκεκριμένη τιμή άντλησης. Ομοίως, διατηρείται η ίδια τακτική και στις κυρώσεις ελέγχου προσέγγισης, όταν η υφάλμυρη σφήνα πλησιάζει επικίνδυνα τη θέση μιας γεώτρησης.

Σημειώνουμε ότι η επιλογή της συγκεκριμένης στρατηγικής ενιαίων κυρώσεων του 5% δεν είναι υποχρεωτικός μονόδρομος στη διαδικασία βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούμε. Προφανώς και μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά ποσοστά επίδρασης για κάθε μία από τις κυρώσεις που χρησιμοποιούμε. Για το σκοπό αυτό απαιτείται όμως ο καθορισμός κατάλληλων συντελεστών βάρους για καθεμιά από τις χρησιμοποιούμενες κυρώσεις ελέγχου, έτσι ώστε να είναι σαφείς και προκαθορισμένες τόσο οι μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις, όσο οι επιμέρους επιδράσεις τους στην εξέλιξη της διαδικασίας. Η εργασία αυτή δύσκολα μπορεί να βασιστεί σε κάποιο θεωρητικό υπόβαθρο και μάλλον είναι ευκολότερο να προκύψει ως πειραματικό αποτέλεσμα, υποστηριζόμενο στατιστικά από ικανοποιητικό πλήθος προσομοιώσεων σε έναν υδροφορέα υπό μελέτη. Επίσης, η συγκεκριμένη εργασία της θεμελίωσης

ενός σαφούς πλαισίου τιμών επίδρασης για τις απαραίτητες κυρώσεις ελέγχου εντός της διαδικασίας βελτιστοποίησης, βρίσκεται εν εξελίξει και επιφυλασσόμαστε να την παρουσιάσουμε σε μελλοντική μας εργασία.

Πίνακας 6.3: Τιμές παραμέτρων των κυρώσεων ελέγχου κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Παράμετροι κυρώσεων ελέγχου (στρατηγική του 5%)	Τιμή
λ	0.05
ν	0.05
μ	0.05
ζ	0.05
η	0.05
ξ	0.05

Στην παρούσα εργασία ακολουθούμε την εφαρμογή ενός ενιαίου ποσοστού επίδρασης για όλες τις κυρώσεις ελέγχου, ως την απλούστερη δυνατή εφαρμοζόμενη διαδικασία. Η επιλογή δε του συγκεκριμένου ποσοστού προκύπτει έπειτα από μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων και πειραματισμούς με διαφορετικές τιμές στα εφαρμοζόμενα ποσοστά επίδρασης. Αυτό που παρατηρήσαμε λοιπόν, είναι ότι για τα δεδομένα του συγκεκριμένου υδροφορέα υπό μελέτη η επιλογή μικρότερων από 5% ποσοστών επίδρασης δεν παρείχε μεγαλύτερη ακρίβεια στην κατασκευή των βέλτιστων πλάνων άντλησης. Οι βέλτιστες λύσεις στις οποίες κατέληγε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης πρότειναν ισοδύναμες τιμές αντλήσεων για τις γεωτρήσεις του υδροφορέα με τις αντίστοιχες λύσεις ακολουθώντας τη στρατηγική του 5%. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας μικρότερα ποσοστά επίδρασης των κυρώσεων ελέγχου στις προτεινόμενες ανά επανάληψη τιμές αντλήσεων, ήταν μικρότερου μεγέθους οι διορθωτικές επεμβάσεις του αλγορίθμου, με συνέπεια σε ορισμένες περιπτώσεις να απαιτούνταν περισσότερες εφαρμογές των κυρώσεων ελέγχου, έτσι ώστε να διατηρηθεί το υφάλμυρο μέτωπο σε απόσταση ασφαλείας από τις γεωτρήσεις του υδροφορέα. Το γεγονός αυτό όμως, αύξανε τον υπολογιστικό φόρτο της διαδικασίας συνολικά. Όταν επίσης επιλέγαμε τη χρήση μεγαλύτερων ποσοστών επίδρασης των κυρώσεων ελέγχου, η διαδικασία εμφανιζόταν να μη διαθέτει την απαιτούμενη ευαισθησία, καθώς έπειτα από την εφαρμογή μεγάλων κυρώσεων μεταβαλλόταν δραματικά

η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, με συνέπεια κάποιες από τις γειτονικές και εξίσου βέλτιστες λύσεις να αγνοούνται.

Στο σημείο αυτό επιλέγουμε να εφαρμόσουμε μια στρατηγική παρουσίασης των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε, που πιθανότατα διευκολύνει τον αναγνώστη στην αποτύπωση της εικόνας του ελέγχου που περιγράφουμε. Πιο συγκεκριμένα, απλοποιούμε τρόπον τινά την ονοματολογία των κυρώσεων ελέγχου που παρουσιάσαμε παραπάνω, αντικαθιστώντας τα ονόματα των αντίστοιχων μεταβλητών με εκφράσεις που δηλώνουν πιο άμεσα τη δραστηριότητά τους εντός του κώδικα βελτιστοποίησης που εφαρμόζουμε. Χρησιμοποιούμε λοιπόν τις εκφράσεις που παρουσιάζονται εντός του Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4: Εποπτική ονοματολογία κυρώσεων ελέγχου και τιμές τους κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων στον υδροφορέα της Καλύμνου.

Κυρώσεις ελέγχου (Μαθηματική μορφή)	Τιμές κατά τις προσομοιώσεις στον υδροφορέα Καλύμνου	Κυρώσεις ελέγχου (Περιγραφική μορφή)
$1 - \lambda$	0.95	$Q_{max}^{local} \text{ penalty}$
$1 + \nu$	1.05	$Q_{min}^{local} \text{ penalty}$
$1 - \mu$	0.95	$Q_{total} \text{ penalty}$
$1 - \zeta$	0.95	$x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$
$1 - \eta$	0.95	$x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$
$1 - \xi$	0.95	$potential \text{ penalty}$

Έτσι, με την έννοια $Q_{max}^{local} \text{ penalty}$ παρουσιάζουμε επακριβώς το συντελεστή με τον οποίο πολλαπλασιάζεται η τιμή της άντλησης μια συγκεκριμένης γεώτρησης στην k -οστή επανάληψη, με στόχο τη μείωσή της όταν έχει υπερβεί την τοπική μέγιστη ονομαστική δυνατότητας άντλησης αυτής. Δηλαδή εφαρμόζουμε εντός του προγραμματιστικού κώδικα τη σχέση:

$$Q_j^{(k)} = Q_{max}^{local} \text{ penalty } Q_j^{(k)}, \quad (6.4)$$

για εκείνους τους δείκτες $j \in \{1, \dots, M\}$ για τους οποίους ισχύει ότι $Q_j^{(k)} \geq \bar{Q}_j$. Με $Q_{min}^{local} \text{ penalty}$ αντίστοιχα χαρακτηρίζουμε τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή αύξησης της τιμής μιας άντλησης, όταν αυτή έχει βρεθεί κάτω από την ελάχιστη επιτρεπόμενη δυνατή τιμή. Κατ' αναλογία ορίζουμε και το συντελεστή $Q_{total} \text{ penalty}$ για το συνολικό όγκο άντλησης

από τον υδροφορέα υπό μελέτη. Στη συνέχεια, ως $x_{movement}^{primary} penalty$ χαρακτηρίζουμε τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή μείωσης της τιμής μιας άντλησης όταν το υφάλμυρο μέτωπο την πλησιάζει επικίνδυνα, δηλαδή βρίσκεται εντός της περιοχής ασφαλείας. Επίσης, με $x_{movement}^{secondary} penalty$ χαρακτηρίζουμε το δεύτερο μέτρο χωρικής άμυνας, την επίδραση δηλαδή των κυρώσεων έλεγχου στις τιμές άντλησης των υπολοίπων γεωτρήσεων, όταν δεν μπορεί να συγκρατηθεί το υφάλμυρο μέτωπο που προελαύνει επικίνδυνα προς κάποια μετωπιαία γεώτρηση. Τέλος, με $potential penalty$ χαρακτηρίζουμε τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή μείωσης της τιμής μιας άντλησης σε μια επανάληψη, όταν η τιμή του δυναμικού ροής γίνεται αρνητική ή μηδενίζεται στη θέση της αντίστοιχης ενεργούς γεώτρησης.

6.2.2 Περιοχές ασφαλείας και θέσεις κρίσιμων σημείων στο εσωτερικό του υδροφορέα

Είναι σαφές ότι η άντληση ποσοτήτων γλυκού νερού στον υδροφορέα της Καλύμνου επιβαρύνει το πρόβλημα της φυσικής υφαλμύρισης που ήδη προϋπάρχει σε αυτόν. Το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας κινούμενο στο εσωτερικό του, προσεγγίζει απειλητικά τις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων. Έτσι, το εφαρμοζόμενο διαχειριστικό πλάνο στην προσπάθειά του να κατασκευάσει βέλτιστες λύσεις, που ισοδυναμούν φυσικά με μεγιστοποιημένες τιμές άντλήσεων, αφιερώνει ένα σημαντικό υπολογιστικό τμήμα της διαδικασίας στην επιβεβαίωση ότι οι λύσεις αυτές είναι ταυτόχρονα και ασφαλείς. Υπενθυμίζουμε ότι με τον χαρακτηρισμό τους ως ασφαλείς εννοούμε, ότι έχοντας εξασφαλίσει ότι τα μεγέθη τους δεν παραβιάζουν κάποια προκαθορισμένα όρια τοπικής και ολικής άντλησης, οι αντλήσεις αυτές δεν επιτρέπουν στο υφάλμυρο μέτωπο να πλησιάσει επικίνδυνα στις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα.

Γνωρίζουμε από τη βιβλιογραφία ότι η διαδικασία άντλησης γλυκού νερού στο εσωτερικό ενός ελεύθερου υδροφορέα έχει ως συνέπεια τη δημιουργία κώνων ανύψωσης και κατάπτωσης περιμετρικά κάθε θέσεως ενεργούς γεώτρησης (Σχήμα 1.2). Το μέγεθος δε και το ακριβές σχήμα καθενός εξ' αυτών εξαρτάται από τα τοπικά χαρακτηριστικά και τις δυνατότητες κάθε γεώτρησης, από την ποιότητα του υλικού του υπεδάφους, αλλά και από το μέγεθος του υδροφορέα. Προφανώς, μεγαλύτερες τιμές άντλησης, υπεδάφος μικρότερης σκληρότητας

και ικανοποιητικού μεγέθους υδροφορέας, αντιστοιχούν σε μεγαλύτερης ακτίνας κώνους. Εστιάζοντας τώρα την έρευνά μας στον υδροφορέα της Καλύμνου, πρέπει να σημειώσουμε ότι δεν έχουμε διαθέσιμες σχετικές πληροφορίες από προηγούμενες εργασίες ως προς τα μεγέθη των κώνων αυτών γύρω από κάθε γεώτρηση. Επομένως, μπορούμε να μελετήσουμε την επίδραση αυτού του φυσικού φαινομένου στη διαδικασία αντλήσεων μονάχα από μαθηματική σκοπιά.

Αυτό που παρατηρήσαμε κατά τη διάρκεια όλων των προσομοιώσεων ελέγχου του διαχειριστικού πλάνου αντλήσεων στον υδροφορέα της Καλύμνου, ήταν ότι καθώς ο αλγόριθμος σταδιακά αύξανε τις επιμέρους τιμές άντλησης, το υφάλμυρο μέτωπο πλησίαζε όπως αναμενόταν τις γεωτρήσεις του υδροφορέα με σχετικά σταθερό ρυθμό, μεταφραζόμενο σε μετατόπιση περίπου $30 - 50 \text{ m}$ ανά επανάληψη. Όταν όμως οι προτεινόμενες τιμές άντλησης έφεραν το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας σε απόσταση περίπου $300 - 350 \text{ m}$ από τη θέση μιας ενεργούς γεώτρησης, η κίνηση του μετώπου γινόταν βίαιη, πραγματοποιώντας άλματα στον x -άξονα ακόμη και των $1000 - 1500 \text{ m}$. Ως συνέπεια αυτού, κυρίως οι μετωπιαίες γεωτρήσεις υφίσταντο το φαινόμενο της υφαλμύρισης και το διαχειριστικό πλάνο αντλήσεων δεν μπορούσε πλέον να χαρακτηρίζεται ως ασφαλές. Αυτή λοιπόν τη δραματική αλλαγή στη συμπεριφορά της κίνησης του υφάλμυρου μετώπου καλούμαστε στο σημείο αυτό να ερμηνεύσουμε και στη συνέχεια να αντιμετωπίσουμε.

Μελετώντας τη συνάρτηση (6.1) του δυναμικού ροής $\phi = \phi(x, y)$, παρατηρούμε στο εσωτερικό της την ύπαρξη *φυσικών λογαριθμών*. Υπενθυμίζουμε ότι χρησιμοποιώντας στη συνάρτηση αυτή τις συνταγμένες $(x, y) \in [0, L] \times [0, W]$ διαφορετικών σημείων του εσωτερικού του υδροφορέα, μπορούμε να υπολογίσουμε το δυναμικό ροής στα σημεία αυτά. Ωστόσο, καθώς οι συντεταγμένες των υπό μελέτη σημείων πλησιάζουν τη θέση κάποιας ενεργούς γεώτρησης, δηλαδή τις συντεταγμένες (x_j, y_j) για κάποιο $j \in \{1, \dots, M\}$, οι αντίστοιχες τιμές των λογαριθμικών όρων μεταβάλλονται δραματικά. Στη θέση δε της κάθε ενεργούς γεώτρησης, όταν δηλαδή ισχύει $(x, y) = (x_j, y_j)$, για κάποιο $j \in \{1, \dots, M\}$, ορισμένοι από τους λογαριθμικούς όρους απειρίζονται αρνητικά. Δηλαδή, οι θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων λειτουργούν εντός του υδροφορέα σαν *καταβόθρες δυναμικού*. Επομένως, η προσέγγιση του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας στη θέση μιας ενεργούς γεώτρησης ισοδυναμεί με χρήση

συντεταγμένων εντός μιας περιοχής τιμών όπου οι λογαριθμικοί όροι εμφανίζουν ιδιαίτερη μεταβλητότητα, υπό την έννοια ότι μικρές αλλαγές στο πεδίο ορισμού τους έχουν ως συνέπεια έντονες λογαριθμικές αλλαγές στο σύνολο τιμών τους.

Έχοντας λοιπόν ως στόχο τον προσδιορισμό εκείνης της περιοχής τιμών άντλησης, που αντιστοιχεί σε ιδιαίτερα έντονες μεταβολές των διαδοχικών θέσεων της υφάλμυρης σφήνας, εστιάζουμε την προσοχή μας στις θέσεις δύο κατηγοριών κρίσιμων σημείων στο εσωτερικό του υδροφορέα. Αυτά είναι τα ακόλουθα:

- Τα *κρίσιμα σημεία* $(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$, $j \in \{1, \dots, M\}$, του υφάλμυρου μετώπου, που βρίσκονται ακριβώς απέναντι από τις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων.
- Τα *κρίσιμα σημεία* $(x_{s,j}, y_{s,j})$, $j \in \{1, \dots, M\}$, του δυναμικού ροής $\phi = \phi(x, y)$, επίσης απέναντι από τις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα.

Όσον αφορά τις θέσεις των κρίσιμων σημείων του υφάλμυρου μετώπου, αυτές υπολογίζονται από την επίλυση της εξίσωσης:

$$\phi(x, y) \Big|_{x=x_{\tau,j}, y=y_{\tau,j}} = \phi_{\tau}, \quad (6.5)$$

ως προς $x = x_{\tau,j}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, όταν ως συνάρτηση δυναμικού ροής χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση που περιγράψαμε προηγουμένως στη σχέση (6.1), απέναντι από κάθε θέση ενεργούς γεώτρησης, θέτοντας δηλαδή ότι $y_{\tau,j} = y_j$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$. Υπενθυμίζουμε ότι $\phi_{\tau} = 8.0078 \text{ m}^2$. Αντίστοιχα, οι συντεταγμένες των θέσεων των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής υπολογίζονται επιλύοντας την εξίσωση:

$$\frac{\partial \phi(x, y)}{\partial x} \Big|_{x=x_{s,j}, y=y_{s,j}} = 0, \quad (6.6)$$

ως προς $x_{s,j}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$. Σε πλήρη αναλογία με τη διαδικασία υπολογισμού των κρίσιμων σημείων του υφάλμυρου μετώπου, η παραπάνω εξίσωση διαθέτει μονάχα μία μεταβλητή προς προσδιορισμό, την $x_{s,j} \in [0, L]$, $j \in \{1, \dots, M\}$, αφού θεωρούμε την αντικατάσταση $y_{s,j} = y_j$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, στο εσωτερικό της.

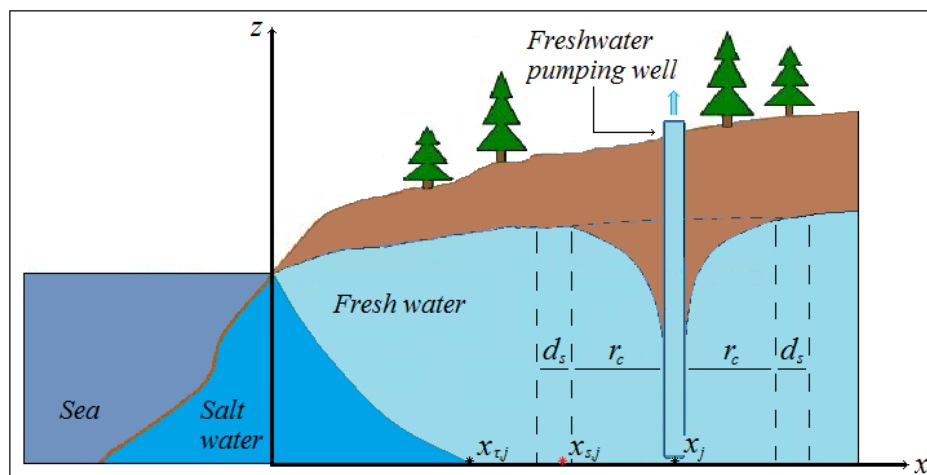
Ο προσδιορισμός και ο έλεγχος των αποστάσεων μεταξύ των παραπάνω κρίσιμων σημείων (Σχήμα 6.6), δηλαδή των διαφορών $x_{s,j} - x_{\tau,j}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, απέναντι

από κάθε γεώτρηση του υδροφορέα είναι καταλυτικής σημασίας στην εξέλιξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης των αντλήσεων. Το φαινόμενο που περιγράψαμε παραπάνω των έντονων μετατοπίσεων της υφάλμυρης σφήνας όταν πλησιάζει επικίνδυνα κοντά στις θέσεις των μετωπιαίων γεωτρήσεων, οφείλεται προφανώς στην παραβίαση των θέσεων των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής. Δηλαδή, σε ορισμένες περιπτώσεις υπό την ισχύ συγκεκριμένων επιμέρους τιμών άντλησης, οι αποστάσεις $x_{s,j} - x_{\tau,j}$, για κάποια $j \in \{1, \dots, M\}$, γίνονται μηδενικές είτε αποκτούν και αρνητικό πρόσημο, με συνέπεια τις παρατηρούμενες έντονες μετατοπίσεις της υφάλμυρης σφήνας. Έτσι, όταν οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο τιμές αντλήσεων φέρουν το υφάλμυρο μέτωπο σε θέσεις που οι συντεταγμένες τους ισοδυναμούν με παραβίαση του θετικού προσήμου της παραπάνω διαφοράς για μία ή και περισσότερες γεωτρήσεις, οι μετατοπίσεις του μετώπου παρουσιάζουν ακραία συμπεριφορά, υπό την έννοια ότι μικρές μεταβολές στις τιμές άντλησης επιφέρουν έντονες μεταβολές στη χωρική μετατόπιση του μετώπου. Επομένως, οι προτεινόμενες από τον αλγόριθμο σε κάθε επανάληψη τιμές αντλήσεων μπορούν να θεωρηθούν ως ασφαλείς, μονάχα όταν αντιστοιχούν σε μετακίνηση του υφάλμυρου μετώπου που διατηρεί θετικό το πρόσημο των αποστάσεων μεταξύ των παραπάνω κρίσιμων σημείων.

Σημειώνουμε στο σημείο αυτό ότι ο υπολογισμός των κρίσιμων σημείων $(x_{s,j}, y_{s,j})$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, απέναντι από κάθε γεώτρηση είναι μια διαδικασία η οποία πρέπει να πραγματοποιείται σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας βελτιστοποίησης, αφού εντός της συνάρτησης του δυναμικού ροής εμφανίζονται οι τιμές των επιμέρους αντλήσεων οι οποίες είναι διαφορετικές σε κάθε επανάληψη. Το γεγονός όμως αυτό προσδίδει σημαντικό υπολογιστικό φόρτο στη διαδικασία, ο οποίος δεν είναι απαραίτητος ειδικά κατά τις αρχικές επαναλήψεις. Μας ενδιαφέρει δηλαδή να γνωρίζουμε τις θέσεις των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής απέναντι από κάθε γεώτρηση όταν το μέτωπο έχει πλησιάσει επικίνδυνα κοντά σε αυτές. Μια κίνηση για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος είναι να χρησιμοποιήσουμε ένα σημείο με προκαθορισμένη σταθερή απόσταση από τη θέση μιας γεώτρησης και όταν το υφάλμυρο μέτωπο το πλησιάζει, τότε να ενεργοποιείται το τμήμα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που υπολογίζει σε κάθε περαιτέρω επανάληψη τις θέσεις των κρίσιμων σημείων για τη συγκεκριμένη γεώτρηση. Ομοίως εφαρμόζουμε για τις υπόλοιπες γεωτρήσεις, με αποτέλεσμα να

περιορίζουμε έτσι αισθητά το πλήθος των επαναλήψεων που έχουν αυξημένο υπολογιστικό φόρτο.

Ωστόσο, στην παρούσα εργασία ακολουθούμε μια διαφορετική προσέγγιση. Παρατηρήσαμε ότι οι θέσεις των μετωπιαίων γεωτρήσεων του υδροφορέα διαδραματίζουν σημαντικότερο ρόλο στην εξέλιξη της διαδικασίας, από τις υπόλοιπες που βρίσκονται σε μεγαλύτερο βάθος στο εσωτερικό του. Μάλιστα, επιβεβαιώνεται πειραματικά σε όλες τις προσομοιώσεις μας, ότι η προστασία αυτών είναι ικανή να προστατεύσει συνολικά ολόκληρο τον υδροφορέα. Επομένως, ο υπολογισμός των κρίσιμων σημείων του υφάλμυρου μετώπου αλλά και του δυναμικού ροής μπροστά από κάθε γεώτρηση, ενώ πραγματοποιείται για όλες τις γεωτρήσεις, έχει σημασία μονάχα για τις μετωπιαίες εξ' αυτών.



Σχήμα 6.6: Κάθετη διατομή του παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου. Κώνος κατάπτωσης και περιοχή ασφαλείας περιμετρικά της θέσεως ενεργούς γεώτρησης.

Στη συνέχεια, υπολογίζοντας διεξοδικά σε πλήθος προσομοιώσεων τις θέσεις των κρίσιμων σημείων μπροστά από τις μετωπιαίες γεωτρήσεις σε κάθε περίπτωση, παρατηρήσαμε ότι η απόστασή τους από την αντίστοιχη θέση ενεργούς γεώτρησης κατά μέσο όρο είναι του μεγέθους των 70 – 350 m. Έπειτα, λαμβάνοντας υπόψη την επιταχυνόμενη κίνηση του υφάλμυρου μετώπου που περιγράψαμε προηγουμένως, μόλις αυτό πλησιάζει στα 300 – 350 m απέναντι από τις μετωπιαίες γεωτρήσεις, εισάγαμε στον υπολογιστικό αλγόριθμο δύο παραμέτρους. Αυτές είναι η υποθετική ακτίνα $r_c = 300 \text{ m}$ των κώνων ανύψωσης και κατάπτωσης

για κάθε γεώτρηση και μια επιπλέον ακτίνα ασφαλείας $d_s = 100 \text{ m}$ (Σχήμα 6.6). Θα μπορούσαμε φυσικά για κάθε γεώτρηση να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικές τιμές για καθεμιά από τις παραμέτρους αυτές, αν και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήσαμε ενιαίες τιμές ως την απλούστερη δυνατή επιλογή. Οι παράμετροι αυτές έχουν ως στόχο τη δημιουργία ενός κυκλικού δίσκου ασφαλείας περιμετρικά κάθε γεώτρησης, ακτίνας $r_c + d_s = 300 + 100 = 400 \text{ m}$. Έτσι, με την επιλογή αυτή δεν απαιτείται πλέον ο υπολογισμός των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής σε κάθε επαναληπτικό βήμα της διαδικασίας, αλλά ένας απλός έλεγχος προσέγγισης των κρίσιμων σημείων του υφάλμυρου μετώπου στις περιφέρειες αυτών των κυκλικών δίσκων ασφαλείας. Τονίζουμε στο σημείο αυτό ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία είναι αποδεκτή, μονάχα εάν εξακριβώσουμε ότι σε κάθε περίπτωση τα κρίσιμα σημεία του δυναμικού ροής απέναντι από κάθε γεώτρηση βρίσκονται στο εσωτερικό του κυκλικού δίσκου ασφαλείας, δηλαδή όταν $x_j - (r_c + d_s) \leq x_{s,j} \leq x_j$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, γεγονός το οποίο επιβεβαιώσαμε πειραματικά για τον υδροφορέα της Καλύμνου με τα συγκεκριμένα υδραυλικά χαρακτηριστικά (Πίνακας 6.2) σε μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων.

Οφείλουμε να σημειώσουμε ότι η μεθοδολογία κατασκευής μιας κυκλικής περιοχής ασφαλείας σταθερής ακτίνας περιμετρικά κάθε γεώτρησης, μονάχα μερικώς αντιμετωπίζει το πρόβλημα της επικίνδυνης προέλασης του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό ενός υδροφορέα. Οδηγούμαστε λοιπόν στις παρακάτω διαπιστώσεις:

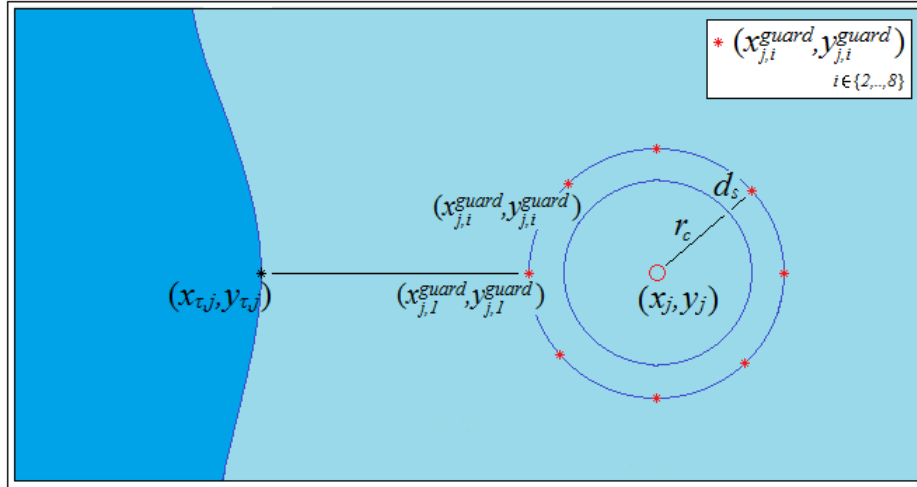
- Κατ' αρχάς, δεν μπορούμε σε κάθε πραγματικό υδροφορέα να γνωρίζουμε την αναλυτική μορφή της συνάρτησης του δυναμικού ροής, ώστε να είναι άμεσα υπολογίσιμες οι θέσεις των κρίσιμων σημείων του. Προφανώς, δεν κατατάσσονται όλοι οι υδροφορείς σε μία εκ των τριών εξιδανικευμένων κατηγοριών τύπου I, II και III, που παρουσιάσαμε προηγουμένως στην ενότητα 2.4.
- Έπειτα, για εκείνους τους υδροφορείς που ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες με συνέπεια να είναι γνωστή η αναλυτική έκφραση του δυναμικού ροής στο εσωτερικό τους, διαφορετικές τιμές στις υδραυλικές τους ιδιότητες απαιτούν κυκλικές περιοχές προστασίας διαφορετικού μεγέθους σε κάθε γεώτρησή τους.

Με στόχο λοιπόν την αντιμετώπιση της δεύτερης περίπτωσης, αφού ο υδροφορέας της

Καλύμνου υπό την εξιδανικευμένη παρούσα περιγραφή του σε αυτήν υπάγεται, πραγματοποιήσαμε ένα πλήθος προσομοιώσεων με τροποποιημένες κάθε φορά τιμές ορισμένων εκ των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα. Αυτό που παρατηρήσαμε ήταν ότι σε κάποιες από τις προσομοιώσεις αυτές, το υφάλμυρο μέτωπο παραβίαζε τα κρίσιμα σημεία του δυναμικού ροής, αφού εισχωρούσε στην κυκλική περιοχή ασφαλείας προεπιλεγμένης σταθερής ακτίνας. Έτσι, για να αντιμετωπίσουμε το φαινόμενο αυτό επιλέξαμε την εφαρμογή ενός ακόμη περιορισμού στο παρόν πρόβλημα βελτιστοποίησης, της υποχρεωτικής θετικής τιμής του δυναμικού ροής σε κάθε θέση ενεργούς γεώτρησης του υδροφορέα. Η διαδικασία αυτή, η οποία προτάθηκε από τους Α. Μαντόγλου, Μ. Παπαντωνίου και Π. Γιαννουλόπουλο στην εργασία τους [38], αναλαμβάνει να ενισχύσει το πλαίσιο των ήδη εφαρμοζόμενων περιορισμών άντλησης και μετακίνησης του μετώπου, εξασφαλίζοντας τόσο την ευστάθεια των παραγόμενων λύσεων όσο και τελικά την ακεραιότητα των γεωτρήσεων του υδροφορέα. Το μέτρο αυτό σε συνδυασμό με την υπόλοιπη διαδικασία βελτιστοποίησης αποδεικνύεται στην πράξη ιδιαίτερα αποδοτικό, παρέχοντας έναν αλγόριθμο ασφαλούς μεγιστοποίησης των αντλήσεων του υδροφορέα. Επίσης, τόσο το ίδιο το μέτρο όσο και η αποτελεσματικότητά του παρουσιάζονται στη συνέχεια αναλυτικά σε κάθε σενάριο αντλήσεων που εφαρμόσαμε στον υδροφορέα της Καλύμνου. Αναφέρουμε τέλος, ότι πρόσφατες εργασίες μας προσανατολίζονται στην κατασκευή ενός μέτρου οριστικής επίλυσης του συγκεκριμένου ζητήματος, υπό την έννοια της κατασκευής ενός κριτηρίου διαρκούς προσδιορισμού και ελέγχου των κρίσιμων σημείων της διαδικασίας αντλήσεων.

Επιστρέφοντας τώρα στην περιγραφή των κυκλικών δίσκων ασφαλείας περιμετρικά κάθε γεώτρησης, αναφέρουμε ότι με στόχο τον έλεγχο προσέγγισης της υφάλμυρης σφήνας σε αυτούς, ακολουθήσαμε την παρακάτω μεθοδολογία. Ορίσαμε κατ' αρχάς στην περιφέρεια καθενός εξ' αυτών ένα πλήθος $n^{guards} > 0$ σημείων προστασίας $(x_{j,i}^{guard}, y_{j,i}^{guard})$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$ και $i \in \{1, \dots, n^{guards}\}$. Στη συνέχεια, πραγματοποιήσαμε προσομοιώσεις για πλήθος $n^{guards} \in \{1, 3, 5, 8\}$ τέτοιων σημείων, επιλεγμένα σε συμμετρικές μεταξύ τους θέσεις (Σχήμα 6.7). Αυτό που παρατηρήσαμε είναι, ότι καθώς το υφάλμυρο μέτωπο εισέρχεται στον υδροφορέα με κατεύθυνση από δυτικά προς ανατολικά, τα μόνα σημεία προστασίας που έρχονται σε πιθανή επαφή με το υφάλμυρο μέτωπο, είναι αυτά που βρίσκονται

στην περιφέρεια του δυτικού τμήματος κάθε κυκλικού δίσκου. Σημειώνουμε επίσης, ότι επειδή το πλάτος του συγκεκριμένου υδροφορέα είναι σχετικά μικρό, μόλις $W = 3000 \text{ m}$, δεν παρουσιάστηκε σε καμία από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν το φαινόμενο της *πλαιϊνής υφαλμύρισης* κάποιας εκ των γεωτρήσεών του. Καταλυτικό δε ρόλο σε αυτό προφανώς έχει η αποδοχή ενιαίας τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας σε ολόκληρη την έκταση του υδροφορέα. Δεχόμαστε δηλαδή ότι τα καρστικά πετρώματα στο υπέδαφός του είναι της ίδιας προέλευσης, με συνέπεια να μην επιτρέπουν τη διέλευση του νερού με διαφορετικές ταχύτητες σε διαφορετικά σημεία εντός του.



Σχήμα 6.7: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, μεγέθυνση Σχήματος 3.2. Κυκλικός δίσκος ασφαλείας περιμετρικά της θέσεως μιας ενεργούς γεώτρησης.

Ως αποτέλεσμα λοιπόν της εμπειρίας μας από όλες αυτές τις προσομοιώσεις στον υδροφορέα την Καλύμνου, προέκυψε η μεθοδολογία που τελικά εφαρμόσαμε, στην οποία γίνεται χρήση μονάχα ενός σημείου προστασίας απέναντι από κάθε γεώτρηση, δηλαδή $n^{guards} = 1$, σταθερά τοποθετημένο σε απόσταση $r_c + d_s = 400 \text{ m}$ από αυτήν. Οι συντεταγμένες δε αυτού του σημείου προστασίας είναι $(x_{j,1}^{guard}, y_{j,1}^{guard}) = (x_j - (r_c + d_s), y_j)$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$. Έτσι, σε κάθε επαναληπτικό βήμα ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης απλώς ελέγχει την απόσταση του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας από το μοναδικό σημείο προστασίας στο δυτικό άκρο της κυκλικής περιοχής ασφαλείας. Πραγματοποιείται δηλαδή ο έλεγχος:

$$x_{\tau,j} \leq x_{j,1}^{guard}, \quad (6.7)$$

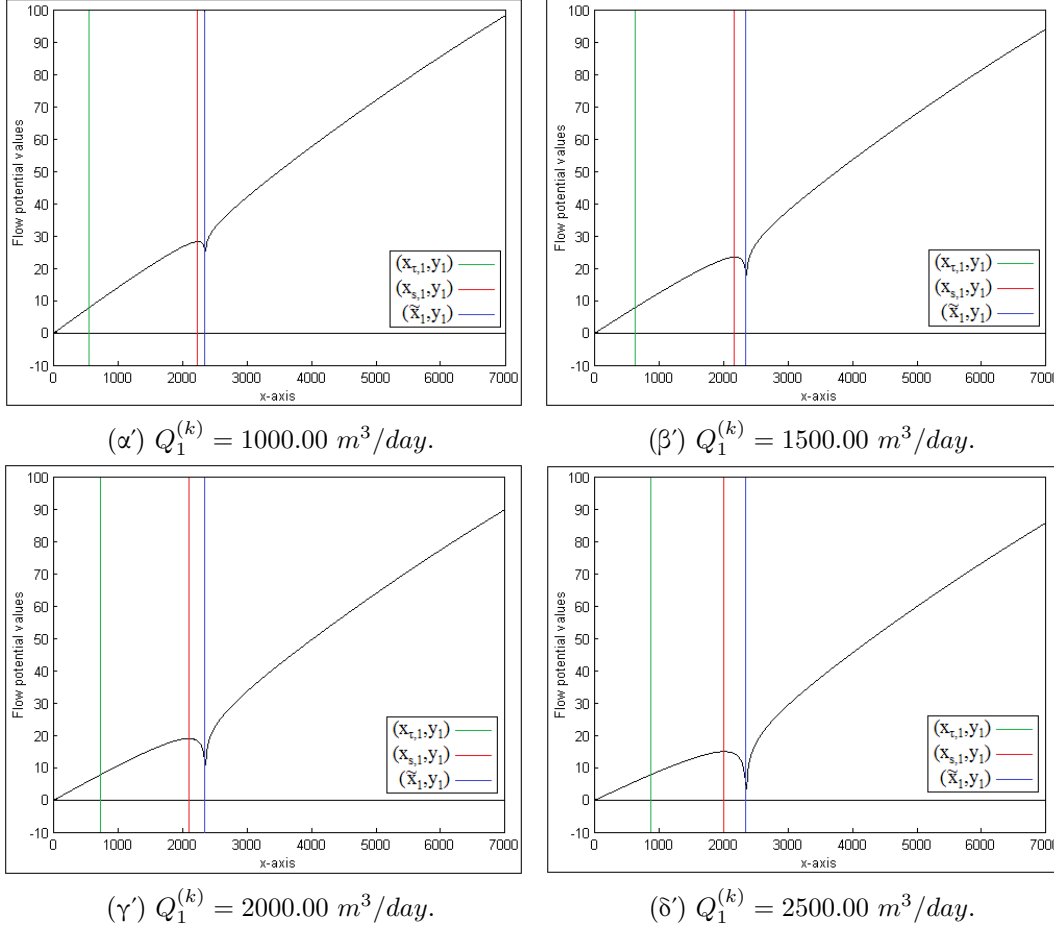
για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$. Στην περίπτωση δε που παραβιάζεται η συγκεκριμένη ανισότητα, εφαρμόζεται η κύρωση ελέγχου $x_{movement}^{primary} penalty$ ως μία πρώτη γραμμή άμυνας, ενώ στη συνέχεια εάν η παραβίαση διατηρείται, μπαίνει σε εφαρμογή η κύρωση $x_{movement}^{secondary} penalty$. Αυτός λοιπόν ο τόσο απλοποιημένος αλγόριθμος αποδεικνύεται, εκ του αποτελέσματος, ως ιδιαίτερα αποτελεσματικός στο να διατηρεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης εντός των προκαθορισμένων από εμάς πλαισίων και να την καθοδηγεί στην κατασκευή ενός βέλτιστου και ταυτόχρονα ασφαλούς διαχειριστικού πλάνου αντλήσεων.

Η διαδικασία ελέγχου και προστασίας των θέσεων των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής αντιπροσωπεύει ένα θεμελιώδες και ιδιαίτερης σημασίας τμήμα της παρούσας Διατριβής. Η χρήση της αναλυτικής λύσεως στην περίπτωση του υδροφορέα της Καλύμνου καθιστά δυνατή μεν την εύρεση των σημείων αυτών, αλλά ταυτόχρονα αναδεικνύει τον περιορισμό μας στην αντιμετώπιση σύνθετων περιπτώσεων υδροφορέων με μη ενιαίες τιμές υδραυλικών παραμέτρων στο εσωτερικό τους. Ωστόσο, για την περίπτωση του υδροφορέα της Καλύμνου η χρήση ενός κατάλληλα ενισχυμένου πλαισίου περιορισμών, αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική στην παρούσα εργασία, ως προς τη διαχείριση των γεωτρήσεων του υδροφορέα.

6.2.3 Ο περιορισμός του δυναμικού ροής

Αναφέραμε προηγουμένως, ότι εξαιτίας της μορφής της αναλυτικής εκφράσεως του δυναμικού ροής $\phi = \phi(x, y)$ στην εξίσωση (6.1) που χρησιμοποιούμε στην παρούσα εξιδανικευμένη περιγραφή του υδροφορέα της Καλύμνου, οι θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα συμπεριφέρονται ως καταβόθρες δυναμικού. Υπενθυμίζουμε ότι το δυναμικό ροής στις θέσεις αυτές (x_j, y_j) , για $j \in \{1, \dots, M\}$, καλείται να μηδενίσει τα ορίσματα λογαριθμικών όρων, με συνέπεια να απειρίζεται αρνητικά. Για την αποφυγή λοιπόν αυτού του απειρισμού, εξετάζουμε την τιμή του δυναμικού ροής όχι επακριβώς στις θέσεις των γεωτρήσεων, αλλά πολύ κοντά σε αυτές, επιλέγοντας ως σημεία ελέγχου τα σημεία (\tilde{x}_j, y_j) , με $\tilde{x}_j = x_j - d_\phi$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$ και προεπιλεγμένη απόσταση ασφαλείας $d_\phi = 1 \text{ m}$. Οι τιμές που λαμβάνει το δυναμικό στα σημεία αυτά μπορούν να είναι θετικές, μηδενικές ή και αρνητικές, αλλά σίγουρα δεν απειρίζονται αρνητικά.

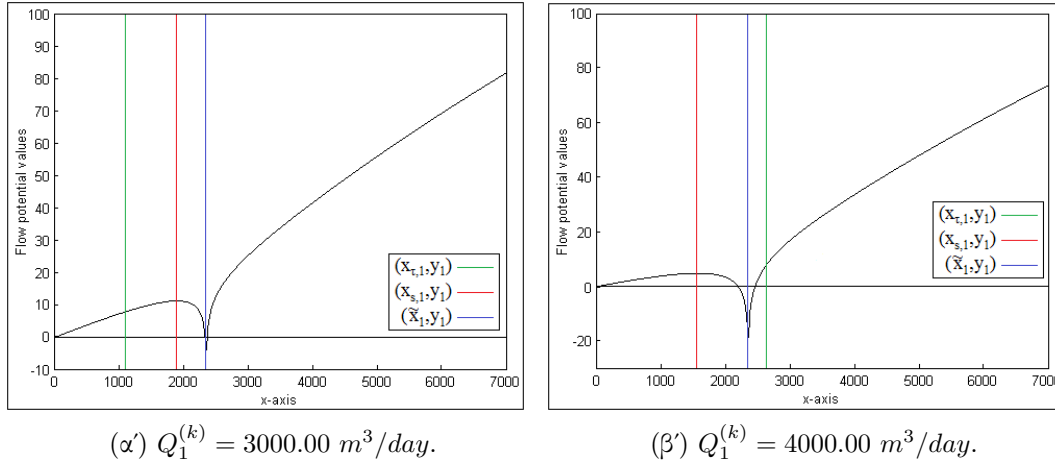
Στα γραφήματα των Σχημάτων 6.8 και 6.9 μπορούμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά



Σχήμα 6.8: Συμπεριφορά της συνάρτησης του δυναμικού ροής υπό την ισχύ διαφορετικών τιμών άντλησης για τη μοναδική γεώτρηση του υδροφορέα. Η τιμή του δυναμικού ροής στη θέση ελέγχου γειτονικά της γεώτρησης διατηρείται θετική.

της συνάρτησης του δυναμικού ροής $\phi = \phi(x, y)$ στο εσωτερικό ενός εξιδανικευμένου υδροφορέα, του οποίου τα χαρακτηριστικά δεχόμαστε ότι περιγράφονται στον Πίνακα 6.2, μονάχα με μία θέση ενεργούς γεώτρησης στη θέση $(x_1, y_1) = (2350.00, 1250.00) \text{ m}$. Μάλιστα, με στόχο τον έλεγχο της συνάρτησης του δυναμικού υπό την ισχύ διαφορετικών τιμών άντλησης ακριβώς απέναντι από τη θέση της μοναδικής γεώτρησης, σταθεροποιούμε την y -συντεταγμένη της θέτοντας $y = y_1$. Προκύπτουν λοιπόν οι ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Κατ' αρχάς, όσον αφορά τη φυσική ερμηνεία του δυναμικού ροής στο εσωτερικό του υδροφορέα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ως παράδειγμα την έννοια του ηλεκτρικού



Σχήμα 6.9: Συμπεριφορά της συνάρτησης του δυναμικού ροής υπό την ισχύ διαφορετικών τιμών άντλησης για τη μοναδική γεώτρηση του υδροφορέα. Η τιμή του δυναμικού ροής στη θέση ελέγχου γειτονικά της γεώτρησης είναι αρνητική.

δυναμικού που συναντάμε στο εσωτερικό ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Γνωρίζουμε λοιπόν από τη θεωρία του Ηλεκτρομαγνητισμού ότι μέσα σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα η αιτία κίνησης των ηλεκτρονίων μεταξύ δύο διαφορετικών σημείων του είναι η διαφορά του ηλεκτρικού δυναμικού που εμφανίζουν οι θέσεις αυτές. Μάλιστα, η κίνηση των ηλεκτρονίων παρατηρείται από σημεία μικρότερου σε σημεία μεγαλύτερου ηλεκτρικού δυναμικού, έχοντας ως συνέπεια το φαινόμενο του ηλεκτρικού ρεύματος. Σε πλήρη αναλογία λοιπόν με την έννοια του ηλεκτρικού δυναμικού, θα λέγαμε ότι οι διαφορετικές τιμές του δυναμικού ροής σε διαφορετικές περιοχές στο εσωτερικό ενός υδροφορέα, αποτελούν στην ουσία την αιτία κίνησης των μορίων του νερού μεταξύ των περιοχών αυτών. Η δε κίνηση αυτή παρατηρείται να συμβαίνει από περιοχές μικρότερου δυναμικού ροής προς περιοχές με μεγαλύτερες τιμές του δυναμικού αυτού.

Μπορούμε επομένως να θεωρήσουμε ότι η έννοια του δυναμικού ροής αντιπροσωπεύει την τάση, τη δυναμική του υφάλμυρου μετώπου να κινηθεί στο εσωτερικό του υδροφορέα κατευθυνόμενο προς θέσεις μεγαλύτερων τιμών του δυναμικού ροής. Όπως παρατηρούμε δε και στα γραφήματα του Σχήματος 6.8, το δυναμικό ροής υπό την ισχύ μιας ενεργούς γεώτρησης, αποτελεί με την ευρύτερη έννοια, μια αύξουσα συνάρτηση

του μήκους του υδροφορέα, με μικρή διακοπή στην περιοχή της ίδιας της γεώτρησης. Σε μια μικρή περιοχή συγκριτικά με το μέγεθος του υδροφορέα, περιμετρικά της θέσεως της γεώτρησης, οι τιμές του δυναμικού ροής παρουσιάζουν φθίνουσα συμπεριφορά μέχρι τον αρνητικό απειρισμό τους επακριβώς στη θέση της γεώτρησης, φαινόμενο που αναφέραμε και ερμηνεύσαμε προηγουμένως.

- Σε κάθε ένα από τα γραφήματα των Σχημάτων 6.8 και 6.9 παρουσιάζουμε τις x -συντεταγμένες των θέσεων του κρίσιμου σημείου $(x_{\tau,1}, y_1)$ της υφάλμυρης σφήνας, του κρίσιμου σημείου $(x_{s,1}, y_1)$ του δυναμικού ροής και του σημείου ελέγχου (\tilde{x}_1, y_1) πολύ κοντά στην ακριβή θέση (x_1, y_1) της ενεργούς γεώτρησης. Ταυτόχρονα δε, παρουσιάζουμε και την τιμή του δυναμικού ροής σε κάθε μία από τις θέσεις αυτές. Έτσι, σύμφωνα με όσα παρουσιάσαμε προηγουμένως στην ενότητα 6.1.1, το κρίσιμο σημείο του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας παρουσιάζει σταθερή θετική τιμή δυναμικού ροής ίση με $\phi(x_{\tau,1}, y_1) = 8.0078 \text{ m}^2$. Έπειτα, στα γραφήματα του Σχήματος 6.8 αλλά και στο Σχήμα 6.9α' το κρίσιμο σημείο του δυναμικού ροής, εκεί δηλαδή που το γράφημα της συνάρτησης δυναμικού γίνεται οριζόντιο και ταυτόχρονα ισχύει ότι $\left. \frac{\partial \phi(x,y)}{\partial x} \right|_{x=x_{s,1}, y=y_{s,1}} = 0$, διαθέτει μεγαλύτερη τιμή δυναμικού από το κρίσιμο σημείο του μετώπου, ισχύει δηλαδή ότι:

$$\phi(x_{\tau,1}, y_1) \leq \phi(x_{s,1}, y_1). \quad (6.8)$$

Στη συνέχεια, οι τιμές του δυναμικού ροής διατηρούν φθίνουσα πορεία έως και τη θέση της ίδιας της γεώτρησης, όπου και απειρίζονται αρνητικά.

- Για τα παραπάνω σημεία ενδιαφέροντος, ως προς τις σχετικές μεταξύ τους θέσεις, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι υπό την ισχύ σχετικά μικρών ή μεσαίων τιμών άντλησης (Σχήματα 6.8 και 6.9α'), αυτές παραμένουν αυστηρά διατεταγμένες σύμφωνα με τη διάταξη:

$$x_{\tau,1} \leq x_{s,1} \leq \tilde{x}_1 < x_1. \quad (6.9)$$

Ωστόσο, καθώς το μέγεθος των αντλήσεων γίνεται όλο και μεγαλύτερο, ενώ η παραπάνω σχέση διάταξης δεν αναιρείται, μεταβάλλονται σε κάποια από τα σημεία αυτά τόσο

οι θέσεις τους όσο και οι τιμές του δυναμικού ροής. Πιο αναλυτικά, η θέση του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας, δηλαδή το σημείο $(x_{\tau,1}, y_1)$, εντοπίζεται όλο και βαθύτερα στο εσωτερικό υδροφορέα, διατηρώντας τη σταθερή τιμή των $\phi(x_{\tau,1}, y_1) = 8.0078 \text{ m}^2$. Αντίστοιχα, το κρίσιμο σημείο $(x_{s,1}, y_1)$ του δυναμικού ροής, ακολουθώντας τη μεταβολή του γραφήματος της συνάρτησης του δυναμικού, κινείται προς τα αριστερά, δηλαδή προς τη θάλασσα. Οι δε τιμές του δυναμικού ροής στο σημείο αυτό ακολουθούν φθίνουσα πορεία από μεγαλύτερες προς μικρότερες τιμές. Έπειτα, η θέση της ενεργούς γεώτρησης (x_1, y_1) προφανώς παραμένει ανεπηρέαστη από τη μεταβολή των αντλήσεων, με σταθερά απειρισμένη αρνητικά την τιμή του δυναμικού στο σημείο αυτό. Τέλος, στη θέση ελέγχου (\tilde{x}_1, y_1) , η οποία δεν μετατοπίζεται χωρικά, η τιμή του δυναμικού κινείται από θετικές προς διαρκώς μικρότερες τιμές, όπου μάλιστα, κάποια στιγμή (Σχήμα 6.9) οι τιμές αυτές γίνονται και αρνητικές.

Η μεθοδολογία που επιλέγουμε να εφαρμόσουμε στην παρούσα εργασία, γνωστή στη βιβλιογραφία από τους Α. Μαντόγλου, Μ. Παπαντωνίου και Π. Γιαννουλόπουλο [38], είναι ο έλεγχος της θέσεως του κρίσιμου σημείου του δυναμικού ροής, διαμέσου του ελέγχου της τιμής του δυναμικού στη θέση ελέγχου γειτονικά κάθε γεώτρησης. Πιο συγκεκριμένα, εισάγουμε στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης τον περιορισμό:

$$\phi(\tilde{x}_j, y_j) > 0, \text{ για κάθε } j \in \{1, \dots, M\}, \quad (6.10)$$

απαιτώντας τη διατήρηση της θετικής τιμής του δυναμικού ροής πολύ κοντά στη θέση της ενεργούς γεώτρησης. Περιορίζοντας λοιπόν τις τιμές που μπορεί να λάβει το δυναμικό ροής στη συγκεκριμένη θέση, περιορίζουμε παράλληλα και τη μείωση της τιμής του δυναμικού ροής στο κρίσιμο σημείο του δυναμικού. Αυτό όμως ισοδυναμεί με περιορισμό της μετακίνησης αυτού του κρίσιμου σημείου προς τα αριστερά, αποτρέποντας έτσι τη συνάντησή του με το υφάλμυρο μέτωπο. Υπενθυμίζουμε ότι ένα προτεινόμενο πλάνο αντλήσεων θεωρούμε ότι αποτελεί ευσταθή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης που μελετάμε, μονάχα όταν η θέση του υφάλμυρου μετώπου παραμένει αριστερότερα της θέσεως του κρίσιμου σημείου του δυναμικού ροής για κάθε γεώτρηση του υδροφορέα.

Ο περιορισμός αυτός αποδεικνύεται στην πράξη ιδιαίτερα αποτελεσματικός, καθοδηγώντας στην ουσία τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης στο να χρησιμοποιεί τιμές αντλήσεων που

διατηρούν την επιθυμητή διάταξη των παραπάνω κρίσιμων σημείων. Τονίζουμε δε, ότι η εφαρμογή του συγκεκριμένου περιορισμού στις μετωπιαίες γεωτρήσεις αποτελεί ικανή συνθήκη για τη διάσωση όλων των γεωτρήσεων του υδροφορέα.

Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής είναι ότι έτσι αποφεύγεται η χρονοβόρα διαδικασία εύρεσης των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής μπροστά από κάθε γεώτρηση, υπό την ισχύ διαφορετικών τιμών άντλησης σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Αρκεί ο έλεγχος της τιμής του δυναμικού ροής στα σημεία ελέγχου γειτονικά των γεωτρήσεων. Πρόκειται δηλαδή στην ουσία για ένα κριτήριο εξοικονόμησης χρόνου και υπολογισμών, έτσι ώστε ο επαναληπτικός αλγόριθμος να οδηγηθεί στις βέλτιστες ασφαλείς τιμές άντλησης για τις γεωτρήσεις του υδροφορέα.

6.2.4 Το κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Το κριτήριο τερματισμού της επαναληπτικής διαδικασίας δεν είναι διαφορετικό από το κριτήριο που περιγράψαμε προηγουμένως στο Κεφάλαιο 5.3 και συνοψίζεται στην σχέση (5.23). Όσον αφορά το πλήθος των χρησιμοποιούμενων επαναλήψεων όπου πραγματοποιείται ο έλεγχος του συγκεκριμένου κριτηρίου, επιλέγουμε να ισχύει ότι $\Lambda = 20$. Έτσι, ο έλεγχος της διαφοράς των μέσων τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης, $|\mu_\Lambda - \mu_{2\Lambda}| < \epsilon_1$, πραγματοποιείται σε βάθος 40 επαναλήψεων, ενώ αντίστοιχα ο έλεγχος της τυπικής απόκλισης των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης, $\sigma_\Lambda < \epsilon_2$, σε βάθος 20 επαναλήψεων. Όπως εύκολα διαπιστώνουμε σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις στη συνέχεια, ο συγκεκριμένος συνδυασμός ελέγχων και πλήθους επαναλήψεων ελέγχου εξασφαλίζει την οριστική σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης σε μια περιοχή ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων. Η σύγκλιση αυτή δηλαδή, δεν είναι περιστασιακής φύσεως με συνέπεια να αναιρείται έπειτα από κάποιες επαναλήψεις, εξαιτίας ακριβώς του ικανοποιητικού πλήθους επαναλήψεων ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την διαπίστωσή της. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εκμεταλλευόμενος το ικανοποιητικό περιθώριο επαναλήψεων ελέγχου έχει εστιάσει τα αποτελέσματά του, δηλαδή τις προτεινόμενες βέλτιστες τιμές άντλησης, σε μια συγκεκριμένη περιοχή τιμών. Το

γεγονός αυτό ενισχύεται με την κατάλληλη επιλογή των σταθερών ανοχής για το συγκεκριμένο κριτήριο τερματισμού, όπου στην παρούσα περίπτωση επιλέγονται με τιμές $\epsilon_1 = 10^{-4}$ και $\epsilon_2 = 10^{-2}$ αντίστοιχα. Συνοψίζουμε όλες τις παραπάνω τιμές στον Πίνακα 6.5 που ακολουθεί.

Πίνακας 6.5: Τιμές παραμέτρων του κριτηρίου τερματισμού της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Παράμετροι κριτηρίου τερματισμού	Τιμή
Λ	20
ϵ_1	10^{-4}
ϵ_2	10^{-2}

Οφείλουμε στο σημείο αυτό να παρουσιάσουμε μια σημαντική διευκρίνιση. Ο στοχαστικός χαρακτήρας του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V που χρησιμοποιούμε, είναι δεδομένος. Η αντικειμενική συνάρτηση, όπως θα δούμε αναλυτικά σε κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις στη συνέχεια, έπειτα από σχετικά μικρό πλήθος επαναλήψεων συγκλίνει σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων. Αναφερόμαστε σε μια ολόκληρη περιοχή τέτοιων λύσεων, διότι η ύπαρξη του θορύβου σε κάθε επανάληψη δεν επιτρέπει τη ντετερμινιστική σύγκλιση σε κάποια ολικά βέλτιστη λύση. Αντίθετα, ο αλγόριθμος αυτός οδηγείται γρήγορα σε μία περιοχή λύσεων που είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους ως προς την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία αποτελεί αύξουσα συνάρτηση του συνολικά αντλούμενου όγκου γλυκού νερού. Έτσι, η ολικά βέλτιστη λύση που εμείς παρουσιάζουμε στους Πίνακες αποτελεσμάτων κάθε περίπτωσης, στην ουσία προέκυψε έπειτα από την ολοκλήρωση του συνόλου των επαναλήψεων της διαδικασίας βελτιστοποίησης και στη συνέχεια την εύρεση της επανάληψης που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

6.3 Σενάρια αντλήσεων

Παρουσιάζουμε στη συνέχεια ένα σύνολο αντιπροσωπευτικών περιπτώσεων διαφορετικού πλήθους και τοποθέτησης των ενεργών γεωτρήσεων εντός του υδροφορέα. Κάθε μία από

τις περιπτώσεις αυτές συνοδεύεται τόσο από την ερμηνεία της επιλογής τοποθέτησης των γεωτρήσεων στις συγκεκριμένες θέσεις, όσο και από τα αναλυτικά αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης που εφαρμόζουμε. Χρησιμοποιούμε Πίνακες αποτελεσμάτων και αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις, όπου γίνεται αναλυτική περιγραφή του προτεινόμενου ως βέλτιστου, σχεδίου διαχείρισης των αντλήσεων του υδροφορέα, με ταυτόχρονη παρουσίαση της εξουδετερωμένης πλέον απειλής υφαλμύρισης προερχόμενη από το κινούμενο υφάλμυρο μέτωπο στο εσωτερικό του.

Σημειώνουμε ότι στις προσομοιώσεις που μελετάμε στη συνέχεια ακολουθούμε δύο εναλλακτικές, αλλά ταυτόχρονα και συνεργαζόμενες μεταξύ τους μεθοδολογίες προσέγγισης, ανάλογα με το αν χρησιμοποιούμε ή όχι τους περιορισμούς δυναμικού, που παρουσιάσαμε στην ενότητα 5.1.3 προηγούμενως. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- *Προφίλ Μοντελοποίησης I.*

Η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης $P = P(\mathbf{Q})$ επιτυγχάνεται λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς όγκου και μετατόπισης που παρουσιάζουμε στις σχέσεις που ακολουθούν:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{Q}} P(\mathbf{Q}) &= e^{-\left[\frac{S(\mathbf{Q}-\bar{\mathbf{Q}})}{S(\bar{\mathbf{Q}})}\right]^2} \\ \text{υπό τις συνθήκες:} \\ 0 \leq \underline{Q}_j \leq Q_j \leq \bar{Q}_j \leq Q_A, & \text{ για κάθε } j \in \{1, \dots, M\}, \\ S(\mathbf{Q}) \leq Q_A, \\ x_{\tau,j} \leq x_j - (r_c + d_s), & \text{ για κάθε } j \in \{1, \dots, M\}. \end{aligned} \tag{6.11}$$

Πρόκειται για τη βασική μεθοδολογία προσέγγισης όλων των περιπτώσεων που παρουσιάζουμε στη συνέχεια, διότι η χρήση της αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική στο υπό μελέτη πρόβλημα της βελτιστοποίησης των αντλήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα της Καλύμνου.

- *Προφίλ Μοντελοποίησης II.*

Το πρόβλημα μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης υπό τη συνθήκη των περιορισμών που παρουσιάσαμε στις σχέσεις (6.11) παραμένει ως έχει, με την προσθήκη

ωστόσο του περιορισμού του θετικού δυναμικού ροής στις θέσεις ελέγχου γειτονικά κάθε ενεργούς γεώτρησης. Απαιτούμε δηλαδή να ισχύει ότι:

$$\phi(\tilde{x}_j, y_j) > 0, \text{ για κάθε } j \in \{1, \dots, M\}, \quad (6.12)$$

όπου $\tilde{x}_j = x_j - d_\phi$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, με προεπιλεγμένη απόσταση ασφαλείας $d_\phi = 1 \text{ m}$. Η χρήση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας, την οποία περιγράψαμε αναλυτικά προηγουμένως στην ενότητα 6.2.3, έχει ως στόχο την ενδυνάμωση του πλαισίου των χρησιμοποιούμενων περιορισμών, ώστε να αντιμετωπίσουμε πιθανά προβλήματα ευστάθειας των παραγόμενων λύσεων. Επίσης, η χρήση του συγκεκριμένου Προφίλ, σε όποιο σημείο της διαδικασίας βελτιστοποίησης εφαρμόζεται, θα τονίζεται ευδιακρίτως.

Σημειώνουμε ότι και στα δύο Προφίλ Μοντελοποίησης, για όλες τις θέσεις ενεργών γεωτρήσεων κατά τη διάρκεια των περιπτώσεων που εξετάζουμε στη συνέχεια, επιλέγουμε οι ελάχιστες και μέγιστες ονομαστικές δυνατότητες άντλησης να ορίζονται ως εξής:

$$\underline{Q}_j = 200 \text{ m}^3/\text{day} \text{ και } \overline{Q}_j = 2500 \text{ m}^3/\text{day}, \quad (6.13)$$

για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$. Επίσης, η αρίθμηση των γεωτρήσεων του υδροφορέα ακολουθεί τη διάταξή τους ως προς τον άξονα των x . Δηλαδή, εάν (x_i, y_i) και (x_j, y_j) είναι οι συντεταγμένες δύο θέσεων ενεργών γεωτρήσεων, με $i, j \in \{1, \dots, M\}$ και $i \leq j$, τότε ισχύει ότι $x_i \leq x_j$.

Τέλος, με στόχο τη δημιουργία ενός μέτρου ελέγχου της αποδοτικότητας σε γλυκό νερό των πραγματοποιούμενων αντλήσεων στην k -οστή επανάληψη, ορίζουμε το *συντελεστή αποδοτικότητας* του πλάνου αντλήσεων $a_{eff}^{(k)}$ ως εξής:

$$a_{eff}^{(k)} := \frac{\sum_{j=1}^M Q_{j,fresh}^{(k)}}{\sum_{j=1}^M \overline{Q}_j} 100\%, \quad (6.14)$$

όπου $\sum_{j=1}^M \overline{Q}_j$ είναι το άθροισμα των μέγιστων ονομαστικών δυνατοτήτων άντλησης όλων των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα, ενώ $\sum_{j=1}^M Q_{j,fresh}^{(k)}$ είναι το άθροισμα των αντλήσεων μονάχα γλυκού νερού στην k -οστή επανάληψη.

Πρόκειται στην ουσία για έναν λόγο με αριθμητή τον όγκο του ωφέλιμου γλυκού νερού που αποδίδεται στην k -οστή επανάληψη στην τοπική κοινότητα, προς το συνολικό όγκο νερού που θα μπορούσε να αντληθεί από τις γεωτρήσεις του υδροφορέα. Προφανώς, η ύπαρξη υφαλμυρισμένων γεωτρήσεων στο εσωτερικό του, είτε η μη αξιοποίηση κατά το μέγιστο δυνατό των δυνατοτήτων άντλησης των γεωτρήσεών του, οδηγεί στη μείωση του αριθμητή του συγκεκριμένου λόγου, με συνέπεια τη μείωση του συντελεστή αποδοτικότητας του πλάνου αντλήσεων στην k -οστή επανάληψη.

Σημειώνουμε ότι στον παρονομαστή του λόγου αυτού τοποθετούμε τον υποθετικά μέγιστο δυνατό αντλούμενο όγκο νερού. Είναι αντιληπτό λοιπόν ότι το πλήθος των ενεργών γεωτρήσεων που συμμετέχουν στο πλάνο διαχείρισης του υδροφορέα επηρεάζει ουσιαστικά την τιμή του παρονομαστή του συγκεκριμένου λόγου. Έτσι, ενώ συγκρίνοντας στη συνέχεια τους συντελεστές αποδοτικότητας περιπτώσεων με ίδιο πλήθος ενεργών γεωτρήσεων, τα αποτελέσματα είναι άμεσα και προφανή, δεν ισχύει το ίδιο και στην περίπτωση που οι εξεταζόμενες περιπτώσεις αντιστοιχούν σε διαφορετικό πλήθος ενεργών αντλήσεων. Παραδείγματος χάριν, αυξάνοντας την τιμή του παρονομαστή στην εξίσωση (6.14) εξαιτίας της χρήσεως περισσότερων ενεργών γεωτρήσεων δεν σημαίνει ταυτόχρονα ότι μειώνεται η τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας. Η συμπεριφορά του αριθμητή, δηλαδή ο όγκος του αντλούμενου γλυκού νερού, καθορίζει την τελική αύξηση ή τη μείωση του λόγου που μελετάμε. Επομένως, η ερμηνεία των αποτελεσμάτων σύγκρισης μεταξύ περιπτώσεων που δεν περιέχουν το ίδιο πλήθος ενεργών γεωτρήσεων απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή.

Η μικρότερη τιμή αυτού του συντελεστή ισούται με 0% και αντιστοιχεί στο χείριστο δυνατό σενάριο αξιοποίησης των αντλήσεων ενός υδροφορέα, όπου είτε ολόκληρος ο αντλούμενος όγκος νερού είναι υφάλμυρος, είτε όλες οι γεωτρήσεις του υδροφορέα παραμένουν ανενεργές. Αντίστοιχα, η μέγιστη τιμή του ίδιου συντελεστή ισούται με 100% και αντιπροσωπεύει το βέλτιστο δυνατό σενάριο, όταν όλες οι αντλήσεις του υδροφορέα αντλούν γλυκό μονάχα νερό στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους.

Χρησιμοποιώντας το συντελεστή αποδοτικότητας του εφαρμοζόμενου πλάνου διαχείρισης των αντλήσεων, μπορούμε να έχουμε μια άμεση εικόνα του ποσοστού αποδοτικότητας σε κάθε επανάληψη της ίδιας της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Για να είναι ωστόσο εφικτή η

σύγκριση των αποτελεσμάτων των επιμέρους περιπτώσεων που παραθέτουμε στη συνέχεια, επιλέγουμε η επανάληψη στην οποία θα πραγματοποιείται ο έλεγχος αποδοτικότητας του πλάνου αντλήσεων, να ταυτίζεται με την επανάληψη του εκάστοτε ολικά βέλτιστου σχεδίου αντλήσεων.

6.3.1 Περίπτωση Ia: Υδροφορέας 2 ενεργών γεωτρήσεων

Η πρώτη περίπτωση που μελετάμε χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη 2 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, εφαρμόζοντας έτσι μία προκαταρκτική εξέταση ευαισθησίας της συμπεριφοράς του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ως προς τη θέση των γεωτρήσεων στο εσωτερικό του. Στόχος μας δηλαδή είναι μια πρώτη επιβεβαίωση του ισχυρισμού, ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να παράγει σύνολα λύσεων ικανά να λαμβάνουν υπόψη τους τις θέσεις των γεωτρήσεων του υδροφορέα, αλλά και τους μεταξύ τους συσχετισμούς. Έτσι, από το πλήθος των προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε στον υδροφορέα της Καλύμνου λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη 2 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του, επιλέγουμε να παρουσιάσουμε στο σημείο αυτό δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις, όπου γίνεται αντιληπτή η ορθότητα του ισχυρισμού μας. Σε κάθε μία από αυτές στόχος μας προφανώς είναι η άντληση της μέγιστης δυνατής ποσότητας γλυκού νερού, χρησιμοποιώντας ως εργαλείο για την κατασκευή αυτού του μεγιστοποιημένου πλάνου αντλήσεων το στοχαστικό αλγόριθμο ALOPEX V, προστατεύοντας παράλληλα τις θέσεις των γεωτρήσεων από το φαινόμενο της υφαλμύρισης.

Πίνακας 6.6: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Συντεταγμένες γεωτρήσεων	Γεώτρηση No 1	Γεώτρηση No 2
$(x_j, y_j) \text{ (m)}$	(2350.00, 800.00)	(2400.00, 2150.00)

Χαρακτηρίζουμε την πρώτη περίπτωση μελέτης ως Περίπτωση Ia, όπου ο υπό μελέτη υδροφορέας διαθέτει 2 θέσεις ενεργών γεωτρήσεων τοποθετημένες στο εσωτερικό του σε σημεία με συντεταγμένες που περιγράφονται στον Πίνακα 6.6. Η επιλογή των συγκεκριμένων θέσεων έγινε έτσι ώστε να παρουσιάσουμε την ικανότητα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης

να τροποποιεί το προτεινόμενο πλάνο αντλήσεων, λαμβάνοντας υπόψη ακόμη και μικρές διαφορές στη x -συντεταγμένη των γεωτρήσεων αυτών. Μελετάμε λοιπόν την περίπτωση όπου οι 2 γεωτρήσεις βρίσκονται σχεδόν παράλληλα απέναντι στην εισερχόμενη υφάλμυρη σφήνα, σε θέσεις που σχεδόν ισαπέχουν από τον y άξονα. Υπάρχει μονάχα μια μικρή διαφορά των 50 m ως προς τη x -συντεταγμένη, καθιστώντας μετωπιαία τη γεώτρηση Νο 1. Ζητούμενο είναι η επιβεβαίωση της ικανότητας του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V να κατασκευάσει ένα βελτιστοποιημένο πλάνο άντλησης για τις γεωτρήσεις αυτές, όπου θα λαμβάνεται υπόψη ακόμη και αυτή η μικρή διαφορά τους ως προς τον άξονα των x .

Προφίλ Μοντελοποίησης I

Τα αποτελέσματα ενός τυπικού ελέγχου 500 επαναλήψεων παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 6.7 και 6.8, καθώς και στις γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων που ακολουθούν.

Πίνακας 6.7: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.

Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	492	84	75
$P(Q^{(k)})$	0.9015	0.9461	0.9343	0.9457
$Q_1^{(k)}$ (m^3/day)	1692.48	1783.52	1823.98	1793.04
$Q_2^{(k)}$ (m^3/day)	1697.20	2038.97	1872.23	2024.97
$S(Q^{(k)})$ (m^3/day)	3389.68	3822.49	3696.21	3818.01
$t^{(k)}$ (secs)	1.9697	1.9382	0.3309	0.2955

Παρατηρούμε στο σημείο αυτό, ότι οι συντεταγμένες των θέσεων των γεωτρήσεων του υδροφορέα επιλέχθηκαν έτσι ώστε να εκφράζουν ακέραιες τιμές μήκους χωρίς δεκαδικά ψηφία. Η επιλογή αυτή δεν προκαλεί κάποια βλάβη στη γενικότητα των περιπτώσεων που εξετάζουμε, διότι οι θέσεις ενδιαφέροντος του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό του υδροφορέα δεν υπολογίζονται χρησιμοποιώντας κάποιο διακριτοποιημένο πλέγμα με συνέπεια να μας ενδιαφέρει το μέγεθος της διακριτοποίησης, αλλά χρησιμοποιούμε την επίλυση της

αναλυτικής μορφής συγκεκριμένων εξισώσεων. Έτσι, ενώ οι υποθετικές γεωτρήσεις του υδροφορέα μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε σημείο στο εσωτερικό του, μέσω του συνδυασμού και της επίλυσης των εξισώσεων (6.1), (6.2) και (6.3) μπορούμε αντίστοιχα να υπολογίσουμε τη θέση του υφάλμυρου μετώπου, το οποίο κινείται απειλητικά προς αυτές.

Πίνακας 6.8: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.7.

Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} \text{ penalty}$	5%	0	0
$Q_{min}^{local} \text{ penalty}$	5%	0	0
$Q_{total} \text{ penalty}$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$	5%	351	27
$x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$	5%	7	0

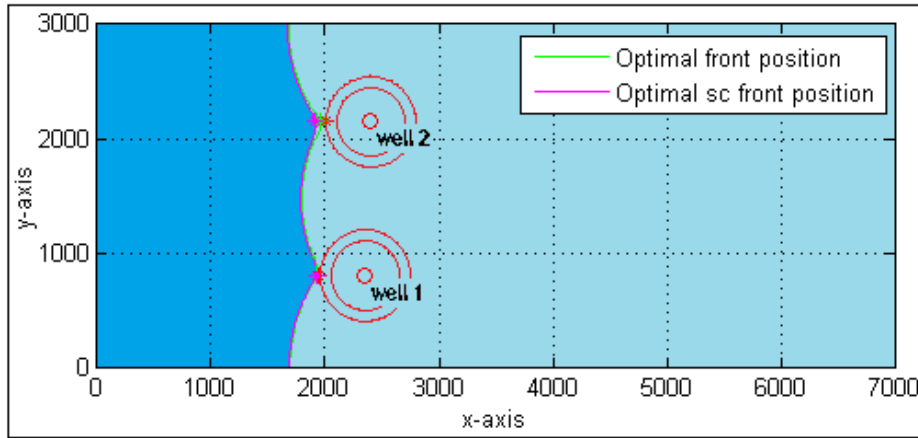
Πίνακας 6.9: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.

Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου	απέναντι από τη γεώτρηση No 1	απέναντι από τη γεώτρηση No 2
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j}) \text{ (m)}$	(1925.41, 800.00)	(1957.20, 2150.00)

Υπενθυμίζουμε ότι $(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$, $j \in \{1, 2\}$, είναι οι συντεταγμένες του υφάλμυρου μετώπου (Toes area) ακριβώς απέναντι από κάθε θέση ενεργούς γεώτρησης με συντεταγμένες (x_j, y_j) , $j \in \{1, 2\}$, λαμβάνοντας υπόψη ότι $y_{\tau,j} = y_j$, για $j \in \{1, 2\}$.

Με μέσο χρόνο ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης της διαδικασίας βελτιστοποίησης ίσο με $t_{av} = 0.0039 \text{ secs}$, όπως βλέπουμε και στον Πίνακα 6.7, απαιτούνται 500 επαναλήψεις και μόλις $t^{(500)} = 1.9697 \text{ secs}$ για την ολοκλήρωση του συγκεκριμένου τυπικού ελέγχου. Η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας εντοπίζεται 492η επανάληψη, με χρόνο ολοκλήρωσης ίσο με $t^{(492)} = 1.9382 \text{ secs}$. Σύμφωνα με τη λύση αυτή, ο προτεινόμενος συνολικός αντλούμενος όγκος γλυκού νερού ισούται με $S(Q^{(492)}) = 3822.49 \text{ m}^3/\text{day}$, αντλώντας $Q_1^{(492)} = 1783.52 \text{ m}^3/\text{day}$ από την 1η γεώτρηση και $Q_2^{(492)} = 2038.97 \text{ m}^3/\text{day}$ από τη 2η. Αναφέραμε προηγουμένως ότι η 2η γεώτρηση βρίσκεται κατά 50 m βαθύτερα στο εσωτερικό

του υδροφορέα. Αυτό οδηγεί τον αλγόριθμο να αντιμετωπίζει μονάχα την 1η γεώτρηση ως άμεσα μετωπιαία, με συνέπεια να χρεώνονται σε αυτήν οι περισσότερες από τις κυρώσεις ελέγχου μετατόπισης $x_{movement}^{primary} penalties$. Αντίθετα, και οι 7 ενεργοποιήσεις της δεύτερης κυρώσεως ελέγχου $x_{movement}^{secondary} penalty$ επιβαρύνουν τις αντλήσεις της 2ης γεώτρησης, όπου ο αλγόριθμος προσπαθώντας να επιμερίσει το βάρος των απαιτούμενων μειώσεων στη συνολική άντληση, εφαρμόζει διαδοχικά μειώσεις του 5% στη γεώτρηση αυτή.

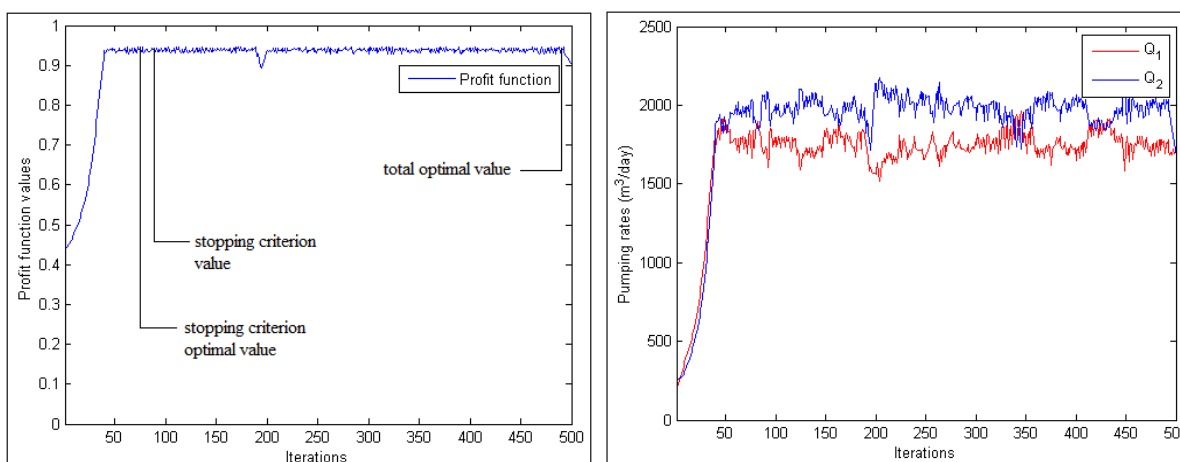


Σχήμα 6.10: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση Ia. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές αντλήσεων.

Η ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού της διαδικασίας πραγματοποιείται μόλις στην 84η επανάληψη, σε χρόνο ίσο με $t^{(84)} = 0.3309 \text{ secs}$. Στην επανάληψη αυτή το προτεινόμενο πλάνο αντλήσεων εξακολουθεί να διατηρεί το μοτίβο μικρότερης - μεγαλύτερης άντλησης για τις δύο γεωτρήσεις που περιγράψαμε προηγουμένως, αν και η μεταξύ τους διαφορά είναι μικρότερη. Η δε βέλτιστη λύση έως την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού έπειτα από 75 επαναλήψεις και χρόνο ίσο με $t^{(75)} = 0.2955 \text{ secs}$, βρίσκεται σε πλήρη αναλογία με την ολικά βέλτιστη λύση, προτείνοντας ένα πλάνο αντλήσεων συνολικού όγκου $S(Q^{(75)}) = 3818.01 \text{ m}^3/\text{day}$, που αντιστοιχεί σε μείωση μόλις κατά $S(Q^{(492)}) - S(Q^{(75)}) = 3822.49 - 3818.01 = 4.48 \text{ m}^3/\text{day}$ και ποσοστό ίσο με 0.12%.

Οι συντεταγμένες των θέσεων της υφάλμυρης σφήνας υπό την ισχύ των βέλτιστων τιμών άντλησης απέναντι ακριβώς από κάθε γεώτρηση παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.9,

ενώ γραφικά, ταυτόχρονα με τις θέσεις της σφήνας υπό την ισχύ των βέλτιστων μέχρι την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.10. Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές γιατί στο συγκεκριμένο Σχήμα οι θέσεις των δύο αυτών ξεχωριστών μετώπων ταυτίζονται.



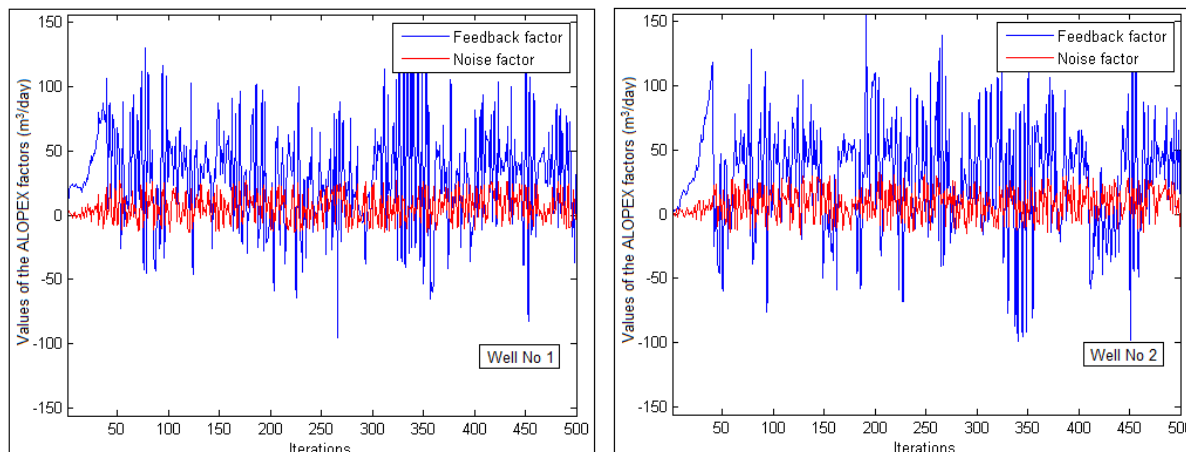
(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(\mathbf{Q})$. Απαιτούνται περίπου 40 επαναλήψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

(β') Προφίλ αντλήσεων για τις 2 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα. Οι τιμές αντλήσεων της 1ης γεώτρησης διατηρούνται σταθερά σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τις αντίστοιχες της 2ης γεώτρησης, καθ' όλη τη διάρκεια των 500 επαναλήψεων.

Σχήμα 6.11: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

Οι δύο εξωτερικοί ομόκεντροι κύκλοι που παρουσιάζουμε γύρω από κάθε θέση ενεργούς γεώτρησης στο Σχήμα 6.10, αλλά και στα υπόλοιπα αντίστοιχα Σχήματα του Κεφαλαίου, απεικονίζουν τις περιοχές ασφαλείας που παρουσιάσαμε σε προηγούμενη ενότητα (Σχήματα 5.2, 6.6 και 6.7) περιμετρικά κάθε γεώτρησης. Υπενθυμίζουμε ότι ο εσωτερικός κύκλος ακτίνας $r_c = 300 \text{ m}$ παρουσιάζει τα όρια της περιοχής του κώνου κατάπτωσης περιμετρικά της γεώτρησης, ενώ ο εξωτερικός κύκλος ακτίνας $d_s = 100 \text{ m}$ αντιπροσωπεύει μια προκαθορισμένη από εμάς απόσταση ασφαλείας.

Μελετώντας τα γραφήματα τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης (Σχήμα 6.11α') όσο και



(α') Τιμές παραγόντων μνήμης και θορύβου για τη γεώτρηση No 1.

(β') Τιμές παραγόντων μνήμης και θορύβου για τη γεώτρηση No 2.

Σχήμα 6.12: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia. Συνεισφορά παραγόντων μνήμης και θορύβου στην κατασκευή των νέων τιμών άντλησης, κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

των επιμέρους άντλησεων (Σχήμα 6.11β') προκύπτουν δύο παρατηρήσεις. Αρχικά, η συγκεκριμένη επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης εκθετικής μορφής, όπως την παρουσιάσαμε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.3.2, είναι υπεύθυνη για την ταχύτατη μεγιστοποίηση των τιμών άντλησης σε λίγες μάλιστα επαναλήψεις. Έπειτα, είναι ιδιαίτερα εμφανής ο στοχαστικός χαρακτήρας του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V που χρησιμοποιούμε. Η αντικειμενική συνάρτηση έπειτα περίπου από 40 επαναλήψεις συγκλίνει σε μια περιοχή ισοδυναμικών τοπικών μεγίστων. Και αναφερόμαστε σε μια ολόκληρη περιοχή τέτοιων λύσεων, διότι η ύπαρξη του θορύβου σε κάθε επανάληψη δεν επιτρέπει τη ντετερμινιστική σύγκλιση σε κάποια ολικά βέλτιστη λύση. Αντίθετα, ο αλγόριθμος αυτός οδηγείται γρήγορα σε μία περιοχή λύσεων που είναι σχεδόν ίσες μεταξύ τους ως προς την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία αποτελεί αύξουσα συνάρτηση του συνολικά αντλούμενου όγκου γλυκού νερού. Έτσι, η ολικά βέλτιστη λύση που εμείς παρουσιάζουμε στους Πίνακες αποτελεσμάτων κάθε περίπτωσης, στην ουσία προέκυψε έπειτα από την ολοκλήρωση των 500 επαναλήψεων της διαδικασίας βελτιστοποίησης και στη συνέχεια την εύρεση της επανάληψης που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Όσον αφορά την τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας αυτού του διαχειριστικού πλάνου αντλήσεων στην 492η επανάληψη, όπου εντοπίζεται η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ισχύει ότι $a_{eff}^{(492)} = \frac{3822.49}{5000.00} 100\% = 76.45\%$. Δηλαδή, το 76.45% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων γλυκού νερού μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα.

Ολοκληρώνουμε την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της πρώτης αυτής περίπτωσης με την παρουσίαση της συνεισφοράς των όρων μνήμης και θορύβου στην κατασκευή των νέων τιμών άντλησης ανά επανάληψη (Σχήμα 6.12). Είναι σαφές ότι ο παράγοντας μνήμης αναλαμβάνει σε κάθε επανάληψη να καθοδηγήσει την διαδικασία, ενώ η συνεισφορά του όρου θορύβου αντιστοιχεί σε σαφώς λιγότερα m^3/day . Αυτό έχει ως συνέπεια η ίδια η διαδικασία να μην αντικαθίσταται σε καμία επανάληψη από μια διαδικασία τυχαίου περιπάτου κατευθυνόμενη αποκλειστικά από τον όρο θορύβου.

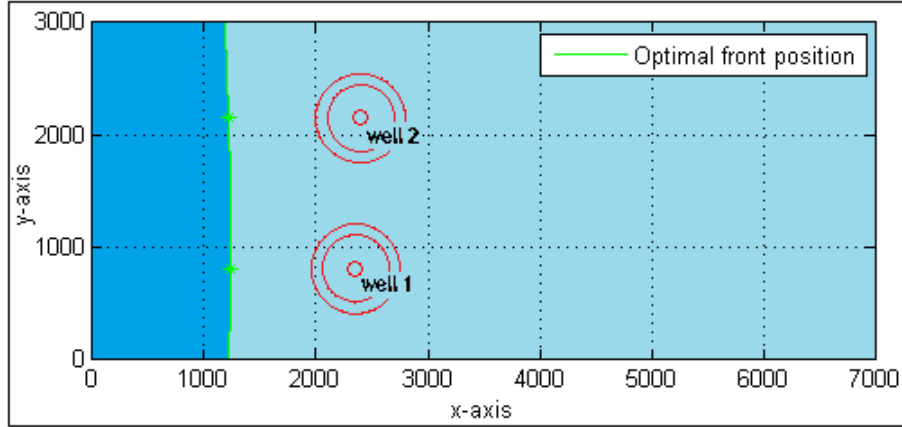
Προφίλ Μοντελοποίησης II

Τα αποτελέσματα που μόλις παρουσιάσαμε υπενθυμίζουμε ότι προέκυψαν χωρίς την ενεργοποίηση των κυρώσεων του δυναμικού ροής, ενώ τονίζουμε το γεγονός ότι αντιστοιχούν σε μια αποτελεσματική διαδικασία μεγιστοποιημένης, αλλά ταυτόχρονα ασφαλούς, εκμετάλλευσης του διαθέσιμου γλυκού νερού στον υδροφορέα της Καλύμνου. Για την πληρότητα της μελέτης παρουσιάζουμε στο σημείο αυτό συνοπτικά τα αποτελέσματα χρήσης του Προφίλ Μοντελοποίησης II, όπου ο νέος πρωταγωνιστής της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι η απαίτηση θετικής τιμής του δυναμικού ροής σε κάθε θέση ενεργούς άντλησης καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, δηλαδή:

$$\phi(\tilde{x}_j, y_j)^{(k)} > 0, \text{ για κάθε } j \in \{1, 2\}, \quad (6.15)$$

για κάθε επανάληψη $k \in \{1, \dots, 500\}$. Εφαρμόζουμε λοιπόν σε όποια επανάληψη απαιτείται κυρώσεις ελέγχου *potential penalties* = 0.95, κατ' αναλογία με τις υπόλοιπες κυρώσεις που εφαρμόσαμε προηγουμένως, μειώνοντας κατά 5% τις πραγματοποιούμενες αντλήσεις κάθε φορά που η τιμή του δυναμικού ροής σε μία ή περισσότερες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων μηδενίζεται ή γίνεται αρνητική.

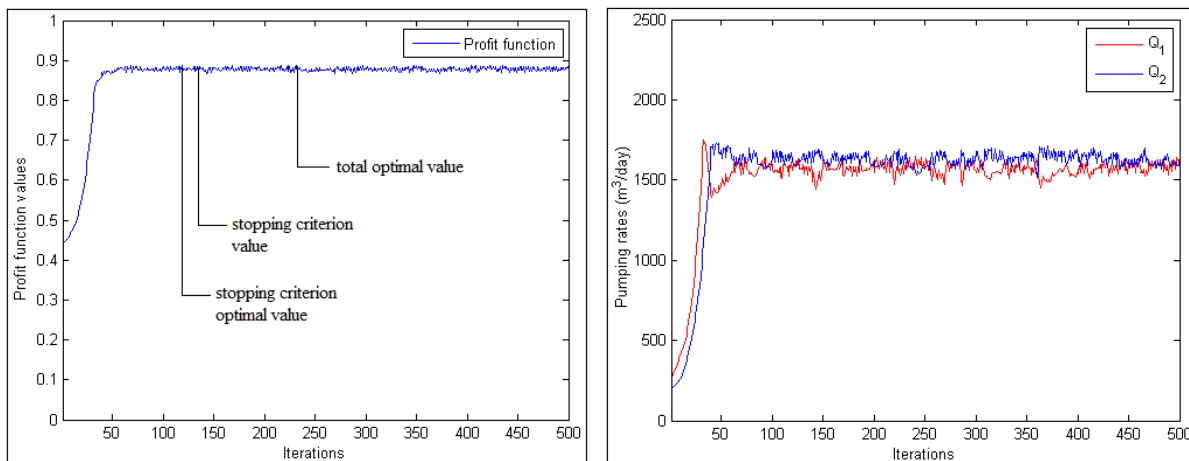
Παρουσιάζουμε στη συνέχεια συνοπτικά τα αποτελέσματα μιας τυπικής προσομοίωσης



Σχήμα 6.13: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση Ia, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες τιμές αντλήσεων.

500 επαναλήψεων, επισημαίνοντας τα σπουδαιότερα χαρακτηριστικά αυτής. Πιο συγκεκριμένα, με μέσο χρόνο ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης ίσο με $t_{av} = 0.0034 \text{ secs}$ και συνολικό χρόνο εκτέλεσης των 500 επαναλήψεων ίσο με $t^{(500)} = 1.7228 \text{ secs}$, η ολικά βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 232η επανάληψη σε αντίστοιχο χρόνο $t^{(232)} = 0.7888 \text{ secs}$. Η ολικά βέλτιστη αυτή λύση προτείνει ένα πλάνο αντλήσεων, σύμφωνα με το οποίο οι γεωτρήσεις αποδίδουν $Q_1^{(232)} = 1609.23 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_2^{(232)} = 1668.37 \text{ m}^3/\text{day}$ αντίστοιχα, με άθροισμα ίσο με $S(Q^{(232)}) = 3277.60 \text{ m}^3/\text{day}$. Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης υπό τη χρήση των αντλήσεων αυτών ισούται με $P(Q^{(232)}) = 0.8881$, ενώ το υφάλμυρο μέτωπο παραμένει τελικά σε σημαντική απόσταση από τις σχεδόν παράλληλες θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων, περίπου σε απόσταση 1220 m από τη θαλάσσια ακτογραμμή (Σχήμα 6.13). Αιτία του φαινομένου αυτού είναι προφανώς οι επαναλαμβανόμενες εφαρμογές των κυρώσεων ελέγχου του δυναμικού ροής, 319 σε πλήθος εντός των 500 επαναλήψεων, όπου συγκρατούν ουσιαστικά την προέλαση του υφάλμυρου μετώπου. Αντίστοιχα, δεν παρατηρείται καμία εφαρμογή των υπολοίπων κυρώσεων ελέγχου της διαδικασίας μέχρι και την ολοκλήρωση αυτού του τυπικού ελέγχου.

Η ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού εντοπίζεται στην 135η επανάληψη, σε χρόνο ίσο με $t^{(135)} = 0.4590 \text{ secs}$, προτείνοντας ένα πλάνο αντλήσεων όπου $Q_1^{(135)} = 1533.89 \text{ m}^3/\text{day}$, $Q_2^{(135)} = 1602.04 \text{ m}^3/\text{day}$ και $S(Q^{(135)}) = 3135.93 \text{ m}^3/\text{day}$.



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Απαιτούνται περίπου 40-50 επαναλήψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

(β') Προφίλ αντλήσεων για τις 2 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα. Οι τιμές αντλήσεων της 1ης γεωτρήσης διατηρούνται σταθερά σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τις αντίστοιχες της 2ης γεωτρήσης, καθ' όλη τη διάρκεια των 500 επαναλήψεων.

Σχήμα 6.14: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ia, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

Η τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας στην 232η επανάληψη, όπου εντοπίζεται η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης υπό την εφαρμογή των κυρώσεων ελέγχου του δυναμικού ροής, ισούται με $a_{eff}^{(232)} = \frac{3277.60}{5000.00} 100\% = 65.55\%$. Δηλαδή, πλέον μόλις το 65.55% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων γλυκού νερού μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα, δηλώνοντας σαφή μείωση σε σχέση με τη χρήση του προηγούμενου Προφίλ Μοντελοποίησης. Προφανώς, αιτία του μειωμένου αυτού συντελεστή αποδοτικότητας είναι η επαναλαμβανόμενη εφαρμογή των κυρώσεων ελέγχου δυναμικού ροής, που υποχρεώνουν το διαχειριστικό πλάνο αντλήσεων να παραμείνει σε περιοχές τιμών άντλησης αισθητά μειωμένες σε σχέση με αυτές του προηγούμενου Προφίλ.

Σημειώνουμε τέλος ότι τόσο η μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης (Σχήμα 6.14α') όσο και οι γραφικές παραστάσεις των επιμέρους τιμών άντλησης (Σχήμα 6.14β') παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά με εκείνες του προηγούμενου Προφίλ Μοντελοποίησης για την Περίπτωση Ia των δύο σχεδόν παράλληλων γεωτρήσεων.

6.3.2 Περίπτωση Ib: Υδροφορέας 2 ενεργών γεωτρήσεων

Η δεύτερη περίπτωση μελέτης στον υδροφορέα της Καλύμνου χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη 2 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του, με συντεταγμένες που περιγράφονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.10. Οι θέσεις των γεωτρήσεων επιλέχθηκαν στην παρούσα περίπτωση, έτσι ώστε να παρουσιάζουν τη συμπεριφορά του αλγορίθμου βελτιστοποίησης υπό την ύπαρξη αυστηρά μίας μετωπιαίας γεώτρησης και μίας σε κάποιο βάθος στο εσωτερικό του υδροφορέα. Αναμένουμε λοιπόν τη δημιουργία πλάνων άντλησης, όπου λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της μετωπιαίας γεώτρησης, προσδίδουν σε αυτή σημαντικά μικρότερο προτεινόμενο όγκο νερού σε σχέση με την επόμενη γεώτρηση στο εσωτερικό του.

Πίνακας 6.10: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Συντεταγμένες γεωτρήσεων	Γεώτρηση No 1	Γεώτρηση No 2
$(x_j, y_j) (m)$	(1400.00, 800.00)	(2350.00, 2150.00)

Προφίλ Μοντελοποίησης I

Τα αποτελέσματα μιας τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων παρουσιάζονται διεξοδικά στη συνέχεια στους Πίνακες 6.11 και 6.12, καθώς και στις γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων του παρόντος Κεφαλαίου.

Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση του συγκεκριμένου ελέγχου ισούται με $t^{(500)} = 1.3068 \text{ secs}$, όπου σε πλήθος 500 επαναλήψεων ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αντιλαμβάνομενος τις σχετικές θέσεις των 2 γεωτρήσεων, προτείνει διαρκώς πλάνα άντλησης που διατηρούν τις αντλήσεις της μεν 1ης γεώτρησης σε πολύ χαμηλά επίπεδα και αντίστοιχα της δε 2ης σε πολύ υψηλά. Ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης ισούται με $t_{av} = 0.0026 \text{ secs}$. Σε πλήθος 160 επαναλήψεων και χρόνο εκτέλεσης ίσο με $t^{(160)} = 0.4160 \text{ secs}$ συναντάμε την ολικά βέλτιστη λύση, όπου αντιστοιχεί σε συνολικό όγκο αντλούμενου νερού ίσο με $S(Q^{(160)}) = 2930.55 \text{ m}^3/\text{day}$. Σύμφωνα με τη λύση αυτή, η 1η γεώτρηση υποχρεώνεται λόγω της εγγύτητας της με το κινούμενο υφάλμυρο μέτωπο

Πίνακας 6.11: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.

Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	160	116	90
$P(Q^{(k)})$	0.8194	0.8426	0.8379	0.8423
$Q_1^{(k)}$ (m^3/day)	393.35	431.63	431.55	434.80
$Q_2^{(k)}$ (m^3/day)	2375.00	2498.96	2465.77	2494.08
$S(Q^{(k)})$ (m^3/day)	2768.35	2930.55	2897.32	2928.88
$t^{(k)}$ ($secs$)	1.3068	0.4160	0.3016	0.2340

Πίνακας 6.12: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.11.

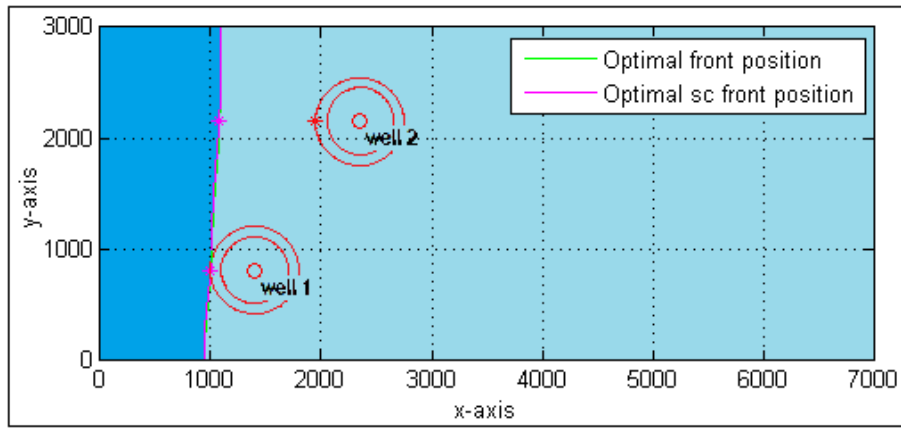
Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} penalty$	5%	163	15
$Q_{min}^{local} penalty$	5%	0	0
$Q_{total} penalty$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} penalty$	5%	110	16
$x_{movement}^{secondary} penalty$	5%	34	5

να περιοριστεί σε άντληση $Q_1^{(160)} = 431.63 \text{ } m^3/day$, ενώ η 2η όντας ασφαλής σε μεγαλύτερο βάθος στο εσωτερικό του υδροφορέα να μεγιστοποιήσει τις αντλήσεις της σε επίπεδο $Q_1^{(160)} = 2498.96 \text{ } m^3/day$.

Υπενθυμίζουμε ότι η μέγιστη επιτρεπτή άντληση για καθεμιά από τις γεωτρήσεις του υδροφορέα και κατά συνέπεια και για τη 2η, ισούται με $\bar{Q}_j = 2500 \text{ } m^3/day$, $j \in \{1,2\}$. Επομένως, η συμπεριφορά του αλγορίθμου ήταν η ακόλουθη. Αρχικά, έως περίπου τις 40 επαναλήψεις προσπαθεί να αυξήσει τις τιμές των αντλήσεων και για τις 2 γεωτρήσεις (Σχήματα 6.16α' και 6.16β'). Αυτό όμως οδηγεί το υφάλμυρο μέτωπο πολύ κοντά στον εξωτερικό κύκλο ασφαλείας της 1ης γεώτρησης. Έτσι, στο σημείο αυτό ξεκινά η επαναλαμβανόμενη ενεργοποίηση της πρώτης κύρωσης ελέγχου προσέγγισης $x_{movement}^{primary} penalty$, όπου εφαρμοζόμενη στη γεώτρηση No 1 προσπαθεί να ανακόψει την κίνηση της υφάλμυρης σφήνας.

Πίνακας 6.13: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.

Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου	απέναντι από τη γεώτρηση No 1	απέναντι από τη γεώτρηση No 2
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$ (m)	(999.93, 800.00)	(1076.38, 2150.00)

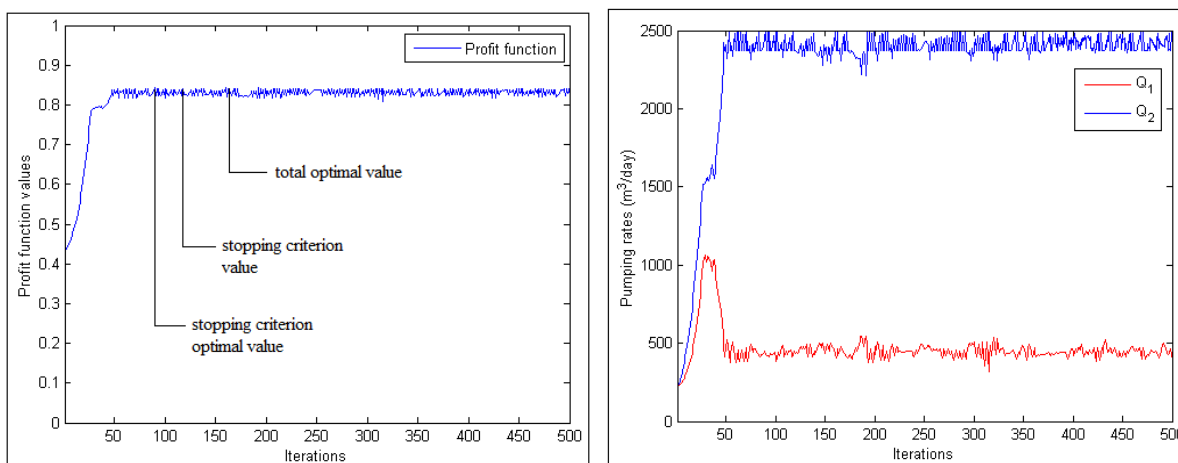


Σχήμα 6.15: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση Ib. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές αντλήσεων.

Ταυτόχρονα, οι τιμές αντλήσεων για τη 2η γεώτρηση συνεχίζουν ανεμπόδιστες να αυξάνουν έως το επίπεδο του $\bar{Q}_2 = 2500 \text{ m}^3/\text{day}$. Τότε, χωρίς να υπάρχει πλέον η δυνατότητα αύξησης των αντλήσεων της 2ης γεώτρησης, ο αλγόριθμος εισέρχεται σε έναν διαρκή κύκλο ελέγχων ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων, έως τελικά τη συμπλήρωση των προκαθορισμένων 500 επαναλήψεων. Να σημειώσουμε ότι τόσο η εφαρμογή της δεύτερης κυρώσεως ελέγχου προσέγγισης $x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$, όσο και η εφαρμογή της κυρώσεως μέγιστης επιτρεπτής άντλησης $Q_{max}^{local} \text{ penalty}$, πραγματοποιούνται μονάχα στη 2η γεώτρηση με στόχο την εξισορρόπηση του καταμερισμού αντλήσεων στις 2 γεωτρήσεις του υδροφορέα.

Το κριτήριο τερματισμού ενεργοποιείται στην 116η επανάληψη και σε χρόνο ίσο με $t^{(116)} = 0.3016 \text{ secs}$, προτείνοντας μια λύση παραπλήσια της ολικά βέλτιστης λύσεως. Όσον αφορά δε τη βέλτιστη λύση έως την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού, αυτή επιτυγχάνεται στην 90η επανάληψη, σε χρόνο ίσο με $t^{(90)} = 0.2340 \text{ secs}$ και σχεδόν ταυτίζεται με την

ολικά βέλτιστη λύση που αναφέραμε προηγουμένως. Είναι σαφές λοιπόν ότι οι θέσεις της υφάλμυρης σφήνας υπό την ισχύ τόσο της βέλτιστης λύσεως όσο και της βέλτιστης μέχρι την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού πρακτικά ταυτίζονται, όπως εύκολα διαπιστώνουμε στο Σχήμα 6.15. Επίσης, στον Πίνακα 6.13 παρουσιάζουμε αναλυτικά τις συντεταγμένες των θέσεων ενδιαφέροντος της υφάλμυρης σφήνας απέναντι από τις 2 γεωτρήσεις του υδροφορέα.



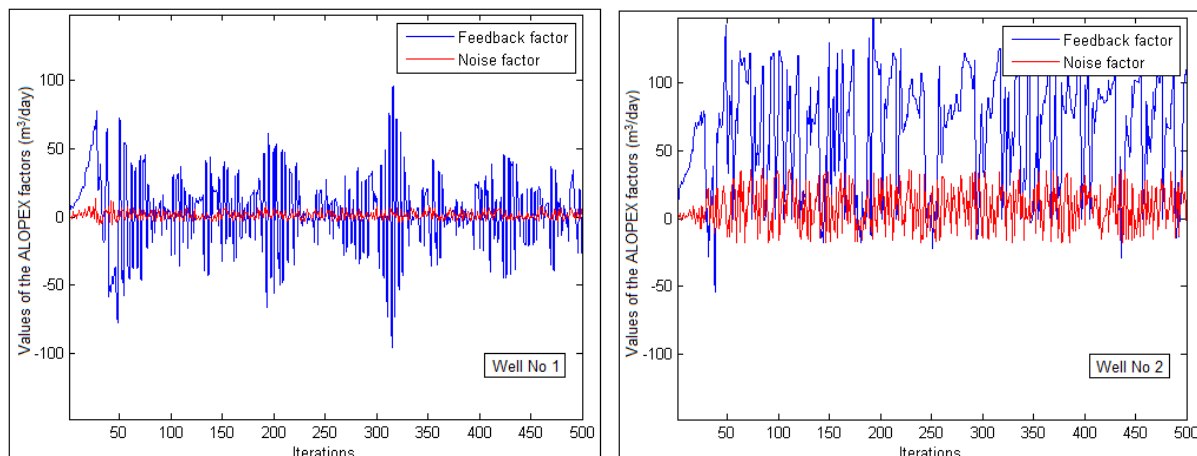
(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Απαιτούνται περίπου 50 επαναλήψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

(β') Τιμές αντλήσεων για τις 2 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα, σταθεροποιημένες σε συγκεκριμένες περιοχές τιμών έπειτα από 50 περίπου επαναλήψεις.

Σχήμα 6.16: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

Η τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας στην 160η επανάληψη, όπου εντοπίζεται η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης ισούται με $a_{eff}^{(160)} = \frac{2930.55}{5000.00} 100\% = 58.61\%$. Δηλαδή, πλέον μόλις το 58.61% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων γλυκού νερού μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα. Η μη παράλληλη δηλαδή διάταξη των ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, έχει ως συνέπεια τη δημιουργία βελτιστοποιημένων πλάνων άντλησης που αποφέρουν στην τοπική κοινότητα αισθητά μειωμένο όγκο γλυκού νερού, σε σχέση πάντοτε με την αντίστοιχη μελέτη της Περίπτωσης Ia.

Επίσης, η παρουσίαση των όρων μνήμης και θορύβου της επαναληπτικής διαδικασίας στο



(α') Τιμές παραγόντων μνήμης και θορύβου για τη γεώτρηση No 1.

(β') Τιμές παραγόντων μνήμης και θορύβου για τη γεώτρηση No 2.

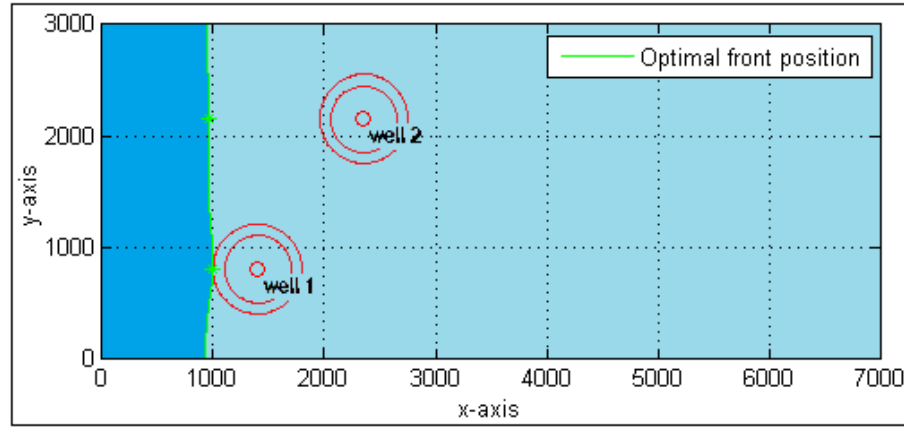
Σχήμα 6.17: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib. Συνεισφορά παραγόντων μνήμης και θορύβου στην κατασκευή των νέων τιμών άντλησης, κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

Σχήμα 6.17 απλά επιβεβαιώνει τη φύση του χρησιμοποιούμενου στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V. Ο κυρίαρχος όρος καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης είναι ο όρος μνήμης, διαμέσου του οποίου ο αλγόριθμος παράγει σε κάθε επανάληψη νέες λύσεις λαμβάνοντας υπόψη του τις λύσεις των προηγούμενων 2 επαναλήψεων. Ο όρος θορύβου αντίστοιχα, επεμβαίνει σε κάθε επανάληψη για να προστατεύσει τη διαδικασία από τυχόν εγκλωβισμό της σε περιοχές τοπικών μονάχα ακροτάτων. Έτσι, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης δεν υποβιβάζεται σε μια απλή διαδικασία ενός τυχαίου περιπάτου, που χωρίς καθοδήγηση εντοπίζει νέα σύνολα λύσεων.

Προφίλ Μοντελοποίησης II

Η ενεργοποίηση των κυρώσεων του δυναμικού ροής τροποποιεί ελαφρώς τα αποτελέσματα που μόλις παρουσιάσαμε, προτείνοντας διαχειριστικά πλάνα άντλησης με τα χαρακτηριστικά που περιγράφουμε στη συνέχεια. Παρατηρούμε έτσι, ότι ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης ισούται με $t_{av} = 0.0035 \text{ secs}$ με συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης αυτού του τυπικού ελέγχου των 500 επαναλήψεων ίσο με $t^{(500)} = 1.7385 \text{ secs}$. Η κύρωση ελέγχου

potential penalty ενεργοποιείται συνολικά 188 φορές, όπου σε συνδυασμό με τις 88 φορές ενεργοποίησης του $x_{movement}^{primary}$ *penalty* και τις 22 φορές του $x_{movement}^{secondary}$ *penalty* χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη προσέγγιση.

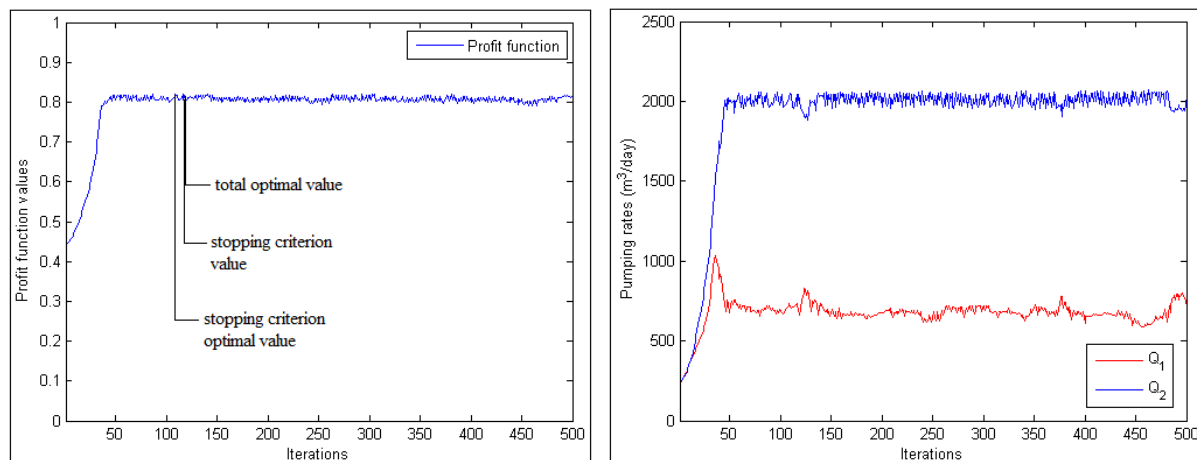


Σχήμα 6.18: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση Ib, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Θέσεις υφάλμυρου μέτωπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες τιμές αντλήσεων.

Η ολικά βέλτιστη λύση παρουσιάζεται στην 116η επανάληψη με επιμέρους αντλήσεις $Q_1^{(116)} = 735.75 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_2^{(116)} = 2043.31 \text{ m}^3/\text{day}$, συνολικό όγκο άντλησης ίσο με $S(Q^{(116)}) = 2779.06 \text{ m}^3/\text{day}$ και χρόνο ολοκλήρωσης $t^{(116)} = 0.4060 \text{ secs}$. Η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ισούται με $P(Q^{(116)}) = 0.8209$. Επίσης, η ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού εντοπίζεται στην 115η επανάληψη, προτείνοντας ένα διαχειριστικό πλάνο αντλήσεων με επιμέρους αντλήσεις $Q_1^{(115)} = 729.39 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_2^{(115)} = 2012.36 \text{ m}^3/\text{day}$, συνολικό όγκο άντλησης ίσο με $S(Q^{(115)}) = 2741.75 \text{ m}^3/\text{day}$ και χρόνο ολοκλήρωσης $t^{(115)} = 0.4025 \text{ secs}$.

Το υφάλμυρο μέτωπο παραμένει σταθεροποιημένο σε απόσταση περίπου 950 – 1000 m από τη θαλάσσια ακτογραμμή (Σχήμα 6.18), διατηρώντας ασφαλείς και τις 2 γεωτρήσεις του υδροφορέα. Η δε κλίση του είναι ελαφρώς διαφορετική στα δύο Προφίλ Μοντελοποίησης, ως αποτέλεσμα προφανώς των διαφορετικών προτεινόμενων βέλτιστων λύσεων.

Όσον αφορά τώρα την τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας στην 116η επανάληψη, όπου εντοπίζεται η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ισχύει ότι $a_{eff}^{(116)} =$



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Απαιτούνται περίπου 40 επαναλήψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

(β') Τιμές αντλήσεων για τις 2 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα, σταθεροποιημένες σε συγκεκριμένες περιοχές τιμών έπειτα από 50 περίπου επαναλήψεις.

Σχήμα 6.19: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Ib, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

$\frac{2779.06}{5000.00} 100\% = 55.58\%$. Δηλαδή, το 55.58% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων γλυκού νερού μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα, ποσοστό σχεδόν παραπλήσιο με αυτό που προτείνεται από το Προφίλ Μοντελοποίησης I.

Τέλος, οι γραφικές παραστάσεις τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης (Σχήμα 6.19α'), όσο και των επιμέρους αντλήσεων (Σχήμα 6.19β'), βρίσκονται σε αναλογία με τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις του προηγούμενου Προφίλ Μοντελοποίησης. Παρατηρούμε όμως, ότι η νέα αντικειμενική συνάρτηση συγκλίνει σε μια περιοχή ελαφρώς μικρότερων τιμών σε σχέση με προηγούμενως, ενώ οι επιμέρους τιμές αντλήσεων των 2 γεωτρήσεων παρουσιάζουν αντίστοιχα μικρότερη διαφορά μεταξύ τους ανά επανάληψη.

6.3.3 Περίπτωση IIa: Υδροφορέας 3 ενεργών γεωτρήσεων

Συνεχίζοντας τη μελέτη του συγκεκριμένου υδροφορέα, σε συνδυασμό πάντοτε με τον ταυτόχρονο έλεγχο αποδοτικότητας της διαδικασίας βελτιστοποίησης που προτείνουμε, μελετάμε

στο παρόν Κεφάλαιο τη συμπεριφορά του αλγορίθμου βελτιστοποίησης στο περιβάλλον του υδροφορέα της Καλύμνου, υπό την ύπαρξη 3 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του. Η τοποθέτηση των γεωτρήσεων αυτών επιλέγεται ακολουθώντας το σκεπτικό που χρησιμοποιήσαμε και προηγουμένως, δηλαδή τον έλεγχο της συμπεριφοράς του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό του, υπό την επίδραση πηγών άντλησης σε σημαντικές για τη διαδικασία θέσεις.

Πίνακας 6.14: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Πα. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Συντεταγμένες γεωτρήσεων	Γεώτρηση No 1	Γεώτρηση No 2	Γεώτρηση No 3
$(x_j, y_j) (m)$	(2200.00, 550.00)	(2200.00, 1600.00)	(3500.00, 2450.00)

Παρουσιάζουμε δύο σενάρια άντλήσεων, ως αντιπροσωπευτικά του πλήθους των σεναρίων 3 θέσεων που εξετάστηκαν στον υδροφορέα αυτό. Οι συντεταγμένες των θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στην πρώτη περίπτωση, γνωστή ως Περίπτωση Πα, παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.14. Πιο συγκεκριμένα, επιλέγουμε οι γεωτρήσεις No 1 και 2 να είναι ταυτόχρονα μετωπιαίες, δηλαδή να διαθέτουν την ίδια συντεταγμένη ως προς τον άξονα των x . Η δε 3η γεώτρηση βρίσκεται σε οριζόντια απόσταση 1300 m βαθύτερα στο εσωτερικό του υδροφορέα, δημιουργώντας έτσι τις κατάλληλες συνθήκες για επίτευξη μεγαλύτερων τιμών άντλησης σε αυτήν.

Προφίλ Μοντελοποίησης I

Τα αποτελέσματα ενός τυπικού ελέγχου 500 επαναλήψεων παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 6.15 και 6.16, καθώς και στις γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων που ακολουθούν.

Με μέσο χρόνο ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης ίσο με $t_{av} = 0.0048 \text{ secs}$, παρατηρούμε ότι απαιτούνται $t^{(500)} = 2.3928 \text{ secs}$ για την εκτέλεση των 500 επαναλήψεων της τυπικής αυτής προσομοίωσης. Οι ολικά βέλτιστες τιμές άντλησης κατασκευάζονται κατά την 121η επανάληψη σε χρόνο $t^{(121)} = 0.5808 \text{ secs}$, ενώ αντιστοιχούν σε συνολικό όγκο αντλούμενου γλυκού νερού ίσο με $3787.42 \text{ m}^3/\text{day}$. Το προφίλ των αντλήσεων που αντιστοιχούν στη

Πίνακας 6.15: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Πα. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.

Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	121	82	63
$P(Q^{(k)})$	0.7807	0.7827	0.7787	0.7818
$Q_1^{(k)}$ (m^3/day)	714.06	765.54	745.04	728.98
$Q_2^{(k)}$ (m^3/day)	567.49	561.75	617.42	604.09
$Q_3^{(k)}$ (m^3/day)	2486.70	2460.13	2386.16	2445.54
$S(Q^{(k)})$ (m^3/day)	3768.25	3787.42	3748.62	3778.61
$t^{(k)}$ (secs)	2.3928	0.5808	0.3936	0.3024

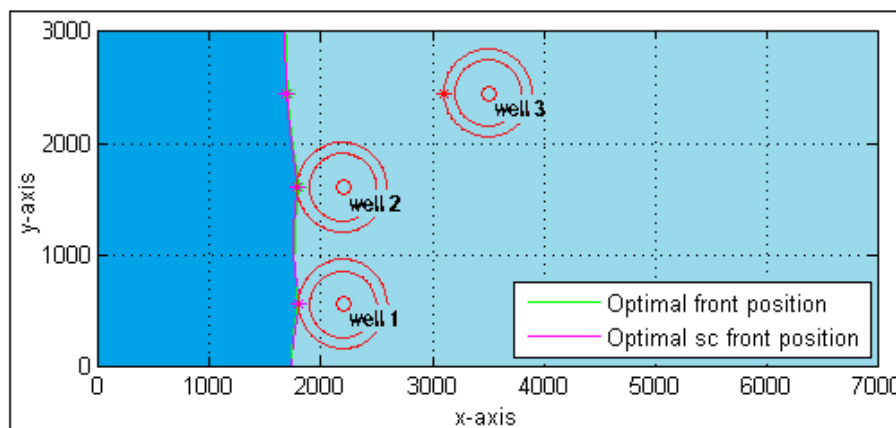
Πίνακας 6.16: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Πα. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.15.

Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} \text{ penalty}$	5%	108	2
$Q_{min}^{local} \text{ penalty}$	5%	1	1
$Q_{total} \text{ penalty}$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$	5%	268	47
$x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$	5%	13	2

βέλτιστη αυτή λύση παρουσιάζει μια ιδιαίτερη λεπτομέρεια της συμπεριφοράς του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Οι γεωτρήσεις No 1 και 2 σύμφωνα με το Σχήμα 6.20, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι είναι ισοδύναμα μετωπιαίες απέναντι στην κίνηση του υφάλμυρου μετώπου. Η τοποθέτησή τους όμως ως προς τον y άξονα και κυρίως η ύπαρξη της 3ης γεώτρησης στη συγκεκριμένη θέση, ακυρώνει μερικώς τον ισχυρισμό αυτό. Πιο αναλυτικά, η 1η και η 2η γεώτρηση μοιράζονται την ίδια x συντεταγμένη, αλλά οι αποστάσεις τους από το νότιο και το βόριο σύνορο του υδροφορέα δεν είναι αντίστοιχα ίδιες. Έτσι, μεγαλύτερο μέρος του υφάλμυρου μετώπου εμφανίζεται στο άνω τμήμα της 2ης γεώτρησης, με προφανώς μεγαλύτερη δυναμική κίνησης προς το εσωτερικό του υδροφορέα. Αναμένουμε δηλαδή ένα ενδεχόμενο μικρότερο σύνολο τιμών άντλησης για τη γεώτρηση αυτή. Το γεγονός αυτό επιδεινώνεται

Πίνακας 6.17: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIa. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές άντλησεων.

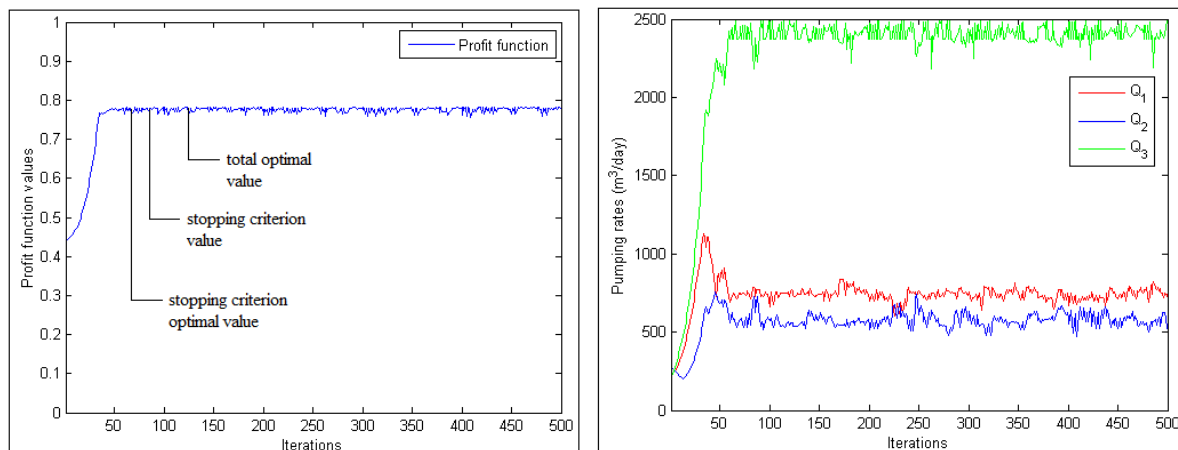
Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου	απέναντι από τη γεώτρηση No 1	απέναντι από τη γεώτρηση No 2	απέναντι από τη γεώτρηση No 3
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$ (m)	(1798.42, 550.00)	(1791.47, 1600.00)	(1690.88, 2450.00)



Σχήμα 6.20: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση IIa. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές άντλησεων.

από την ύπαρξη της 3ης γεώτρησης, όπως αυτή αποτυπώνεται στο ίδιο Σχήμα. Έτσι, ο διαθέσιμος προς άντληση όγκος γλυκού νερού της ανώτερης περιοχής του υδροφορέα, πρέπει να καταμεριστεί σε 2 θέσεις γεωτρήσεων (δηλαδή στη 2η και στην 3η), εν αντιθέσει με τον αντίστοιχο κατώτερο που αποδίδεται μονάχα στην 1η γεώτρηση. Το γεγονός αυτό παρουσιάζεται αναλυτικά μέσα από το γράφημα των επιμέρους τιμών άντλησης για τις 3 γεωτρήσεις της περίπτωσης αυτής στο Σχήμα 6.21β'. Παρατηρούμε δηλαδή από τις πρώτες επαναλήψεις, ότι ο ALOPEX αντιλαμβανόμενος την ιδιαιτερότητα των θέσεων των γεωτρήσεων της περίπτωσης που μελετάμε, προτείνει τιμές για την 1η γεώτρηση σαφώς μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες για την 2η.

Η 3η γεώτρηση, σταθερά, καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, διατηρείται σε μια περιοχή τιμών πολύ κοντά στη μέγιστη επιτρεπτή της τιμή, δηλαδή τα $\bar{Q}_3 = 2500 \text{ m}^3/\text{day}$. Να σημειώσουμε ότι η συμπεριφορά της 3ης γεώτρησης καθορίζει το πλάνο άντλησεων,



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(\mathbf{Q})$. Απαιτούνται περίπου 40-50 επαναλήψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

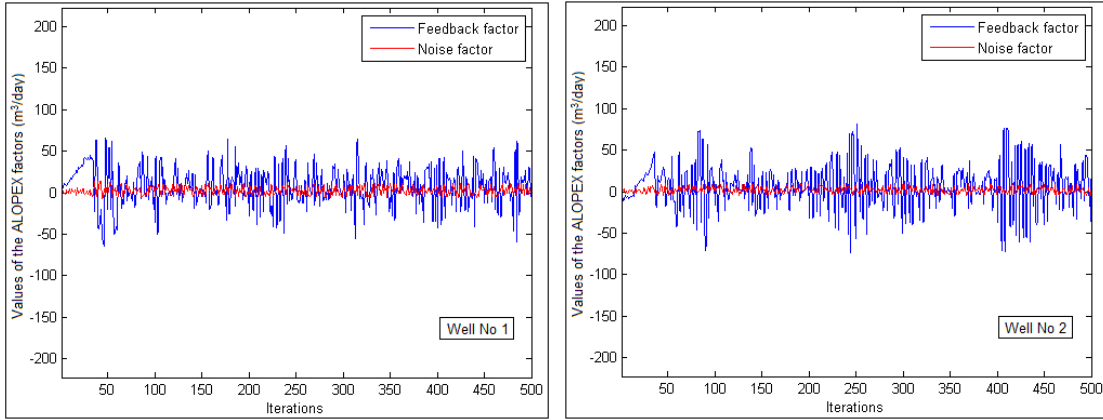
(β') Προφίλ αντλήσεων για τις 3 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα. Είναι εμφανής η ικανότητα της 3ης γεώτρησης να αντλεί σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες γλυκού νερού σε σχέση με τις ικανότητες αντίστοιχα των άλλων 2 μετωπιαίων γεωτρήσεων.

Σχήμα 6.21: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Πα. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

υπό την έννοια ότι η γεώτρηση αυτή όντας απαλλαγμένη από τον κίνδυνο υφαλμύρισης, γρήγορα φτάνει στο μέγιστο δυνατό όριο αντλήσεων της. Έτσι ο ALOPEX, από τη στιγμή που μεγιστοποιεί τις τιμές άντλησης της γεώτρησης αυτής, ασχολείται στην ουσία με τον έλεγχο πιθανών ζευγαριών τιμών για τις άλλες δύο. Εκεί λαμβάνεται υπόψη η σχετική θέση αυτών των γεωτρήσεων ως προς την 3η γεώτρηση και καθορίζονται οι τελικές τιμές σε κάθε επανάληψη.

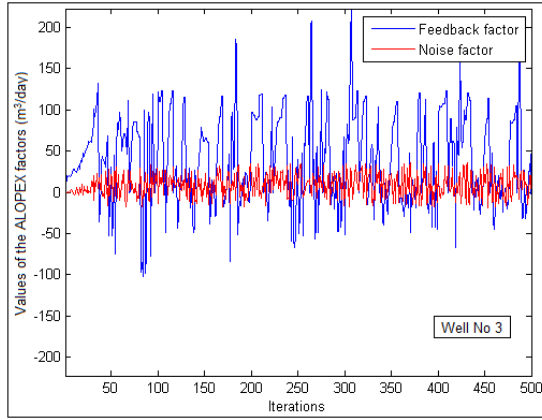
Η τελική θέση του υφάλμυρου μετώπου υπό την ισχύ τόσο των ολικά βέλτιστων τιμών άντλησης, όσο και των βέλτιστων του κριτηρίου τερματισμού της διαδικασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.20. Οι συντεταγμένες των θέσεων του υφάλμυρου μετώπου υπό την ισχύ των βέλτιστων τιμών άντλησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.17.

Το κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας ενεργοποιείται στην 82η επανάληψη, σε χρόνο $t^{(82)} = 0.3936 \text{ secs}$. Το προφίλ των λύσεων που περιγράφει βρίσκεται σε πλήρη αναλογία με τις αντλήσεις που περιγράφονται στην ολικά βέλτιστη λύση της προσομοίωσης για κάθε



(α') Τιμές παραγόντων μνήμης και θορύβου για τη γεώτρηση No 1.

(β') Τιμές παραγόντων μνήμης και θορύβου για τη γεώτρηση No 2.



(γ') Τιμές παραγόντων μνήμης και θορύβου για τη γεώτρηση No 3.

Σχήμα 6.22: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση Πα. Συνεισφορά παραγόντων μνήμης και θορύβου στην κατασκευή των νέων τιμών άντλησης, κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

γεώτρηση. Ο δε συνολικός όγκος άντλησης ισούται με $S(Q^{(82)}) = 3748.62 \text{ m}^3/\text{day}$, μόλις δηλαδή $S(Q^{(121)}) - S(Q^{(82)}) = 3787.42 - 3748.62 = 38.8 \text{ m}^3/\text{day}$ λιγότερα. Ομοίως, η βέλτιστη λύση μέχρι την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού σε 63 επαναλήψεις και χρόνο ίσο με $t^{(63)} = 0.3024 \text{ secs}$, επίσης σε πλήρη αντιστοιχία με τις τιμές άντλησης της βέλτιστης λύσεως, προτείνει συνολικό όγκο ασφαλούς άντλησης ίσο με $S(Q^{(63)}) = 3778.61 \text{ m}^3/\text{day}$ και μπορεί προφανώς να χρησιμοποιηθεί στη θέση της ολικά βέλτιστης λύσεως, σε χρόνο πραγματοποίησης μάλιστα πολύ μικρότερο.

Η σύγκλιση της αντικειμενικής συνάρτησης σε μια περιοχή ισοδύναμων λύσεων, όπως

είναι εμφανές και στο Σχήμα 6.21α', πραγματοποιείται περίπου από τις 40-50 αρχικές επαναλήψεις και διατηρείται στην ίδια περιοχή τιμών για όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Όσον αφορά την εφαρμογή των κυρώσεων ελέγχου κατά την εκτέλεση των 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης (Πίνακας 6.16), είναι σαφές ότι οι γεωτρήσεις No 1 και 2 αντιμετωπίζουν κυρώσεις ελέγχου προσέγγισης $x_{movement}^{primary} penalties$ και $x_{movement}^{secondary} penalties$, ενώ η 3η γεώτρηση εκτός από τις κυρώσεις $x_{movement}^{secondary} penalties$ αντιμετωπίζει και κυρώσεις μέγιστων επιτρεπόμενων τιμών άντλησης $Q_{max}^{local} penalties$.

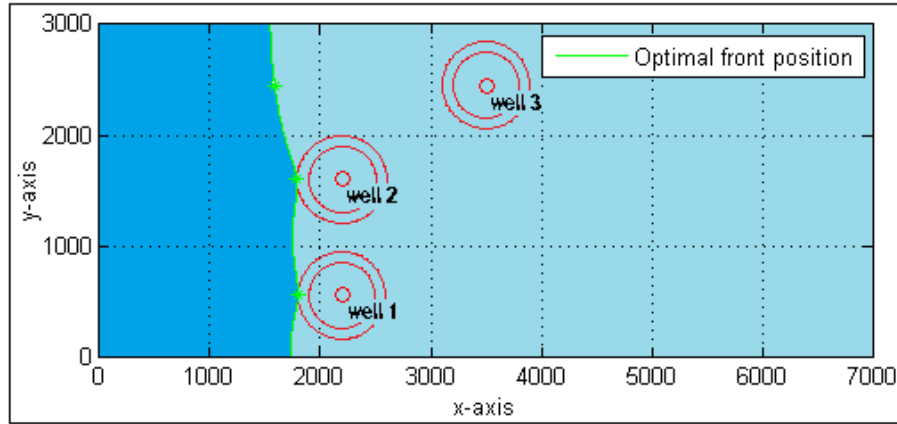
Η τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας στην 121η επανάληψη, όπου εντοπίζεται η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ισούται με $a_{eff}^{(121)} = \frac{3787.42}{7500.00} 100\% = 50.50\%$. Δηλαδή, μόλις το 50.50% του συνολικού δυνατού όγκου άντλήσεων γλυκού νερού μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα. Μια παρατήρηση στο σημείο αυτό είναι ότι η αύξηση του αριθμού των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα, στην ουσία μειώνει το συντελεστή αποδοτικότητας σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις των 2 ενεργών γεωτρήσεων. Επίσης, άμεση σύγκριση αποδοτικότητας μεταξύ των σεναρίων άντλησης που περιέχουν διαφορετικό πλήθος ενεργών γεωτρήσεων, όπως παραδείγματος χάριν μεταξύ των Περιπτώσεων Ia ή Ib και IIa, δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Τέλος παρουσιάζουμε τη συμπεριφορά των όρων μνήμης και θορύβου κατά τη διάρκεια του κύκλου αυτής της προσομοίωσης, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο Σχήμα 6.22. Σημειώνουμε ότι στην 3η γεώτρηση εμφανίζονται μεγαλύτερες τιμές ταυτόχρονα και των δύο όρων (Σχήμα 6.22γ'), εξαιτίας προφανώς του μεγαλύτερου όγκου άντλήσεων που πραγματοποιούνται από τη γεώτρηση αυτή σε σχέση με τις άλλες δύο. Επίσης, τονίζουμε ότι προφανώς πρόκειται για μια διαδικασία κατευθυνόμενη από τον ALOPEX και όχι απλά ένας τυχαίος περίπατος κατευθυνόμενος από τον παράγοντα θορύβου.

Προφίλ Μοντελοποίησης II

Ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης χρησιμοποιώντας το Προφίλ Μοντελοποίησης II ισούται με $t_{av} = 0.0066 \text{ secs}$, με συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης ενός τυπικού ελέγχου 500 επαναλήψεων ίσο με $t^{(500)} = 3.2958 \text{ secs}$. Η κύρωση ελέγχου *potential penalty*, που προφανώς χαρακτηρίζει τη συγκεκριμένη μοντελοποίηση, ενεργοποιείται συνολικά 98 φορές,

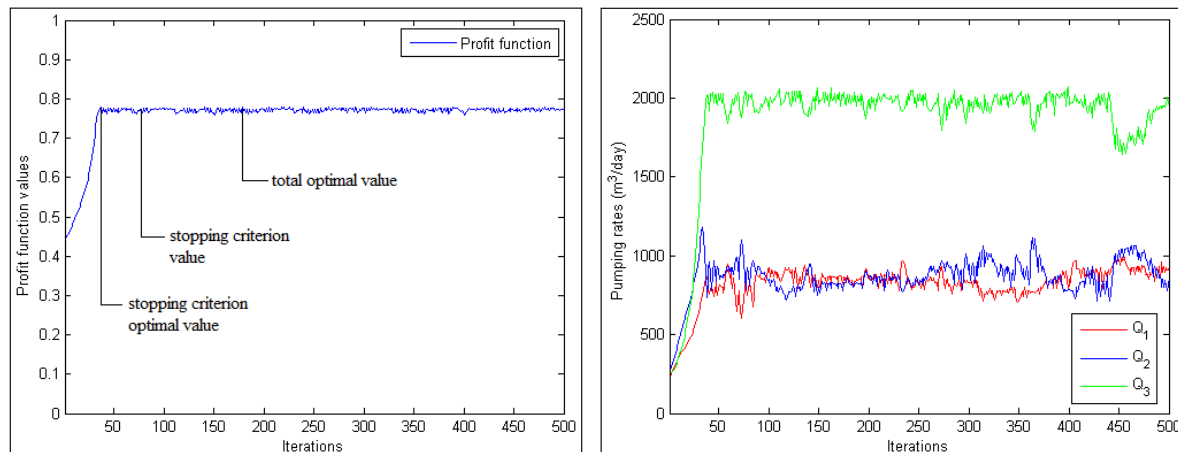
σε συνδυασμό με τις 355 φορές ενεργοποίησης του $x_{movement}^{primary} penalty$ και 19 φορές του $x_{movement}^{secondary} penalty$.



Σχήμα 6.23: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση Πα, Προφίλ Μοντελοποίησης Π. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες τιμές αντλήσεων.

Η ολικά βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 179η επανάληψη με επιμέρους αντλήσεις $Q_1^{(179)} = 877.07 \text{ m}^3/\text{day}$, $Q_2^{(179)} = 857.33 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_3^{(179)} = 2019.74 \text{ m}^3/\text{day}$, συνολικό όγκο άντλησης ίσο με $S(Q^{(179)}) = 3754.15 \text{ m}^3/\text{day}$ και χρόνο ολοκλήρωσης $t^{(179)} = 1.1814 \text{ secs}$. Η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ισούται με $P(Q^{(179)}) = 0.7792$. Επίσης, η ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού εντοπίζεται στην 76η επανάληψη, προτείνοντας ένα διαχειριστικό πλάνο αντλήσεων με επιμέρους αντλήσεις $Q_1^{(76)} = 794.83 \text{ m}^3/\text{day}$, $Q_2^{(76)} = 870.69 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_3^{(76)} = 2039.93 \text{ m}^3/\text{day}$, με συνολικό όγκο άντλησης ίσο με $S(Q^{(76)}) = 3705.45 \text{ m}^3/\text{day}$ και χρόνο ολοκλήρωσης $t^{(76)} = 0.2016 \text{ secs}$. Η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ισούται με $P(Q^{(76)}) = 0.7742$.

Το υφάλμυρο μέτωπο υπό την ισχύ του ολικά βέλτιστου πλάνου αντλήσεων, παραμένει σταθεροποιημένο σε απόσταση ασφαλείας από τις 3 γεωτρήσεις του υδροφορέα (Σχήμα 6.23), διατηρώντας σχεδόν τις ίδιες κλίσεις που συναντήσαμε στο υφάλμυρο μέτωπο του Προφίλ Μοντελοποίησης Ι. Ομοίως, η γραφική παράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης (Σχήμα 6.24α') βρίσκεται σε πλήρη αναλογία με την αντίστοιχη του προηγούμενου Προφίλ Μοντελοποίησης. Διαφορά ωστόσο συναντάμε ως προς τις επιμέρους αντλήσεις (Σχήμα 6.24β'),



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Απαιτούνται περίπου 30-40 επαναλήψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

(β') Τιμές αντλήσεων για τις 2 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα, σταθεροποιημένες σε συγκεκριμένες περιοχές τιμών έπειτα από 50 περίπου επαναλήψεις.

Σχήμα 6.24: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIa, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

όπου πλέον η επίδραση των εφαρμοζόμενων *potential penalties* υποχρεώνει τις μεν τιμές αντλήσεων της 3ης γεώτρησης να παραμένουν σε μικρότερες τιμές (περίπου $500 \text{ m}^3/\text{day}$ κατά μέσο) σε σχέση με προηγουμένως, τις δε αντλήσεις της 2ης και 3ης γεώτρησης να εναλλάσσουν τιμές μεταξύ τους, στην προσπάθεια του αλγορίθμου να εξετάζει διαρκώς ισοδύναμα διαχειριστικά πλάνα για αυτές τις μετωπιαίες γεωτρήσεις.

Όσον αφορά τέλος την τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας στην 179η επανάληψη, όπου εντοπίζεται η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ισχύει ότι $a_{eff}^{(179)} = \frac{3754.15}{7500.00} 100\% = 50.06\%$. Δηλαδή, το 50.06% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων γλυκού νερού μπορεί ως ωφέλιμο να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα, ποσοστό ελάχιστα μειωμένο σε σχέση με το αντίστοιχο του Προφίλ Μοντελοποίησης I.

6.3.4 Περίπτωση IIb: Υδροφορέας 3 ενεργών γεωτρήσεων

Μελετάμε την περίπτωση μιας διαφορετικής διάταξης 3 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα της Καλύμνου, όπως αυτές παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.18. Στην παρούσα περίπτωση εμφανίζεται μονάχα μία μετωπιαία γεώτρηση, η γεώτρηση Νο 1, η θέση της οποίας επηρεάζει ιδιαίτερα την προσπάθεια του αλγορίθμου βελτιστοποίησης να παράγει τις ζητούμενες βέλτιστες λύσεις. Οι λύσεις αυτές αντιστοιχούν σε μεγιστοποιημένο πλάνο αντλήσεων, υπό τη συνθήκη πάντοτε της προστασίας κάθε γεώτρησης από το καταστρεπτικό φαινόμενο της υφαλμύρισης.

Πίνακας 6.18: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Συντεταγμένες γεωτρήσεων	Γεώτρηση No 1	Γεώτρηση No 2	Γεώτρηση No 3
$(x_j, y_j) (m)$	(2200.00, 1100.00)	(3500.00, 2450.00)	(5000.00, 550.00)

Προφίλ Μοντελοποίησης I

Τα αποτελέσματα ενός τυπικού ελέγχου 500 επαναλήψεων παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 6.19 και 6.20, καθώς και στις γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων που ακολουθούν.

Πίνακας 6.19: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.

Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	221	85	77
$P(Q^{(k)})$	0.7794	0.7807	0.7747	0.7779
$Q_1^{(k)} (m^3/day)$	222.38	206.63	210.00	293.57
$Q_2^{(k)} (m^3/day)$	1471.59	1254.18	1125.92	1004.77
$Q_3^{(k)} (m^3/day)$	2061.87	2306.97	2375.00	2443.32
$S(Q^{(k)}) (m^3/day)$	3755.85	3767.78	3710.92	3741.67
$t^{(k)} (secs)$	3.4820	1.5470	0.5950	0.5390

Πίνακας 6.20: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.19.

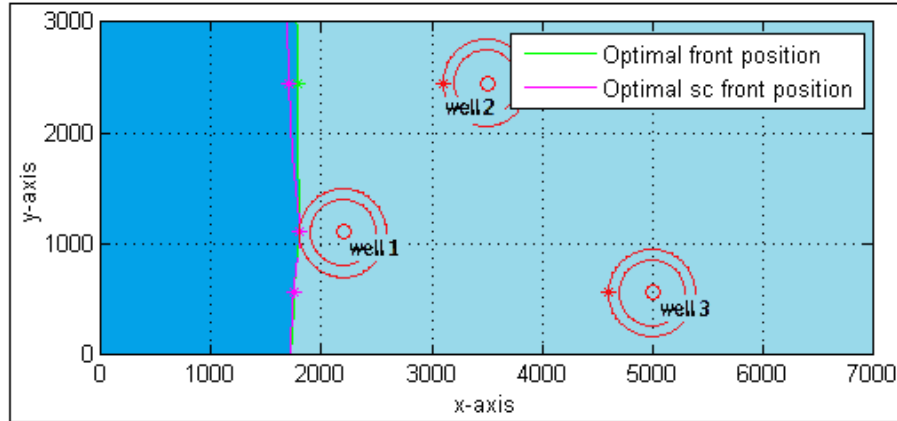
Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} \text{ penalty}$	5%	33	11
$Q_{min}^{local} \text{ penalty}$	5%	24	1
$Q_{total} \text{ penalty}$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$	5%	242	21
$x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$	5%	372	4

Πίνακας 6.21: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.

Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου	απέναντι από τη γεώτρηση No 1	απέναντι από τη γεώτρηση No 2	απέναντι από τη γεώτρηση No 3
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j}) \text{ (m)}$	(1799.92, 1100.00)	(1784.22, 2450.00)	(1746.52, 550.000)

Ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης του εφαρμοζόμενου αλγορίθμου βελτιστοποίησης ισούται με $t_{av} = 0.0070 \text{ secs}$, με συνέπεια ο πλήρης τυπικός έλεγχος των 500 επαναλήψεων να διαρκεί χρόνο ίσο με $t^{(500)} = 3.4820 \text{ secs}$. Η βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 221η επανάληψη, σε χρόνο ίσο με $t^{(221)} = 1.5470 \text{ secs}$ και αντιστοιχεί σε συνολικό όγκο ασφαλούς άντλησης ίσο με $S(Q^{(221)}) = 3767.78 \text{ m}^3/\text{day}$. Το προτεινόμενο ως ολικά βέλτιστο πλάνο αντλήσεων προτείνει επιμέρους τιμές αντλήσεων $Q_1^{(221)} = 206.63 \text{ m}^3/\text{day}$, $Q_2^{(221)} = 1254.18 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_3^{(221)} = 2306.97 \text{ m}^3/\text{day}$ για τις 3 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα. Εξετάζοντας τις τιμές αυτές, είναι σαφές ότι ο αλγόριθμος ελαχιστοποιεί τις τιμές άντλησης της 1ης γεώτρησης, εξαιτίας της άμεσης προσέγγισής της από το υφάλμυρο μέτωπο. Όπως είναι εμφανές στο γράφημα των επιμέρους τιμών άντλησης του Σχήματος 6.26β', ο αλγόριθμος, αν και αρχικά προσπάθησε να αυξήσει τις τιμές άντλησης της μετωπιαίας αυτής γεώτρησης, μόλις το υφάλμυρο μέτωπο έφτασε σε απόσταση ασφαλείας, υποχρεώθηκε να εφαρμόσει διαδοχικές κυρώσεις ελέγχου προσέγγισης σε αυτήν. Επίσης, ως προς τις τιμές αντλήσεων των άλλων δύο γεωτρήσεων, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης λαμβάνοντας υπόψη τις θέσεις τους εντός του υδροφορέα, προτείνει διαρκώς αυξανόμενες τιμές. Οι μειώσεις

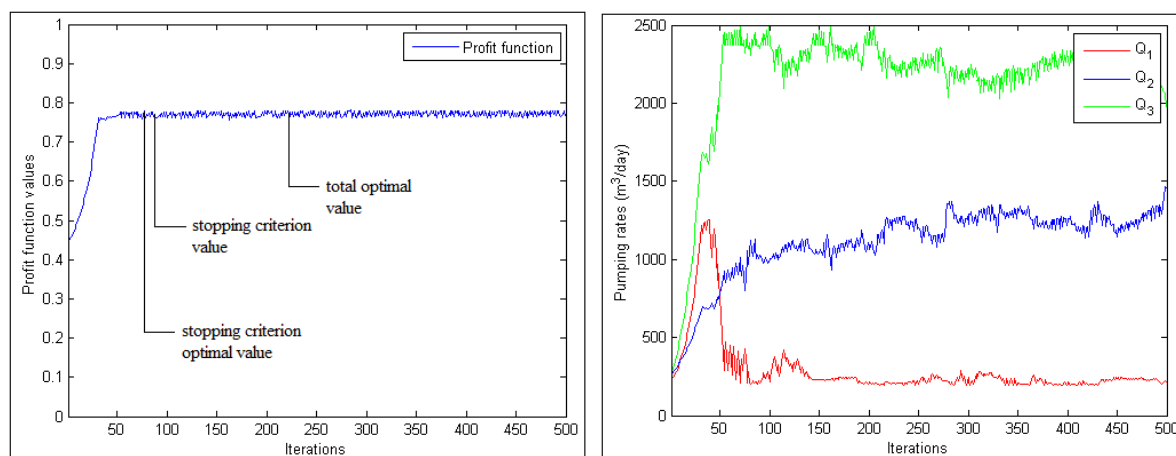
που παρουσιάζονται σε κάποιες επαναλήψεις στις τιμές αντλήσεων της 2ης και 3ης γεώτρησης, οφείλονται σε διαδοχικές εφαρμογές κυρώσεων ελέγχου μετατόπισης αλλά και μέγιστου επιτρεπτού όγκου αντλήσεων.



Σχήμα 6.25: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση IIb. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές αντλήσεων.

Η ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού συναντάται στην 85η επανάληψη, σε χρόνο ίσο με $t^{(85)} = 0.5950 \text{ secs}$. Το προτεινόμενο πλάνο αντλήσεων στην επανάληψη αυτή αποδίδει συνολικά $S(Q^{(85)}) = 3710.92 \text{ m}^3/\text{day}$ όγκο γλυκού νερού, με πλάνο αντλήσεων παρόμοιο με αυτό της ολικά βέλτιστης λύσης. Η διαφορά τους $S(Q^{(221)}) - S(Q^{(85)}) = 3767.78 - 3710.92 = 56.86 \text{ m}^3/\text{day}$ αντιστοιχεί σε ποσοστό μείωσης ίσο με 1.51%. Επίσης, παρατηρούμε ότι η διαφορά μεταξύ της βέλτιστης λύσης και της βέλτιστης μέχρι την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού είναι ακόμη μικρότερη, ίση με $S(Q^{(221)}) - S(Q^{(77)}) = 3767.78 - 3741.67 = 26.11 \text{ m}^3/\text{day}$ και ποσοστό 0.69%, ενώ ο χρόνος ολοκλήρωσής της τελευταίας ισούται με $t^{(77)} = 0.5390 \text{ secs}$. Είναι σαφές ωστόσο, ότι η βέλτιστη υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού λύση διαθέτει ελαφρώς διαφορετικό προφίλ σε σχέση με την ολικά βέλτιστη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης κατά την 77η επανάληψη, που εντοπίζει τη βέλτιστη υπό συνθήκη λύση του, εξακολουθεί να λέγαμε να διατηρεί ελπίδες ότι μπορεί να διατηρήσει σε υψηλότερα επίπεδα τις τιμές άντλησης της 1ης γεώτρησης. Στη συνέχεια όμως, συνειδητοποιεί ότι με περαιτέρω μείωση των τιμών αυτής μπορεί να υπάρξει

περιθώριο αύξησης των τιμών των άλλων δύο γεωτρήσεων, γεγονός που τελικά μπορεί να αυξήσει τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης.



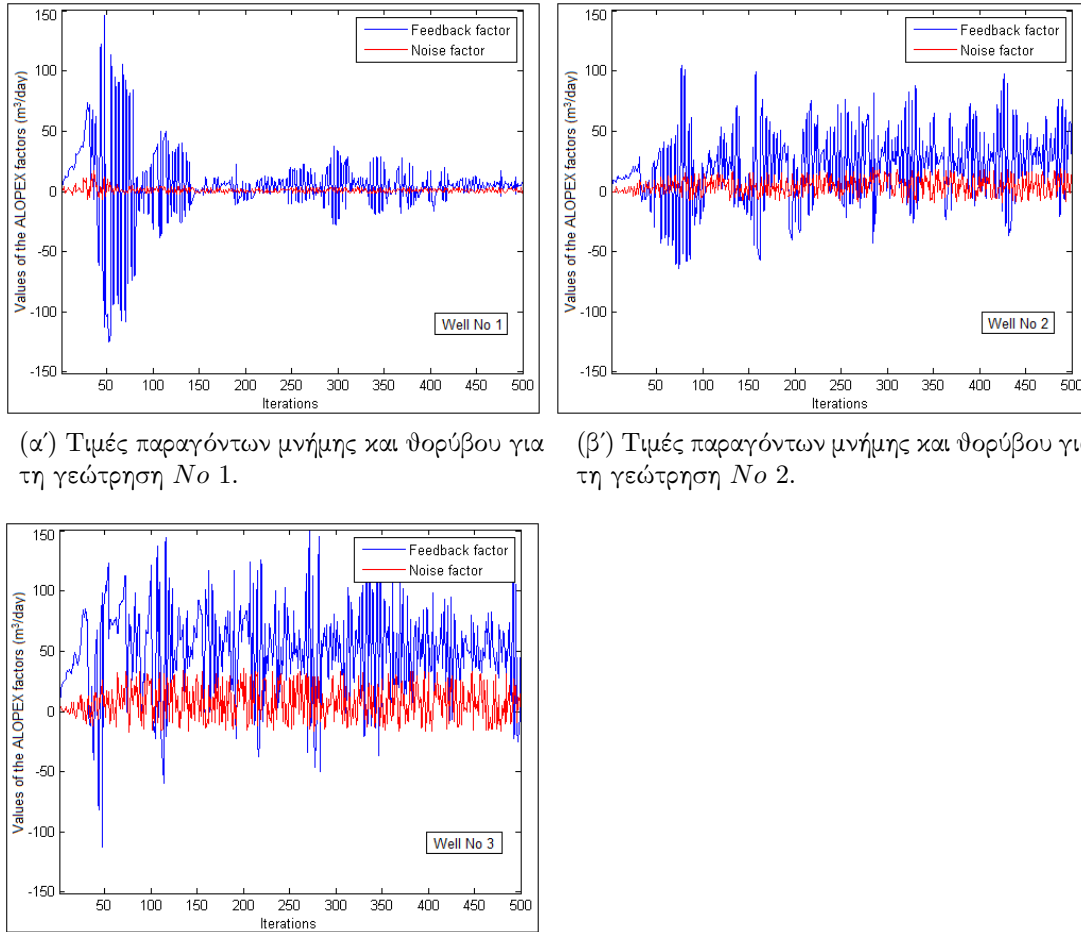
(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Απαιτούνται περίπου 60-70 επαναλήψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

(β') Προφίλ αντλήσεων για τις 3 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα. Οι τιμές αντλήσεων για την 1η γεώτρηση παραμένουν σε αυστηρά περιορισμένα επίπεδα σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των άλλων 2 γεωτρήσεων.

Σχήμα 6.26: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

Όσον αφορά τις εφαρμογές των κυρώσεων ελέγχου που συνολικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.20, είναι προφανής ο καταμερισμός τους. Αρχικά, οι κυρώσεις αντλούμενου όγκου $Q_{min}^{local} penalties$ (24 σε πλήθος) εφαρμόζονται στην 1η γεώτρηση, ως συνέπεια των μειωμένων τιμών άντλησης που προτείνονται για τη γεώτρηση αυτή, έπειτα από τη διαδοχική εφαρμογή στην ίδια γεώτρηση των 242 κυρώσεων προσέγγισης $x_{movement}^{primary} penalties$. Υπενθυμίζουμε ότι μόλις το υφάλμυρο μέτωπο παραβιάζει την προκαθορισμένη κυκλική περιοχή ασφαλείας περιμετρικά της μετωπιαίας 1ης γεώτρησης, η πρώτη κύρωση ελέγχου μετατόπισης μειώνει κατά 5% τις τιμές της άντλησης αυτής, προσπαθώντας να αναχαιτίσει το μέτωπο. Στη συνέχεια, επειδή προφανώς η διαδοχική εφαρμογή των κυρώσεων αυτών δεν είναι ικανή να ανακόψει την προέλαση του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας, ενεργοποιούνται 372 φορές οι κυρώσεις $x_{movement}^{secondary} penalties$, εφαρμοζόμενες στις γεωτρήσεις No 2 και No 3. Όσον

αφορά την ενεργοποίηση του Q_{max}^{local} penalty, αυτή πραγματοποιείται 33 φορές στη διάρκεια των 500 επαναλήψεων του τυπικού ελέγχου που παρουσιάζουμε, εφαρμοζόμενη μονάχα στις τιμές άντλησεων της 3ης γεώτρησης του υδροφορέα. Η τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας



(α') Τιμές παραγόντων μνήμης και θορύβου για τη γεώτρηση No 1.

(β') Τιμές παραγόντων μνήμης και θορύβου για τη γεώτρηση No 2.

(γ') Τιμές παραγόντων μνήμης και θορύβου για τη γεώτρηση No 3.

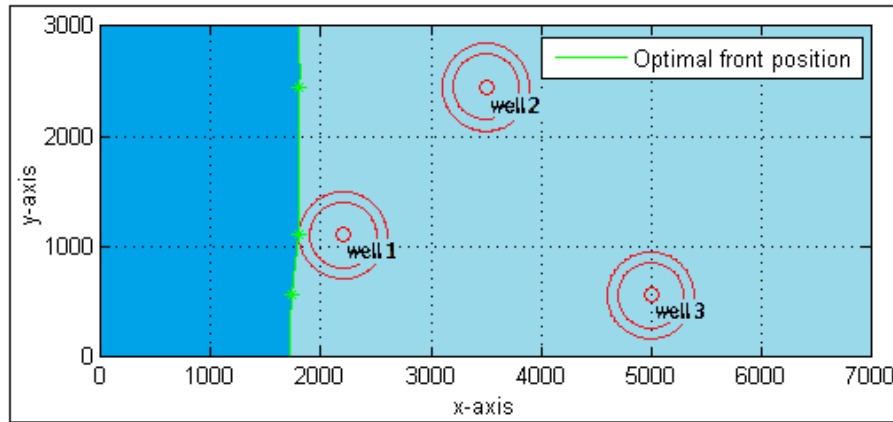
Σχήμα 6.27: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb. Συνεισφορά παραγόντων μνήμης και θορύβου στην κατασκευή των νέων τιμών άντλησης, κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

στην 221η επανάληψη, όπου εντοπίζεται η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ισούται με $a_{eff}^{(221)} = \frac{3767.78}{7500.00} 100\% = 50.24\%$, ποσό ισοδύναμο με αυτό που παρουσιάσαμε προηγουμένως στην Περίπτωση IIa.

Στις γραφικές παραστάσεις του Σχήματος 6.27 παρουσιάζουμε τη συνεισφορά των δύο συνεργαζόμενων όρων μνήμης και θορύβου, κατά την εκτέλεση των 500 επαναλήψεων της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Είναι προφανής η κυριαρχία του όρου μνήμης σε όλη τη διάρκεια της διαδικασίας, με πλάτος τιμών πολλαπλάσιο του πλάτους τιμών του όρου θορύβου για κάθε γεώτρηση του υδροφορέα.

Προφίλ Μοντελοποίησης II

Ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης χρησιμοποιώντας το Προφίλ Μοντελοποίησης II ισούται με $t_{av} = 0.0075 \text{ secs}$, με συνολικό χρόνο ολοκλήρωσης ενός τυπικού ελέγχου 500 επαναλήψεων ίσο με $t^{(500)} = 3.7376 \text{ secs}$. Η κύρωση ελέγχου *potential penalty*, που η προσθήκη της αποτελεί τη χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ των δύο χρησιμοποιούμενων Προφίλ Μοντελοποίησης, ενεργοποιείται συνολικά 42 φορές, σε συνδυασμό με τις 6 φορές του $Q_{max}^{local} \text{ penalty}$, τις 13 φορές του $Q_{min}^{local} \text{ penalty}$, τις 229 φορές ενεργοποίησης του $x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$ και τις 342 φορές του $x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$.

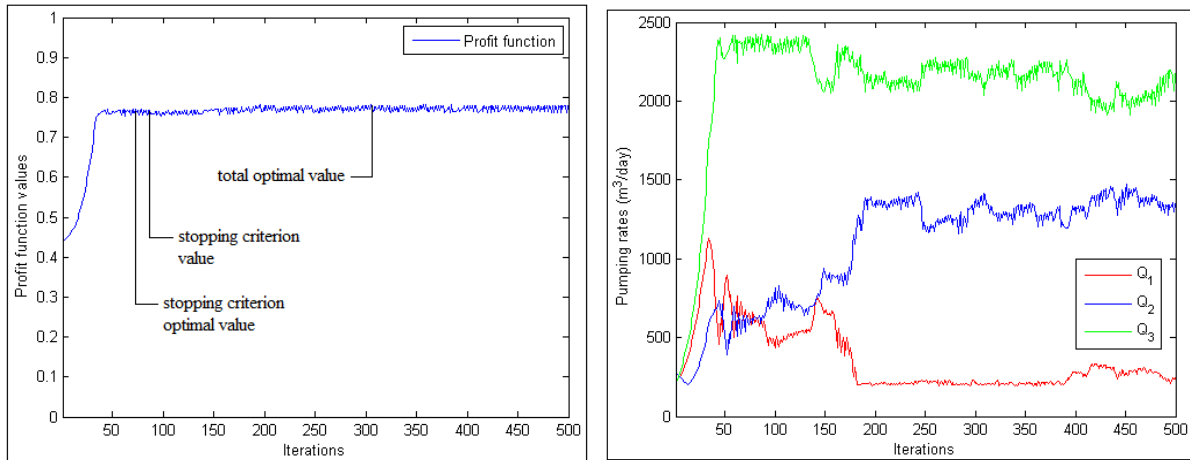


Σχήμα 6.28: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση IIb, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.

Η ολικά βέλτιστη λύση εντοπίζεται στην 305η επανάληψη με επιμέρους αντλήσεις $Q_1^{(305)} = 206.74 \text{ m}^3/\text{day}$, $Q_2^{(305)} = 1392.64 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_3^{(305)} = 2173.34 \text{ m}^3/\text{day}$, συνολικό όγκο άντλησης ίσο με $S(Q^{(305)}) = 3772.72 \text{ m}^3/\text{day}$ και χρόνο ολοκλήρωσης $t^{(305)} = 2.2875 \text{ secs}$.

Η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ισούται με $P(\mathbf{Q}^{(305)}) = 0.7812$. Επίσης, η ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού εντοπίζεται στην 87η επανάληψη, προτείνοντας ένα διαχειριστικό πλάνο αντλήσεων με επιμέρους αντλήσεις $Q_1^{(87)} = 603.61 \text{ m}^3/\text{day}$, $Q_2^{(87)} = 627.69 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_3^{(87)} = 2423.61 \text{ m}^3/\text{day}$, συνολικό όγκο άντλησης ίσο με $S(\mathbf{Q}^{(87)}) = 3654.91 \text{ m}^3/\text{day}$ και χρόνο ολοκλήρωσης $t^{(87)} = 0.6525 \text{ secs}$. Η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ισούται με $P(\mathbf{Q}^{(87)}) = 0.7689$.

Το υφάλμυρο μέτωπο υπό την ισχύ του ολικά βέλτιστου πλάνου αντλήσεων παραμένει σταθεροποιημένο σε απόσταση ασφαλείας από τις 3 γεωτρήσεις του υδροφορέα (Σχήμα 6.28). Παρατηρούμε δε ότι η θέση του μετώπου που αντιστοιχεί στην ολικά βέλτιστη λύση ταυτίζεται με την αντίστοιχη (Σχήμα 6.25) που παρουσιάσαμε προηγουμένως στο Προφίλ Μοντελοποίησης Ι.



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(\mathbf{Q})$. Απαιτούνται περίπου 40 επαναλήψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

(β') Τιμές αντλήσεων για τις 2 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα, σταθεροποιημένες σε συγκεκριμένες περιοχές τιμών έπειτα από 50 περίπου επαναλήψεις.

Σχήμα 6.29: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IIb, Προφίλ Μοντελοποίησης II. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

Η γραφική παράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης (Σχήμα 6.29α') βρίσκεται σε πλήρη αναλογία με την αντίστοιχη του προηγούμενου Προφίλ Μοντελοποίησης. Όσον αφορά τώρα τις επιμέρους αντλήσεις, τα γραφήματά τους στο Σχήμα 6.24β' βρίσκονται επίσης σε αναλογία

με τα γραφήματα του προηγούμενου Προφίλ, με διαφορές όμως που προφανώς οφείλονται στην παρατεταμένη εφαρμογή των κυρώσεων *potential penalties*.

Η τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας στην 305η επανάληψη, όπου εντοπίζεται πλέον η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ισούται με $a_{eff}^{(305)} = \frac{3772.72}{7500.00} 100\% = 50.30\%$. Δηλαδή, το 50.30% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων γλυκού νερού μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα, ποσοστό εντελώς όμοιο με αυτό που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο Προφίλ.

6.3.5 Περίπτωση III: Υδροφορέας 5 ενεργών γεωτρήσεων

Στο εσωτερικό του υδροφορέα συναντάμε 5 θέσεις ενεργών γεωτρήσεων, οι συντεταγμένες των οποίων παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 6.22 παρακάτω. Σημειώνουμε ότι η παρούσα περίπτωση έχει μελετηθεί προηγουμένως στη βιβλιογραφία (Α. Μαντόγλου και Μ. Παπαντωνίου [36], [37]), ακολουθώντας διαφορετικές διαδικασίες βελτιστοποίησης από αυτήν που εμείς εδώ προτείνουμε.

Προφίλ Μοντελοποίησης I

Η μετωπιαία γεώτρηση No 1, όντας τοποθετημένη εγγύτερα στη θάλασσα ακτογραμμή, αποτελεί τη σημαντικότερη από τις 5 αυτές γεωτρήσεις και έτσι ένα μεγάλο πλήθος κυρώσεων ελέγχου προσέγγισης αναμένεται να εφαρμοστούν σε αυτή. Τα αποτελέσματα ενός τυπικού ελέγχου 500 επαναλήψεων παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 6.23 και 6.24, καθώς και στις γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων που ακολουθούν.

Πίνακας 6.22: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση III. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Συντεταγμένες γεωτρήσεων	Γεώτρηση No 1	Γεώτρηση No 2	Γεώτρηση No 3
$(x_j, y_j) (m)$	(2657.00, 1572.00)	(3353.00, 2200.00)	(3932.00, 975.00)
Συντεταγμένες γεωτρήσεων	Γεώτρηση No 4	Γεώτρηση No 5	
$(x_j, y_j) (m)$	(4632.00, 2470.00)	(4873.00, 1586.00)	

Με μέσο χρόνο ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης ίσο με $t_{av} = 0.0157 \text{ secs}$ απαιτούνται 500 επαναλήψεις και συνολικός χρόνος ίσος με $t^{(500)} = 7.8707 \text{ secs}$ για την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Έπειτα από τον έλεγχο των επαναλήψεων αυτών προκύπτει συμπτωματικά ότι η τελευταία επανάληψη αντιστοιχεί στην επανάληψη της ολικά βέλτιστης λύσης, προτείνοντας αντλούμενο όγκο γλυκού νερού ίσο με $S(Q^{(500)}) = 3969.62 \text{ m}^3/\text{day}$. Παρατηρώντας το προφίλ της λύσεως αυτής, μόλις $202.27 \text{ m}^3/\text{day}$ γλυκού νερού αντιστοιχούν στη μετωπιαία γεώτρηση No 1, διότι η επαναλαμβανόμενη επικίνδυνη προσέγγιση του υφάλμυρου μετώπου στην περιοχή ασφαλείας περιμετρικά της γεώτρησης, οδήγησε τον αλγόριθμο σε διαδοχικές εφαρμογές των κυρώσεως ελέγχου προσέγγισης $x_{movement}^{primary} \text{ penalties}$ (Πίνακας 6.24) σε αυτήν, με αντίστοιχες μειώσεις αντλήσεων κατά 5%.

Πίνακας 6.23: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση III. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.

Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	500	84	63
$P(Q^{(k)})$	0.6277	0.6277	0.6247	0.6275
$Q_1^{(k)} (\text{m}^3/\text{day})$	202.27	202.27	214.30	206.41
$Q_2^{(k)} (\text{m}^3/\text{day})$	504.38	504.38	739.03	720.10
$Q_3^{(k)} (\text{m}^3/\text{day})$	1303.05	1303.05	911.41	923.57
$Q_4^{(k)} (\text{m}^3/\text{day})$	1047.07	1047.07	1254.90	1278.27
$Q_5^{(k)} (\text{m}^3/\text{day})$	912.85	912.85	805.97	838.96
$S(Q^{(k)}) (\text{m}^3/\text{day})$	3969.62	3969.62	3925.60	3967.30
$t^{(k)} (\text{secs})$	7.8707	7.8707	1.3188	0.9891

Η ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού εντοπίζεται στην 84η επανάληψη, ενώ η βέλτιστη λύση έως την εφαρμογή του κριτηρίου τερματισμού στην 63η. Οι λύσεις που προτείνονται στις επαναλήψεις αυτές παρουσιάζουν μεγάλες ομοιότητες ως προς τις επιμέρους τιμές άντλησης, με καλύτερη προφανώς τη λύση της 63ης επανάληψης και συνολικό όγκο αντλούμενου γλυκού νερού ίσο με $S(Q^{(63)}) = 3967.30 \text{ m}^3/\text{day}$. Ο δε χρόνος εκτέλεσης έως και την επανάληψη αυτή ισούται με $t^{(63)} = 0.9891 \text{ secs}$, ενώ η ίδια η λύση αυτή διαφέρει από την ολικά βέλτιστη σε όγκο νερού ίσο με $S(Q^{(500)}) - S(Q^{(63)}) = 3969.62 - 3967.30 = 2.32 \text{ m}^3/\text{day}$

Πίνακας 6.24: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση III. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.23.

Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} \text{ penalty}$	5%	0	0
$Q_{min}^{local} \text{ penalty}$	5%	52	5
$Q_{total} \text{ penalty}$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$	5%	324	34
$x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$	5%	993	83

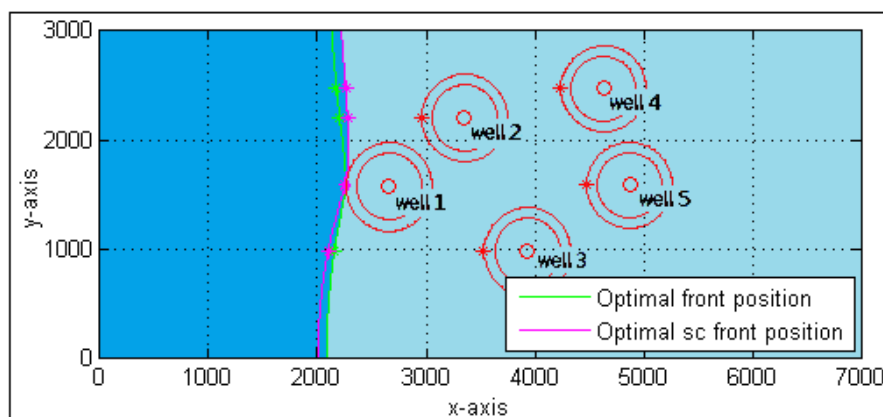
και αμελητέο ποσοστό σχεδόν ίσο με 0.06%. Ωστόσο, τα προφίλ των δύο αυτών βέλτιστων λύσεων παρουσιάζουν ομοιότητες αλλά και διαφορές ως προς τα ποσά των επιμέρους αντλήσεων. Πιο αναλυτικά, παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις η μετωπιαία γεώτρηση προτείνεται να αντλεί πολύ κοντά στο κατώτερο επιτρεπτό της όριο των $Q_1 = 200 \text{ m}^3/\text{day}$, έτσι ώστε το μεν υφάλμυρο μέτωπο να παραμένει στα όρια της ελάχιστης ασφαλούς απόστασης μακριά από τη γεώτρηση αυτή, οι δε άλλες γεωτρήσεις να αντλούν σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες γλυκού νερού. Η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο αυτών διαχειριστικών πλάνων άντλησης εντοπίζεται στις αντλήσεις της 3ης γεώτρησης. Πρόκειται για $Q_3^{(500)} - Q_3^{(63)} = 1303.05 - 923.57 = 379.48 \text{ m}^3/\text{day}$ περισσότερο όγκο νερού σύμφωνα με την ολικά βέλτιστη λύση, ποσότητα η οποία έχει προκύψει από αντίστοιχες μειώσεις στις ολικά βέλτιστες αντλήσεις της 2ης και της 4ης γεώτρησης.

Πίνακας 6.25: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση III. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.

Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου	απέναντι από τη γεώτρηση No 1	απέναντι από τη γεώτρηση No 2	απέναντι από τη γεώτρηση No 3
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j}) \text{ (m)}$	(2256.51, 1572.00)	(2205.60, 2200.00)	(2156.93, 975.00)
Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου	απέναντι από τη γεώτρηση No 4	απέναντι από τη γεώτρηση No 5	
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j}) \text{ (m)}$	(2176.00, 2470.00)	(2257.47, 1586.00)	

Στον Πίνακα 6.25 παρουσιάζονται η θέση του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας υπό την ισχύ των ολικά βέλτιστων τιμών άντλησης. Όλες οι γεωτρήσεις του υδροφορέα παραμένουν

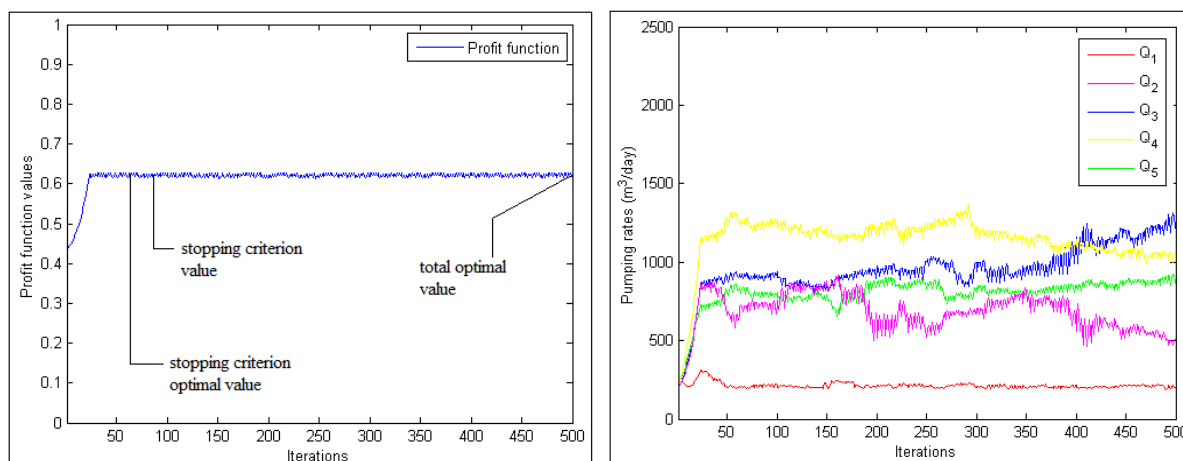
ασφαλείς, καθώς το υφάλμυρο μέτωπο σταθεροποιείται σε οριακή απόσταση ασφαλείας από τη μετωπιαία 1η γεώτρηση. Επίσης, στη γραφική παράσταση του Σχήματος 6.30 γίνεται αντιληπτή η επικίνδυνη προέλαση της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα και αντίστοιχα η εξουδετέρωση αυτού του κινδύνου προσέγγισης, διαμέσου της χρήσεως τόσο των ολικά βέλτιστων τιμών άντλησης όσο και των βέλτιστων τιμών μέχρι την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού της διαδικασίας. Οι διαφορές στις επιμέρους τιμές άντλησης έχουν ως συνέπεια μικρές αλλά αισθητές διαφορές στην καμπυλότητα των δύο αυτών σχετικών γραφημάτων του υφάλμυρου μετώπου, όπως είναι εμφανές στο Σχήμα 6.30.



Σχήμα 6.30: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση ΙΙΙ. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές άντλησεων.

Παρατηρώντας το γράφημα της αντικειμενικής συνάρτησης στο Σχήμα 6.31α' είναι σαφές ότι η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει συγκλίνει σε μια περιοχή ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων τουλάχιστον από τις πρώτες 20 επαναλήψεις. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος εκμεταλλευόμενος το στοχαστικό του χαρακτήρα αναζητά ισοδύναμες βέλτιστες λύσεις ως προς την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και κατά συνέπεια του συνολικού όγκου άντλησεων. Οι δε λύσεις αυτές, όπως διαπιστώνουμε και στο γράφημα του Σχήματος 6.31β', είναι στην ουσία συνδυασμοί εντός πάντοτε των προκαθορισμένων επιτρεπτών ορίων άντλησης, προτεινόμενων επιμέρους άντλησεων που αθροιστικά αντιστοιχούν περίπου στον ίδιο συνολικό όγκο άντλησης. Ο ALOPEX γνωρίζοντας ότι έχει μεγιστοποιήσει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης από τις πρώτες χιόλας επαναλήψεις, αναζητά ισοδύναμες ως προς το συνολικό

όγκο νερού βέλτιστες λύσεις. Έτσι, διατηρώντας σε σχετικά σταθεροποιημένα επίπεδα τις τιμές άντλησης της μετωπιαίας 1ης γεώτρησης αλλά και της πιο απομακρυσμένης από το υφάλμυρο μέτωπο 5ης γεώτρησης, εναλλάσσει τις τιμές των τριών άλλων γεωτρήσεων. Σε μικρό βαθμό θα λέγαμε ότι παρατηρείται δε και μια μικρή αλλά σταθερή αύξηση στις τιμές της 5ης γεώτρησης. Οι διαφορετικές λοιπόν λύσεις που παράγει ο αλγόριθμος είναι στην ουσία διαφορετικά σύνολα τιμών για τη 2η, 3η, 4η και λιγότερο για την 5η γεώτρηση του υδροφορέα, όπου ελλείπει κάποιου περαιτέρω περιορισμού, ο αλγόριθμος θεωρεί ως επιτρεπτές και εφαρμόζει όλες αυτές τις δοκιμές. Η ίδια εικόνα, δηλαδή αυτό το μοτίβο εναλλαγών μεταξύ των τιμών των 4 μη-μετωπιαίων γεωτρήσεων, παρατηρείται ακόμη και αν αυξήσουμε δραματικά το πλήθος των επαναλήψεων.



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Απαιτούνται περίπου 20-30 επαναλήψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

(β') Προφίλ άντλησεων των 5 ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα. Ενώ οι τιμές άντλησης της μετωπιαίας 1ης γεώτρησης παραμένουν περιορισμένες σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα, οι τιμές των άλλων 4 γεωτρήσεων εξετάζουν περιπτώσεις που αντιστοιχούν σε ισοδύναμα βέλτιστα πλάνα άντλησης.

Σχήμα 6.31: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση III. Συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης και επιμέρους αντλήσεων κατά την εκτέλεση του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V σε σύνολο 500 επαναλήψεων.

Όσον αφορά τώρα την τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας στην 500η επανάληψη, όπου εντοπίζεται η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ισχύει ότι $a_{eff}^{(500)} =$

$\frac{3969.62}{12500.00} 100\% = 31.76\%$. Δηλαδή, το 31.76% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων γλυκού νερού μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα. Τονίζουμε ότι το μικρότερο αυτό ποσοστό αποδοτικότητας σε σχέση με προηγούμενες περιπτώσεις, δεν καθιστά το προτεινόμενο βέλτιστο πλάνο διαχείρισης μη ικανοποιητικό. Αντιθέτως, οι δυνατότητες άντλησης στο συγκεκριμένο υδροφορέα αξιοποιούνται στο έπακρο, υπό την ισχύ της συγκεκριμένης διάταξης των 5 ενεργών γεωτρήσεων και όποια περαιτέρω σύγκριση πρέπει να γίνει μεταξύ περιπτώσεων που χρησιμοποιούν το ίδιο πλήθος ενεργών γεωτρήσεων.

Αν και στην παρούσα ενότητα παραλείπουμε τα γραφήματα της συνεισφοράς των όρων μνήμης και θορύβου σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου στοχαστικής βελτιστοποίησης A-LOPEX V, σημειώνουμε ότι όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις μελέτης ο όρος μνήμης κυριαρχεί εντός της διαδικασίας. Πιο συγκεκριμένα, ο όρος αυτός καθοδηγεί τον αλγόριθμο στην κατασκευή νέων τιμών άντλησης, λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες τιμές σε 2 προηγούμενες επαναλήψεις. Στη συνέχεια, ο όρος θορύβου αναλαμβάνει την προστασία της επαναληπτικής διαδικασίας από τυχόν εγκλωβισμούς σε περιοχές τοπικών μονάχα μεγίστων τιμών, προσφέροντας την απαραίτητη διαταραχή ώστε η διαδικασία να συνεχίσει τη διερεύνηση νέων τοπικών μεγίστων.

Προφίλ Μοντελοποίησης II

Η διάταξη των 5 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων που μελετάμε στην παρούσα περίπτωση είναι τέτοια, ώστε να μην απαιτείται σε κανένα σημείο της διαδικασίας βελτιστοποίησης η χρήση των κυρώσεων ελέγχου *potential penalties*. Έτσι, σε κάθε προσομοίωση που εκτελέσαμε επιτρέποντας την εφαρμογή των κυρώσεων αυτών, προέκυψαν διαχειριστικά πλάνα αντλήσεων με μηδενικό πλήθος ενεργοποιήσεων των συγκεκριμένων κυρώσεων. Στην ουσία δηλαδή, κατασκευάσαμε πλάνα αντλήσεων εντελώς ισοδύναμα με αυτά του Προφίλ Μοντελοποίησης I, που παρουσιάσαμε προηγουμένως. Επομένως, δεν απαιτείται στο σημείο αυτό η παρουσίαση κάποιου νέου διαχειριστικού πλάνου αντλήσεων.

6.3.6 Περίπτωση IV: Υδροφορέας 11 ενεργών γεωτρήσεων

Στο εσωτερικό του υδροφορέα της Καλύμνου δεχόμαστε σύμφωνα με σχετική εργασία της βιβλιογραφίας (Α. Μαντόγλου, Μ. Παπαντωνίου και Π. Γιαννουλόπουλος [38]), την ύπαρξη 11 ενεργών γεωτρήσεων, οι θέσεις των οποίων παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά στον Πίνακα 6.26. Υπενθυμίζουμε ότι η αρίθμηση των γεωτρήσεων ακολουθεί τη διάταξή τους ως προς τον άξονα των x . Ισχύει επομένως για τις γεωτρήσεις $No\ i$ και $No\ j$ με $i \leq j \in \{1, \dots, 11\}$, ότι η i -οστή γεώτρηση βρίσκεται αριστερότερα της j -οστής, δηλαδή $x_i \leq x_j$.

Πίνακας 6.26: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IV. Συντεταγμένες θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Συντεταγμένες γεωτρήσεων	Γεώτρηση <i>No</i> 1	Γεώτρηση <i>No</i> 2	Γεώτρηση <i>No</i> 3
$(x_j, y_j) (m)$	(2035.00, 1120.00)	(2390.00, 785.00)	(2445.00, 2160.00)
Συντεταγμένες γεωτρήσεων	Γεώτρηση <i>No</i> 4	Γεώτρηση <i>No</i> 5	Γεώτρηση <i>No</i> 6
$(x_j, y_j) (m)$	(2850.00, 1905.00)	(2875.00, 1600.00)	(3665.00, 1540.00)
Συντεταγμένες γεωτρήσεων	Γεώτρηση <i>No</i> 7	Γεώτρηση <i>No</i> 8	Γεώτρηση <i>No</i> 9
$(x_j, y_j) (m)$	(3895.00, 1400.00)	(4200.00, 1460.00)	(4505.00, 1795.00)
Συντεταγμένες γεωτρήσεων	Γεώτρηση <i>No</i> 10	Γεώτρηση <i>No</i> 11	
$(x_j, y_j) (m)$	(4530.00, 1460.00)	(5090.00, 1710.00)	

Προφίλ Μοντελοποίησης I

Το μεγαλύτερο πλήθος ενεργών γεωτρήσεων, σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, έχει προφανώς ως συνέπεια μεγαλύτερο συνολικά υπολογιστικό χρόνο ολοκλήρωσης της διαδικασίας. Τα αποτελέσματα λοιπόν ενός τυπικού ελέγχου 500 επαναλήψεων, με μέσο χρόνο επανάληψης $t_{av} = 0.0380\ secs$ και συνολικό χρόνο εκτέλεσης $t^{(500)} = 18.9914\ secs$, παρουσιάζονται αναλυτικά στους Πίνακες 6.27 και 6.29. Η ολικά βέλτιστη λύση κατασκευάζεται από τον αλγόριθμο στην 43η επανάληψη σε χρόνο $t^{(43)} = 1.6340\ secs$, και αντιστοιχεί σε ένα πλάνο αντλήσεων που οι μεταξύ τους διαφορές σε όγκο αντλούμενου νερού είναι σχετικά μικρές. Συνολικά, σύμφωνα με το βέλτιστο αυτό σενάριο αντλούνται

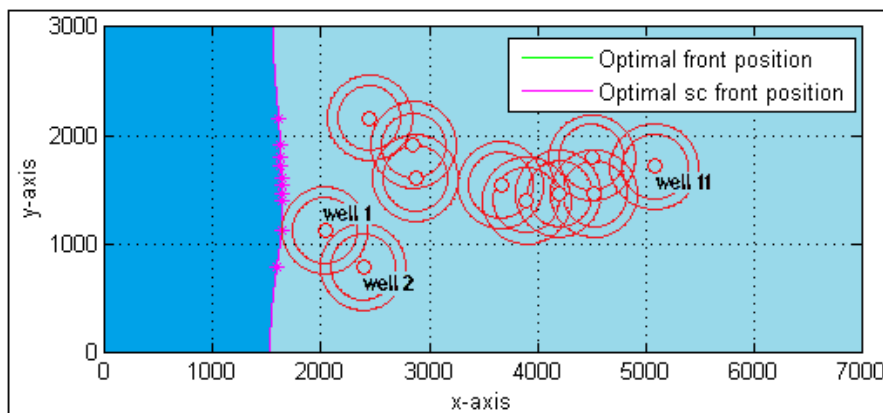
$S(Q^{(43)}) = 3658.12 \text{ m}^3/\text{day}$ γλυκού νερού. Παρατηρούμε επίσης στον Πίνακα 6.27 ότι η ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού συναντάται στην 66η επανάληψη και αντίστοιχο χρόνο $t^{(66)} = 2.5080 \text{ secs}$, ενώ η βέλτιστη λύση υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού ταυτίζεται με την ολικά βέλτιστη που παρουσιάσαμε προηγουμένως.

Πίνακας 6.27: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IV. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης ALOPEX V.

Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	43	66	43
$P(Q^{(k)})$	0.4704	0.4716	0.4678	0.4716
$Q_1^{(k)} (m^3/day)$	201.14	213.09	202.43	213.09
$Q_2^{(k)} (m^3/day)$	314.72	285.82	301.78	285.82
$Q_3^{(k)} (m^3/day)$	223.25	420.33	354.30	420.33
$Q_4^{(k)} (m^3/day)$	518.16	460.16	437.77	460.16
$Q_5^{(k)} (m^3/day)$	395.18	314.41	346.60	314.41
$Q_6^{(k)} (m^3/day)$	270.44	380.49	367.21	380.49
$Q_7^{(k)} (m^3/day)$	354.95	275.57	251.23	275.57
$Q_8^{(k)} (m^3/day)$	370.14	389.92	381.72	389.92
$Q_9^{(k)} (m^3/day)$	397.50	379.07	396.84	379.07
$Q_{10}^{(k)} (m^3/day)$	336.63	282.81	277.63	282.81
$Q_{11}^{(k)} (m^3/day)$	235.97	256.45	214.35	256.45
$S(Q^{(k)}) (m^3/day)$	3618.08	3658.12	3531.86	3658.12
$t^{(k)} (secs)$	18.9914	1.6340	2.5080	1.6340

Η θέση του υφάλμυρου μετώπου υπό την ισχύ των ολικά βέλτιστων τιμών άντλησης, που όπως είδαμε ταυτίζονται με τις βέλτιστες υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.32 και αριθμητικά στον Πίνακα 6.28.

Παρατηρώντας τόσο το γράφημα της αντικειμενικής συνάρτησης (Σχήμα 6.33α'), όσο και το αντίστοιχο γράφημα των επιμέρους τιμών άντλησης (Σχήμα 6.33β'), γίνεται άμεσα σαφές ότι αρκούν λίγες μονάχα επαναλήψεις για τη σύγκλιση της διαδικασίας σε μια περιοχή ισοδύναμων βέλτιστων τιμών άντλησης. Τα προτεινόμενα πλάνα αντλήσεων δεν μεταβάλλονται αισθητά κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων της διαδικασίας και ο αλγόριθμος από πολύ νωρίς



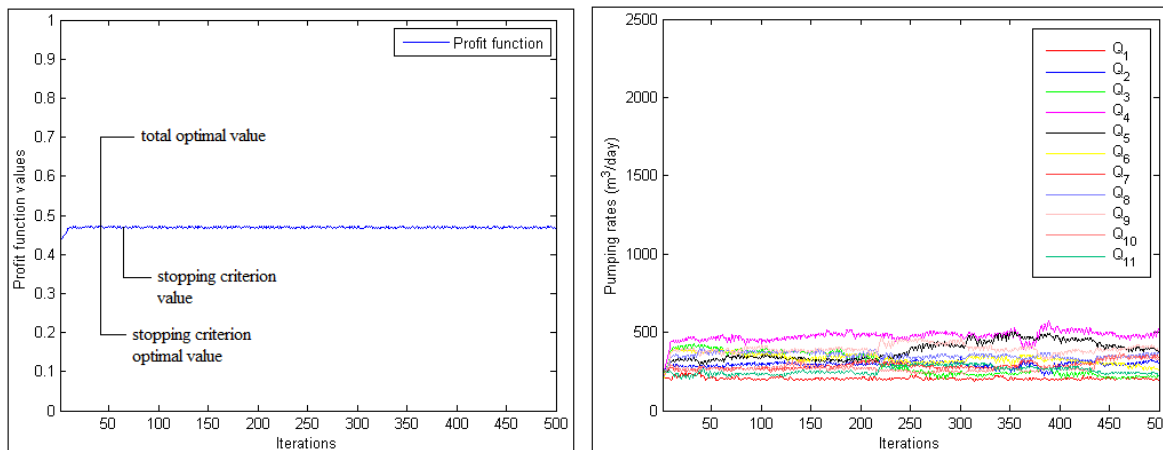
Σχήμα 6.32: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Καλύμνου, περίπτωση IV. Θέσεις υφάλμυρου μετώπου χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες του κριτηρίου τερματισμού τιμές αντλήσεων.

Πίνακας 6.28: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IV. Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, όταν χρησιμοποιούνται οι ολικά βέλτιστες τιμές αντλήσεων.

Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου	απέναντι από τη γεώτρηση No 1	απέναντι από τη γεώτρηση No 2	απέναντι από τη γεώτρηση No 3
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$ (m)	(1632.92, 1120.00)	(1589.70, 785.00)	(1604.81, 2160.00)
Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου	απέναντι από τη γεώτρηση No 4	απέναντι από τη γεώτρηση No 5	απέναντι από τη γεώτρηση No 6
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$ (m)	(1620.38, 1905.00)	(1631.65, 1600.00)	(1633.50, 1540.00)
Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου	απέναντι από τη γεώτρηση No 7	απέναντι από τη γεώτρηση No 8	απέναντι από τη γεώτρηση No 9
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$ (m)	(1637.39, 1400.00)	(1635.85, 1460.00)	(1625.04, 1795.00)
Συντεταγμένες θέσεων υφάλμυρου μετώπου	απέναντι από τη γεώτρηση No 10	απέναντι από τη γεώτρηση No 11	
$(x_{\tau,j}, y_{\tau,j})$ (m)	(1635.85, 1460.00)	(1628.08, 1710.00)	

έχει κατασκευάσει την ολικά βέλτιστη λύση του. Οι όποιες λύσεις παράγονται στη συνέχεια αποτελούν μικρές διαφοροποιήσεις της ολικά βέλτιστης αυτής λύσεως και μπορούν ισάξια να την αντικαταστήσουν.

Ο αλγόριθμος προστατεύοντας τη μετωπιαία γεώτρηση No 1 προστατεύει στην ουσία το σύνολο των γεωτρήσεων του υδροφορέα. Έτσι, ενώ οι εφαρμογές του $x_{movement}^{primary} penalty$



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Απαιτούνται περίπου 20 επαναλήψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

(β') Αντλήσεις των 11 ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα. Η μόνη παρατηρούμενη μεταβολή στις επιμέρους αντλήσεις έπειτα από την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού, είναι η εναλλαγή των προτεινόμενων τιμών άντλησης μεταξύ της 2ης και της 5ης γεώτρησης.

Σχήμα 6.33: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IV. Στοχαστικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης ALOPEX V 500 επαναλήψεων.

και του $Q_{min}^{local} penalty$ πραγματοποιούνται στις αντλήσεις της 1ης γεώτρησης, οι πολλές σε πλήθος εφαρμογές του $x_{movement}^{secondary} penalty$ χρεώνονται στις υπόλοιπες γεωτρήσεις του υδροφορέα (Πίνακας 6.29).

Όσον αφορά τώρα την τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας στην 43η επανάληψη, όπου εντοπίζεται η ολικά βέλτιστη λύση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ισχύει ότι $a_{eff}^{(43)} = \frac{3658.12}{27500.00} 100\% = 13.30\%$. Η αναφορά στο συντελεστή αποδοτικότητας αυτής της περίπτωσης γίνεται για την πληρότητα της παρουσίασης. Δεν μπορούμε δηλαδή να εξάγουμε συμπεράσματα για το πόσο αποδοτικό είναι το συγκεκριμένο βέλτιστο πλάνο διαχείρισης των αντλήσεων, εάν δεν το συγκρίνουμε με άλλες περιπτώσεις που να λαμβάνουν όμως υπόψη τους 11 θέσεις ενεργών γεωτρήσεων.

Πίνακας 6.29: Υδροφορέας Καλύμνου, περίπτωση IV. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX V που περιγράφεται στον Πίνακα 6.27.

Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} \text{ penalty}$	5%	0	0
$Q_{min}^{local} \text{ penalty}$	5%	80	4
$Q_{total} \text{ penalty}$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$	5%	310	33
$x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$	5%	2580	240

Προφίλ Μοντελοποίησης II

Ομοίως με την περίπτωση του υδροφορέα των 5 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων που παρουσιάσαμε προηγουμένως, στην παρούσα περίπτωση δεν απαιτείται σε κανένα σημείο της διαδικασίας βελτιστοποίησης η εφαρμογή των κυρώσεων ελέγχου *potential penalties*. Το δυναμικό ροής σε κάθε γεώτρηση διατηρεί το θετικό του πρόσημο, χωρίς την περαιτέρω επέμβασή μας, εξαιτίας φυσικά της διάταξης των θέσεων των 11 γεωτρήσεων του υδροφορέα. Έτσι, το Προφίλ Μοντελοποίησης II στην ουσία ταυτίζεται με το Προφίλ Μοντελοποίησης I, παρέχοντας μονάχα εναλλακτικά αλλά εντελώς ισοδύναμα πλάνα άντλησεων. Προφανώς λοιπόν δεν χρειάζεται να παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα κάποιας προσομοίωσης στο σημείο αυτό.

6.4 Οι παραγόμενες λύσεις από τον αλγόριθμο στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX V

6.4.1 Υπολογιστικό κόστος της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάσαμε διεξοδικά τη συμπεριφορά του αλγορίθμου στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX V σε ένα πλήθος αντιπροσωπευτικών σεναρίων άντλησης στον παράκτιο υδροφορέα της Καλύμνου. Σε κάθε μία από τις περιπτώσεις μελέτης αυτές,

ο αλγόριθμος παρήγαγε σε ιδιαίτερα μικρό χρονικό διάστημα ένα πλήθος ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων, ενώ στη συνέχεια, συγκρίνοντάς τες προέκυπτε κάθε φορά η ολικά βέλτιστη λύση. Υπενθυμίζουμε ότι η ολικά βέλτιστη αυτή λύση αντιπροσωπεύει το πλάνο αντλήσεων του υδροφορέα, που με ασφάλεια επιτυγχάνει το συνολικά μέγιστο αντλούμενο όγκο γλυκού νερού, έπειτα από την ολοκλήρωση της διαδικασίας των 500 επαναλήψεων που εμείς είχαμε προκαθορίσει. Παρατηρήσαμε επίσης, ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βελτιστοποίησης διαθέτει την ικανότητα να οδηγείται πολύ γρήγορα σε μια περιοχή ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων και να παραμένει στη γειτονιά των λύσεων αυτών μέχρι το τέλος της διαδικασίας. Εάν επιλέγαμε λοιπόν ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης να ολοκληρώνεται σε μεγαλύτερο πλήθος επαναλήψεων, με στόχο προφανώς τον έλεγχο περισσότερων πιθανών βέλτιστων λύσεων, δεν θα προέκυπτε κάποιο διαφορετικό αποτέλεσμα, ή πιο σωστά, η όποια νέα ολικά βέλτιστη λύση θα αντιστοιχούσε σε αντικειμενική συνάρτηση με απειροελάχιστη διαφορά από την αντικειμενική συνάρτηση της ολικά βέλτιστης των 500 επαναλήψεων. Επομένως, μπορούμε να θεωρήσουμε το συγκεκριμένο έλεγχο των 500 επαναλήψεων που εφαρμόζουμε, στην ουσία, σαν έλεγχο της *ασυμπτωτικής συμπεριφοράς* του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Στον Πίνακα 6.30 παρουσιάζουμε συγκεντρωτικά τις ολικά βέλτιστες λύσεις για κάθε μία από τις περιπτώσεις μελέτης που εξετάσαμε, ενώ παράλληλα παραθέτουμε και τους αντίστοιχους χρόνους επίτευξης των λύσεων αυτών. Ωστόσο, πρέπει στο σημείο αυτό να λάβουμε υπόψη μας τη μεθοδολογία υπολογισμού αυτών των χρόνων κατασκευής αυτών των λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, για να οδηγηθεί ο αλγόριθμος σε αυτές τις βέλτιστες λύσεις, αρχικά ολοκλήρωσε τον έλεγχο και των 500 επαναλήψεων και στη συνέχεια υπολόγισε την ολικά βέλτιστη λύση σε κάθε περίπτωση. Δηλαδή, ο χρόνος που παρουσιάζουμε στην τελευταία γραμμή του Πίνακα 6.30 είναι μεν πραγματικός υπολογιστικός χρόνος, αλλά η ίδια η βέλτιστη λύση δεν υπολογίστηκε στον χρόνο αυτό. Εννοούμε με τον ισχυρισμό αυτό, ότι ο συνολικός χρόνος υπολογισμού της ολικά βέλτιστης λύσης ταυτίζεται με το χρόνο ολοκλήρωσης της συνολικής διαδικασίας και των 500 επαναλήψεων, αφού δεν είναι δυνατό να οδηγηθούμε στη λύση αυτή εάν δεν προηγηθεί ο έλεγχος του συνόλου των επαναλήψεων της διαδικασίας. Έτσι, ο χρόνος που παρουσιάζουμε στην τελευταία γραμμή του Πίνακα αυτού είναι στην ουσία ο χρόνος που απαιτείται για να οδηγηθεί ο αλγόριθμος στη λύση αυτή, χωρίς

όμως ταυτόχρονα να γνωρίζει ότι η συγκεκριμένη λύση είναι η ολικά βέλτιστη της διαδικασίας. Παρουσιάζουμε λοιπόν στο σημείο αυτό τον ισχυρισμό, ότι μπορούμε να οδηγηθούμε σε βέλτιστη λύση πολύ πιο σύντομα από το πέρας των προεπιλεγμένων 500 επαναλήψεων, χρησιμοποιώντας το κριτήριο ολοκλήρωσης της επαναληπτικής διαδικασίας. Ακριβώς για το σκοπό αυτό παραθέτουμε στον Πίνακα 6.31 τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα ολοκλήρωσης της επαναληπτικής διαδικασίας με την ικανοποίηση του κριτηρίου τερματισμού.

Πίνακας 6.30: Ολικά βέλτιστες τιμές άντλησης για όλες τις περιπτώσεις μελέτης, έπειτα από έλεγχο που ακολουθεί την ολοκλήρωση του συνόλου των 500 επαναλήψεων.

Παράμετροι ελέγχου	Περιπτώσεις μελέτης					
	Ia	Ib	IIa	IIb	III	IV
k_{opt}	492	160	121	221	500	43
$P(Q^{(k_{opt})})$	0.9461	0.8426	0.7827	0.7807	0.6277	0.4716
$Q_1^{(k_{opt})}$	1783.52	431.63	765.54	206.63	202.27	213.09
$Q_2^{(k_{opt})} Q_7^{(k_{opt})}$	2038.97	2498.96	561.75	1254.18	504.38	285.82 275.57
$Q_3^{(k_{opt})} Q_8^{(k_{opt})}$	-	-	2460.13	2306.97	1303.05	420.33 389.92
$Q_4^{(k_{opt})} Q_9^{(k_{opt})}$	-	-	-	-	1047.07	460.16 379.07
$Q_5^{(k_{opt})} Q_{10}^{(k_{opt})}$	-	-	-	-	912.85	314.41 282.81
$Q_6^{(k_{opt})} Q_{11}^{(k_{opt})}$	-	-	-	-	-	380.49 256.45
$S(Q^{(k_{opt})})$	3822.49	2930.55	3787.42	3767.78	3969.62	3658.12
$t^{(500)}$	1.9697	1.3068	2.3928	3.4820	7.8707	18.9914
$t^{(k_{opt})}$	1.9382	0.4160	0.5808	1.5470	7.8707	1.6340

Η παράμετρος $k_{opt} \in \{1, \dots, 500\}$ αντιπροσωπεύει το επαναληπτικό βήμα της ολικά βέλτιστης λύσεως σε καθεμιά από τις περιπτώσεις μελέτης, ενώ οι μονάδες μέτρησης των συντελεστών $Q_j^{(k_{opt})}$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, είναι m^3/day και φυσικά οι παράμετροι χρόνου $t^{(500)}$ και $t^{(k_{opt})}$ υπολογίζονται σε *seconds*. Με $k^{sc} \in \{40, \dots, 500\}$ συμβολίζουμε την επανάληψη που ενεργοποιείται το κριτήριο τερματισμού της διαδικασίας, ενώ αντίστοιχα με $k_{opt}^{sc} \in \{k^{sc} - 40, \dots, k^{sc}\}$ την επανάληψη που αντιστοιχεί στη βέλτιστη λύση εντός των επαναλήψεων που δραστηριοποιείται το κριτήριο τερματισμού. Υπενθυμίζουμε ότι σύμφωνα με την αναλυτική περιγραφή της εφαρμογής του κριτηρίου τερματισμού της διαδικασίας στο Κεφάλαιο 6.2.4, σε κάθε επαναληπτικό βήμα πραγματοποιείται ο έλεγχος των τελευταίων 40 επαναλήψεων.

Πίνακας 6.31: Βέλτιστες τιμές άντλησης για όλες τις περιπτώσεις μελέτης, υπό την ισχύ εφαρμογής του κριτηρίου τερματισμού.

Παράμετροι ελέγχου	Περιπτώσεις μελέτης					
	Ia	Ib	IIa	IIb	III	IV
$k^{sc} k_{opt}^{sc}$	84 75	116 90	82 63	85 77	84 63	66 43
$P(Q^{(k_{opt}^{sc})})$	0.9457	0.8423	0.7818	0.7779	0.6275	0.4716
$Q_1^{(k_{opt}^{sc})}$	1793.04	434.80	728.98	293.57	206.41	213.09
$Q_2^{(k_{opt}^{sc})} Q_7^{(k_{opt}^{sc})}$	2024.97	2494.08	604.09	1004.77	720.10	285.82 275.57
$Q_3^{(k_{opt}^{sc})} Q_8^{(k_{opt}^{sc})}$	-	-	2445.54	2443.32	923.57	420.33 389.92
$Q_4^{(k_{opt}^{sc})} Q_9^{(k_{opt}^{sc})}$	-	-	-	-	1278.27	460.16 379.07
$Q_5^{(k_{opt}^{sc})} Q_{10}^{(k_{opt}^{sc})}$	-	-	-	-	838.96	314.41 282.81
$Q_6^{(k_{opt}^{sc})} Q_{11}^{(k_{opt}^{sc})}$	-	-	-	-	-	380.49 256.45
$S(Q^{(k_{opt}^{sc})})$	3818.01	2928.88	3778.61	3741.67	3967.30	3658.12
$t^{(k^{sc})}$	0.3309	0.3016	0.3936	0.5950	1.3188	2.5080
$t^{(k_{opt}^{sc})}$	0.2955	0.2340	0.3024	0.5390	0.9891	1.6340

Εξετάζοντας συγκριτικά τα αποτελέσματα που παρουσιάζουμε στους τελευταίους δύο Πίνακες, γίνεται σαφές ότι οι διαφορές τους είναι ιδιαίτερα μικρές τόσο ως προς τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, όσο και ως προς το συνολικό όγκο άντλησης, σε κάθε περίπτωση. Τα δε επιμέρους πλάνα αντλήσεων παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα, με μοναδική εξαίρεση τις προτεινόμενες αντλήσεις από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης στην περίπτωση III. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε ότι η ολικά βέλτιστη λύση και η βέλτιστη υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού προτείνουν ελαφρώς τροποποιημένα πλάνα αντλήσεων, που αντιστοιχούν όμως σε αντικειμενικές συναρτήσεις, που οι τιμές τους διαφέρουν στο 3ο δεκαδικό ψηφίο. Τα δύο αυτά πλάνα αντλήσεων αποτελούν ισοδύναμες βέλτιστες λύσεις για το πρόβλημα της ασφαλούς διαχείρισης των αντλήσεων στον υδροφορέα Καλύμνου 5 ενεργών γεωτρήσεων. Η επιλογή της μίας ή της άλλης λύσεως είναι καθαρά απόφαση της ακολουθούμενης στρατηγικής εκ μέρους μας και μπορεί να στηρίζεται μόνο, όπως και για όλες τις άλλες περιπτώσεις, στο συνολικό χρονικό διάστημα υπολογισμού της. Συνεπώς, εξαιτίας του ότι οι χρόνοι υπολογισμού των βέλτιστων υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού λύσεις είναι κλάσματα μονάχα των αντίστοιχων χρόνων υπολογισμού των ολικά βέλτιστων λύσεων, μια

αποτελεσματική στρατηγική εκ μέρους μας είναι η χρήση των λύσεων που προκύπτουν στους μικρότερους δυνατούς χρόνους.

Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό, ότι ομοίως με την περίπτωση των ολικά βέλτιστων λύσεων προηγουμένως, ως χρόνους ολοκλήρωσης της διαδικασίας υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού υποχρεούμεθα να θεωρήσουμε τους χρόνους που αντιστοιχούν επακριβώς στις επαναλήψεις ενεργοποίησης του κριτηρίου τερματισμού. Δηλαδή, εφόσον η εύρεση της βέλτιστης υπό το κριτήριο τερματισμού λύσης υποχρεώνει το αλγόριθμο να φτάσει στην επανάληψη ενεργοποίησης του κριτηρίου τερματισμού, χρησιμοποιείται πλέον ο δικός της χρόνος ως υπολογιστικός χρόνος της διαδικασίας. Όπως παρατηρούμε όμως στον Πίνακα 6.31, η διαφορά τους βρίσκεται σε λίγες μόνο επαναλήψεις και κατά συνέπεια οι χρόνοι εκτέλεσής τους διαφέρουν επίσης ελάχιστα.

Αξιοποιώντας επομένως αυτό το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της ταχύτατης σύγκλισης σε μια περιοχή ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων του στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V, έχουμε τη δυνατότητα χρήσης αυτού του αλγορίθμου σαν μια real time διαδικασία εύρεσης ακροτάτων σε μια πληθώρα κατάλληλα μοντελοποιημένων προβλημάτων, με άμεσα και αξιόπιστα αποτελέσματα.

6.4.2 Κρίσιμα σημεία της διαδικασίας βελτιστοποίησης

Με στόχο τον έλεγχο ευστάθειας των παραγόμενων λύσεων, παρουσιάζουμε στην ενότητα αυτή μια αναλυτική μελέτη των θέσεων των κρίσιμων σημείων εντός του υδροφορέα, σε κάθε επαναληπτικό βήμα της διαδικασίας. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο Κεφάλαιο, διακρίνουμε τα παρακάτω δύο είδη κρίσιμων σημείων:

- Κρίσιμα σημεία του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας, με συντεταγμένες $(x_{\tau,j}, y_j)$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, απέναντι ακριβώς από τις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων (x_j, y_j) , με $j \in \{1, \dots, M\}$, του υδροφορέα.
- Κρίσιμα σημεία του δυναμικού ροής στο εσωτερικό του υδροφορέα, με συντεταγμένες $(x_{s,j}, y_j)$, για κάθε $j \in \{1, \dots, M\}$, επίσης απέναντι από τις αντίστοιχες θέσεις (x_j, y_j) , με $j \in \{1, \dots, M\}$, των ενεργών γεωτρήσεων.

Οι θέσεις των σημείων αυτών παρουσιάστηκαν προηγουμένως στο Σχήμα 6.6, και ο προσδιορισμός τους σε κάθε επαναληπτικό βήμα της διαδικασίας είναι υποχρεωτικός, αφού οι θέσεις αυτές μεταβάλλονται ανάλογα με τις χρησιμοποιούμενες ανά επανάληψη τιμές αντλήσεων.

Στον Πίνακα 6.32 παρουσιάζουμε συγκεντρωτικά τα κρίσιμα σημεία του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας, για όλες τις περιπτώσεις μελέτης που εξετάσαμε στις προηγούμενες ενότητες. Οι χρησιμοποιούμενες τιμές αντλήσεων για τον υπολογισμό των θέσεων αυτών είναι οι ολικά βέλτιστες, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στους Πίνακες αναλυτικών αποτελεσμάτων όλων των περιπτώσεων μελέτης.

Πίνακας 6.32: Τετμημένες των κρίσιμων σημείων $(x_{\tau,j}, y_j)$, $j \in \{1, \dots, M\}$, της υφάλμυρης σφήνας απέναντι από κάθε θέση ενεργούς γεώτρησης, χρησιμοποιώντας τις ολικά βέλτιστες τιμές άντλησης για όλες τις περιπτώσεις μελέτης.

Τετμημένη κρίσιμων σημείων	Περιπτώσεις μελέτης					
	Ia	Ib	IIa	IIb	III	IV
$x_{\tau,1}$	1925.41	999.93	1798.42	1799.92	2256.51	1632.92
$x_{\tau,2} \mid x_{\tau,7}$	1957.20	1076.38	1791.47	1784.22	2205.60	1589.70 1637.39
$x_{\tau,3} \mid x_{\tau,8}$	-	-	1690.88	1746.52	2156.93	1604.81 1635.85
$x_{\tau,4} \mid x_{\tau,9}$	-	-	-	-	2176.00	1620.38 1625.04
$x_{\tau,5} \mid x_{\tau,10}$	-	-	-	-	2257.47	1631.65 1635.85
$x_{\tau,6} \mid x_{\tau,11}$	-	-	-	-	-	1633.50 1628.08
$x_{1,1}^{guard} - x_{\tau,1}$	24.59	0.07	1.58	0.08	0.49	2.08

Αναφέραμε στην αρχή του παρόντος Κεφαλαίου τον ιδιαίτερο ρόλο στη διαδικασία βελτιστοποίησης που διαδραματίζει η μετωπιαία γεώτρηση, σε κάθε μία από τις περιπτώσεις μελέτης. Μάλιστα, τονίσαμε το γεγονός, ότι η ασφαλής διαχείριση της συγκεκριμένης γεώτρησης είναι ικανή συνθήκη προστασίας συνολικά όλων των γεωτρήσεων του υδροφορέα. Παρουσιάζουμε λοιπόν στην τελευταία γραμμή του Πίνακα αυτού την απόσταση του σημείου ασφαλείας $(x_{1,1}^{guard}, y_1)$ της μετωπιαίας γεώτρησης από το αντίστοιχο κρίσιμο σημείο $(x_{\tau,1}, y_1)$ του υφάλμυρου μετώπου. Υπενθυμίζουμε δε ότι $x_{1,1}^{guard} = x_1 - (r_c + d_s)$, όπου $r_c = 300 \text{ m}$ η προεπιλεγμένη τιμή της ακτίνας δράσεως του κώνου κατάπτωσης περιμετρικά κάθε γεώτρησης και $d_s = 100 \text{ m}$ μια επιπλέον απόσταση ασφαλείας. Είναι σαφές ότι η απόσταση αυτή παραμένει θετική σε κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, δηλαδή οι ολικά βέλτιστες αντλήσεις οδηγούν το υφάλμυρο μέτωπο κοντά στις θέσεις ενεργών γεωτρήσεων,

αλλά δεν εισέρχονται στις κυκλικές περιοχές ασφαλείας αυτών. Προφανώς, η μη εισχώρηση του κρίσιμου σημείου της σφήνας εντός της κυκλικής περιοχής προστασίας της μετωπιαίας γεώτρησης, αποτρέπει και την είσοδο των υπολοίπων κρίσιμων σημείων στις αντίστοιχες περιοχές ασφαλείας των άλλων γεωτρήσεων. Ισχύει δηλαδή ότι:

$$x_{1,1}^{guard} - x_{\tau,1} > 0 \Rightarrow x_{j,1}^{guard} - x_{\tau,j}, \text{ για κάθε } j \in \{2, \dots, M\}. \quad (6.16)$$

Σε περίπτωση που χρησιμοποιούσαμε περισσότερα από ένα σημεία ασφαλείας περιμετρικά της μετωπιαίας αρχικά και στη συνέχεια όλων των γεωτρήσεων, δηλαδή $n_{guards} > 1$, τα αποτελέσματα παραμένουν ίδια ως προς την εισχώρηση του υφάλμυρου μετώπου εντός του υδροφορέα. Η κίνηση της σφήνας ελέγχεται μονάχα με τη χρήση του σημείου ασφαλείας $(x_{1,1}^{guard}, y_1)$, και η συμμετοχή των υπολοίπων κρίνεται περιττή.

Πίνακας 6.33: Τετμημένες των κρίσιμων σημείων $(x_{s,j}, y_{s,j})$, $j \in \{1, \dots, M\}$, απέναντι από κάθε θέση ενεργούς γεώτρησης, χρησιμοποιώντας τις ολικά βέλτιστες τιμές άντλησης για όλες τις περιπτώσεις μελέτης.

Τετμημένη κρίσιμων σημείων	Περιπτώσεις μελέτης					
	Ia	Ib	IIa	IIb	III	IV
$x_{s,1}$	2004.61	1325.09	2013.20	2118.78	2535.31	1958.14
$x_{s,2} x_{s,7}$	2014.36	1989.31	2037.65	3123.34	3133.17	2316.82 3850.13
$x_{s,3} x_{s,8}$	-	-	3064.35	4507.13	3558.62	2303.62 4145.74
$x_{s,4} x_{s,9}$	-	-	-	-	4432.33	2747.60 4455.83
$x_{s,5} x_{s,10}$	-	-	-	-	4737.50	2799.10 4200.00
$x_{s,6} x_{s,11}$	-	-	-	-	-	3587.63 20358.53
$x_{s,1} - x_{\tau,1}$	79.20	325.16	214.78	318.86	278.80	325.22

Στόχος μας στη συνέχεια είναι ο έλεγχος της ευστάθειας των λύσεων που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης, ο έλεγχος δηλαδή της συμπεριφοράς του υφάλμυρου μετώπου έπειτα από μικρές τεχνητές μεταβολές στις επιμέρους τιμές άντλησεων. Παρουσιάζουμε λοιπόν στον Πίνακα 6.33 συγκεντρωτικά τις τετμημένες των κρίσιμων σημείων $(x_{s,1}, y_1)$ του δυναμικού ροής, απέναντι από τη μετωπιαία γεώτρηση, σε κάθε μια από τις περιπτώσεις που μελετήσαμε προηγουμένως, χρησιμοποιώντας τις ολικά βέλτιστες τιμές άντλησεων. Η διαφορά $x_{s,1} - x_{\tau,1}$, που παρουσιάζουμε στην τελευταία γραμμή του Πίνακα αυτού, ικανοποιεί

το κριτήριο:

$$x_{s,1} - x_{\tau,1} \equiv \min_{1 \leq j \leq M} (x_{s,j} - x_{\tau,j}) > 0 \quad (6.17)$$

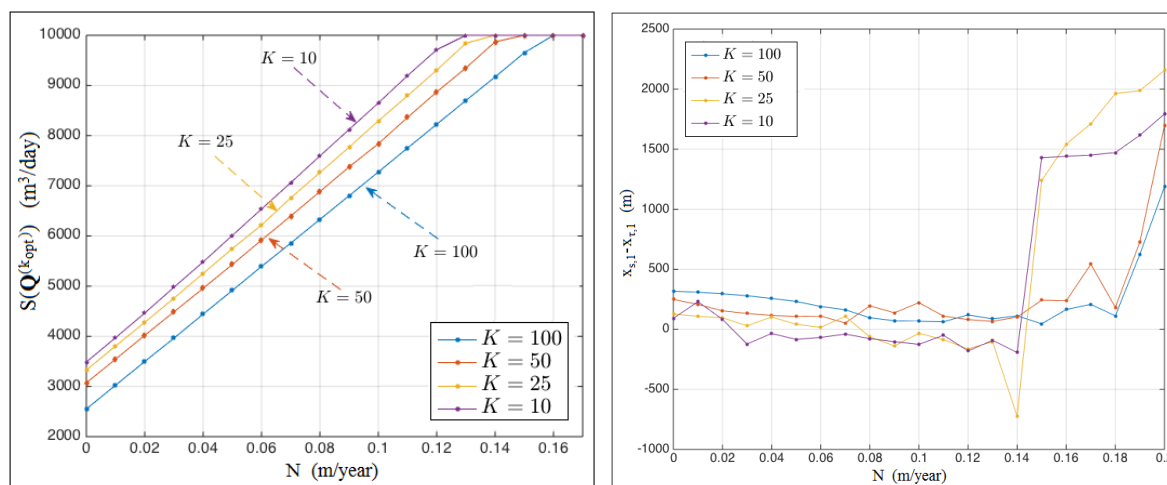
δηλαδή, σε κάθε περίπτωση η θέση του υφάλμυρου απέναντι από κάθε μετωπιαία γεώτρηση βρίσκεται σε ικανοποιητική απόσταση από το αντίστοιχο κρίσιμο σημείο του δυναμικού ροής. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει την ευστάθεια των παραγόμενων λύσεων και κατά συνέπεια την εγκυρότητα των παραγόμενων από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης λύσεων.

Παρατηρούμε ωστόσο, ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως παραδείγματος χάριν στις III και IV, ενώ η χρήση των βέλτιστων τιμών άντλησης αντιστοιχεί σε μια ευσταθή διαδικασία, δεν συμβαίνει το ίδιο με μια μικρή τεχνητή αύξηση όλων των τιμών άντλησης. Πιο συγκεκριμένα, με μια αύξηση του μεγέθους του 5% παρατηρούμε ότι το υφάλμυρο μέτωπο προωθείται αισθητά εντός του υδροφορέα και η συνθήκη (6.17) δεν ισχύει πλέον. Αυτή δηλαδή η σχετικά μικρή αύξηση στις τιμές άντλησης είχε δραματικές συνέπειες. Για την αντιμετώπιση λοιπόν του φαινομένου αυτού χρησιμοποιούμε τις συνθήκες του Προφίλ Μοντελοποίησης II, όπως αναλυτικά περιγράφουμε στη συνέχεια.

6.4.3 Ανάλυση ευαισθησίας των παραγόμενων λύσεων

Στην παρούσα ενότητα, με στόχο την επιβεβαίωση της εγκυρότητας των βελτιστοποιημένων σεναρίων άντλησης που παρουσιάσαμε προηγουμένως, υποβάλλουμε σε διεξοδικότερη εξέταση τις Περιπτώσεις III και IV, χρησιμοποιώντας ως μεταβλητές ελέγχου τις παραμέτρους της ανατροφοδότησης N και της υδραυλικής αγωγιμότητας K . Επιλέγουμε για τη μελέτη μας αυτή τις συγκεκριμένες δύο περιπτώσεις, επειδή στη βιβλιογραφία τις συναντάμε ως υπαρκτές και ρεαλιστικές. Υπενθυμίζουμε ότι η μελέτη των υπολοίπων περιπτώσεων στο Κεφάλαιο του υδροφορέα της Καλύμνου είχε ως στόχο, αρχικά την επιβεβαίωση της ικανότητας του χρησιμοποιούμενου αλγορίθμου στοχαστικής βελτιστοποίησης να αντιλαμβάνεται τις ιδιαιτερότητες των διαφορετικών διατάξεων των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα σε κάθε περίπτωση, και στη συνέχεια την αποτελεσματική διαχείριση των αντλήσεων τους.

Οι υπό εξέταση δύο περιπτώσεις αυτής της ενότητας μελετήθηκαν προηγουμένως χρησιμοποιώντας και τα δύο Προφίλ Μοντελοποίησης I και II. Διαπιστώσαμε λοιπόν ότι η διάταξη των γεωτρήσεων και στις δυο περιπτώσεις ήταν τέτοια, ώστε υπό την επίδραση



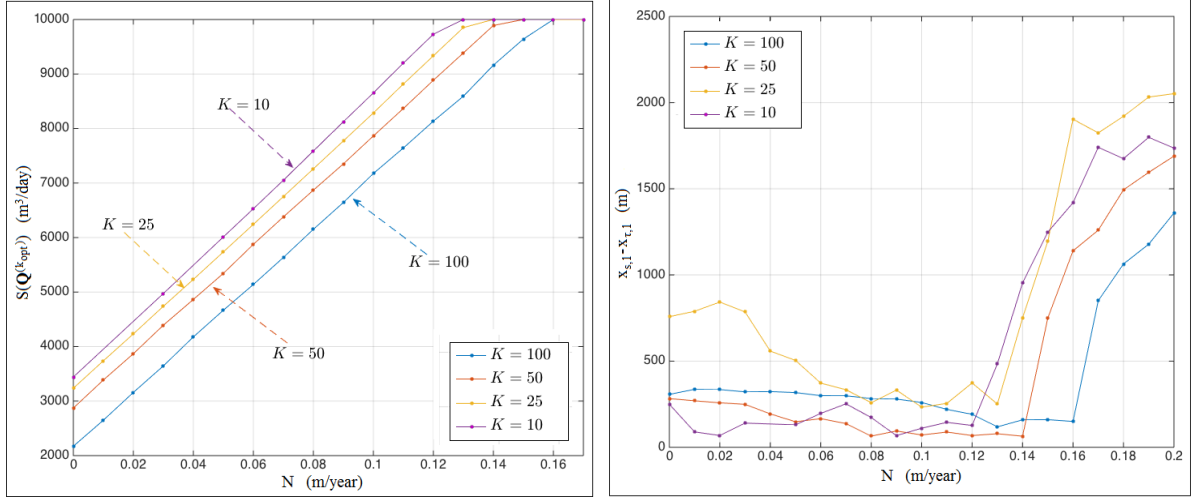
(α') Περίπτωση III: Αθροίσματα $S(Q^{(k_{opt})})$ των βέλτιστων τιμών άντλησης.

(β') Περίπτωση III: Αποστάσεις $x_{s,1} - x_{\tau,1}$ μεταξύ των τετμημένων των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής και του υφάλμυρου μετώπου για τη μετωπιαία γεώτρηση του υδροφορέα.

Σχήμα 6.34: Υδροφορέας Καλύμνου, Προφίλ Μοντελοποίησης I: Ανάλυση ευαισθησίας για την Περίπτωση III, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της ανατροφοδότησης N του υδροφορέα.

των συγκεκριμένων σταθερών τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της επιφανειακής ανατροφοδότησης N , τα παραγόμενα αποτελέσματα ταυτίζονταν. Δηλαδή, σε καμιά από τις περιπτώσεις αυτές δεν παρήχθησαν τιμές άντλήσεων που να μηδενίζουν ή να καθιστούν αρνητικό το πρόσημο του δυναμικού ροής στις θέσεις των γεωτρήσεων του υδροφορέα. Έτσι, δεν προέκυψε στην ουσία η ανάγκη εφαρμογής των κυρώσεων του δυναμικού ροής που παρουσιάσαμε αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα, με συνέπεια τα δύο χρησιμοποιούμενα Προφίλ Μοντελοποίησης να ταυτίζονται απολύτως.

Στο σημείο αυτό, με στόχο την ανάδειξη της αναγκαιότητας χρήσεως των κυρώσεων του δυναμικού ροής και κατά συνέπεια του Προφίλ Μοντελοποίησης II στις ρεαλιστικές περιπτώσεις του υδροφορέα Καλύμνου των 5 και των 11 ενεργών γεωτρήσεων, παρουσιάζουμε τα παρακάτω αποτελέσματα αυτής της στοχευμένης ανάλυσης ευαισθησίας. Τα γραφήματα των Σχημάτων 6.34 και 6.35 παρήχθησαν χρησιμοποιώντας το Προφίλ Μοντελοποίησης I, ενώ αντίστοιχα για τα γραφήματα των Σχημάτων 6.36 και 6.37 χρησιμοποιήθηκε το Προφίλ Μοντελοποίησης II.



(α') Περίπτωση IV: Αθροίσματα $S(Q^{k_{opt}})$ των βέλτιστων τιμών άντλησης.

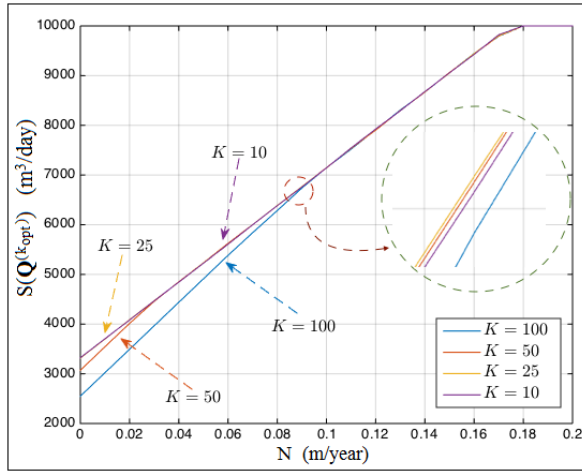
(β') Περίπτωση IV: Αποστάσεις $x_{s,1} - x_{\tau,1}$ μεταξύ των τετμημένων των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής και του υφάλμυρου μετώπου για τη μετωπιαία γεώτρηση του υδροφορέα.

Σχήμα 6.35: Υδροφορέας Καλύμνου, Προφίλ Μοντελοποίησης I: Ανάλυση ευαισθησίας για την Περίπτωση IV, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της ανατροφοδότησης N του υδροφορέα.

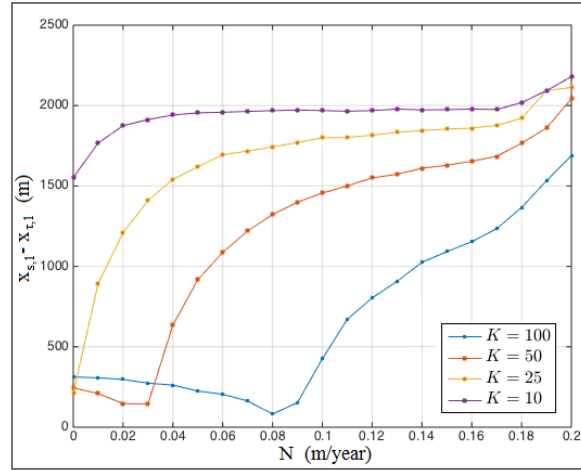
Οι γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 6.34α' και 6.35α' παρουσιάζουν τα αθροίσματα των βέλτιστων τιμών άντλησης, για τις περιπτώσεις III και IV αντίστοιχα, χρησιμοποιώντας 4 διαφορετικές τιμές για την παράμετρο της υδραυλικής αγωγιμότητας $K \in \{10, 25, 50, 100\}$ σε m/day και 21 διαφορετικές τιμές για την παράμετρο της επιφανειακής ανατροφοδότησης $N \in \{0.00, 0.01, 0.02, \dots, 0.20\}$ σε $m/year$. Είναι σαφές ότι η μορφή των γραφημάτων αυτών είναι γραμμική και στις δύο περιπτώσεις υπό μελέτη. Μάλιστα, οι μεγαλύτερες τιμές του αθροίσματος $S(Q^{k_{opt}})$ λαμβάνονται για τη μικρότερη από τις χρησιμοποιούμενες τιμές του K , δηλαδή για $K = 10$ m/day και αντίστοιχα για τις μεγαλύτερες τιμές της επιφανειακής ανατροφοδότησης, δηλαδή για $N \in [0.13, \dots, 0.20]$ $m/year$. Αυτό είναι απολύτως λογικό, υπό την έννοια ότι μικρότερες τιμές του K αντιστοιχούν σε κίνηση του νερού με μικρότερη ταχύτητα στο εσωτερικό του υδροφορέα, με αποτέλεσμα να δίνεται η δυνατότητα στις γεωτρήσεις του να αντλούν με μεγαλύτερη ισχύ. Ομοίως, ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν για αυξημένες τιμές του N , καθώς ο υδροφορέας αναπληρώνει ταχύτερα και σε

σημαντικότερο ποσοστό την ποσότητα του αντλούμενου γλυκού νερού στο εσωτερικό του.

Παρατηρούμε επίσης ότι κοντά στην περιοχή των $S(Q^{(k_{opt})}) = 10000 \text{ m}^3/\text{day}$ η μορφή των γραφικών παραστάσεων αλλάζει κλίση, μέχρι το σημείο όπου γίνεται εντελώς οριζόντια, για $N \in [0.16, \dots, 0.20] \text{ m/year}$ και για τις 4 τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας. Υπενθυμίζουμε ότι το ανώτερο όριο ημερήσιας άντλησης που θέσαμε για το συγκεκριμένο υδροφορέα ήταν ακριβώς αυτό, δηλαδή $Q_A = 10000 \text{ m}^3/\text{day}$, με συνέπεια το άθροισμα των πραγματοποιούμενων βέλτιστων αντλήσεων να σταθεροποιείται στην τιμή αυτή.



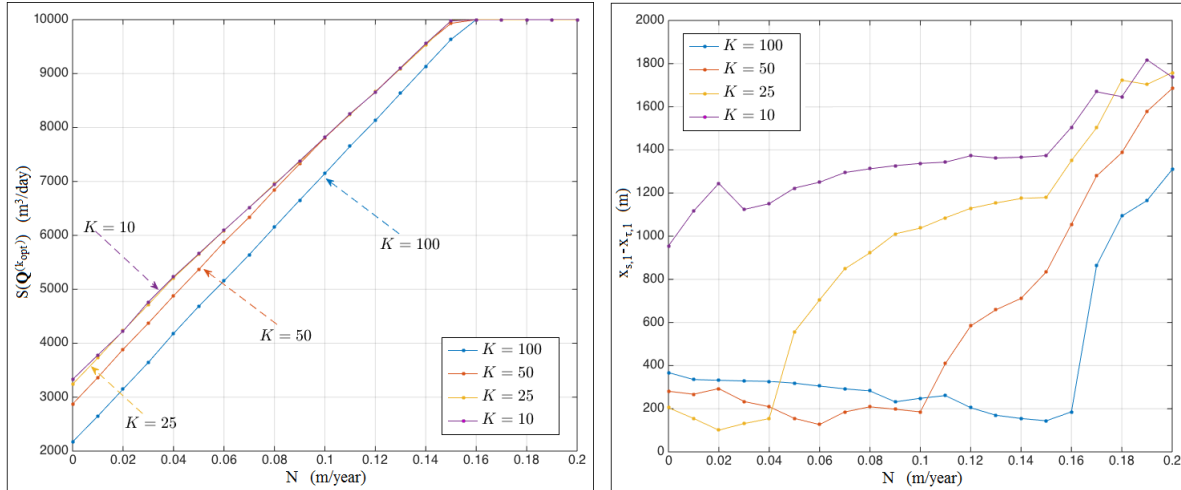
(α') Περίπτωση III: Αθροίσματα $S(Q^{(k_{opt})})$ των βέλτιστων τιμών άντλησης.



(β') Περίπτωση III: Αποστάσεις $x_{s,1} - x_{τ,1}$ μεταξύ των τετμημένων των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής και του υφάλμυρου μετώπου για τη μετωπιαία γεώτρηση του υδροφορέα.

Σχήμα 6.36: Υδροφορέας Καλύμνου, Προφίλ Μοντελοποίησης II: Ανάλυση ευαισθησίας για την Περίπτωση III, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της ανατροφοδότησης N του υδροφορέα.

Ωστόσο, στο γράφημα του Σχήματος 6.34β' παρουσιάζεται ένα σημαντικό πρόβλημα που αξίζει ιδιαίτερης προσοχής, μιας και η ύπαρξή του οδήγησε στη μελέτη που παρουσιάζουμε στην ενότητα αυτή. Η διαφορά μεταξύ των θέσεων των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής και του υφάλμυρου μετώπου $x_{s,1} - x_{τ,1}$ για τη μετωπιαία γεώτρηση, για κάποιες τιμές των K και N εντοπίζεται πολύ κοντά στο 0, ενώ για κάποιες άλλες γίνεται αρνητική. Παραδείγματος χάριν, χρησιμοποιώντας τιμές $K = 10 \text{ m/day}$ και $N \in [0.025, \dots, 0.142] \text{ m/year}$,



(α') Περίπτωση IV: Αθροίσματα $S(Q^{(k_{opt})})$ των βέλτιστων τιμών άντλησης.

(β') Περίπτωση IV: Αποστάσεις $x_{s,1} - x_{t,1}$ μεταξύ των τετμημένων των κρίσιμων σημείων του δυναμικού ροής και του υφάλμυρου μετώπου για τη μετωπιαία γεώτρηση του υδροφορέα.

Σχήμα 6.37: Υδροφορέας Καλύμνου, Προφίλ Μοντελοποίησης II: Ανάλυση ευαισθησίας για την Περίπτωση IV, χρησιμοποιώντας διαφορετικές τιμές για τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της ανατροφοδότησης N του υδροφορέα.

οι τιμές των παραπάνω αποστάσεων γίνονται αρνητικές. Τότε, οι πραγματοποιούμενες αντλήσεις δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως ευσταθείς, φαινόμενο στο οποίο αναφερθήκαμε στις εισαγωγικές ενότητες του παρόντος Κεφαλαίου πριν από την αναλυτική παρουσίαση των επιμέρους περιπτώσεων. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την εμφάνιση του φαινομένου, όπου πλέον μικρές αλλαγές στις τιμές αντλήσεων ισοδυναμούν με μεγάλα άλματα της υφάλμυρης σφήνας και σχετικά απρόβλεπτη κίνηση του υφάλμυρου μετώπου. Σημειώνουμε ωστόσο, τη μη εμφάνιση του φαινομένου αυτού στην Περίπτωση IV, εξαιτίας προφανώς της διάταξης των θέσεων των ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα, που οδηγούν σε προτεινόμενα πλάνα λύσεων με παραπλήσιες τιμές άντλησης. Έτσι, για κάθε εξεταζόμενο συνδυασμό τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και της επιφανειακής ανατροφοδότησης το πρόσημο της διαφοράς $x_{s,1} - x_{t,1}$ παραμένει θετικό και οι προτεινόμενες αντλήσεις ευσταθείς (Σχήμα 6.35β'). Επίσης, σημειώνουμε ότι και στις δύο περιπτώσεις μελέτης εντοπίζουμε

συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων της υδραυλικής αγωγιμότητας και της επιφανειακής ανατροφοδότησης, όπου οι παραπάνω διαφορές αποκτούν δραματικά μεγάλο θετικό μέγεθος, με εντονότερη εμφάνιση του φαινομένου για μικρότερες τιμές του K και μεγαλύτερες τιμές του N .

Με στόχο την αντιμετώπιση του φαινομένου της παρατηρούμενης μη ευστάθειας των προτεινόμενων λύσεων για κάποιες συνδυαστικές περιοχές τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και της επιφανειακής ανατροφοδότησης, χρησιμοποιούμε το Προφίλ Μοντελοποίησης II, όπου λαμβάνεται επιπλέον υπόψη η ισχύ του περιορισμού του θετικού δυναμικού ροής στις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων. Η διαδικασία αυτή αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματική, αφού εξασφαλίζει την ακεραιότητα των γεωτρήσεων, σύμφωνα με την αναλυτική παρουσίαση των σεναρίων άντλησης προηγουμένως, αλλά και την ευστάθεια των παραγόμενων λύσεων από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.

Οι γραφικές παραστάσεις του αθροίσματος των προτεινόμενων βέλτιστων τιμών άντλησης, όπως αυτές αποτυπώνονται στα Σχήματα 6.36α' και 6.37α', παρουσιάζουν συγκλίνουσα συμπεριφορά τόσο για την Περίπτωση III όσο και την Περίπτωση IV. Πιο συγκεκριμένα, στην Περίπτωση III του υδροφορέα των 5 ενεργών γεωτρήσεων (Σχήμα 6.36α'), οι 4 γραφικές παραστάσεις του βέλτιστου συνολικού όγκου αντλούμενου νερού υπό διαφορετικές τιμές της παραμέτρου της υδραυλικής αγωγιμότητας, περίπου στην περιοχή του $N = 0.09 \text{ m/year}$ και έπειτα, ταυτίζονται. Το φαινόμενο αυτό σε μικρότερη κλίμακα εμφανίζεται και στο γράφημα του Σχήματος 6.37α' για την περίπτωση IV. Επίσης, στην περιοχή του $S(Q^{(k_{opt})}) = 10000 \text{ m}^3/\text{day}$ ομοίως με το Προφίλ Μοντελοποίησης I, η κλίση των γραφικών παραστάσεων γίνεται οριζόντια και σταθεροποιείται στον αριθμό αυτό, εξαιτίας φυσικά του συνολικού διαθέσιμου προς άντλησης όγκου γλυκού νερού Q_A από τον υδροφορέα.

Ωστόσο, η αξία επιλογής του Προφίλ Μοντελοποίησης II είναι εμφανής στα γραφήματα του Σχήματος 6.36β', όπου πλέον οι αποστάσεις $x_{s,1} - x_{\tau,1}$ παραμένουν θετικές. Η επιπλέον εφαρμογή του περιορισμού θετικής τιμής του δυναμικού ροής στις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων, κατάφερε να διατηρήσει θετικό το πρόσημο της διαφοράς των αποστάσεων των κρίσιμων σημείων δυναμικού και υφάλμυρου μετώπου, ανεξαρτήτως τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και επιφανειακής ανατροφοδότησης. Οι παραγόμενες λύσεις από τον

αλγόριθμο είναι ευσταθείς, ενώ πλέον μικρές αλλαγές τους δεν οδηγούν την υφάλμυρη σφήνα να εκτελέσει μη προβλέψιμου μήκους άλματα. Σημειώνουμε δε, ότι στην περίπτωση IV του υδροφορέα των 11 γεωτρήσεων, οι παραγόμενες λύσεις και με το προηγούμενο Προφίλ Μοντελοποίησης ήταν ευσταθείς (Σχήμα 6.35β'), με συνέπεια η περαιτέρω εφαρμογή του περιορισμού δυναμικού απλώς να βελτιώνει την υπάρχουσα μη επικίνδυνη κατάσταση, όπως εύκολα διαπιστώνουμε στο Σχήμα 6.37β'.

6.5 Υδροφορέας Καλύμνου: Συμπεράσματα

Ο παράκτιος υδροφορέας γλυκού νερού στο ανατολικό τμήμα του Ελληνικού νησιού της Καλύμνου στο νότιο Αιγαίο αποτελεί μια εξαιρετική επιλογή για την εφαρμογή του μοντέλου στοχαστικής βελτιστοποίησης που προτείνουμε στην παρούσα εργασία. Τόσο η γεωμετρία του σχήματος του υδροφορέα, όσο και οι τιμές των υδραυλικών χαρακτηριστικών στο εσωτερικό του, τον καθιστούν ιδανικό υποψήφιο για την εφαρμογή γνωστών από τη βιβλιογραφία εξισώσεων ροής, η χρήση των οποίων μας παρέχει τη δυνατότητα αναλυτικής περιγραφής της κίνησης των διαφορετικών φάσεων του νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Περιγράφουμε στη συνέχεια συνοπτικά τα κομβικά σημεία τόσο της μαθηματικής μοντελοποίησης όσο και των αποτελεσμάτων της διαδικασίας βελτιστοποίησης, που παρουσιάσαμε αναλυτικά κατά την εξέλιξη του Κεφαλαίου του υδροφορέα της Καλύμνου.

- Κατ' αρχάς, ακολουθώντας μια μεθοδολογία προσέγγισης που προτείνεται σε σημαντικές εργασίες της βιβλιογραφίας, επιλέγουμε να προσομοιάσουμε τις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα στην περιοχή Βαθύ Καλύμνου με εκείνες ενός ελεύθερου, καρστικού και ομοιογενούς υδροφορέα σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Το άμεσο πλεονέκτημα αυτής της περιγραφής είναι ότι μπορούμε έτσι να χρησιμοποιήσουμε ως εξισώσεις ροής στο εσωτερικό του, σχετικές εξισώσεις αποδεδειγμένης ισχύος από έγκυρους ερευνητές των τελευταίων 40 χρόνων. Επομένως, χωρίς την ανάγκη εφαρμογής κάποιας αριθμητικής μεθόδου, χρησιμοποιώντας μονάχα την αναλυτική λύση του δυναμικού ροής, μπορούμε να γνωρίζουμε σε κάθε χρονική στιγμή τις σχετικές θέσεις των φάσεων του νερού στο εσωτερικό του.

- Παλαιότερες μελέτες του συγκεκριμένου υδροφορέα παρουσιάζουν αποκλίσεις μεταξύ τους τόσο ως προς το πλήθος και τις θέσεις τοποθέτησης των ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του, όσο και ως προς τις μεθόδους μοντελοποίησης και εκμετάλλευσής του. Επιλέγουμε στο σημείο αυτό να χρησιμοποιήσουμε την περιγραφή που συναντάμε στις εργασίες των Α. Μαντόγλου, Μ. Παπαντωνίου και Π. Γιαννουλόπουλου, όπου πλήθος 5 ή 11 γεωτρήσεων χαρακτηρίζει τις προσπάθειες εκμετάλλευσης του υδροφορέα. Επιπροσθέτως, με στόχο την παρουσίαση των ικανοτήτων της διαδικασίας βελτιστοποίησης που προτείνουμε στην παρούσα εργασία, εξετάζουμε υποθετικά σενάρια ύπαρξης 2 και 3 αντίστοιχα θέσεων ενεργών γεωτρήσεων, κατάλληλα τοποθετημένες έτσι ώστε να αναδεικνύουν τα χαρακτηριστικά της χρησιμοποιούμενης μεθοδολογίας.
- Για την θέση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης κατασκευάσαμε μια νέα έκδοση του γνωστού από τη βιβλιογραφία αλγορίθμου ALOPEX, τροποποιημένη και ρυθμισμένη κατάλληλα ώστε να περιγράφει τα φυσικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υδροφορέα. Ταυτόχρονα, ένα πλήρως εξειδικευμένο πλήθος περιορισμών χωρικής μετατόπισης, αντλούμενου όγκου και δυναμικού ροής συνδυάζεται με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία, ώστε να εξασφαλίζεται σε κάθε σημείο της διαδικασίας ο έλεγχος των πραγματοποιούμενων αντλήσεων. Μάλιστα, ως προς το μέγεθος επίδρασης όλων των περιορισμών αυτών επιλέγουμε τη χρήση της λεγόμενης στρατηγικής του 5%, η οποία αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποδοτική.
- Με στόχο λοιπόν την κατασκευή ενός βελτιστοποιημένου και ασφαλούς διαχειριστικού πλάνου αντλήσεων για το συγκεκριμένο υδροφορέα υπό μελέτη, εξετάζουμε διαδοχικά σενάρια θέσεων τοποθέτησης των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα. Ωστόσο, πέραν από τις περιπτώσεις των 5 και 11 γεωτρήσεων που συναντάμε στη βιβλιογραφία, μελετάμε και χαρακτηριστικές περιπτώσεις με 2 και 3 θέσεις ενεργών γεωτρήσεων, όπως αναφέραμε προηγουμένως, με στόχο την ανάδειξη της ικανότητας του χρησιμοποιούμενου στοχαστικού αλγορίθμου ALOPEX V να λαμβάνει υπόψη του μικρές αλλαγές μεταξύ των σεναρίων και να προσαρμόζει ανάλογα τη διαδικασία μεγιστοποίησης των αντλήσεων. Παρουσιάζουμε στη συνέχεια εν συντομία τα σενάρια αντλήσεων που μελετήσαμε, υπό το πρίσμα ενός συνόλου περιορισμών που χαρακτηρίσαμε ως

Προφίλ Μοντελοποίησης I.

Περίπτωση Ia:

Οι 2 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα βρίσκονται τοποθετημένες σχεδόν παράλληλα απέναντι από τη θαλάσσια ακτογραμμή, σε συμμετρικές θέσεις ως προς τον άξονα των x στο εσωτερικό του υδροφορέα. Η διαδικασία βελτιστοποίησης των 500 επαναλήψεων ολοκληρώνεται ταχύτατα, ενώ σε χρόνο $t^{(k_{opt})} = 1.9382 \text{ secs}$ προτείνεται μια ολικά βέλτιστη λύση που μπορεί να αποδώσει $S(Q^{(k_{opt})}) = 3822.49 \text{ m}^3/\text{day}$ όγκο γλυκού νερού στην τοπική κοινότητα. Αν δε, έναντι της ολικά βέλτιστης λύσεως χρησιμοποιήσουμε τη βέλτιστη υπό την ισχύ ενεργοποίησης του κριτηρίου τερματισμού, απαιτείται μικρότερος συνολικός χρόνος ίσος με $t^{(k_{opt}^{sc})} = 0.2955 \text{ secs}$, στον οποίο παρουσιάζεται μια εντελώς ισοδύναμη βέλτιστη λύση. Το υφάλμυρο μέτωπο, υπό την ισχύ των παραπάνω βέλτιστων λύσεων, παραμένει σε προκαθορισμένη απόσταση ασφαλείας και από τις 2 γεωτρήσεις (Σχήμα 6.10) στο εσωτερικό του υδροφορέα. Τέλος, ο συντελεστής αποδοτικότητας της διαδικασίας ισούται με $a_{eff}^{(k_{opt})} = 76.45\%$, δηλαδή η παρούσα διάταξη των γεωτρήσεων παρέχει ιδιαίτερα αυξημένες δυνατότητες αξιοποίησης των αποθεματικών σε γλυκό νερό του υδροφορέα υπό μελέτη.

Περίπτωση Ib:

Συνεχίζουμε τη μελέτη της συμπεριφοράς του αλγορίθμου, υπό την ύπαρξη 2 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων τοποθετημένες σε απόσταση ως προς τον άξονα των x μεταξύ τους, καθιστώντας έτσι μονάχα τη μία εξ' αυτών ως μετωπιαία γεώτρηση. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης λαμβάνοντας υπόψη τη δυναμική κίνησης του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό του υδροφορέα, προτείνει πλάνα άντλήσεων που οι τιμές άντλησης στη μετωπιαία γεώτρηση είναι σαφώς μικρότερες σε σχέση με τις αντίστοιχες στη δεύτερη. Μάλιστα, σε χρόνο $t^{(k_{opt})} = 0.4160 \text{ secs}$ κατασκευάζεται η ολικά βέλτιστη λύση με συνολικό όγκο γλυκού νερού ίσο με $S(Q^{(k_{opt})}) = 2930.55 \text{ m}^3/\text{day}$. Αντίστοιχα, η βέλτιστη υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού συναντάται στην 90η επανάληψη, σε χρόνο ίσο με $t^{(k_{opt}^{sc})} = 0.2340 \text{ secs}$ και συνολικό προτεινόμενο όγκο άντλησης ίσο με $S(Q^{(k_{opt}^{sc})}) = 2928.88 \text{ m}^3/\text{day}$. Το υφάλμυρο μέτωπο σταθεροποιείται υπό τη χρήση της ολικά βέλτιστης λύσεως στην προκαθορισμένη απόσταση ασφαλείας μπροστά από

τη μετωπιαία γεώτρηση (Σχήμα 6.15), χωρίς να επίκειται ο κίνδυνος υφαλμύρισής της. Τέλος, ο συντελεστής αποδοτικότητας ισούται με $a_{eff}^{(k_{opt})} = 58.61\%$ και αντιστοιχεί προφανώς σε πλάνο άντλησεων που χρησιμοποιεί σε μικρότερο βαθμό το διαθέσιμο προς άντλησης όγκο νερού του υδροφορέα.

Περίπτωση IIa:

Ο υδροφορέας της Καλύμνου παρουσιάζεται στην παρούσα περίπτωση να διαθέτει 3 θέσεις ενεργών γεωτρήσεων, οι 2 εκ των οποίων είναι ισοδύναμα μετωπιαίες ως προς τον y άξονα, ενώ η 3η βρίσκεται σε απόσταση στο εσωτερικό του υδροφορέα. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης προτείνει ένα ολικά βέλτιστο διαχειριστικό και ταυτόχρονα ασφαλές πλάνο άντλησης σε χρόνο $t^{(k_{opt})} = 0.5808 \text{ secs}$, με προτεινόμενο συνολικό όγκο άντλησης ίσο με $S(Q^{(k_{opt})}) = 3787.42 \text{ m}^3/\text{day}$. Αντίστοιχα, η βέλτιστη λύση υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού εντοπίζεται σε χρόνο $t^{(k_{opt}^{sc})} = 0.3024 \text{ secs}$ αποδίδοντας $S(Q^{(k_{opt}^{sc})}) = 3778.61 \text{ m}^3/\text{day}$ σε παρόμοιο πλάνο επιμέρους άντλησεων. Το υφάλμυρο μέτωπο υπό την ισχύ των ολικά βέλτιστων άντλησεων σταθεροποιείται σε θέση εκτός των περιοχών ασφαλείας των μετωπιαίων γεωτρήσεων, χωρίς έτσι να απειλεί την ακεραιότητά τους (Σχήμα 6.20). Ο δε συντελεστής αποδοτικότητας που αντιστοιχεί στην ολικά βέλτιστη λύση, αισθητά μειωμένος σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις των 2 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων, ισούται με $a_{eff}^{(k_{opt})} = 50.50\%$.

Περίπτωση IIb:

Οι θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων παραμένουν 3, ενώ η διάταξή τους στο εσωτερικό του υδροφορέα είναι τέτοια ώστε μονάχα μία εξ' αυτών να παραμένει μετωπιαία. Η ολικά βέλτιστη λύση κατασκευάζεται σε χρόνο $t^{(k_{opt})} = 1.5470 \text{ secs}$ και προτείνει συνολικό όγκο άντλησης ίσο με $S(Q^{(k_{opt})}) = 3767.78 \text{ m}^3/\text{day}$, άνισα κατανεμημένο στις 3 θέσεις γεωτρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η μετωπιαία γεώτρηση υποχρεώνεται σε δραματική μείωση των τιμών άντλησής της, εξαιτίας της επαναλαμβανόμενης διείσδυσης του υφάλμυρου μετώπου στην περιοχή ασφαλείας περιμετρικά αυτής. Αντίστοιχα, η επόμενη σε απόσταση από το υφάλμυρο μέτωπο γεώτρηση προτείνεται να αντλεί στο ήμισυ των ονομαστικών δυνατοτήτων της, ενώ στην τελευταία επιτρέπεται μια ιδιαίτερα αυξημένη τελική τιμή άντλησεων. Περίπου ανάλογο πλάνο άντλησεων προτείνεται και κατά

τη βέλτιστη υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού λύση, σε χρόνο ολοκλήρωσης ίσο με $t^{(k_{opt}^{sc})} = 0.5390 \text{ secs}$ και συνολικό όγκο $S(Q^{(k_{opt}^{sc})}) = 3741.67 \text{ m}^3/\text{day}$ γλυκού νερού. Το υφάλμυρο μέτωπο προφανώς σταθεροποιείται σε απόσταση ασφαλείας από τη μετωπιαία γεώτρηση (Σχήμα 6.25), ενώ ο συντελεστής αποδοτικότητας του ολικά βέλτιστου πλάνου αντλήσεων ισούται με $a_{eff}^{(k_{opt})} = 50.24\%$, ποσοστό δηλαδή ισοδύναμο με το αντίστοιχο της προηγούμενης διάταξης 3 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων.

Περίπτωση III:

Στην περίπτωση μελέτης των 5 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων την οποία συναντάμε και στη βιβλιογραφία, η τοποθέτηση πλέον των γεωτρήσεων αυτών στο εσωτερικό του υδροφορέα καταλαμβάνει προφανώς μεγαλύτερο χώρο. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αναλαμβάνει να προτείνει ένα βελτιστοποιημένο και ταυτόχρονα ασφαλές πλάνο αντλήσεων για τις γεωτρήσεις αυτές στον ελάχιστο χρόνο εκτέλεσης. Έτσι, η ολικά βέλτιστη λύση σε χρόνο $t^{(k_{opt})} = 7.8707 \text{ secs}$ προτείνει συνολικό όγκο άντλησης ίσο με $S(Q^{(k_{opt})}) = 3969.62 \text{ m}^3/\text{day}$. Το δε πλάνο των επιμέρους αντλήσεων διατηρεί ελαχιστοποιημένες τις αντλήσεις της μετωπιαίας γεώτρησης, ενώ προτείνει σημαντικές τιμές άντλησης για τις υπόλοιπες γεωτρήσεις. Το βέλτιστο υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού πλάνο αντλήσεων σε αισθητά μικρότερο χρόνο $t^{(k_{opt})} = 0.9891 \text{ secs}$, παράγει ένα παραπλήσιο αλλά συνολικά ισοδύναμο πλάνο αντλήσεων, με μικρές αυξομειώσεις στις επιμέρους αντλήσεις. Το υφάλμυρο μέτωπο σε κάθε περίπτωση παραμένει σταθεροποιημένο σε απόσταση ασφαλείας από την μετωπιαία γεώτρηση (Σχήμα 6.30). Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τη χρήση περισσότερων θέσεων ενεργών γεωτρήσεων σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις μελέτης, είναι αναμενόμενη η μειωμένη τιμή του συντελεστή αποδοτικότητας, ο οποίος ισούται με $a_{eff}^{(k_{opt})} = 31.76\%$.

Περίπτωση IV:

Με αφορμή την εργασία των Α. Μαντόγλου, Μ. Παπαντωνίου και Π. Γιαννουλόπουλου [38] εξετάσαμε την περίπτωση ύπαρξης 11 θέσεων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα. Το προτεινόμενο ως ολικά βέλτιστο πλάνο αντλήσεων σε χρόνο ίσο με $t^{(k_{opt})} = 1.6340 \text{ secs}$, περιγράφει έναν σχεδόν ομοιόμορφο καταμερισμό των επιμέρους αντλήσεων σε όλες τις γεωτρήσεις του υδροφορέα, με αναμενόμενη φυσικά

μειωμένη τιμή στη μετωπιαία γεώτρηση. Ο συνολικός προτεινόμενος όγκος άντλησης ισούται με $S(Q^{(k_{opt})}) = 3658.12 \text{ m}^3/\text{day}$ και διατηρεί το υφάλμυρο μέτωπο σε απόσταση ασφαλείας από τη μετωπιαία γεώτρηση (Σχήμα 6.32). Η δε βέλτιστη υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού λύση ταυτίζεται με την ολικά βέλτιστη. Τέλος, το αυξημένο πλήθος των 11 γεωτρήσεων καθιστά το συντελεστή αποδοτικότητας αισθητά μειωμένο, ίσο με $a_{eff}^{(k_{opt})} = 13.30\%$, εξαιτίας προφανώς του καταμερισμού του σχεδόν παγιωμένου συνολικού διαθέσιμου όγκου νερού προς άντληση σε περισσότερες γεωτρήσεις.

- Όσον αφορά το συντελεστή αποδοτικότητας που χρησιμοποιήσαμε σε κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις μελέτης, θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι δυνατότητες άντλησης από τον συγκεκριμένο υδροφορέα είναι σχετικά σαφείς. Όπως εύκολα παρατηρούμε σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, ο διαθέσιμος όγκος άντλησης υπό την ισχύ των υπαρχουσών υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα κυμαίνεται μεταξύ $3500 - 4000 \text{ m}^3/\text{day}$. Το πόσο αυτό δεν μπορεί να ξεπεραστεί εάν χρησιμοποιηθούν περισσότερες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων. Έτσι, το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια ο συντελεστής αποδοτικότητας που χρησιμοποιούμε να παρουσιάζει μια σταθερά μειούμενη τάση καθώς αυξάνουμε το πλήθος των χρησιμοποιούμενων γεωτρήσεων. Αντιθέτως, στην περίπτωση που εξετάζουμε σενάρια άντλησεων με ίδιο πλήθος ενεργών γεωτρήσεων, ο συντελεστής αυτός μπορεί να μας προσφέρει ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα.
- Όπως έγινε αντιληπτό από όλες τις περιπτώσεις μελέτης που εξετάσαμε, η προστασία της μετωπιαίας γεώτρησης είναι ικανή να εξασφαλίσει τη συνολική προστασία ολόκληρου του υδροφορέα. Ωστόσο, σε κάποιες από τις περιπτώσεις αυτές η παρεχόμενη ασφάλεια υπό την ισχύ των υπαρχουσών συνθηκών του προβλήματος δεν είναι παγιωμένη. Με μικρές αυξήσεις, παραδείγματος χάριν στην Περίπτωση III των 5 ενεργών γεωτρήσεων, στις τιμές της ολικά βέλτιστης λύσης είναι δυνατό να παραβιασθεί η κυκλική περιοχή ασφαλείας γύρω από τη μετωπιαία γεώτρηση και το υφάλμυρο μέτωπο να εκτελεί μη προβλέψιμα άλματα μεγάλου μήκους στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Για την αντιμετώπιση λοιπόν του φαινομένου αυτού εισάγουμε στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης ένα ακόμη περιορισμό, της θετικής τιμής του δυναμικού ροής σε κάθε θέση ενεργούς γεώτρησης. Υπό της ισχύ του ενδυναμωμένου πλέον συνόλου περιορισμών, ο αλγόριθμος οδηγείται σε σύνολα βέλτιστων λύσεων για όλες περιπτώσεις μελέτης, ελαφρώς διαφοροποιημένα σε σχέση με τα προηγούμενα. Χαρακτηρίζουμε δε το σύνολο αυτών των προσομοιώσεων ως Προφίλ προσομοίωσης II και παραθέτουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα και τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις σε κάθε μία από τις περιπτώσεις που εξετάσαμε.

- Με στόχο τον έλεγχο της ευστάθειας των παραγόμενων λύσεων σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας, υπολογίζουμε τις θέσεις των κρίσιμων σημείων $x_{s,j}$, $j \in \{1, \dots, M\}$ του δυναμικού ροής και τις συγκρίνουμε με τις θέσεις των κρίσιμων σημείων $x_{\tau,j}$, $j \in \{1, \dots, M\}$ της υφάλμυρης σφήνας. Υπενθυμίζουμε ότι η προστασία της μετωπιαίας γεώτρησης απεδείχθη ικανή για το συγκεκριμένο υδροφορέα, να εξασφαλίσει τη συνολική προστασία ολόκληρου του υδροφορέα σε όλα τα σενάρια αντλήσεων που εξετάσαμε παραπάνω. Έτσι, θεωρώντας ότι οι παραγόμενες λύσεις είναι ευσταθείς και οι αντίστοιχες προτεινόμενες τιμές άντλησης έγκυρες μονάχα όταν οι αποστάσεις $x_{s,1} - x_{\tau,1}$ παραμένουν θετικές, στην τελευταία ενότητα του Κεφαλαίου του υδροφορέα της Καλύμνου παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα της σχετικής ανάλυσης ευαισθησίας που διεξάγαμε. Σημειώνουμε ότι κατά τη διάρκεια της ανάλυσης αυτής ελέγχουμε τόσο τη συμπεριφορά της ολικά βέλτιστης λύσης όσο και των αποστάσεων που μόλις αναφέραμε, μεταβάλλοντας τις παραμέτρους της υδραυλικής αγωγιμότητας K και της επιφανειακής ανατροφοδότησης N στην περιοχή του υδροφορέα. Διαπιστώνουμε έτσι, ότι υπό την ισχύ του Προφίλ Μοντελοποίησης I οι παραγόμενες λύσεις σε ορισμένες περιπτώσεις δεν χαρακτηρίζονται από την απαιτούμενη ευστάθεια και κατά συνέπεια εγκυρότητα. Η αντιμετώπιση δε του σημαντικού αυτού προβλήματος προήλθε από τη χρήση του ενισχυμένου Προφίλ Μοντελοποίησης II, όπου ο περιορισμός του θετικού δυναμικού ροής στις θέσεις ενεργών γεωτρήσεων αναλαμβάνει την τροποποίηση των αντλήσεων που θέτουν σε κίνδυνο τη μετωπιαία γεώτρηση, με συνέπεια να καθιστούν το συνολικό διαχειριστικό πλάνο αντλήσεων ευσταθές και ασφαλές για τον υδροφορέα.

- Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της διαδικασίας βελτιστοποίησης του πλάνου αντλήσεων που επιλέγουμε να εφαρμόσουμε σε αυτόν τον παράκτιο υδροφόρα γλυκού νερού, είναι η ικανότητά του να προσαρμόζεται στη στρατηγική εκμετάλλευσης της υπερκείμενης περιοχής του υδροφόρα. Έχουμε δηλαδή τη δυνατότητα μέσω του συγκεκριμένου αλγορίθμου να κατασκευάσουμε βέλτιστα πλάνα αντλήσεων που να ικανοποιούν επακριβώς τις τοπικές ανάγκες των γειτονικών περιοχών σε νερό. Ορίζουμε λοιπόν εξειδικευμένα ανά γεώτρηση ανώτερα και κατώτερα επιτρεπτά όρια αντλήσεων, έτσι ώστε να διοχετεύουμε τον απαιτούμενο αντλούμενο όγκο νερού εκεί που είναι αναγκαίος, λαμβάνοντας υπόψη τοπικές παραμέτρους όπως το μέγεθος του πληθυσμού της περιοχής, τα είδη των καλλιεργειών και οι φυσικά οι ονομαστικές δυνατότητες των χρησιμοποιούμενων σωληνώσεων, γεννητριών και αντλιοστασίων. Ο προγραμματισμός του κώδικα ALOPEX, ώστε να λαμβάνει υπόψη του αυτές τις πληροφορίες είναι ιδιαίτερα απλός και σύντομος.
- Ο συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης κάθε μίας από τις παραπάνω τυπικές προσομοιώσεις πλήθους 500 επαναλήψεων, διαρκεί μόλις λίγα δευτερόλεπτα. Το γεγονός αυτό καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική τη συγκεκριμένη μεθοδολογία βελτιστοποίησης του διαχειριστικού πλάνου αντλήσεων, ενώ αποτελεί σημαντική πρόοδο στην κατεύθυνση μελέτης ανάλογων διαδικασιών, σε σχέση πάντοτε με τους πολύ μεγαλύτερους χρόνους εφαρμογής προηγούμενων μεθόδων της βιβλιογραφίας. Μάλιστα, οι απαιτούμενοι χρόνοι εκτέλεσης μειώνονται περαιτέρω, αν λάβουμε υπόψη μας ότι ως βέλτιστη λύση μπορούμε ισοδύναμα να χρησιμοποιήσουμε τη βέλτιστη υπό την ισχύ του κριτηρίου τερματισμού, η οποία παράγεται στις περισσότερες των περιπτώσεων σε λίγες μόλις επαναλήψεις.

Παρουσιάσαμε αναλυτικά τη σύνθεση μιας διαδικασίας στοχαστικής βελτιστοποίησης, η οποία όταν εφαρμόζεται στην περίπτωση του πλάνου αντλήσεων ενός υδροφόρα με κατάλληλες υδραυλικές ιδιότητες, είναι ικανή να κατασκευάσει διαχειριστικά σενάρια αντλήσεων που αξιοποιούν στο έπακρο τις διαθέσιμες ποσότητες γλυκού νερού του υδροφόρα. Ταυτόχρονα, τα ίδια σενάρια εξασφαλίζουν και τη βιωσιμότητα του υδροφόρα, υπό την έννοια ότι οι παραγόμενες αντλήσεις δεν προκαλούν το φαινόμενο της υφαλμύρισης σε καμιά από

τις υπάρχουσες γεωτρήσεις. Χαρακτηρίσαμε δε τη διαδικασία αυτή ως διαδικασία ασφαλούς μεγιστοποίησης των αντλήσεων γλυκού νερού.

Κεφάλαιο 7

Ο παράκτιος υδροφορέας γλυκού νερού στην περιοχή Χερσονήσος του Ηρακλείου Κρήτης

7.1 Εισαγωγή: Γενικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα

Ο Δήμος Χερσονήσου βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της νήσου Κρήτης στη νότια Ελλάδα, περίπου 25 km ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου (Σχήμα 7.1). Το βόρειο τμήμα του Δήμου είναι παραθαλάσσιο, γεγονός το οποίο σε συνδυασμό με το εξαιρετικό κλίμα της Κρήτης, καθιστά την περιοχή σημαντικό πόλο έλξης για τον τουρισμό που επισκέπτεται το νησί ολόκληρο το χρόνο, προφανώς με αναμενόμενη μεγέθυνση του φαινομένου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Κατά συνέπεια, κατά την καλοκαιρινή περίοδο οι πάγιες απαιτήσεις σε πόσιμο και σε αρδεύσιμο νερό αυξάνονται δραματικά, εξαιτίας του τουρισμού αλλά και των εντονότερων γεωργικών δραστηριοτήτων. Το αποτέλεσμα φυσικά είναι η μείωση του τοπικού υδροφόρου ορίζοντα με ταυτόχρονη ενίσχυση του φαινομένου της διείσδυσης υφάλμυρου νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα γλυκού νερού της περιοχής.

Στο υπέδαφος του Δήμου Χερσονήσου εντοπίζεται η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας. Πρόκειται για μια υδροφόρο λεκάνη με εμβαδόν που αντιστοιχεί σε μια περιοχή περίπου 18 km², εκτεινόμενη σε έκταση 3.8 km από δυτικά προς ανατολικά και σχεδόν 4.7 km στην κατεύθυνση Βορράς - Νότος (Σχήμα 7.2).



Σχήμα 7.1: Η νήσος Κρήτη στη νότια Ελλάδα και η περιοχή του Δήμου Χερσονήσου στο βόρειο τμήμα αυτής (Google map).

Εντός της περιοχής μελέτης συναντώνται πλήθος υδρολογικών σχηματισμών με έντονη διαφοροποίηση ως προς τα υδραυλικά τους χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα οι σχηματισμοί που υπάρχουν στην ευρύτερη περιοχή του Δήμου Χερσονήσου ανήκουν σε δύο κατηγορίες (Σ. Κατεράκης [64]):

- Υδροπερατοί σχηματισμοί, στους οποίους ανήκουν τα προνεογενή ανθρακικά πετρώματα, οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, οι γύψοι, τα κροκαλοπαγή και οι ψαμμίτες του νεογενούς.
- Υδατοστεγείς σχηματισμοί, στους οποίους ανήκουν οι ψυλλίτες, χαλαζίτες, μάργες και άργιλοι του νεογενούς.

Ο συνδυασμός των πετρωμάτων αυτών δημιουργεί τις απαραίτητες συνθήκες για τη δημιουργία ενός ευαίσθητου συστήματος παράκτιου υδροφορέα γλυκού νερού, του οποίου την αποτελεσματικότερη διαχείριση και προστασία μελετάμε στην παρούσα εργασία. Στην περιοχή του υδροφορέα τα υδροφόρα πετρώματα παρουσιάζουν υδραυλική αγωγιμότητα με τιμές που ποικίλουν από $K = 0.15 \text{ m/day}$ έως και $K = 430 \text{ m/day}$. Πιο αναλυτικά, συναντάμε ασβεστόλιθους και δομολίτες με $K = 12.96 \text{ m/day}$, βιοκλαστικούς λατυποπαγείς ασβεστόλιθους με $K = 5.2 \text{ m/day}$, μάργες και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους με $K = 0.15 \text{ m/day}$,

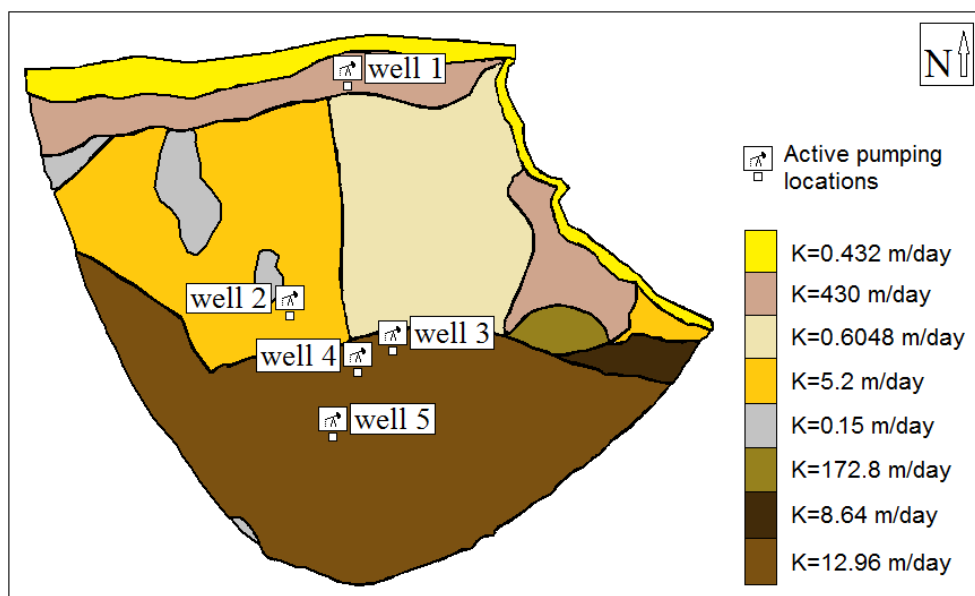


Σχήμα 7.2: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα γλυκού νερού (κόκκινη τεθλασμένη γραμμή) στο Δήμο Χερσονήσου Κρήτης (Google map).

αργιλικά πετρώματα με $K = 0.6048 \text{ m/day}$ και φυσικά άμμος εμπλουτισμένη με θαλάσσιες αποθέσεις και $K = 430 \text{ m/day}$. Στο Σχήμα 7.3 μπορούμε να παρατηρήσουμε το πλήθος και τη διάταξη αυτών των πετρωμάτων με τις τόσο έντονες διαφορές ως προς το χαρακτηριστικό της υδραυλικής αγωγιμότητας στο εσωτερικό τους.

Επίσης, να σημειώσουμε ότι εντός της περιοχής μελέτης συναντάμε πέντε επίσημες γεωτρήσεις (Σχήμα 7.3), οι οποίες είναι ενεργές ολόκληρο το χρόνο, αλλά λειτουργούν σε εντατικούς ρυθμούς κυρίως κατά την καλοκαιρινή περίοδο.

Οφείλουμε στο σημείο αυτό να επισημάνουμε ότι το βασικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου υδροφορέα είναι η έλλειψη ομοιογένειας των υδραυλικών χαρακτηριστικών στο εσωτερικό του. Το γεγονός αυτό έχει ως άμεση συνέπεια την αδυναμία χρήσης της αναλυτικής εξίσωσης της ροής (2.4) που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 2.3 και χρησιμοποιήσαμε εκτενώς στην περίπτωση του υδροφορέα της Καλύμνου. Έτσι, η θέση της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα δεν μπορεί να υπολογιστεί μέσω της επίλυσης μιας εξίσωσης,



Σχήμα 7.3: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Περιοχές διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας καθώς και οι θέσεις των 5 ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του.

αλλά απαιτείται η χρήση δαπανηρών επαναληπτικών μεθόδων. Εισάγουμε λοιπόν στο σημείο αυτό έναν υβριδικό κώδικα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων γνωστό από τη βιβλιογραφία ως *Princeton Transport Code (PTC)* (D. Babu et al. [5], ιστότοπος www.argusone.com/ptc [75] και Σ. Καρτεράκης [64]). Μέσω του αλγορίθμου αυτού για ένα δεδομένο σετ αντλήσεων και προκαθορισμένες οριακές συνθήκες ανατροφοδότησης του υδροφορέα, μπορούμε να υπολογίζουμε τη θέση της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του.

Επίσης, συνδυάζουμε τον αλγόριθμο PTC με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης ALOPEX V, τον οποίο παρουσιάσαμε αναλυτικά στο Κεφάλαιο 4.2. Μέσω επομένως του συνδυαστικού πλέον αλγορίθμου ALOPEX-PTC παράγουμε ένα πλήθος λύσεων, που αντιστοιχούν σε αντλήσεις ικανές να μεγιστοποιήσουν ασφαλώς το συνολικό πλάνο αντλήσεων του υδροφορέα αυτού. Φυσικά, με τον όρο *ασφαλής μεγιστοποίηση* δηλώνουμε την πρόθεσή μας να μεγιστοποιήσουμε τον αντλούμενο όγκο γλυκού νερού, εμποδίζοντας παράλληλα την προέλαση στο εσωτερικό του υδροφορέα του καταστρεπτικού φαινομένου της υφαλμύρισης, που περιγράψαμε σε προηγούμενα κεφάλαια.

Παρουσιάζουμε στη συνέχεια εν συντομία ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του

αλγορίθμου PTC.

7.2 Princeton Transport Code

Ο κώδικας Princeton Transport Code, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, είναι ένα υβριδικός αλγόριθμος πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων, ο οποίος αναλαμβάνει στην παρούσα εργασία τον υπολογισμό της θέσεως της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα, μέσω του αλγορίθμου αυτού διαχωρίζουμε την επιφάνεια του υδροφορέα σε ένα πλήθος τριγωνικών στοιχείων, όπου σε κάθε ένα από αυτά είναι εφικτός ο υπολογισμός του υδραυλικού ύψους του γλυκού νερού στο εσωτερικό του υδροφορέα. Με τον τρόπο αυτό, για ένα δεδομένο σετ αντλήσεων και προκαθορισμένες οριακές συνθήκες ανατροφοδότησης, μπορούμε να υπολογίζουμε τη θέση της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του.

7.2.1 Οι εξισώσεις του PTC

Ο κώδικας PTC χρησιμοποιεί το ακόλουθο σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων, ως προς την παράμετρο του υδραυλικού ύψους h , για να αναπαραστήσει τη ροή υπογείων υδάτων (D. Babu et al. [5]):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{j=1}^M Q_i \delta(x-x_j) \delta(y-y_j) \delta(z-z_j) = 0 \quad (7.1)$$

με συνιστώσες ταχύτητας της ροής:

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, \quad \text{και} \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}. \quad (7.2)$$

Στην περίπτωση που το πρόβλημα περιλαμβάνει και μεταφορά ρύπου συγκέντρωσης c , η εξίσωση μεταφοράς του είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left[D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \\ & + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \frac{\partial c}{\partial t} = 0. \end{aligned} \quad (7.3)$$

Πίνακας 7.1: Παράμετροι εξισώσεων κώδικα PTC.

Παράμετροι	Περιγραφή
h	Υδραυλικό ύψος.
K	Υδραυλική αγωγιμότητα.
c	Χημική συγκέντρωση στο σημείο (x, y, z) κατά τη χρονική στιγμή t .
$E(c)$	Συνάρτηση που αντιπροσωπεύει ιδιότητες χημικής απορρόφησης.
c^w	Συγκέντρωση του νερού στο σημείο άντλησης (x_j, y_j, z_j) , $j \in \{1, \dots, M\}$.
θ	Πορώδες του υδροφορέα.
D	Συντελεστής διάχυσης.
V	Μέτρο του διανύσματος ταχύτητας της ροής.
S	Συντελεστής ειδικής αποθήκευσης.
Q_j	Τιμή της άντλησης στην j -οστή θέση.
δ	Συνάρτηση δέλτα του Dirac.
M	Αριθμός των ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα.

Να σημειώσουμε ότι όλες οι παραπάνω εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και το νόμο του Darcy, ενώ οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 7.1. Επίσης, χρησιμοποιούμε στην τελευταία εξίσωση τον όρο Q ως συντομογραφία, με:

$$Q := \sum_{j=1}^M Q_j \delta(x - x_j) \delta(y - y_j) \delta(z - z_j), \quad (7.4)$$

όπου οι αρνητικές τιμές στους όρους Q_j , $j \in \{1, \dots, M\}$, εκφράζουν διαδικασία αντλήσεων, ενώ αντίστοιχα οι θετικές τιμές εκφράζουν διαδικασία ανατροφοδότησης. Η λύση δε των εξισώσεων αυτών ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία (D. Babu et al. [5]):

- Υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη h από την εξίσωση (7.1).
- Υπολογίζονται οι ταχύτητες του Darcy V_x , V_y , V_z από τις εξισώσεις (7.2).
- Επιλύεται η εξίσωση (7.3) για την εύρεση της συγκέντρωσης του ρύπου c .

Η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων σε πολύπλοκα φυσικά συστήματα τριών διαστάσεων απαιτεί συνήθως την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων, όπου το υπολογιστικό τους κόστος είναι ιδιαίτερα μεγάλο. Ο κώδικας PTC λοιπόν, χρησιμοποιεί ένα διαχωριστικό αλγόριθμο για να επιλύει ανάλογες εξισώσεις, μέσω του οποίου μειώνεται σημαντικά το υπολογιστικό

φορτίο. Ο αλγόριθμος αυτός έχει ως δομικό στοιχείο το διαχωρισμό της υπό μελέτη περιοχής σε περίπου παράλληλα οριζόντια στρώματα, όπου μέσα σε αυτά εφαρμόζεται μια διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων με σκοπό να επιτευχθεί η ακριβής απεικόνιση των ακανόνιστων περιοχών. Στη συνέχεια, τα στρώματα αυτά συνδέονται κάθετα μέσω μιας διακριτοποίησης πεπερασμένων διαφορών. Έτσι, κατά τη διάρκεια μιας επανάληψης σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα επιλύονται οι οριζόντιοι διαχωρισμοί πεπερασμένων στοιχείων, ενώ στο δεύτερο επιλύονται οι εξισώσεις που συνδέουν τα κάθετα στρώματα (D. Babu et al. [5]).

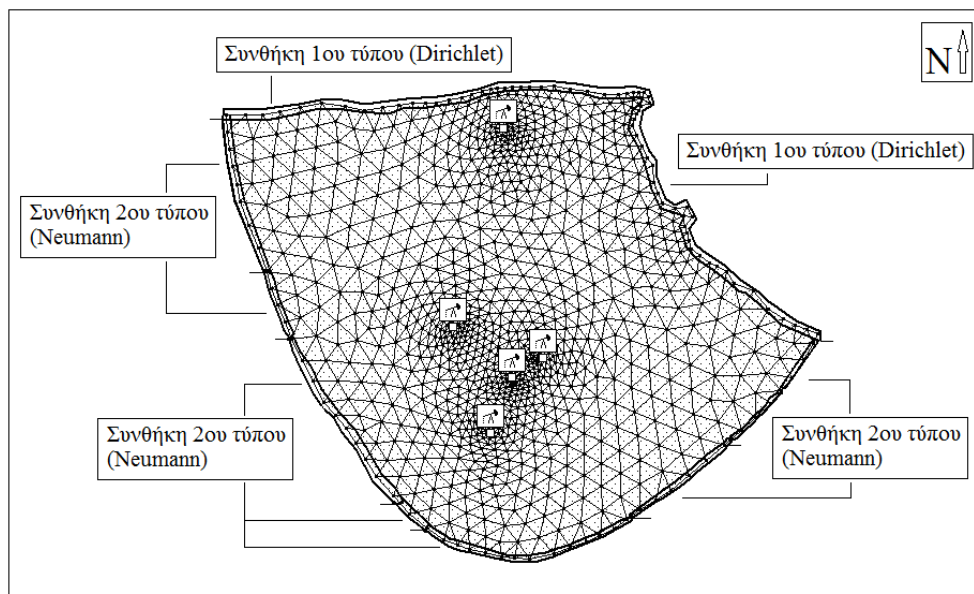
7.2.2 Συνοριακές συνθήκες ροής

Ο κώδικας PTC δέχεται τρεις κατηγορίες συνοριακών συνθηκών στην εξίσωση ροής (7.1), συνθήκες που μπορούν να μεταβληθούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Συνοριακές συνθήκες 1ου τύπου (συνθήκες Dirichlet) καθορισμένου υδραυλικού ύψους.
- Συνοριακές συνθήκες 2ου τύπου (συνθήκες Neumann) καθορισμένης ροής.
- Συνοριακές συνθήκες 3ου τύπου (συνθήκες μικτές) διαρροής.

Η προεπιλεγμένη συνοριακή συνθήκη για όλα τα σύνορα είναι μηδενικής ροής. Αυτό υποδηλώνει περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατα στρώματα κάτω και γύρω από αυτόν. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής μελέτης, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες. Αν θέλαμε δε να αναφέρουμε λίγες πληροφορίες για τις συνθήκες αυτές θα λέγαμε τα ακόλουθα (D. Babu et al. [5]):

- Συνθήκες Dirichlet:
Τα όρια καθορισμένου υδραυλικού ύψους ορίζονται δηλώνοντας τους κόμβους και τη σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους σε καθέναν από αυτούς. Ο κώδικας αυτομάτως ορίζει ως σταθερούς όρους τις γραμμές και στήλες του πίνακα των συντελεστών, που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους.



Σχήμα 7.4: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Συνοριακές συνθήκες 1ου και 2ου τύπου περιμετρικά του υδροφορέα, ο οποίος είναι διακριτοποιημένος από τον κώδικα PTC σε δύο κατακόρυφα στρώματα με 1050 κόμβους και 1984 τριγωνικά χωρία το καθένα.

- Συνθήκες Neumann:

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει ένα πολύ απλό μέσο καθορισμού των οριακών συνθηκών καθορισμένης ροής. Με την εφαρμογή του θεωρήματος του Green προκύπτει ένας συνοριακός όρος στις εξισώσεις του μοντέλου. Όταν η ροή θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους Δl η ολοκλήρωση των σχέσεων θα δίνει τις κομβικές κατανομές. Έτσι ο χρήστης αρκεί να ορίσει την ογκομετρική ροή σε ένα κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός συνόρου. Η ροή λόγω άντλησης εισάγεται μαθηματικά με τον καθορισμό της ογκομετρικής ροής σε έναν κόμβο. Για διευκόλυνση της εισαγωγής της ομοιόμορφης διήθησης το πρόγραμμα επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης, ενώ κάνει αυτόματα ολοκλήρωση σε όλη την περιοχή για να καθορίσει την ογκομετρική ροή.

- Συνθήκες 3ου τύπου:

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται με μια μετατροπή των εξισώσεων του συστήματος. Καθορίζεται έτσι ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής (υδραυλική αγωγιμότητα

προς την απόσταση). Ο όρος αυτός ολοκληρώνεται στην περιοχή και αναπαριστά την κάθετη διαρροή.

Για την εξειδικευμένη εφαρμογή του κώδικα PTC στο συγκεκριμένο πρόβλημα, δηλαδή στον υδροφορέα της Χερσονήσου που τώρα μελετάμε, παραπέμπουμε στη διπλωματική εργασία του Σ. Καρτεράκη [64].

Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζουμε τις κατηγορίες των συνοριακών συνθηκών που χρησιμοποιούνται στον υδροφορέα της Χερσονήσου. Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση των Ghyben-Herzberg:

$$h_f - d = \delta \xi, \quad (7.5)$$

με τιμές $d = 100 \text{ m}$ (το βάθος της θάλασσας στα βόρεια και βορειανατολικά του υδροφορέα), $\delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = 0.025$ (ο λόγος πυκνοτήτων γλυκού και αλμυρού νερού) και $\xi = 100 \text{ m}$ (η απόσταση της διεπιφάνειας κάτω από τη στάθμη της θάλασσας) για τον συγκεκριμένο υδροφορέα, μπορεί εύκολα να υπολογιστεί ότι το υδραυλικό ύψος του φρέσκου νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας ισούται με $h_f - d = 2.5 \text{ m}$. Κατά συνέπεια το υδραυλικό ύψος της υφάλμυρης διεπιφάνειας ισούται με $h_f = d + 2.5 = 102.5 \text{ m}$, που στην ουσία είναι η ένδειξη του μετώπου της υφαλμύρισης. Για το λόγο αυτό οι γραφικές παραστάσεις στη συνέχεια έχουν σχεδιαστεί με ανάλογη κλίμακα, ώστε σε κάθε προσομοίωση να είναι εμφανής η θέση του υφάλμυρου μετώπου (που εμφανίζεται με τη γαλάζια γραμμή των 102.5 m).

7.3 Η επιλογή του υδροφορέα της Χερσονήσου

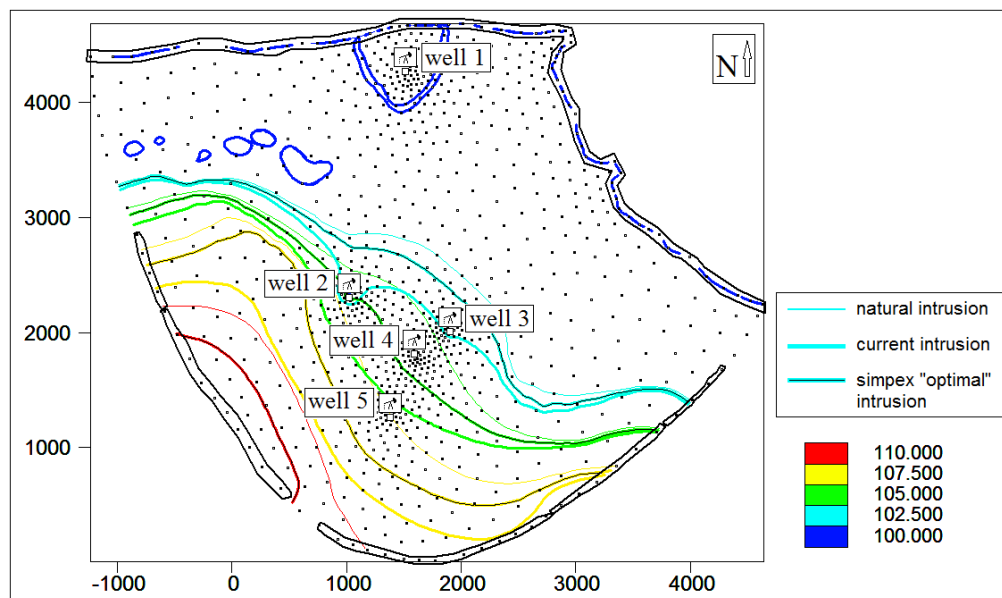
Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενες ενότητες, τελικός στόχος της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή της διαδικασίας ασφαλούς μεγιστοποίησης του πλάνου αντλήσεων σε έναν πραγματικό παράκτιο υδροφορέα γλυκού νερού. Έτσι, στα κεφάλαια που προηγήθηκαν της μελέτης του υδροφορέα της Καλύμνου, καθορίσαμε τα ακριβή πλαίσια εφαρμογής της διαδικασίας βελτιστοποίησης, με πρωταγωνιστή πάντοτε το στοχαστικό αλγόριθμο ALOPEX, ενώ στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάσαμε και αποδείξαμε την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης στον, τρόπο τινά, δοκιμαστικό υδροφορέα γλυκού νερού της νήσου Καλύμνου. Το επόμενο βήμα λοιπόν είναι η εφαρμογή της δοκιμασμένης και πλέον

προρρυθμισμένης διαδικασίας μεγιστοποίησης αντλήσεων που εμείς κατασκευάσαμε, σε έναν πραγματικό παράκτιο υδροφόρα.

Πίνακας 7.2: Παράκτιος υδροφόρας Χερσονήσου. Αποτελέσματα αντλήσεων χρησιμοποιώντας τις τρέχουσες χρησιμοποιούμενες τιμές αλλά και τις βέλτιστες προτεινόμενες τιμές των μεθόδων SIMPLEX και DE αντίστοιχα.

Παράμετροι ελέγχου	Τρέχουσες τιμές	Βέλτιστες τιμές μεθόδου SIMPLEX	Βέλτιστες τιμές μεθόδου DE
$Q_1^{(k)}$ (m^3/day)	1800.00	1800.00	1800.00
$Q_2^{(k)}$ (m^3/day)	2520.00	631.50	659.60
$Q_3^{(k)}$ (m^3/day)	576.00	576.00	575.70
$Q_4^{(k)}$ (m^3/day)	2520.00	1935.40	1786.10
$Q_5^{(k)}$ (m^3/day)	146.00	0.00	114.30
$S(Q^{(k)})$ (m^3/day)	7562.00	4942.90	4935.70

Ως αφορμή της επιλογής του παράκτιου υδροφόρα γλυκού νερού του Δήμου Χερσονήσου υπήρξε η Διπλωματική εργασία Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης του Σ. Καρτεράκη [64] στο Πολυτεχνείο Κρήτης και φυσικά οι δημοσιεύσεις που την ακολούθησαν, όπου γίνεται σαφής η επιτακτική ανάγκη αντιμετώπισης του φαινομένου υφαλμύρισης που αντιμετωπίζει ο συγκεκριμένος υδροφόρας. Πιο συγκεκριμένα, στην εργασία αυτή παρουσιάζεται το τρέχον διαχειριστικό πλάνο αντλήσεων του υδροφόρα, το οποίο εκ των πραγμάτων είναι ιδιαίτερα επιβλαβές για αυτόν, αφού διογκώνει το ήδη υπάρχον φαινόμενο υφαλμύρισης εντός του. Σύμφωνα με το πλάνο αυτό, ο υδροφόρας προσφέρει στην τοπική κοινότητα συνολικό όγκο νερού περίπου ίσο με $7500 m^3/day$, με το αντίστοιχο μέτωπο υφαλμύρισης όμως να έχει ήδη καταστήσει μη ωφέλιμες τις γεωτρήσεις Νο 1, 2 και 3 (Σχήμα 7.5). Έτσι, το νερό που αντλείται από τις γεωτρήσεις αυτές δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, με συνέπεια το συνολικό ωφέλιμο για την κοινότητα αντλούμενο νερό να προέρχεται από τις γεωτρήσεις Νο 4 και 5, με συνολικό όγκο ίσο με $2520.00 + 146.00 = 2666.00 m^3/day$ (Πίνακας 7.2). Ο Σ. Καρτεράκης λοιπόν με στόχο την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού αναπτύσσει και παρουσιάζει διαδικασίες διαχείρισης των πραγματοποιούμενων αντλήσεων, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζουμε συνοπτικά στη συνέχεια. Να σημειώσουμε ότι το βασικό σημείο της μεθοδολογίας του Σ. Καρτεράκη είναι ο καθορισμός ενός πλήθους κόμβων ασφαλείας



Σχήμα 7.5: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του υδροφορέα, λαμβάνοντας υπόψη τη φυσική υφαλμύριση αλλά και χρησιμοποιώντας τόσο τις τρέχουσες όσο και τις SIMPLEX βέλτιστες αντλήσεις από τη βιβλιογραφία. Η θέση του υφάλμυρου μετώπου υπό την ισχύ των DE βέλτιστων αντλήσεων σχεδόν ταυτίζεται με το αντίστοιχο γράφημα των λύσεων της SIMPLEX, γι'αυτό και παραλείπεται.

μακριά από τις γεωτρήσεις, με στόχο την επίτευξη των μέγιστων δυνατών αντλήσεων που φέρουν το υφάλμυρο μέτωπο να αγγίζει επακριβώς τους κόμβους αυτούς.

Στον Πίνακα 7.2 παραθέτουμε τα επίσημα στοιχεία των πραγματοποιούμενων αντλήσεων αυτήν την περίοδο, αλλά και των βέλτιστων λύσεων που αντίστοιχα προτείνονται από τον Σ. Καρτεράκη, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους SIMPLEX και DE (μέθοδος εξελικτικών αλγορίθμων), ως προς τις 5 γεωτρήσεις του υδροφορέα. Προτείνονται έτσι δύο σεντ παραπλήσιων λύσεων, όπου η βασική τους διαφορά βρίσκεται στις αντλήσεις της 4ης και 5ης γεώτρησης, ενώ ο συνολικός όγκος του αντλούμενου γλυκού νερού υπόκειται σε μια μείωση της τάξεως των $2600 \text{ m}^3/\text{day}$ σε σχέση με τις τρέχουσες τιμές αντλήσεων, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η προστασία των γεωτρήσεων Νο 2, 3, 4 και 5 του υδροφορέα. Είναι προφανές ότι η γεώτρηση Νο 1 είναι πλέον ακατάλληλη προς ωφέλιμη χρήση, αφού το αντλούμενο νερό είναι υφάλμυρο. Τέλος, οι γραφικές παραστάσεις των θέσεων του υφάλμυρου μετώπου υπό την

ισχύ των αντλήσεων που περιγράψαμε παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.5.

Ο παράκτιος υδροφορέας γλυκού νερού στο Δήμο Χερσονήσου αποτελεί μια ιδανική περίπτωση υδροφορέα εν κινδύνω, όπου η εφαρμογή της διαδικασίας διαχείρισης αντλήσεων που εμείς προτείνουμε μπορεί να προστατεύσει και να αξιοποιήσει ταυτόχρονα σε υψηλό βαθμό τις δυνατότητες τροφοδοσίας των γειτονικών περιοχών σε γλυκό νερό.

7.4 Σενάρια αντλήσεων και ανατροφοδότησης του παράκτιου υδροφορέα

Με στόχο τη μελέτη της απόδοσης των τοπικών γεωτρήσεων στην προσπάθεια τους να τροφοδοτήσουν την υπερκείμενη περιοχή με γλυκό νερό, αλλά και ταυτόχρονα τη μελέτη της επίδρασής τους στο φαινόμενο της υφαλμύρισης του υδροφορέα, εξετάζουμε ένα πλήθος ρεαλιστικών συνδυαστικών σεναρίων αντλήσεων και παράλληλα ανατροφοδότησης του υδροφορέα. Τα σενάρια αυτά επιλέγονται έτσι ώστε να εξετάζουμε ταυτόχρονα δύο σημαντικές παραμέτρους της διαδικασίας εκμετάλλευσης του υδροφορέα. Η πρώτη παράμετρος αναφέρεται στο πλήθος και στις θέσεις των χρησιμοποιούμενων ενεργών γεωτρήσεων, ενώ η δεύτερη αφορά τον όγκο γλυκού νερού που ανατροφοδοτεί τον υδροφορέα ανάλογα με την εποχή του έτους.

Ως προς την παράμετρο του πλήθους και των θέσεων των χρησιμοποιούμενων γεωτρήσεων σημειώνουμε τα ακόλουθα. Στο εσωτερικό του υδροφορέα υπάρχουν 5 επίσημες γεωτρήσεις, υπεύθυνες για την τροφοδοσία σε γλυκό νερό της υπερκείμενης περιοχής. Ωστόσο, η πρώτη εξ αυτών (γεώτρηση Νο 1) βρίσκεται πολύ κοντά στη θαλάσσια ακτογραμμή, με πολύ αρνητικές συνέπειες για την ακεραιότητά της ως προς το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Με στόχο λοιπόν τη μελέτη της συμπεριφοράς του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό του υδροφορέα ανάλογα με το πλήθος και τη θέση των ενεργών γεωτρήσεων, εξετάζουμε διαδοχικά τα τρία παρακάτω σενάρια αντλήσεων.

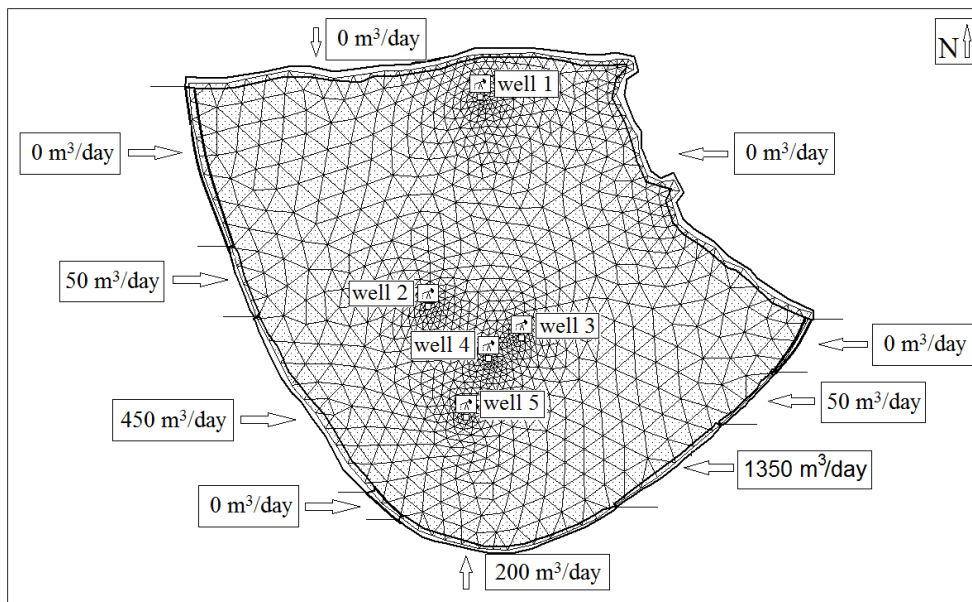
- Στο πρώτο σενάριο παραμένουν ενεργές και οι πέντε επίσημες γεωτρήσεις της περιοχής. Επιτρέπουμε δηλαδή και στην, τρόπον τινά, προβληματική γεώτρηση Νο 1 να λειτουργεί ακόμη και στο μέγιστο των δυνατοτήτων της, αντλώντας εν ανάγκη και

υφάλμυρο νερό. Χαρακτηρίζουμε δε το σενάριο αυτό ως **Σενάριο_V** από το πλήθος των χρησιμοποιούμενων γεωτρήσεων.

- Στο δεύτερο σενάριο διακόπτουμε τη λειτουργία της προβληματικής γεώτρησης (γεώτρηση No 1) και επιτρέπουμε το σύνολο των αντλήσεων να πραγματοποιείται από τις υπόλοιπες 4. Με τη διαδικασία αυτή προκύπτουν ιδιαίτερα σημαντικά συμπεράσματα για τη χρησιμότητα της προβληματικής γεώτρησης καθώς και τη συνεισφορά αυτής στο γενικότερο πλάνο αντλήσεων. Κατά αναλογία με πριν, χαρακτηρίζουμε το σενάριο αυτό ως **Σενάριο_IV**.
- Στο τρίτο και τελευταίο σενάριο ως προς το πλήθος και τις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων εξετάζουμε την προσθήκη, ενδεικτικά μονάχα, μιας ακόμη ενεργούς γεώτρησης σε διαφορετικές θέσεις στο εσωτερικό του υδροφορέα. Μέσω αυτής της διαδικασίας διαπιστώνεται η δυνατότητα του συγκεκριμένου υδροφορέα να φιλοξενήσει περισσότερες από τις υπάρχουσες γεωτρήσεις, με την προϋπόθεση όμως να υπάρξει κατάλληλη μέριμνα για τη σωστή επιλογή των θέσεων κατασκευής τους. Η περίπτωση αυτή, κατά αναλογία με τις προηγούμενες, χαρακτηρίζεται ως **Σενάριο_VI**.

Ως προς την παράμετρο του όγκου γλυκού νερού που ανατροφοδοτεί τον υδροφορέα ανάλογα με την εποχή του έτους, διακρίνουμε δύο σενάρια, θεωρώντας ότι το έτος μπορεί να θεωρηθεί ως το άθροισμα δύο εξαμήνων με χαρακτηριστικά καλοκαιριού το ένα και χαρακτηριστικά χειμώνα το άλλο.

- Στο πρώτο εξ αυτών επιλέγουμε την εφαρμογή ενός *καλοκαιρινού* σεναρίου ανατροφοδότησης. Πιο συγκεκριμένα, δεχόμαστε ότι η ανατροφοδότηση του υδροφορέα μέσω βροχόπτωσης είναι μηδενική, δηλαδή $N = 0 \text{ mm/day}$, με συνέπεια η μόνη ανατροφοδότησή του σε γλυκό νερό να επιτυγχάνεται από πλαινές υπεδάφειες εισροές νερού, σύμφωνα με το Σχήμα 7.6. Χαρακτηρίζουμε δε το σενάριο αυτό ως **Σενάριο_Summer**.
- Στη συνέχεια δεχόμαστε την εφαρμογή ενός *χειμερινού* σεναρίου ανατροφοδότησης, όπου ο συντελεστής βροχόπτωσης στα ανώτερα στρώματα του υδροφορέα ισούται με $N_{upper} = 500 \text{ mm/year}$, με αντίστοιχο συντελεστή διήθησης στα κατώτερα στρώματα

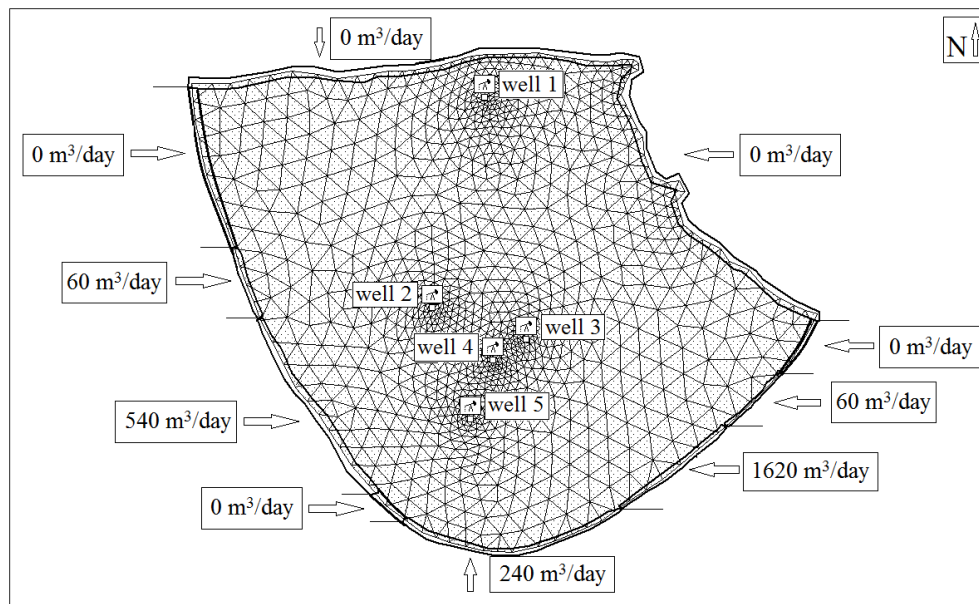


Σχήμα 7.6: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Πλαϊνές υπεδάφειες εισροές γλυκού νερού (σε m^3/day) στο καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης του υδροφορέα.

του ίσο με 30%, που αντιστοιχεί σε $N = 150 \text{ mm/year}$. Επίσης, κατά το σενάριο αυτό οι πλαϊνές ανατροφοδοτήσεις του υδροφορέα προσαυξάνονται σε σχέση με την καλοκαιρινή περίοδο κατά 20% και παριστάνονται αναλυτικά στο Σχήμα 7.7. Το σενάριο αυτό χαρακτηρίζεται ως **Σενάριο_Winter**.

Οι περιπτώσεις μελέτης που παρουσιάζουμε στη συνέχεια αποτελούν συνδυασμούς των σεναρίων που μόλις αναφέραμε, ώστε ταυτόχρονα να εξετάζουμε ένα σενάριο άντλησης με ένα αντίστοιχο σενάριο ανατροφοδότησης. Παραδείγματος χάριν η περίπτωση *Summer_IV* περιγράφει τη συμπεριφορά του γλυκού και του υφάλμυρου νερού στον υδροφορέα όταν χρησιμοποιούνται 4 ενεργές γεωτρήσεις σε καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης. Αντίστοιχα, η περίπτωση *Winter_V* αντιπροσωπεύει το συνδυασμό του σεναρίου άντλησης 5 γεωτρήσεων με χειμερινό σενάριο ανατροφοδότησης του υδροφορέα και ούτω καθεξής.

Κάθε μία από τις περιπτώσεις μελέτης που παρουσιάζουμε στη συνέχεια πλαισιώνεται από τα ακόλουθα:



Σχήμα 7.7: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Πλαϊνές υπεδάφειες εισροές γλυκού νερού (σε m^3/day) στο χειμερινό σενάριο ανατροφοδότησης του υδροφορέα, προσαυξημένες κατά 20% σε σχέση με το αντίστοιχο καλοκαιρινό σενάριο.

- Γραφικές παραστάσεις της θέσεως του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό του υδροφορέα, υπό συγκεκριμένες συνθήκες άντλησης και ανατροφοδότησης.
- Γραφικές παραστάσεις ελέγχου της χρησιμοποιούμενης διαδικασίας βελτιστοποίησης (συμπεριφορά αντικειμενικής συνάρτησης, γεωτρήσεων κ.α.).
- Αναλυτικούς πίνακες αποτελεσμάτων (τιμές αντλήσεων, αριθμός επαναλήψεων, υπολογιστικός χρόνος κ.α.) της διαδικασίας βελτιστοποίησης που εφαρμόζουμε.

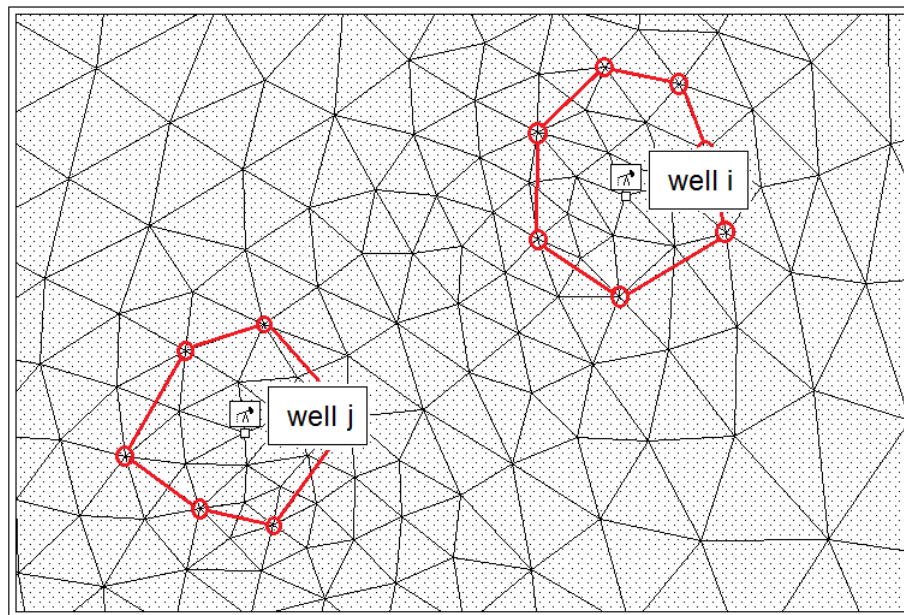
Για τον έλεγχο κάθε μίας από τις περιπτώσεις αντλήσεων που παρουσιάζουμε στο συγκεκριμένο Κεφάλαιο πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με πλήθος επαναλήψεων από 100 έως και 10000. Επιλέγουμε να παρουσιάσουμε κάποιες μονάχα από αυτές ως αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις, πλήθους 500 επαναλήψεων. Τις χαρακτηρίζουμε δε ως *τυπικές προσομοιώσεις*, ακολουθώντας το πρότυπο που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο Κεφάλαιο του υδροφορέα της Καλύμνου, αφού περιέχουν όλες τις πληροφορίες που χρειαζόμαστε για την αξιολόγηση κάθε περίπτωσης, ενώ ταυτόχρονα το υπολογιστικό τους κόστος δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο.

7.5 Στρατηγική προστασίας του υδροφορέα

Σημειώνουμε στο σημείο αυτό μια σημαντική διαφορά στη στρατηγική προστασίας που χρησιμοποιούμε ως προς τις γεωτρήσεις του υδροφορέα σε σχέση με προηγούμενες εργασίες. Επιλέγουμε ένα πλήθος κόμβων στο διακριτοποιημένο πλέγμα που κατασκευάζει ο κώδικας PTC περιμετρικά κάθε θέσεως ενεργούς γεώτρησης (Σχήμα 7.8), με τέτοιον τρόπο ώστε να δημιουργείται ένας πολυγωνικός δίσκος ασφαλείας γύρω από αυτήν. Χαρακτηρίζουμε τους κόμβους αυτούς ως *κόμβους ασφαλείας* και ο ρόλος τους είναι το να μην επιτρέπουν την είσοδο της υφάλμυρης σφήνας εντός του νοητού δίσκου που αυτοί δημιουργούν. Γνωρίζουμε από τη μελέτη του φαινομένου στον συγκεκριμένο υδροφορέα, ότι το υφάλμυρο μέτωπο κινείται με κατεύθυνση Βορράς προς Νότο. Αυτό όμως δεν μας εμποδίζει στο να επιλέγουμε κόμβους ασφαλείας και στα νότια κάθε γεώτρησης, με στόχο την προστασία της από πιθανά φαινόμενα δακτυλισμού, που ίσως εμφανίσει το υφάλμυρο μέτωπο κινούμενο εντός πετρωμάτων με τόσο έντονες διαφορές στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας. Έτσι, μπορούμε να είμαστε σίγουροι για την περιμετρική προστασία της κάθε γεώτρησης, ακόμη και αν οι συνθήκες μεταβάλλονταν τόσο ώστε η κίνηση του υφάλμυρου μετώπου να ήταν απρόβλεπτη και προς πολλές ταυτόχρονα κατευθύνσεις.

Ως προς την απόσταση των κόμβων ασφαλείας από την ίδια τη γεώτρηση, επιλέξαμε την τοποθέτησή τους σε τέτοιες θέσεις ώστε να παρέχουν μια απόσταση ασφαλείας περίπου ίση με $d_s = 180 \text{ m}$. Υπό τη συνθήκη αυτή εξασφαλίζουμε την προστασία κάθε γεώτρησης ακόμη και αν χρησιμοποιηθούν αντλήσεις μεγαλύτερες από τις προτεινόμενες από τον αλγόριθμό μας σε ποσοστό έως 10%. Στην ουσία δηλαδή, η απόσταση των $d_s = 180 \text{ m}$ αντιστοιχεί περίπου σε μια τεχνητή και ομοιόμορφη αύξηση κατά 10% των προτεινόμενων αντλήσεων, σύμφωνα πάντοτε με τις αριθμητικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήσαμε στο συγκεκριμένο υδροφορέα.

Υπενθυμίζουμε το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο υδροφορέα ο υπολογισμός της θέσεως του υφάλμυρου μετώπου πραγματοποιείται μέσω χρήσεως του υβριδικού κώδικα πεπερασμένων διαφορών και στοιχείων PTC και όχι μιας αναλυτικής σχέσεως του δυναμικού ροής $\phi = \phi(x, y)$, όπως δηλαδή συνέβαινε προηγουμένως στον υδροφορέα της Καλύμνου. Μία



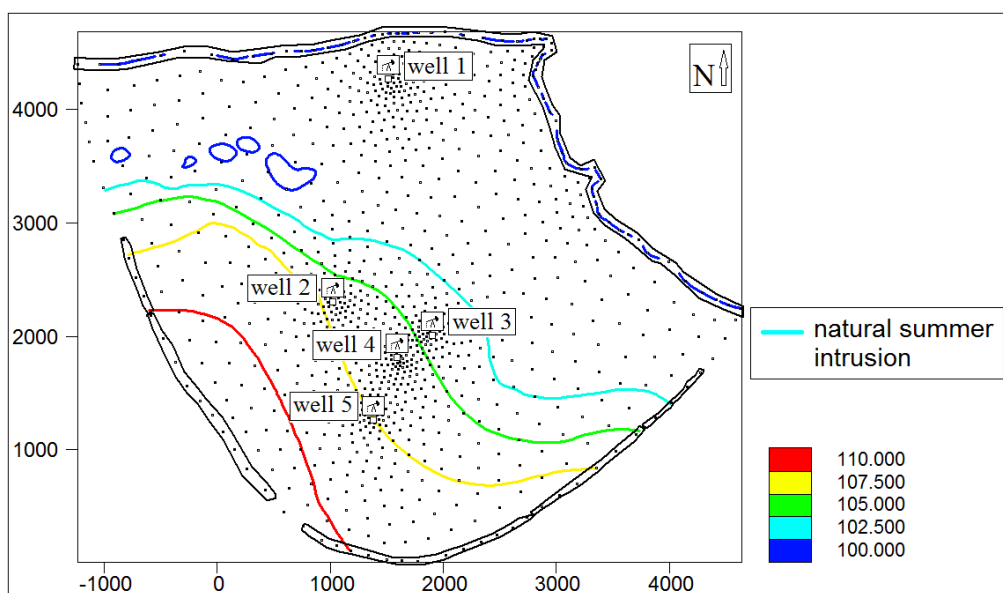
Σχήμα 7.8: Κόμβοι ασφαλείας περιμετρικά κάθε θέσεως ενεργούς γεώτρησης στο εσωτερικό του υδροφορέα της Χερσονήσου.

λοιπόν ακόμη συνέπεια αυτού είναι και η έλλειψη της δυνατότητας υπολογισμού των λεγόμενων κρίσιμων σημείων περιμετρικά των γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα. Στον υδροφορέα της Καλύμνου προσπαθήσαμε να προστατεύουμε τα σημεία αυτά από την πρόελαση του υφάλμυρου μετώπου, ορίζοντας κατάλληλα σημεία προστασίας περιμετρικά των γεωτρήσεων, έτσι ώστε να εξασφαλίσουμε ταυτόχρονα την ομαλή σύγκλιση της διαδικασίας βελτιστοποίησης σε πλάνα βέλτιστων λύσεων. Στην παρούσα περίπτωση λοιπόν, η απόσταση ασφαλείας των $d_s = 180 \text{ m}$ επιλέχθηκε έπειτα από μεγάλο πλήθος αριθμητικών δοκιμών, έτσι ώστε αφενός να αντιστοιχεί σε μια τεχνητή ομοιόμορφη αύξηση των βέλτιστων αντλήσεων κατά 10% και αφετέρου να περιέχει εντός της τα επίμαχα κρίσιμα σημεία. Το τελευταίο εξασφαλίζεται δε από τη συμπεριφορά των γραφήματος της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε μια από τις περιπτώσεις μελέτης, όπου είναι προφανής η ομαλή σύγκλιση της διαδικασίας σε ισοδύναμες περιοχές βέλτιστων λύσεων.

7.6 Περίπτωση I: Υδροφορέας 5 ενεργών γεωτρήσεων

7.6.1 Summer_V: Καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης

Εξετάζουμε τις δυνατότητες άντλησης γλυκού νερού από το συγκεκριμένο υδροφορέα, λαμβάνοντας υπόψη την ύπαρξη 5 επίσημων ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του. Θυμίζουμε ότι η αρίθμηση των γεωτρήσεων αυτών γίνεται κατά μήκος του άξονα των y , από πάνω προς τα κάτω, θεωρώντας ότι η γεώτρηση $No\ j$ αντιστοιχεί στο $well\ j$, με $j \in \{1, \dots, 5\}$.



Σχήμα 7.9: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου. Ισοϋφείς καμπύλες απεικόνισης του φαινομένου της φυσικής υφαλμύρισης υπό την ισχύ του καλοκαιρινού σεναρίου ανατροφοδότησης του υδροφορέα.

Άμεσα διαπιστώνουμε ότι η γεώτρηση $No\ 1$ είναι προβληματική, υπό την έννοια ότι είναι τοποθετημένη σε λάθος τοποθεσία. Βρίσκεται πολύ κοντά στη θάλασσα ακτογραμμή, με συνέπεια να υποψιαζόμαστε ότι έχει υποστεί υφαλμύριση, ακόμη και όταν δεν πραγματοποιούνται αντλήσεις από αυτήν. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται μέσω του αλγορίθμου PTC, όπου με χρήση μηδενικών τιμών άντλησης για όλες τις γεωτρήσεις (δηλαδή όλες οι

γεωτρήσεις καθίστανται ανενεργές) το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας που κινείται από τη θάλασσα προς το εσωτερικό του υδροφορέα βρίσκεται ήδη εντός του (Σχήμα 7.9) σε μια απόσταση περίπου 2 km.

Χαρακτηρίζουμε το φαινόμενο αυτό ως *φυσική υφαλμύριση* του υδροφορέα τόσο στο καλοκαιρινό όσο και στο χειμερινό σενάριο ανατροφοδότησής του, κατ' αναλογία με το φαινόμενο της φυσικής υφαλμύρισης που είχαμε περιγράψει σε προηγούμενο κεφάλαιο για τον υδροφορέα της Καλύμνου. Όπως τότε, έτσι και στην περίπτωση αυτού του υδροφορέα πρόκειται για φαινόμενο το οποίο οφείλουμε να λάβουμε σοβαρά υπόψη μας σε κάθε προσπάθεια μελέτης του, διότι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας στην περίπτωση αυτή βρίσκεται στην αρχική του θέση, δηλαδή δεν επιδέχεται περαιτέρω βελτίωσης. Όλες οι επόμενες θέσεις της υφάλμυρης σφήνας θα βρίσκονται σίγουρα σε μεγαλύτερο βάθος στο εσωτερικό του υδροφορέα, αφού η ενεργοποίηση των γεωτρήσεών του θα μειώσει τη διαθέσιμη ποσότητα γλυκού νερού του υδροφορέα με ταυτόχρονη αντικατάστασή του από ποσότητα υφάλμυρου νερού στο εσωτερικό του.

Η γεώτρηση Νο 1 έχει υποστεί το φαινόμενο της υφαλμύρισης, χωρίς να είναι δυνατή η διάσωσή της. Έτσι, η διατήρηση της γεώτρησης αυτής ως ενεργή δεν μπορεί να έχει ως στόχο τη συμμετοχή της στο βέλτιστο πλάνο άντλησεων που προσπαθούμε να κατασκευάσουμε, αφού στην ουσία προσφέρει μονάχα υφάλμυρο νερό. Μπορεί ωστόσο να μας οδηγήσει σε συμπεράσματα σχετικά με το πόσο συμμετέχει στον έλεγχο της προέλασης του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό του υδροφορέα. Εξετάζουμε δηλαδή την περίπτωση όπου η γεώτρηση αυτή εξάγοντας υφάλμυρο νερό προσφέρει μια μορφή αποσυμφόρησης - αποσυμπίεσης του υδροφορέα, με συνέπεια να αναστέλλει κατά κάποιο ποσοστό την προέλαση της υφάλμυρης σφήνας στο εσωτερικό του.

Όσον αφορά τον κώδικα βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούμε, είναι σαφές ότι πρέπει να προσέξουμε ιδιαίτερα τη μοντελοποίηση του ως προς τη γεώτρηση Νο 1. Πιο συγκεκριμένα, επιτρέπουμε στη συγκεκριμένη γεώτρηση να λειτουργεί με οποιαδήποτε προτεινόμενη από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης άντληση, εντός φυσικά των ορίων της ελάχιστης και της μέγιστης ονομαστικής δυνατότητας της συγκεκριμένης γεώτρησης, έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η συνολική άντληση από τον υδροφορέα. Δεν εφαρμόζουμε δηλαδή κυρώσεις

ελέγχου σε αυτήν τη γεώτρηση.

Πίνακας 7.3: Μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές δυνατότητες άντλησης στις 5 περιοχές ενεργών γεωτρήσεων.

Γεώτρηση j	1	2	3	4	5
\overline{Q}_j (m^3/day)	1800.00	2520.00	576.00	2520.00	146.00
\underline{Q}_j (m^3/day)	540.00	756.00	172.80	756.00	43.80

Πίνακας 7.4: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC.

Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	404	86	79
$P(\mathbf{Q}^{(k)})$	0.9643	0.9756	0.9666	0.9715
$Q_1^{(k)}$ (m^3/day)	1710.00	1787.02	1710.00	1735.11
$Q_2^{(k)}$ (m^3/day)	1370.13	1368.67	1441.58	1340.61
$Q_3^{(k)}$ (m^3/day)	569.65	560.20	554.33	561.66
$Q_4^{(k)}$ (m^3/day)	2332.06	2519.43	2349.46	2515.91
$Q_5^{(k)}$ (m^3/day)	138.70	138.09	113.61	123.45
$S(\mathbf{Q}^{(k)})$ (m^3/day)	6120.55	6373.40	6168.99	6276.74
$t^{(k)}$ (secs)	468.4561	378.5076	80.5734	74.0151

Στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζουμε αναλυτικά τις μέγιστες ονομαστικές δυνατότητες άντλησεων \overline{Q}_j , $j \in \{1, \dots, 5\}$, των συγκεκριμένων γεωτρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη το πρόβλημα που μελέτησε ο Σ. Καρτεράκης και παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 7.3, ορίζουμε να ταυτίζονται οι μέγιστες αυτές τιμές με τις τιμές των τρεχουσών άντλησεων που εφαρμόζονται στον υδροφορέα. Ως προς δε τις ελάχιστες επιτρεπτές τιμές \underline{Q}_j , $j \in \{1, \dots, 5\}$, χρησιμοποιούμε τον κανόνα:

$$\underline{Q}_j = 0.30\overline{Q}_j, \quad j \in \{1, \dots, 5\}, \quad (7.6)$$

δηλαδή οι ελάχιστες τιμές άντλησης ορίζονται να είναι ίσες με το 30% των αντίστοιχων μέγιστων επιτρεπτών τιμών.

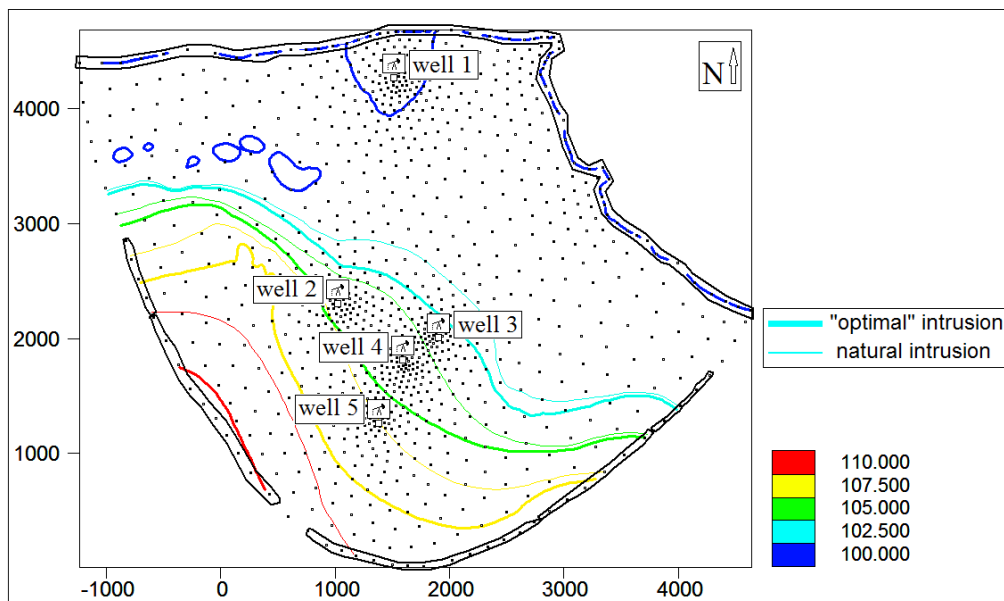
Το πλήθος των επαναλήψεων που απαιτούνται για την εύρεση μιας βέλτιστης λύσης στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι σχετικά λίγες. Λιγότερες από 100 επαναλήψεις είναι τις περισσότερες φορές αρκετές για να την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού που έχουμε ορίσει. Αν στο σημείο αυτό διατύπωνε κάποιος τον ισχυρισμό ότι το κριτήριο τερματισμού είναι πολύ χαλαρό με συνέπεια να ικανοποιείται γρήγορα, τον παραπέμπουμε στις γραφικές παραστάσεις της αντικειμενικής συνάρτησης σε καθεμιά από τις παρακάτω περιπτώσεις, όπου εύκολα διαπιστώνουμε τη μαθηματική σύγκλιση της όλης διαδικασίας σε μια περιοχή ισοδύναμων λύσεων από τις 100 πρώτες επαναλήψεις και μετά. Για την πληρότητα της παρουσίασης όμως, χρησιμοποιούμε σε όλες τις περιπτώσεις που μελετάμε πλήθος επαναλήψεων σχεδόν 5-πλάσιο από το πλήθος εκείνο που απαιτείται για την ικανοποίηση του κριτηρίου τερματισμού. Δηλαδή, χρησιμοποιούμε ένα συνολικό πλήθος 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC, όπου με την ολοκλήρωσή του παρουσιάζουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης στους πίνακες και τα γραφήματα που ακολουθούν. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα αποτελέσματα μιας τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων συνοψίζονται στους Πίνακες 7.4, 7.5 και στο Σχήμα 7.13.

Πίνακας 7.5: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX-PTC που περιγράφεται στον Πίνακα 7.4.

Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} \text{ penalty}$	5%	341	32
$Q_{min}^{local} \text{ penalty}$	5%	2	2
$Q_{total} \text{ penalty}$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$	5%	71	8
$x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$	5%	15	0

Στο σημείο αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε την αποτελεσματικότητα του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC που μόλις χρησιμοποιήσαμε. Αρχούν 86 επαναλήψεις για την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού, όπου διατηρώντας όλες τις γεωτρήσεις του υδροφορέα ενεργές, επιτυγχάνουμε την εύρεση των τιμών εκείνων που μεγιστοποιούν τη συνολική άντληση γλυκού νερού από τον υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα, με τις αντλήσεις που περιγράφονται στην 4η στήλη (τιμές κριτηρίου τερματισμού) του Πίνακα 7.4 επιτυγχάνουμε

μια συνολική απόδοση $S(Q^{(86)}) = 6168.99 \text{ m}^3/\text{day}$, η οποία αποτελεί σημαντική βελτίωση της προηγούμενης πρότασης των περίπου $S(Q) = 5000 \text{ m}^3/\text{day}$ που συναντήσαμε στην εργασία του Σ. Καρτεράκη [64] και περιγράψαμε αναλυτικά προηγουμένως.

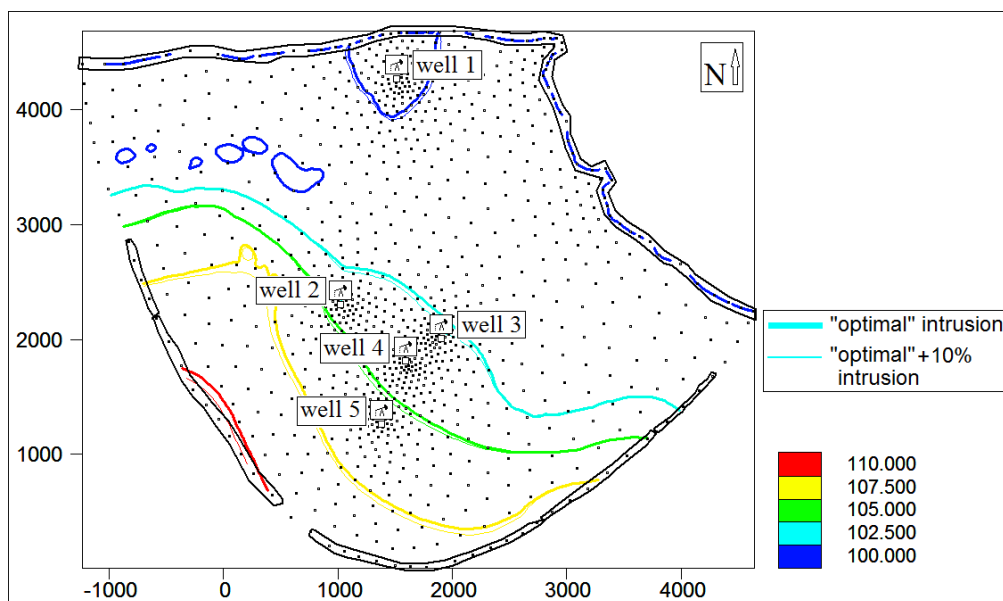


Σχήμα 7.10: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης της φυσικής υφαλμύρισης αλλά και του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις.

Όσον αφορά την ολικά βέλτιστη λύση που προτείνει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης στην 404η επανάληψη και σε υπολογιστικό χρόνο ίσο με $t^{(404)} = 379.5076 \text{ secs}$, αυτή αντιστοιχεί σε συνολικό όγκο αντλούμενο νερού ίσο με $6373.40 \text{ m}^3/\text{day}$. Η λύση αυτή προσφέρει μεγαλύτερο όγκο νερού ίσο με $6373.40 - 4942.90 = 1430.5 \text{ m}^3/\text{day}$, σε σχέση με τη βέλτιστη εκ των λύσεων που προτάθηκαν από τον Σ. Καρτεράκη [64] (Πίνακας 7.2), ποσοστό αύξησης δηλαδή ίσο με 28.94%. Αν εξαιρέσουμε τώρα τον όγκο του υφάλμυρου νερού που αντλείται από την υφαλμυρισμένη 1η γεώτρηση, απομένουν $6373.40 - 1787.02 = 4586.38 \text{ m}^3/\text{day}$ γλυκού νερού που μπορούν να αποδοθούν προς χρήση στην τοπική κοινότητα.

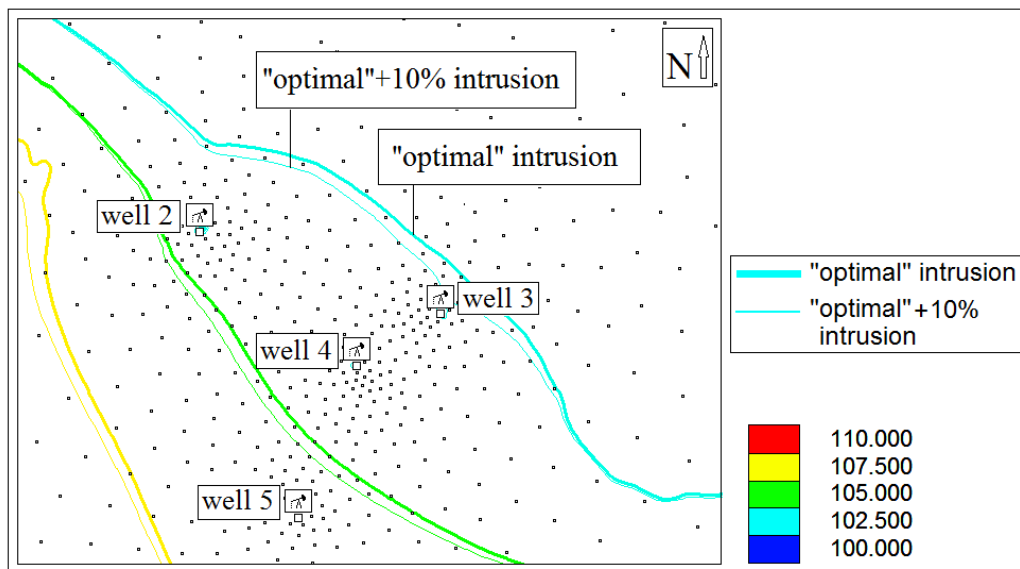
Να τονίσουμε το γεγονός ότι με εξαίρεση τη γεώτρηση No 1, της οποίας η διάσωση όπως προαναφέραμε δεν αποτελεί στόχο μας, όλες οι υπόλοιπες παραμένουν ασφαλείς από το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας βρίσκεται σε απόσταση

ιση ή και μεγαλύτερη των 180 m μπροστά από κάθε γεώτρηση, σύμφωνα με τα κριτήρια ασφαλούς προσέγγισης που εμείς τοποθετήσαμε μέσα στον αλγόριθμο ALOPEX. Ο συγκεκριμένος καθορισμός τώρα αυτών των κριτηρίων δημιουργεί δύο πλεονεκτήματα. Κατ' αρχάς, η απόσταση ασφαλείας των 180 m είναι αρκετή για να αντισταθμίσει την όποια έλλειψη ακρίβειας στην εύρεση του υφάλμυρου μετώπου έχουμε εντός του αλγορίθμου PTC, λόγω της εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που εμπεριέχει. Ακόμη δηλαδή και με σφάλμα κάποιων μέτρων, το υφάλμυρο μέτωπο παραμένει αρκετά μακριά από τις γεωτρήσεις. Έπειτα, καθίσταται δυνατή και η ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων αυτών, αφού όπως βλέπουμε και στα Σχήματα 7.11 και 7.12, μία τεχνητή ομοιόμορφη αύξηση 10% σε όλες τις αντλήσεις της βέλτιστης λύσης είναι πλέον οριακά καταστροφική για κάποιες από τις γεωτρήσεις.



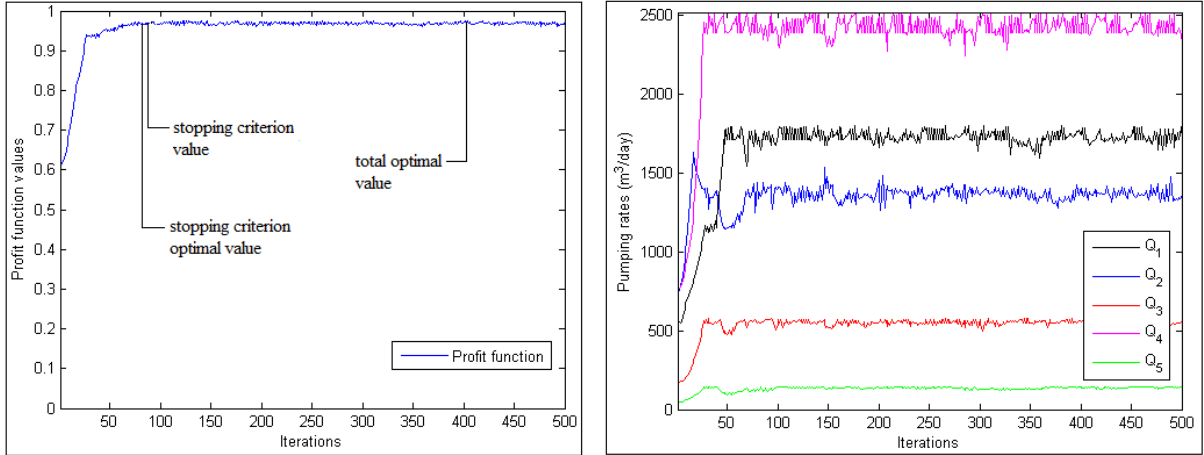
Σχήμα 7.11: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις αλλά και τις βέλτιστες τεχνητά προσαυξημένες κατά 10%.

Μια ακόμη σημαντική παρατήρηση είναι ότι οι προτεινόμενες ως βέλτιστες λύσεις που παρουσιάσαμε προηγουμένως, δηλαδή η ολική βέλτιστη λύση και οι λύσεις του κριτηρίου τερματισμού, δεν είναι μοναδικές. Πρόκειται για γεγονός που παρουσιάσαμε και αναλύσαμε



Σχήμα 7.12: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Μεγέθυνση του Σχήματος 7.11.

και στην περίπτωση του υδροφορέα της Καλύμνου. Θυμίζουμε ότι τότε όπως και τώρα, ο στοχαστικός αλγόριθμος ALOPEX καλείται να υπολογίσει την επόμενη καλύτερη λύση του προβλήματός μας, δηλαδή τις αμέσως μεγαλύτερες αντλήσεις. Όμως, ο αλγόριθμος αυτός είναι στοχαστικός και όχι ντετερμινιστικός. Δηλαδή, πάντοτε τα αποτελέσματά του θα διαφέρουν κατά κάποιες μικρές τιμές εξαιτίας της ύπαρξης κατάλληλου θορύβου στο εσωτερικό του. Όμως, από την επανάληψη όπου η αντικειμενική συνάρτηση $P = P(Q)$ ικανοποιεί το κριτήριο τερματισμού και έπειτα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ο ALOPEX έχει ήδη καταλήξει σε μια αποδεκτή περιοχή βέλτιστων λύσεων (Σχήματα 7.13α' και 7.13β'), όπου εντός αυτής πλέον κάνει μικρά βήματα αναζητώντας την καλύτερη εξ' αυτών. Η γραφική παράσταση λοιπόν της συνάρτησης κέρδους $P = P(Q)$ δεν μεταβάλλεται ιδιαίτερα από την 86 επανάληψη και μετά, αφού έχει εντοπίσει μια περιοχή σχεδόν ισοδύναμων τοπικών μεγίστων. Ολοκληρώνοντας τώρα έναν έλεγχο 500 επαναλήψεων, καθοδηγούμε τον ALOPEX να βρει την καλύτερη εκ των λύσεων αυτών και να καταλήξει σε μια ολικά μέγιστη λύση. Τέλος, η ολικά βέλτιστη λύση στην οποία καταλήγει ο ALOPEX (Πίνακας 7.4) είναι μόλις 3.31% καλύτερη από τη βέλτιστη λύση έως την εφαρμογή του κριτηρίου τερματισμού.



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Έπειτα από περίπου 80 επαναλήψεις είναι σαφής η εικόνα σύγκλισης που παρουσιάζει η αντικειμενική συνάρτηση σε μια περιοχή ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων.

(β') Αντλήσεις των 5 ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα. Σε πλήρη αντιστοιχία με τη γραφική απεικόνιση της αντικειμενικής συνάρτησης, απαιτούνται περίπου 80 επαναλήψεις για τη σταθεροποίηση των επιμέρους τιμών άντλησης σε συγκεκριμένες περιοχές βέλτιστων λύσεων.

Σχήμα 7.13: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_V. Συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC 500 επαναλήψεων.

Αυτό σημαίνει ότι με μέσο χρόνο επανάληψης $t_{av} = 0.9369 \text{ secs}$, δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσουμε την ολικά βέλτιστη λύση του αλγορίθμου η οποία προκύπτει μετά από $t^{(404)} = 379.5076 \text{ secs}$, αλλά τη βέλτιστη έως το κριτήριο τερματισμού που απαιτεί χρόνο μόλις $0.9369 * 79 = 74.0105 \text{ secs}$. Άρα, γίνεται αντιληπτή η ικανότητα του συγκεκριμένου αλγορίθμου με κατάλληλη προσαρμογή και προρρύθμιση στα εκάστοτε δεδομένα, να κατασκευάζει ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων σε ιδιαίτερα μικρό χρονικό διάστημα.

Ο μέγιστος δυνατός όγκος αντλήσεων χρησιμοποιώντας και τις 5 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα ισούται με $\sum_{j=1}^5 \bar{Q}_j = 7562.00 \text{ m}^3/\text{day}$, ενώ υπό την ισχύ του βέλτιστου πλάνου αντλήσεων ο όγκος αντλούμενου γλυκού νερού ισούται με $\sum_{j=1}^5 Q_{j,fresh}^{(404)} = 4596.38 \text{ m}^3/\text{day}$, εξαιτίας του ότι $Q_{1,fresh}^{(404)} = 0 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_{j,fresh}^{(404)} = Q_j^{(404)}$, για $j \in \{2, 3, 4, 5\}$. Επομένως, ο συντελεστής αποδοτικότητας του βέλτιστου διαχειριστικού πλάνου σε αυτό το σενάριο αντλήσεων ισούται με $a_{eff}^{(404)} = \frac{4596.38}{7562.00} 100\% = 60.65\%$. Δηλαδή μόλις το 60.65% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα.

Στον Πίνακα 7.5 παρουσιάζουμε την επίδραση των κυρώσεων ελέγχου στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Είναι σαφές ότι ο αλγόριθμος προσπαθώντας να διατηρήσει εντός των επιτρεπτών τιμών άντλησης τις προτεινόμενες λύσεις σε κάθε επανάληψη, υποχρεώνεται στην εφαρμογή των κυρώσεων όγκου και πιο συγκεκριμένα του $Q_{max}^{local} penalty$. Έπειτα, με στόχο την προστασία των επιμέρους γεωτρήσεων από την επέλαση του υφάλμυρου μετώπου, εφαρμόζει τη στρατηγική του 5% στις κυρώσεων ελέγχου προσέγγισης. Από τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου Πίνακα είναι μάλλον προφανές, ότι η κίνηση του υφάλμυρου μετώπου αναστέλλεται στις περισσότερες περιπτώσεις μονάχα με την εφαρμογή του $x_{movement}^{primary} penalty$, εφαρμόζονται δηλαδή κυρώσεις προσέγγισης μονάχα στις μετωπιαίες γεωτρήσεις.

7.6.2 Winter_V: Χειμερινό σενάριο ανατροφοδότησης

Στη συνέχεια επαναλαμβάνουμε τους προηγούμενους ελέγχους, υπό την ισχύ όμως του χειμερινού σεναρίου ανατροφοδότησης που παρουσιάσαμε παραπάνω. Η αύξηση στις εισροές ανατροφοδότησης του υδροφορέα (Σχήμα 7.7) αναμένουμε να έχει ως επακόλουθο την αύξηση του διαθέσιμου όγκου γλυκού νερού προς ικανοποίηση των γειτονικών περιοχών, γεγονός το οποίο επιβεβαιώνεται από τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρουσιάζουμε παρακάτω. Έτσι, τα αποτελέσματα ενός τυπικού ελέγχου 500 επαναλήψεων παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.6 και 7.7, ενώ οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις ακολουθούν.

Όσον αφορά τις μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές τιμές άντλησεων από τις 5 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα, παραμένουν ίδιες με αυτές που εφαρμόσαμε στην περίπτωση των 5 γεωτρήσεων υπό καλοκαιρινές συνθήκες ανατροφοδότησης (σενάριο Summer_V), εξακολουθεί να ισχύει δηλαδή ο Πίνακας 7.3, που παρουσιάσαμε προηγουμένως.

Με μέσο χρόνο ολοκλήρωσης μιας επανάληψης ίσο με $t_{av} = 0.9026 \text{ secs}$ απαιτούνται μόλις 64 επαναλήψεις για την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού της διαδικασίας, σε χρόνο ίσο με $t^{(64)} = 57.7664 \text{ secs}$. Σε αυτό το χρονικό διάστημα ο συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC παρήγαγε διαδοχικά σύνολα λύσεων που αντιστοιχούν σε τιμές άντλησεων και για τις 5 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα. Φυσικά, η γεώτρηση No 1 εξακολουθεί να αντλεί υφάλμυρο νερό αφού δεν είναι δυνατή η διάσωσή της. Έτσι, ο συνολικός όγκος

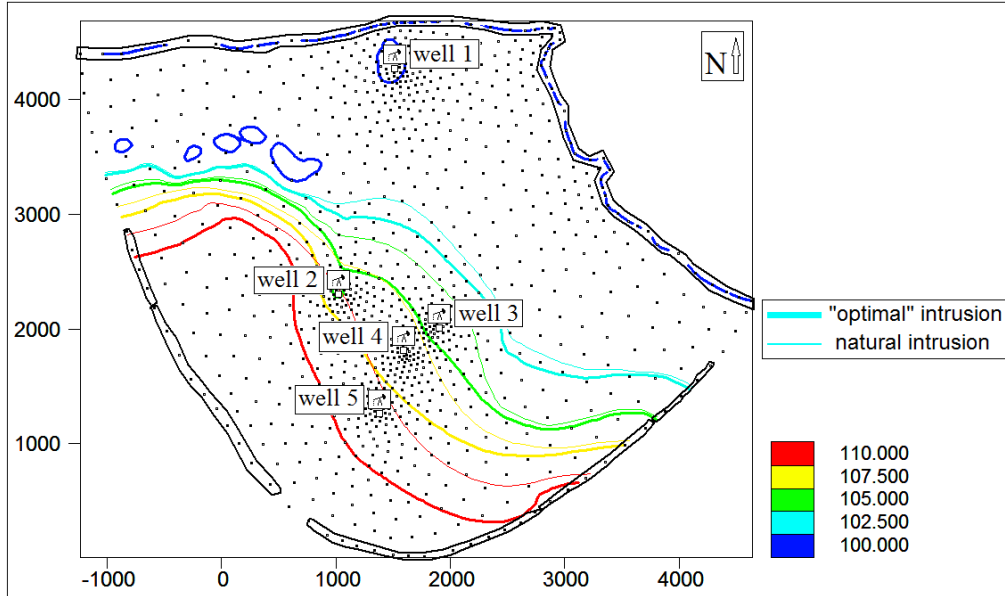
Πίνακας 7.6: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC.

Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	198	64	63
$P(\mathbf{Q}^{(k)})$	0.9981	0.9999	0.9940	0.9965
$Q_1^{(k)}$ (m^3/day)	1788.36	1777.16	1457.85	1518.21
$Q_2^{(k)}$ (m^3/day)	2394.00	2514.42	2434.25	2426.24
$Q_3^{(k)}$ (m^3/day)	549.05	545.27	554.24	545.98
$Q_4^{(k)}$ (m^3/day)	2354.85	2511.35	2394.00	2502.93
$Q_5^{(k)}$ (m^3/day)	142.08	136.80	134.72	123.41
$S(\mathbf{Q}^{(k)})$ (m^3/day)	7228.34	7484.99	6975.06	7116.77
$t^{(k)}$ (secs)	451.2806	178.7148	57.7664	56.8638

Πίνακας 7.7: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX-PTC που περιγράφεται στον Πίνακα 7.6.

Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} \text{ penalty}$	5%	411	23
$Q_{min}^{local} \text{ penalty}$	5%	2	2
$Q_{total} \text{ penalty}$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$	5%	0	0
$x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$	5%	0	0

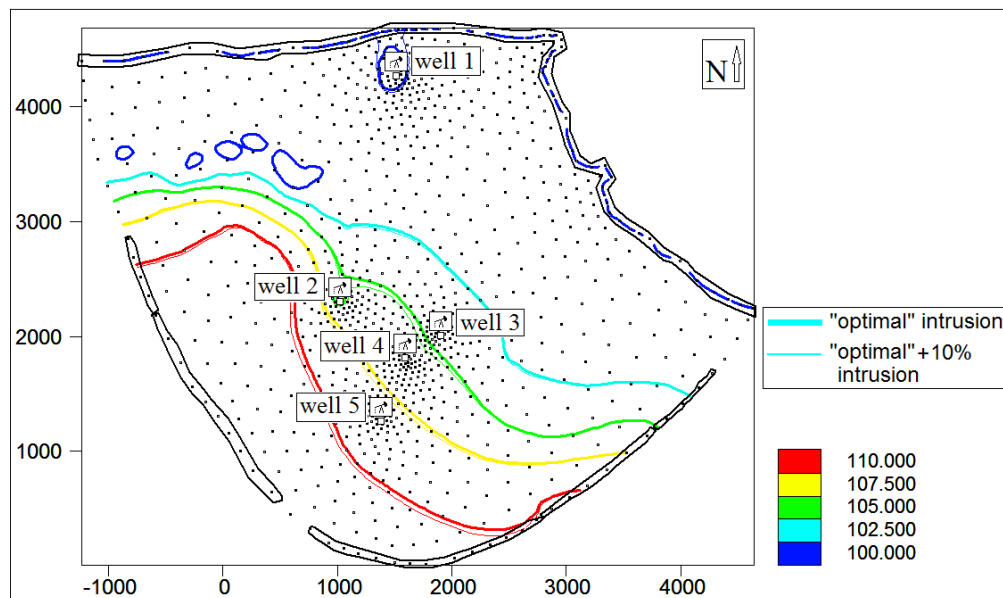
γλυκού νερού του προτεινόμενου πλάνου αντλήσεων στην επανάληψη ικανοποίησης του κριτηρίου τερματισμού ισούται με $S(\mathbf{Q}^{(64)}) - Q_1^{(64)} = 6575.06 - 1457.85 = 5117.21 \text{ m}^3/day$. Ωστόσο, σύμφωνα με την αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του κριτηρίου τερματισμού της διαδικασίας, που παρουσιάσαμε στο Κεφάλαιο 5.3, απαιτούνται 40 επαναλήψεις σταθεροποιημένης διαδικασίας, έτσι ώστε να ενεργοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Εντός λοιπόν των τελευταίων αυτών επαναλήψεων μπορούμε να εντοπίσουμε τη βέλτιστη λύση έως την εφαρμογή του κριτηρίου ολοκλήρωσης της διαδικασίας. Πράγματι, στη συγκεκριμένη περίπτωση εντοπίζεται η βέλτιστη αυτή λύση στην 63η επανάληψη, που αντιστοιχεί σε συνολικό όγκο αντλούμενου ωφέλιμου γλυκού νερού



Σχήμα 7.14: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης της φυσικής υφαλμύρισης αλλά και του μετώπου της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις.

ίσο με $S(Q^{(63)}) - Q_1^{(63)} = 7116.77 - 1518.21 = 5598.56 \text{ m}^3/\text{day}$. Ο αντίστοιχος έλεγχος στην περίπτωση Summer_V απέδωσε ποσότητα γλυκού νερού ίση με $S(Q^{(79)}) - Q_1^{(79)} = 6276.74 - 1735.11 = 4541.63 \text{ m}^3/\text{day}$. Η διαφορά τώρα των διαθέσιμων αυτών ποσοτήτων γλυκού νερού είναι σημαντική αφού αντιστοιχεί σε $5598.56 - 4541.63 = 1056.93 \text{ m}^3/\text{day}$ και σε ποσοστό 23.27%. Εάν συγκρίνουμε δε τις επιμέρους αντλήσεις στις δύο αυτές περιπτώσεις θα διαπιστώσουμε ότι ο αυξημένος αντλούμενος όγκος γλυκού νερού προστίθεται στην ουσία στις τιμές άντλησης της γεώτρησης No 2, όπου έχοντας πλέον το υφάλμυρο μέτωπο σε μεγαλύτερη απόσταση ασφαλείας μακριά της μπορεί να αυξήσει τις αντλήσεις της.

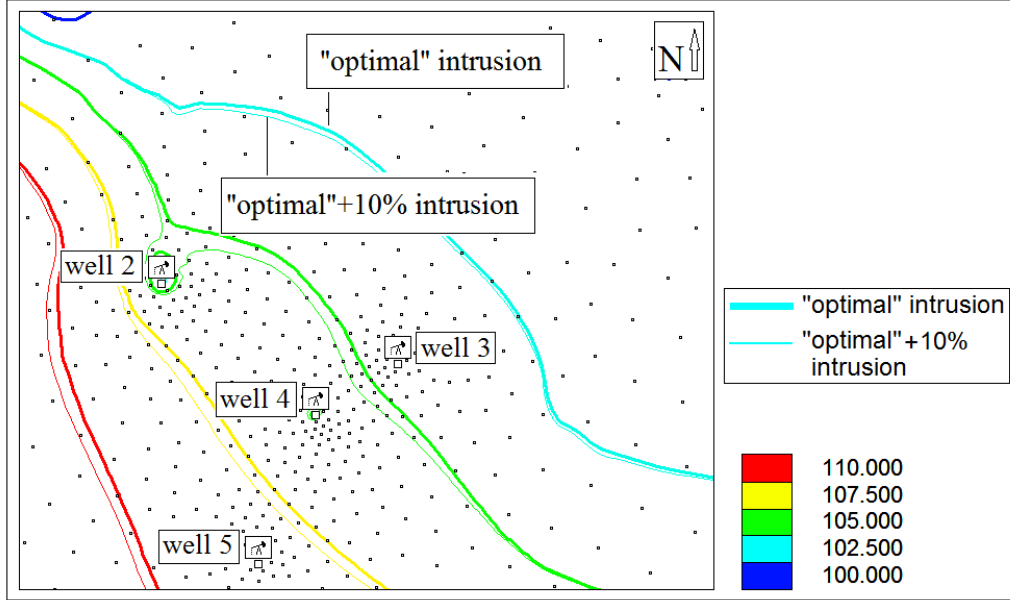
Αντίστοιχη αύξηση των αντλήσεων παρατηρείται και ως προς τη σύγκριση των ολικά βέλτιστων προτεινόμενων τιμών άντλησης μεταξύ των περιπτώσεων Winter_V και Summer_V. Πιο συγκεκριμένα, υπό την ισχύ του χειμερινού πλάνου ανατροφοδότησεων η ολικά βέλτιστη λύση προβλέπει συνολικό όγκο γλυκού νερού ίσο με $S(Q^{(198)}) - Q_1^{(198)} = 7484.99 - 1777.16 = 5707.83 \text{ m}^3/\text{day}$. Προηγουμένως, κατά την εφαρμογή του καλοκαιρινού σεναρίου ανατροφοδότησης είχαμε αντίστοιχα $S(Q^{(404)}) - Q_1^{(404)} = 6373.40 - 1787.02 = 4586.38 \text{ m}^3/\text{day}$,



Σχήμα 7.15: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις αλλά και τις βέλτιστες τεχνητά προσ αυξημένες κατά 10%.

προτεινόμενο αντλούμενο όγκο γλυκού νερού. Αυτή η αύξηση των $5707.83 - 4586.38 = 1121.45 \text{ m}^3/\text{day}$ είναι σημαντική και ισοδυναμεί με μια αύξηση του 24.45%.

Στο Σχήμα 7.14 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ακόμη και υπό την επίδραση των αυξημένων τιμών άντλησης της βέλτιστης λύσης του Πίνακα 7.6, το υφάλμυρο μέτωπο παραμένει σε ικανοποιητική απόσταση ασφαλείας από τη γεώτρηση No 3. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι θα μπορούσαμε να κατασκευάσουμε ένα πλάνο αντλήσεων με ακόμη μεγαλύτερες επιμέρους τιμές άντλησης, επιχειρώντας να εκμεταλλευτούμε αυτό το περιθώριο ασφαλείας που έχει δημιουργηθεί στο σημείο αυτό. Όμως, όπως παρατηρούμε και στον Πίνακα 7.3, η παρούσα διαδικασία έχει ήδη πλησιάσει κατά το μέγιστο δυνατό τις μέγιστες ονομαστικές τιμές αντλήσεων, δηλαδή χρησιμοποιούνται οι γεωτρήσεις του υδροφορέα στο μέγιστο των προκαθορισμένων δυνατοτήτων τους. Έτσι, δεν είναι δυνατό να αυξήσουμε περαιτέρω τις επιμέρους αντλήσεις, παρά μονάχα υποθετικά, χωρίς δηλαδή την παρουσία κάποιου σχεδίου βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα δε μιας τέτοιας δραματικής αύξησης του 10%, που εξακολουθεί να μην είναι επιζήμια για τον υδροφορέα, μπορούμε να παρατηρήσουμε στα Σχήματα

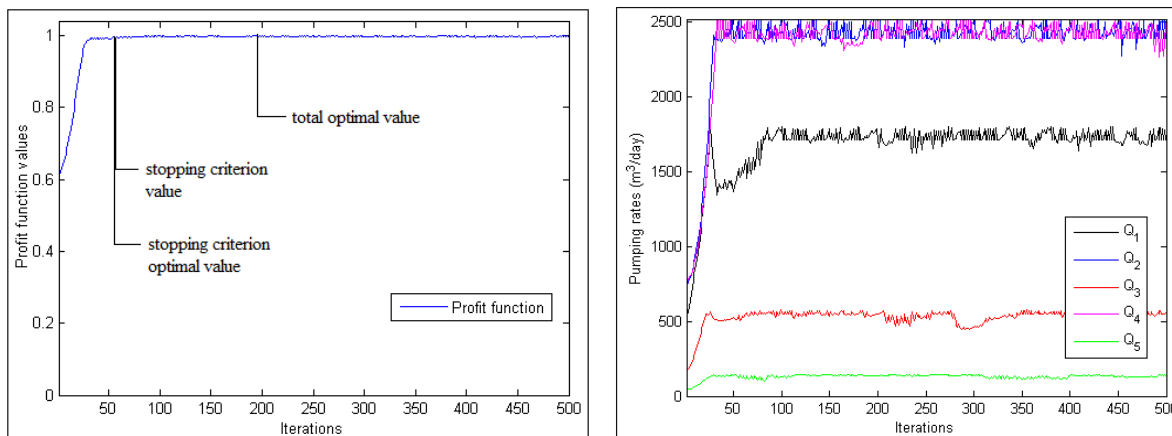


Σχήμα 7.16: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Μεγέθυνση του Σχήματος 7.15.

7.15 και 7.16. Το υφάλμυρο μέτωπο εξακολουθεί να μη θέτει υπό τον κίνδυνο υφαλμύρισης τη γεώτρηση No 3, η οποία είναι και η πρώτη εκ των γεωτρήσεων του υδροφορέα (με εξαίρεση φυσικά την 1η γεώτρηση) που το υφάλμυρο μέτωπο συναντά κατά την προέλασή του εντός του.

Η μοναδική κύρωση ελέγχου που ενεργοποιείται διαρκώς με στόχο τη διατήρηση των προτεινόμενων από τον αλγόριθμο αντλήσεις εντός των προκαθορισμένων ορίων του Πίνακα 7.3, είναι η Q_{local_max} με 411 ενεργοποιήσεις στο συνολικό πλήθος των 500 επαναλήψεων της διαδικασίας. Δεν ενεργοποιούνται οι κυρώσεις ελέγχου προσέγγισης $x_{movement}^{primary} penalty$ και $x_{movement}^{secondary} penalty$, διότι το υφάλμυρο μέτωπο δεν πλησιάζει απειλητικά σε καμία επανάληψη τις γεωτρήσεις του υδροφορέα.

Με στόχο τον υπολογισμό του συντελεστή αποδοτικότητας στην παρούσα περίπτωση, παρατηρούμε ότι ο μέγιστος δυνατός όγκος αντλήσεων χρησιμοποιώντας και τις 5 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα ισούται με $\sum_{j=1}^5 \bar{Q}_j = 7562.00 \text{ m}^3/\text{day}$, ενώ υπό την ισχύ του βέλτιστου πλάνου αντλήσεων ο όγκος αντλούμενου γλυκού νερού ισούται με $\sum_{j=1}^5 Q_{j,fresh}^{(198)} = 5707.83 \text{ m}^3/\text{day}$. Θυμίζουμε ότι $Q_{1,fresh}^{(198)} = 0 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_{j,fresh}^{(198)} = Q_j^{(198)}$, για $j \in$



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(\mathbf{Q})$. Από τις 60 περίπου επαναλήψεις η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει συγχλίνει σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων της συνάρτησης αυτής.

(β') Αντλήσεις των 5 ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα. Απαιτούνται περίπου 60 επαναλήψεις, ώστε με εξαίρεση την υφαλμυρισμένη γεώτρηση No 1, οι τιμές των επιμέρους αντλήσεων να έχουν οδηγηθεί πολύ κοντά στις μέγιστες ονομαστικές τους τιμές.

Σχήμα 7.17: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Winter_V. Συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC 500 επαναλήψεων.

$\{2, 3, 4, 5\}$. Επομένως, ο συντελεστής αποδοτικότητας του βέλτιστου διαχειριστικού πλάνου σε αυτό το σενάριο αντλήσεων ισούται με $a_{eff}^{(198)} = \frac{5707.83}{7562.00} 100\% = 75.48\%$. Δηλαδή, πλέον το 75.48% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα, εξαιτίας προφανώς των αυξημένων ανατροφοδοτήσεων του υδροφορέα.

Οι γραφικές παραστάσεις τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης $P = P(\mathbf{Q})$ όσο και των επιμέρους αντλήσεων στα Σχήματα 7.17α' και 7.17β' επιβεβαιώνουν τις προηγούμενες παρατηρήσεις. Η επαναληπτική διαδικασία συγχλίνει σε μια περιοχή ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων από τις πρώτες 60 επαναλήψεις και μετά, εκ των οποίων η ολικά βέλτιστη στο σύνολο των 500 επαναλήψεων του τυπικού ελέγχου που εδώ παρουσιάζουμε, συναντάται στην 198η επανάληψη. Οι δε επιμέρους αντλήσεις περίπου από την 60η επανάληψη και έπειτα προσεγγίζουν κατά μέγιστο βαθμό τις μέγιστες ονομαστικές τους τιμές. Ο στοχαστικός χαρακτήρας της διαδικασίας είναι αυτός που αναλαμβάνει στο υπόλοιπο των επαναλήψεων να ελέγχει για τιμές νέων τοπικών μεγίστων της διαδικασίας.

7.7 Περίπτωση II: Υδροφορέας 4 ενεργών γεωτρήσεων

7.7.1 Summer_IV: Καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης

Εξετάζουμε την περίπτωση ενός πλάνου αντλήσεων όπου δε λαμβάνεται υπόψη η γεώτρηση No 1, εξαιτίας της λανθασμένης αρχικής τοποθέτησής της σε περιοχή πολύ κοντά στη θαλάσσια ακτογραμμή. Θεωρούμε δηλαδή τη συγκεκριμένη γεώτρηση ως ανενεργή, δεν της επιτρέπουμε να αντλεί νερό, με συνέπεια οι ανάγκες σε γλυκό νερό των γειτονικών περιοχών του υδροφορέα Χερσονήσου να καλύπτονται από τις υπόλοιπες 4 γεωτρήσεις. Οι θέσεις αυτών (Σχήμα 7.18) όπως και οι ονομαστικές τους μέγιστες και ελάχιστες δυνατότητες άντλησης (Πίνακας 7.8) παραμένουν αμετάβλητες σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις που παρουσιάσαμε. Όσον αφορά δε την ανατροφοδότηση του υδροφορέα, θεωρούμε ότι στην παρούσα περίπτωση ακολουθείται το καλοκαιρινό σενάριο, όπως αυτό περιγράφεται αναλυτικά στο Σχήμα 7.6.

Πίνακας 7.8: Μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές δυνατότητες άντλησης στις περιοχές γεωτρήσεων. Η γεώτρηση No 1 επιλέγουμε να είναι ανενεργή, ώστε να μη συμμετέχει στην κατασκευή του πλάνου αντλήσεων του υδροφορέα.

Γεώτρηση j	1	2	3	4	5
\overline{Q}_j (m^3/day)	0.00	2520.00	576.00	2520.00	146.00
\underline{Q}_j (m^3/day)	0.00	756.00	172.80	756.00	43.80

Στόχος μας είναι η διερεύνηση της συνεισφοράς της, τρόπον τινά, προβληματικής γεώτρησης No 1 στο γενικότερο πλάνο αντλήσεων, μέσω της σύγκρισης των αποτελεσμάτων του ελέγχου που πραγματοποιήσαμε προηγουμένως στην περίπτωση Summer_V με τα αποτελέσματα της παρούσας περίπτωσης. Ο ισχυρισμός μας, τον οποίο αποδεικνύουμε μέσω των παρακάτω ελέγχων, είναι ότι η γεώτρηση No 1 δεν μπορεί να συμμετέχει στην κατασκευή ενός βέλτιστου πλάνου αντλήσεων, ως γεώτρηση υπό μη αναστρέψιμο καθεστώς υφαλμύρισης. Έτσι, οι υπόλοιπες 4 γεωτρήσεις αναλαμβάνουν εξ ολοκλήρου το έργο της άντλησης γλυκού νερού από το συγκεκριμένο υδροφορέα, παράγοντας λύσεις που αντιστοιχούν σε εντελώς ισοδύναμες επιμέρους και συνολικές τιμές άντλησης με αυτές που παρήχθησαν στην

περίπτωση Summer_V, εάν φυσικά αγνοήσουμε σε αυτήν τον όγκο υφάλμυρου νερού που αντλείται από τη γεώτρηση No 1.

Πίνακας 7.9: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC.

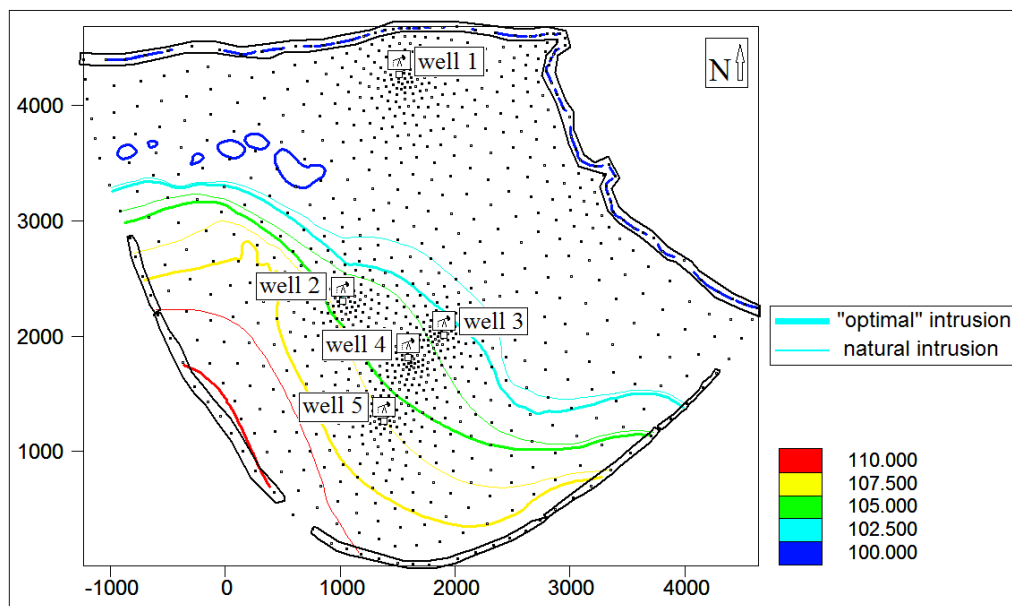
Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	331	71	64
$P(\mathbf{Q}^{(k)})$	0.9489	0.9604	0.9476	0.9559
$Q_1^{(k)}$ (m^3/day)	0.00	0.00	0.00	0.00
$Q_2^{(k)}$ (m^3/day)	1333.93	1392.37	1351.70	1395.91
$Q_3^{(k)}$ (m^3/day)	564.30	570.67	542.76	547.20
$Q_4^{(k)}$ (m^3/day)	2400.37	2513.18	2394.00	2456.94
$Q_5^{(k)}$ (m^3/day)	144.32	127.87	137.36	138.46
$S(\mathbf{Q}^{(k)})$ (m^3/day)	4442.93	4604.08	4425.81	4538.52
$t^{(k)}$ (secs)	460.1238	304.5862	65.3342	58.8928

Πίνακας 7.10: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX-PTC που περιγράφεται στον Πίνακα 7.9.

Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} \text{ penalty}$	5%	262	6
$Q_{min}^{local} \text{ penalty}$	5%	2	2
$Q_{total} \text{ penalty}$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$	5%	121	19
$x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$	5%	18	6

Παρακολουθούμε στη συνέχεια τα αποτελέσματα μιας τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων, όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικά στους Πίνακες 7.9 και 7.10. Ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης σε αυτήν την προσομοίωση ισούται με $t_{av} = 0.9202 \text{ secs}$, χρόνος ελαφρώς μικρότερος από τον αντίστοιχο μέσο χρόνο επανάληψης $t_{av} = 0.9369 \text{ secs}$ της περίπτωσης Summer_V. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, αφού στην παρούσα περίπτωση εντός του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC απαιτείται λιγότερος φόρτος

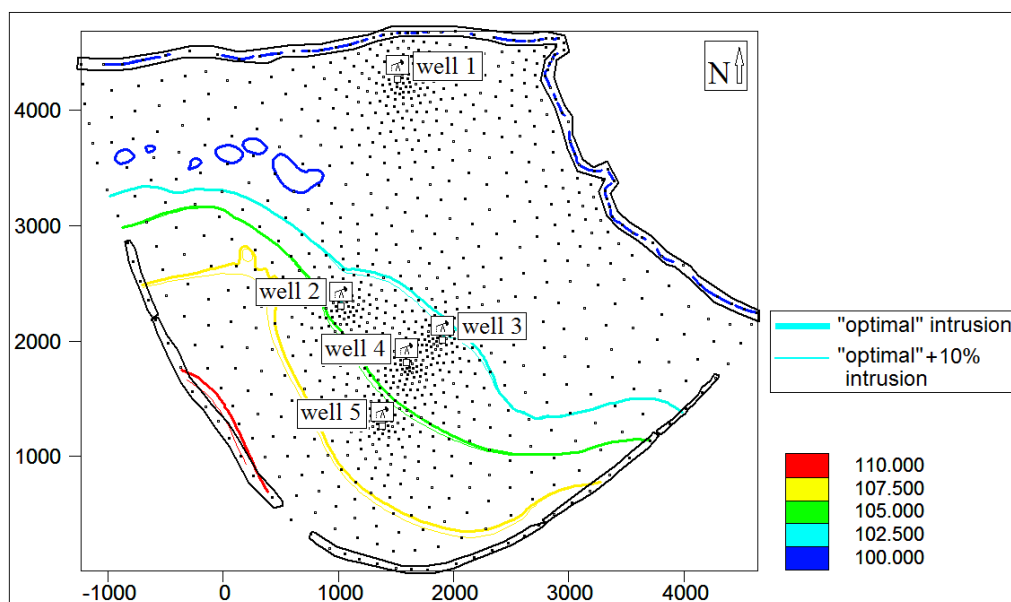
υπολογισμών ανά επανάληψη, εξαιτίας των λιγότερων ελέγχων που αντιστοιχούν σε πλάνο αντλήσεων 4 ενεργών γεωτρήσεων. Έτσι, αρκούν 71 επαναλήψεις για την ικανοποίηση του κριτηρίου τερματισμού της διαδικασίας, με αντίστοιχο συνολικό όγκο αντλούμενου νερού ίσο με $S(Q^{(71)}) = 4425.81 \text{ m}^3/\text{day}$. Η αντίστοιχη συνολική άντληση της περίπτωσης Summer_V στην 86η επανάληψη, όπου και ικανοποιούνται οι συνθήκες του κριτηρίου τερματισμού της διαδικασίας, χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη φυσικά τον υφάλμυρο όγκο νερού που προσφέρει η γεώτρηση No 1, ήταν $S(Q^{(86)}) - Q_1^{(86)} = 6168.99 - 1710.00 = 4458.99 \text{ m}^3/\text{day}$. Η διαφορά των $4458.99 - 4425.81 = 33.18 \text{ m}^3/\text{day}$ αντιστοιχεί σε μια ποσοστιαία μείωση της τάξης του 0.74%, όπου εξαιτίας του διαμοιρασμού των υπολειπόμενων κυβικών νερού και στις 4 γεωτρήσεις, κρίνεται ως μη σημαντική.



Σχήμα 7.18: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Ισοϋφείς καμπύλες απεικόνισης της φυσικής υφαλμύρισης αλλά και του μετώπου της υφαλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις.

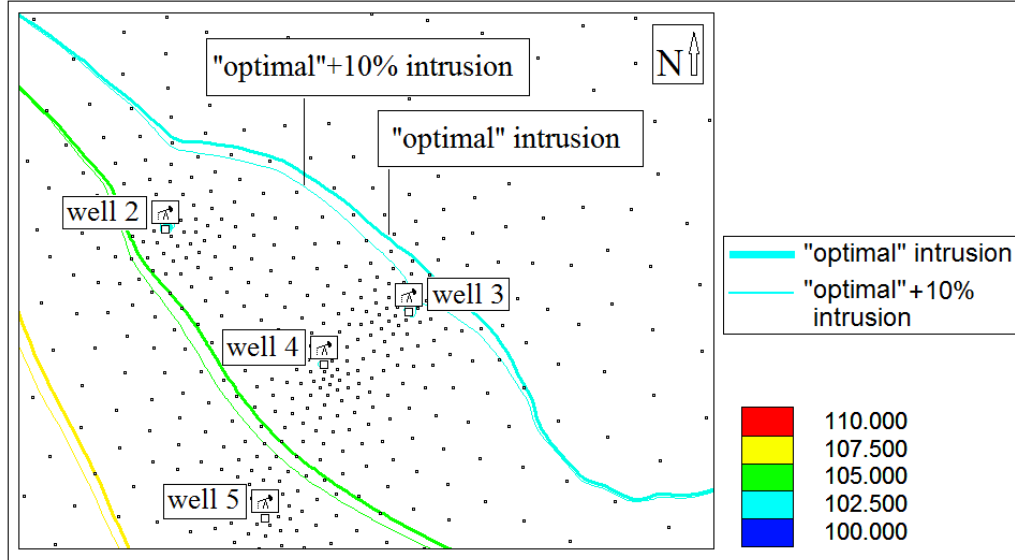
Εξετάζουμε και συγκρίνουμε στη συνέχεια τις προτεινόμενες ως βέλτιστες λύσεις των περιπτώσεων Summer_V και Summer_IV. Η βέλτιστη λύση της παρούσας περίπτωσης αντιστοιχεί σε συνολικό όγκο νερού ίσο με $S(Q^{(331)}) = 4604.08 \text{ m}^3/\text{day}$, που είναι κατά $17.70 \text{ m}^3/\text{day}$ και 0.38% μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο όγκο των $S(Q^{(404)}) - Q_1^{(404)} =$

$6373.40 - 1787.02 = 4586.38 \text{ m}^3/\text{day}$ της Summer_V. Μάλιστα, τα βέλτιστα αποτελέσματα της Summer_IV προκύπτουν σε χρόνο $t^{(331)} = 304.5862 \text{ secs}$, που είναι κατά $378.5076 - 304.5862 = 73.9214 \text{ secs}$ μικρότερος από τον αντίστοιχο χρόνο της Summer_V. Τέλος, η κατανομή των επιμέρους αντλήσεων είναι εντελώς ισοδύναμη στις δύο περιπτώσεις, επιβεβαιώνοντας τον ισχυρισμό μας για αντικατάσταση του πλάνου μελέτης Summer_V από το Summer_IV, που αντιστοιχεί σε πλήρη απενεργοποίηση της γεώτρησης No 1 του υδροφορέα.



Σχήμα 7.19: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Ισούψειες καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις αλλά και τις βέλτιστες τεχνητά προσαυξημένες κατά 10%.

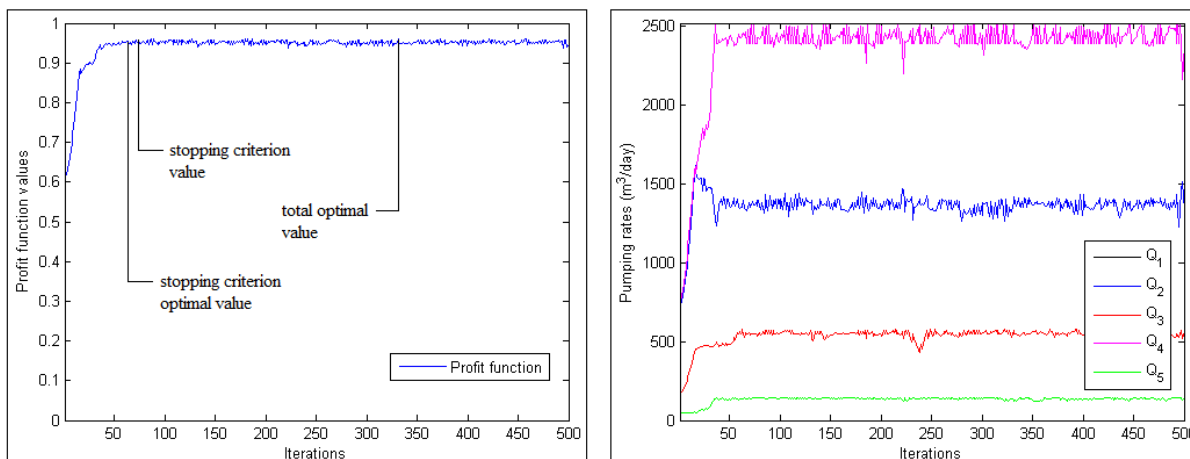
Στο Σχήμα 7.18 παρουσιάζουμε τη θέση του υφάλμυρου μετώπου υπό την ισχύ δύο περιπτώσεων άντλησης. Αρχικά, με τη λεπτή γαλάζια τεθλασμένη γραμμή παρουσιάζουμε την επίδραση του φαινομένου της φυσικής υφαλμύρισης στον υδροφορέα. Πρόκειται, όπως αναφέραμε και προηγουμένως, για τη βέλτιστη δυνατή θέση υπαναχώρησης του υφάλμυρου μετώπου εντός του υδροφορέα, αφού αντιστοιχεί σε μηδενικές τιμές άντλησης σε όλες τις γεωτρήσεις του υδροφορέα. Έπειτα, υπό την ισχύ των βέλτιστων τιμών άντλησης του Πίνακα 7.9 παρουσιάζουμε εντός του ίδιου Σχήματος τη θέση του μετώπου, που ενώ πλέον



Σχήμα 7.20: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Μεγέθυνση του Σχήματος 7.19.

βρίσκεται πιο κοντά στις θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων, εξακολουθεί να εξασφαλίζεται η ακεραιότητά τους. Διατηρείται δηλαδή η απόσταση ασφαλείας των $d_s = 180 \text{ m}$, η οποία επιλέγει έτσι ώστε να αντιστοιχεί σε μια υποθετική, τεχνητή και ομοιόμορφη αύξηση των βέλτιστων αντλήσεων κατά 10%. Στα Σχήματα 7.19 και 7.20 αναπαριστώνται συγκριτικά οι θέσεις του μετώπου, χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αλλά και τις βέλτιστες αντλήσεις προσαυξημένες τεχνητά κατά 10%, όπου πλέον ο κίνδυνος υφαλμύρισης της γεώτρησης No 3 είναι εμφανής και άμεσος.

Ο μέγιστος δυνατός όγκος αντλήσεων χρησιμοποιώντας τις 4 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα ισούται με $\sum_{j=1}^5 \bar{Q}_j = 5762.00 \text{ m}^3/\text{day}$, λαμβάνοντας υπόψη ότι $\bar{Q}_1 = 0 \text{ m}^3/\text{day}$. Υπό την ισχύ του βέλτιστου πλάνου αντλήσεων στην 331η επανάληψη, ο όγκος του αντλούμενου γλυκού νερού ισούται με $\sum_{j=1}^5 Q_{j,fresh}^{(331)} = 4604.08 \text{ m}^3/\text{day}$, εξαιτίας του ότι $Q_{1,fresh}^{(331)} = 0 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_{j,fresh}^{(331)} = Q_j^{(331)}$, για $j \in \{2, 3, 4, 5\}$. Επομένως, ο συντελεστής αποδοτικότητας του βέλτιστου διαχειριστικού πλάνου σε αυτό το σενάριο αντλήσεων ισούται με $a_{eff}^{(331)} = \frac{4604.08}{5762.00} 100\% = 79.90\%$. Δηλαδή, το 79.90% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα.



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Απαιτούνται περίπου 70 επαναλήψεις για τη σύγκλιση της διαδικασίας βελτιστοποίησης σε μια περιοχή ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων.

(β') Αντλήσεις των 4 ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα. Οι επιμέρους τιμές άντλησης, υπό τη συνεχή επίδραση του στοχαστικού θορύβου, σταθεροποιούνται σε περιοχές ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων.

Σχήμα 7.21: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_IV. Συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC 500 επαναλήψεων.

Ως προς το πλήθος ενεργοποιήσεων των κυρώσεων ελέγχου της τρέχουσας περίπτωσης αξίζει να παρατηρήσουμε ότι πάλι η κύρωση $Q_{max}^{local} penalty$ παρουσιάζει τις περισσότερες εμφανίσεις, μιας και οι γεωτρήσεις No 3, 4 και 5 καλούνται να χρησιμοποιήσουν τιμές άντλησεων πολύ κοντά στις μέγιστες ονομαστικές τους δυνατότητες. Δεύτερη σε πλήθος ενεργοποιήσεων έρχεται η κύρωση ελέγχου $x_{movement}^{primary} penalty$, όπου σε συνδυασμό με την $x_{movement}^{secondary} penalty$ καλείται να προστατεύσει τη γεώτρηση No 3 από την επέλαση του υφάλμυρου μετώπου.

Οι γραφικές παραστάσεις της αντικειμενικής συνάρτησης αλλά και των επιμέρους τιμών άντλησης στην προσομοίωση των 500 επαναλήψεων που τώρα μελετάμε, παρουσιάζεται στα Σχήματα 7.21α' και 7.21β' αντίστοιχα. Είναι σαφής η εικόνα μιας συγκλίνουσας διαδικασίας βελτιστοποίησης από τις 60-70 επαναλήψεις και μετά, αφού ο αλγόριθμος σταθεροποιείται σε περιοχές ισοδύναμων λύσεων. Ο αλγόριθμος ALOPEX χρησιμοποιώντας την ιδιότητα της στοχαστικότητας που τον αντιπροσωπεύει, προσπαθεί να οδηγήσει την αντικειμενική συνάρτηση της διαδικασίας σε ισοδύναμες βέλτιστες λύσεις, όπου μετά το πέρας των 500

επαναλήψεων μπορεί να επιλέξει την καλύτερη από αυτές. Οι διαφορές όμως αυτών των βέλτιστων λύσεων, όπως είναι σαφές από τα Σχήματα της αντικειμενικής συνάρτησης και των επιμέρους αντλήσεων, είναι μικρές, με συνέπεια οι λύσεις αυτές να μπορούν εξίσου να χρησιμοποιηθούν ως ολικά βέλτιστες λύσεις.

Να σημειώσουμε στο σημείο αυτό ότι δεν παραθέτουμε αναλυτικά την περίπτωση Winter_IV, περίπτωση που αντιστοιχεί σε υδροφορέα 4 ενεργών γεωτρήσεων υπό την ισχύ του χειμερινού πλάνου ανατροφοδότησης. Η επιλογή μας αυτή βασίζεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο σενάριο αντλήσεων δεν παρουσιάζει πλέον κάποιο επιστημονικό ενδιαφέρον, αφού η επιβεβαίωση της χρήσης των 4 ενεργών γεωτρήσεων έναντι των αρχικών 4+1, όπου η 1η γεώτρηση είναι υφαλμυρισμένη, επιτεύχθηκε στις προηγούμενες ενότητες. Είναι σαφές δηλαδή, και επιβεβαιώνεται από πλήθος σχετικών προσομοιώσεων, ότι τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου είναι ταυτόσημα με τα αποτελέσματα που παρουσιάσαμε στο σενάριο Winter_V, με ελαφρώς μικρότερο μάλιστα υπολογιστικό κόστος. Έτσι, ως επόμενο βήμα εστιάζουμε την προσοχή μας στη μελέτη σεναρίων με περισσότερες από 5 ενεργές γεωτρήσεις, με στόχο φυσικά τον έλεγχο πιθανής μεγαλύτερης απόδοσης σε γλυκό νερό από τον συγκεκριμένο υδροφορέα.

7.8 Περίπτωση III: Υδροφορέας 6 ενεργών γεωτρήσεων

Στόχος μας στη συγκεκριμένη ενότητα είναι ο έλεγχος της υπόθεσης πως εντός του συγκεκριμένου υδροφορέα μελέτης μπορούν να κατασκευαστούν νέες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων, υπό τη συνθήκη φυσικά του ελέγχου καταλληλότητας των θέσεων αυτών. Έτσι, ενδεικτικά επιλέγουμε την παρουσίαση δύο σεναρίων τοποθέτησης μιας μονάχα επιπλέον γεώτρησης σε διαφορετικές θέσεις εντός του υδροφορέα, θέσεις όπου οι προηγούμενες προσομοιώσεις έδειξαν ότι είναι ασφαλείς από το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Οι περιοχές τοποθέτησης των γεωτρήσεων αυτών εμφανίζουν διαφορετικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, γεγονός το οποίο οδηγεί στην κατασκευή διαφοροποιημένων πλάνων άντλησης με αντίστοιχα διαφορετικό συνολικό όγκο αντλούμενου γλυκού νερού. Στις δύο αυτές περιπτώσεις που παρουσιάζουμε

στη συνέχεια, επιλέγουμε για τη νέα γεώτρηση να έχει ως ονομαστικές μέγιστες τιμές άντλησης τις μέγιστες που συναντήσαμε μεταξύ των πραγματικών γεωτρήσεων του υδροφορέα. Ισχύει δηλαδή ότι:

$$\overline{Q_j} = 2500.00 \text{ m}^3/\text{day} \text{ και } \underline{Q_j} = 0.30\overline{Q_j} = 756.00 \text{ m}^3/\text{day}, \quad (7.7)$$

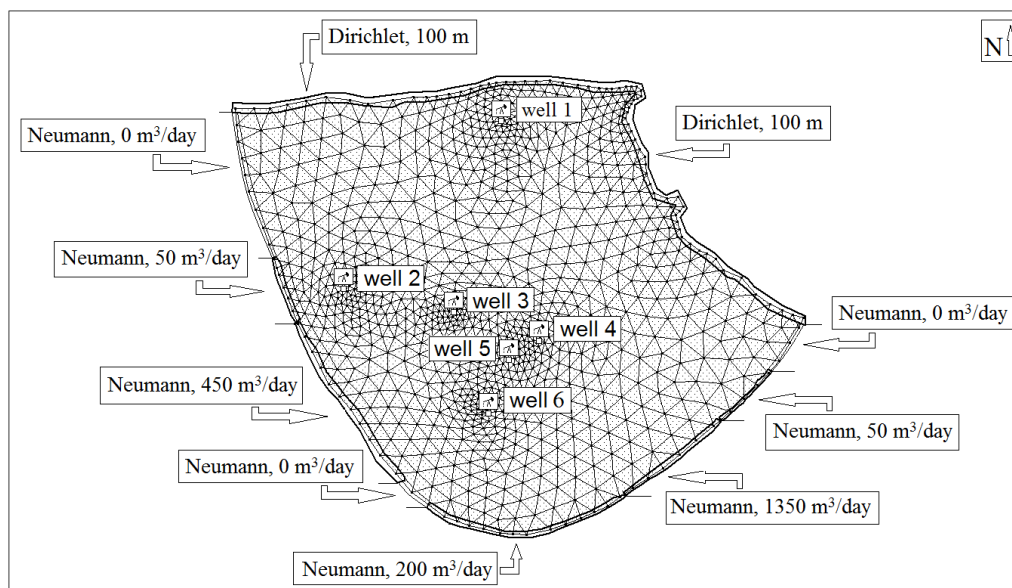
όπου j -οστή είναι η νέα γεώτρηση που εμφανίζουμε σε κάθε περίπτωση. Όσον αφορά τη διάταξη των 6 πλέον ενεργών γεωτρήσεων, αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά σε καθεμιά από τις περιπτώσεις μελέτης.

7.8.1 Summer_VIa: Καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης

Στην πρώτη από τις δύο αυτές διερευνητικές περιπτώσεις επιλέγουμε η νέα υποθετική γεώτρηση να είναι τοποθετημένη σε μια περιοχή δυτικά της πρώην 2ης γεώτρησης του υδροφορέα. Επιλέξαμε να τοποθετήσουμε τη νέα γεώτρηση στη συγκεκριμένη θέση, επειδή σύμφωνα με τα αριθμητικά και γραφικά αποτελέσματα των προηγούμενων περιπτώσεων, το υφάλμυρο μέτωπο καθώς κινείται στο εσωτερικό του υδροφορέα, δεν πλησιάζει ιδιαίτερα την πρώην γεώτρηση No 2, με συνέπεια η συγκεκριμένη περιοχή να μπορεί να θεωρηθεί ως ασφαλής από το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Τοποθετούμε λοιπόν εκεί την υποθετική νέα γεώτρηση και μελετάμε εκ νέου τη συμπεριφορά του υφάλμυρου μετώπου κατά τη δυνατόν μεγιστοποίηση των αντλήσεων του υδροφορέα. Στο Σχήμα 7.22 παρουσιάζουμε αναλυτικά τις θέσεις των 6 ενεργών γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα ταυτόχρονα με τις παρούσες χρησιμοποιούμενες συνοριακές συνθήκες.

Για την εισαγωγή της νέας γεώτρησης στη θέση No 2 κατασκευάζουμε εντός του υδροφορέα ένα νέο πλέγμα 1940 τριγωνικών στοιχείων και 1032 κόμβων, με επιλεγμένη πυκνωση αυτών πάλι γύρω από τις περιοχές των γεωτρήσεων. Ο συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC αναλαμβάνει την κατασκευή του ζητούμενου βέλτιστου πλάνου αντλήσεων, με τα αποτελέσματα ενός τυπικού ελέγχου 500 επαναλήψεων να παρουσιάζονται παρακάτω στους Πίνακες 7.12 και 7.13.

Όσον αφορά συνολικά τις μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές δυνατότητες άντλησης



Σχήμα 7.22: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Πλαϊνές ανατροφοδοτήσεις (συνοριακές συνθήκες) και θέσεις των 6 ενεργών γεωτρήσεων εντός του διακριτοποιημένου πλέγματος του υδροφορέα.

Πίνακας 7.11: Μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές δυνατότητες άντλησης στις 6 θέσεις ενεργών γεωτρήσεων.

Γεώτρηση j	1	2	3	4	5	6
Q_j (m^3/day)	1800.00	2520.00	2520.00	576.00	2520.00	146.00
\underline{Q}_j (m^3/day)	540.00	756.00	756.00	172.80	756.00	43.80

των γεωτρήσεων αυτών, θεωρούμε ως αμετάβλητες τις τιμές που χρησιμοποιήσαμε στη μελέτη της αρχικής περίπτωσης Summer_V, με την προσθήκη της νέας γεώτρησης στη θέση No 2. Στον Πίνακα 7.11 παρουσιάζουμε αναλυτικά αυτές τις μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές τιμές.

Ο μέσος χρόνος ολοκλήρωσης μιας επανάληψης ισούται στη συγκεκριμένη περίπτωση με $t_{av} = 1.7861$ secs, με συνέπεια να απαιτούνται $t^{(69)} = 123.2409$ secs για την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού και $t^{(500)} = 893.0465$ secs για την ολοκλήρωση του συνολικού ελέγχου των 500 επαναλήψεων. Είναι προφανές ότι η ύπαρξη περισσότερων γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα υποχρεώνει τον επαναληπτικό αλγόριθμο να εκτελεί περισσότερους

υπολογισμούς ανά επανάληψη, να αυξάνει δηλαδή το υπολογιστικό κόστος και κατά συνέπεια τον χρόνο ολοκλήρωσης της όλης διαδικασίας.

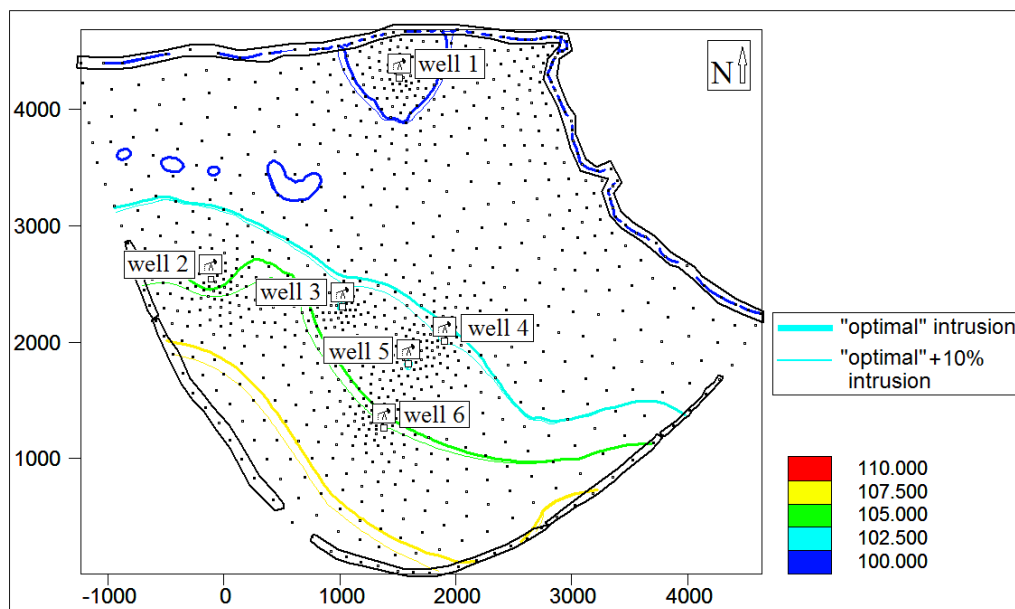
Πίνακας 7.12: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC.

Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	189	69	58
$P(Q^{(k)})$	0.9437	0.9647	0.9376	0.9416
$Q_1^{(k)}$ (m^3/day)	1715.94	1710.00	1774.93	1790.87
$Q_2^{(k)}$ (m^3/day)	2375.00	2499.29	2070.60	2111.83
$Q_3^{(k)}$ (m^3/day)	1009.80	1099.91	1021.42	1016.55
$Q_4^{(k)}$ (m^3/day)	181.44	227.50	239.95	286.30
$Q_5^{(k)}$ (m^3/day)	2218.17	2504.28	2265.70	2247.74
$Q_6^{(k)}$ (m^3/day)	138.54	114.34	135.09	140.54
$S(Q^{(k)})$ (m^3/day)	7638.89	8155.31	7507.69	7593.82
$t^{(k)}$ (secs)	893.0465	337.5729	123.2409	103.5938

Πίνακας 7.13: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX-PTC που περιγράφεται στον Πίνακα 7.12.

Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} penalty$	5%	147	7
$Q_{min}^{local} penalty$	5%	32	5
$Q_{total} penalty$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} penalty$	5%	255	20
$x_{movement}^{secondary} penalty$	5%	688	52

Η γεώτρηση No 1 εξακολουθεί να είναι υφαλμυρισμένη και το νερό το οποίο αντλείται από αυτήν να είναι ακατάλληλο για χρήση. Ωστόσο, διατηρώντας την προσέγγιση που εφαρμόσαμε και στην περίπτωση των 5 ενεργών γεωτρήσεων, επιτρέπουμε στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να προτείνει τιμές αντλήσεων και για την γεώτρηση αυτή, με μόνο περιορισμό οι τιμές της να παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων του Πίνακα 7.11.

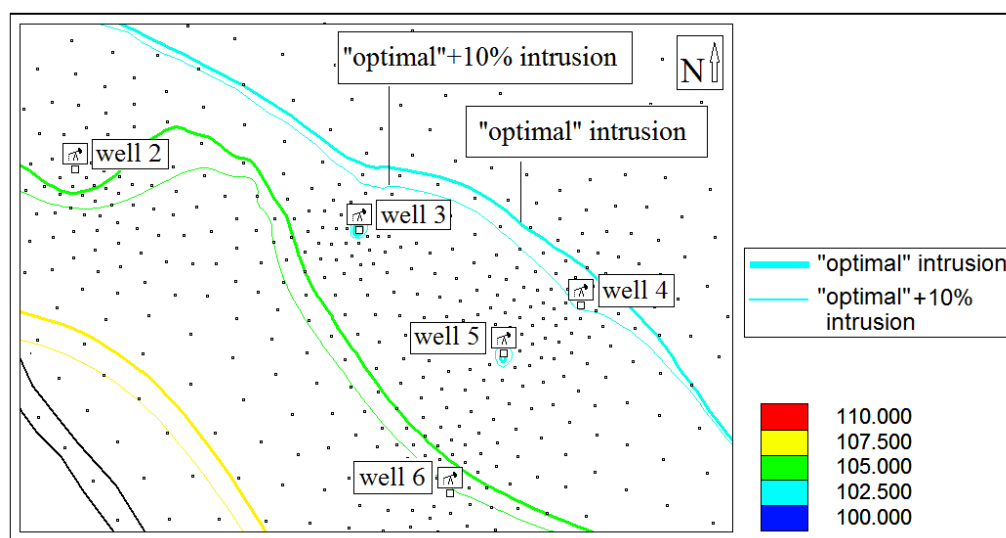


Σχήμα 7.23: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις αλλά και τις βέλτιστες τεχνητά προσαυξημένες κατά 10%.

Οι τιμές αντλήσεων που υπολογίζει ο αλγόριθμος στην 58η επανάληψη είναι οι βέλτιστες τιμές έως την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού και αντιστοιχούν σε συνολικό όγκο γλυκού νερού ίσο με $S(Q^{(58)}) - Q_1^{(58)} = 7593.82 - 1790.87 = 5802.95 \text{ m}^3/\text{day}$. Αυτή η ποσότητα γλυκού νερού είναι κατά $5802.95 - 4541.63 = 1261.32 \text{ m}^3/\text{day}$ και 27.77% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη ποσότητα που αντλείται χρησιμοποιώντας τις 5 ενεργές γεωτρήσεις της περίπτωσης Summer_V. Η διαφορά αυτή γίνεται μεγαλύτερη αν αντίστοιχα συγκρίνουμε τις ολικά βέλτιστες τιμές των δύο περιπτώσεων. Πράγματι ενώ στη Summer_V ο συνολικός βέλτιστος όγκος γλυκού νερού ήταν ίσος με $6373.40 - 1787.02 = 4586.38 \text{ m}^3/\text{day}$, τώρα η αντίστοιχη τιμή ισούται με $8155.31 - 1710.00 = 6445.31 \text{ m}^3/\text{day}$, μια ιδιαίτερα σημαντική διαφορά δηλαδή των $6445.31 - 4586.38 = 1858.93 \text{ m}^3/\text{day}$ και ποσοστού 40.53%.

Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι το βέλτιστο πλάνο αντλήσεων που προτείνεται στην παρούσα περίπτωση δεν προσεγγίζει εκείνο της Summer_V. Στην ουσία δηλαδή δεν πρόκειται για μια επανάληψη του προηγούμενου σχεδίου με τον επιπλέον όγκο νερού να αποδίδεται μονάχα στη νέα γεώτρηση. Πιο συγκεκριμένα, εξαιρώντας από τη σύγκριση τις τιμές άντλησης

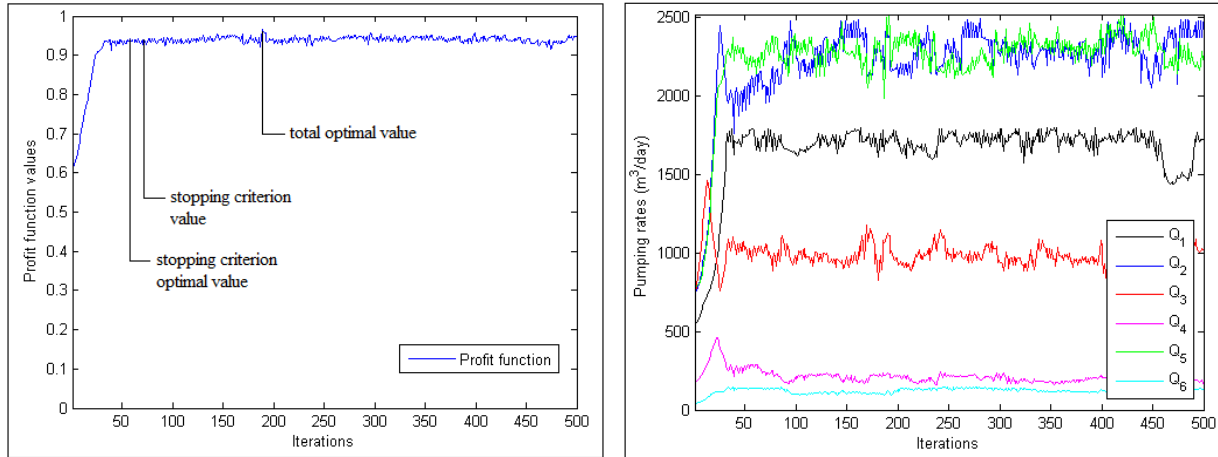
της γεώτρησης No 1, παρατηρούμε ότι οι τιμές άντλησης στη 2η και 3η γεώτρηση του σεναρίου Summer_V μειώνονται περίπου κατά $270 \text{ m}^3/\text{day}$ και $330 \text{ m}^3/\text{day}$ αντίστοιχα σε σχέση με τις αντλήσεις των ίδιων γεωτρήσεων στο σενάριο Summer_VIa, όπου πλέον χαρακτηρίζονται ως 3η και 4η γεώτρηση αντίστοιχα. Μειώνεται επίσης κατά $138.09 - 114.34 = 23.75 \text{ m}^3/\text{day}$ και ποσοστό 20.77% η βέλτιστη τιμή άντλησης της πρώην 5ης και νυν 6ης γεώτρησης του υδροφορέα. Πρόκειται δηλαδή για ποιοτικώς διαφορετικά σχέδια αντλήσεων.



Σχήμα 7.24: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Μεγέθυνση του Σχήματος 7.23.

Η εφαρμογή του κριτηρίου ολοκλήρωσης της διαδικασίας βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε, όπως αναφέραμε και προηγουμένως στην 69η επανάληψη, με συνολικό όγκο ωφέλιμου νερού ίσο με $S(Q^{(69)}) - Q_1^{(69)} = 7507.69 - 1774.93 = 5732.76 \text{ m}^3/\text{day}$, σύμφωνα με τον Πίνακα 7.12. Οι υπόλοιπες προτεινόμενες λύσεις της επαναληπτικής διαδικασίας κυμαίνονται στα ίδια πλαίσια, όπως μπορούμε να δούμε από τα γραφήματα της αντικειμενικής συνάρτησης $P = P(Q)$ και των επιμέρους αντλήσεων αντίστοιχα (Σχήματα 7.25α' και 7.25β'). Ωστόσο, εξαιτίας του στοχαστικού χαρακτήρα της όλης διαδικασίας είναι δυνατό η επίδραση του θορύβου να οδηγήσει έστω και για λίγες επαναλήψεις σε περιοχές αποδεκτών πάντοτε τιμών, με σημαντική διαφορά όμως από τις προηγούμενες. Κάτι ανάλογο συνέβη λοιπόν και στη συγκεκριμένη περίπτωση στην 189η επανάληψη, όπου η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνοντας

ολικά μέγιστη τιμή ίση με $P(Q^{(189)}) = 0.9647$, κατασκευάζει ένα σετ λύσεων με συνολικό όγκο ωφέλιμου νερού ίσο με $S(Q^{(189)}) - Q_1^{(189)} = 8155.31 - 1710.00 = 6445.31 \text{ m}^3/\text{day}$. Η διαφορά των δύο αυτών προτεινόμενων σχεδίων άντλησης στην 69η και στην 189η επανάληψη (χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τον όγκο υφάλμυρου νερού της γεώτρησης No 1) είναι ίση με $6445.31 - 5732.76 = 712.55 \text{ m}^3/\text{day}$. Παρατηρώντας δε τις επιμέρους αντλήσεις της ολικά βέλτιστης λύσης, βλέπουμε ότι ο επιπλέον όγκος νερού κατανέμεται στις γεωτρήσεις No 2, 3 και 5, γεγονός το οποίο αποτυπώνεται στα σχετικά γραφήματα τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης όσο και των επιμέρους αντλήσεων.



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Απαιτούνται περίπου 60-70 επανάληψεις έτσι ώστε η αντικειμενική συνάρτηση να οδηγηθεί σε μια περιοχή ισοδύναμων τοπικών μεγίστων.

(β') Αντλήσεις των 6 ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα. Η μόνη παρατηρούμενη μεταβολή στις επιμέρους αντλήσεις έπειτα από την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού, είναι η εναλλαγή των προτεινόμενων τιμών άντλησης μεταξύ της 2ης και της 5ης γεώτρησης.

Σχήμα 7.25: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIa. Συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC 500 επανάληψεων.

Ο μέγιστος δυνατός όγκος αντλήσεων χρησιμοποιώντας και τις 6 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα ισούται με $\sum_{j=1}^6 \bar{Q}_j = 10082.00 \text{ m}^3/\text{day}$, ενώ υπό την ισχύ του βέλτιστου πλάνου αντλήσεων στην 189η επανάληψη ο όγκος του αντλούμενου γλυκού νερού ισούται με $\sum_{j=1}^6 Q_{j,fresh}^{(189)} = 6445.31 \text{ m}^3/\text{day}$. Λαμβάνουμε φυσικά υπόψη ότι $Q_{1,fresh}^{(189)} = 0 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_{j,fresh}^{(189)} = Q_j^{(189)}$, για $j \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$. Επομένως, ο συντελεστής αποδοτικότητας

του βέλτιστου διαχειριστικού πλάνου σε αυτό το σενάριο αντλήσεων ισούται με $a_{eff}^{(189)} = \frac{6445.31}{10082.00} 100\% = 63.93\%$. Δηλαδή, το 63.93% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα.

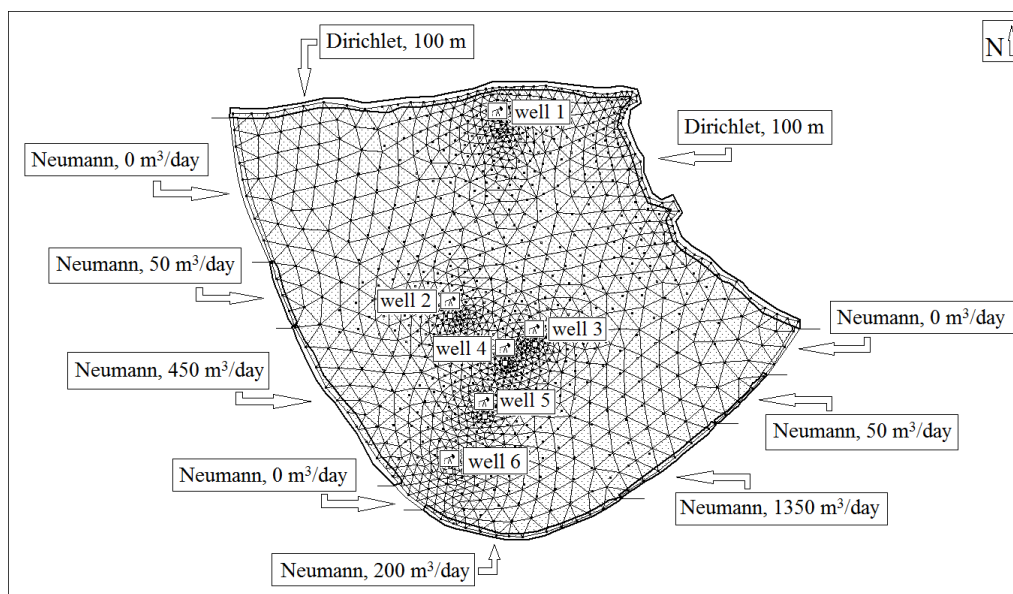
Το πλήθος ενεργοποιήσεων των 5 τύπων κυρώσεων ελέγχου που εφαρμόζουμε σε όλη τη διάρκεια του ελέγχου των 500 επαναλήψεων παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 7.13. Αν θέλαμε επιγραμματικά να κάνουμε ένα σχόλιο για τα αποτελέσματα αυτά, θα λέγαμε ότι το μεγάλο πλήθος εμφανίσεων του $x_{movement}^{secondary}$ *penalty* οφείλεται στις συνεχόμενες προσπάθειες του ALOPEX να αναχαιτίσει την κίνηση του υφάλμυρου μετώπου, εφαρμόζοντας όμως κυρώσεις σε όλες τις γεωτρήσεις του υδροφορέα και όχι μονάχα σε αυτή που άμεσα κινδυνεύει κάθε φορά.

Υπό τη χρήση τώρα του προτεινόμενου ως βέλτιστου πλάνου αντλήσεων μπορούμε να παρατηρήσουμε στα Σχήματα 7.23 και 7.24, ότι το υφάλμυρο μέτωπο προσεγγίζει χωρίς να απειλεί τις γεωτρήσεις Νο 3 και 4. Το γεγονός αυτό όμως δεν εξακολουθεί να ισχύει με την εφαρμογή της τεχνητής και ομοιόμορφης αύξησης του 10% σε όλες τις αντλήσεις, με συνέπεια το όριο ασφαλείας των $d_s = 180$ m να παραβιάζεται και η γεώτρηση Νο 4 να υπόκειται σε πλήρη υφαλμύριση. Η νέα γεώτρηση που εμείς τοποθετήσαμε υποθετικά εντός του υδροφορέα, η γεώτρηση Νο 2, όπως είναι σαφές από τα ίδια Σχήματα, δεν αντιμετωπίζει κάποιο κίνδυνο προσέγγισης από το υφάλμυρο μέτωπο. Επομένως ήταν σωστή η επιλογή της συγκεκριμένης θέσης τοποθέτησής της τόσο ως προς την χαμηλή επικινδυνότητα της περιοχής, όσο και ως προς το γεγονός της δυνατότητας εκμετάλλευσης μεγαλύτερου όγκου αντλούμενου νερού από το συγκεκριμένο υδροφορέα.

7.8.2 Summer_VIb: Καλοκαιρινό σενάριο ανατροφοδότησης

Εξετάζουμε τέλος ένα εναλλακτικό σενάριο διαχείρισης του υδροφορέα, υπό την ισχύ ενός προφίλ 6 ενεργών γεωτρήσεων σε συνδυασμό με το καλοκαιρινό σχέδιο ανατροφοδότησης, που περιγράψαμε προηγουμένως. Η επιλογή της περιοχής όπου τοποθετείται η υποθετική νέα γεώτρηση γίνεται, όπως εξηγήσαμε στην αρχή της συγκεκριμένης ενότητας, με τέτοιο τρόπο ώστε αφενός η επιλεγμένη περιοχή να μην αντιμετωπίζει τον κίνδυνο υφαλμύρισης και αφετέρου η ίδια η γεώτρηση να συναντά πετρώματα με διαφορετικές υδραυλικές ιδιότητες,

ώστε να αποτυπωθεί η επίδρασή τους στα αποτελέσματα της άντλησης. Έτσι, ενώ στην περίπτωση Summer_VIa προηγουμένως η υποθετική νέα γεώτρηση τοποθετήθηκε σε μια περιοχή με τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας ίση με $K = 5.20 \text{ m/day}$, τώρα η νέα γεώτρηση επιλέγουμε να βρίσκεται στο νοτιότερο άκρο του υδροφορέα (Σχήμα 7.26), σε μια περιοχή υδραυλικής αγωγιμότητας ίσης με $K = 12.96 \text{ m/day}$, σύμφωνα πάντοτε με το Σχήμα 7.3 διάταξης των διαφορετικών πετρωμάτων εντός του υδροφορέα. Χαρακτηρίζουμε τη γεώτρηση αυτή ως No 6 και της επιτρέπουμε να λειτουργεί με ονομαστικές τιμές άντλησεων ίσες με $\bar{Q}_6 = 2520.00 \text{ m}^3/\text{day}$ και $\underline{Q}_6 = 0.30\bar{Q}_6 = 756.00 \text{ m}^3/\text{day}$ αντίστοιχα.



Σχήμα 7.26: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Πλαϊνές ανατροφοδοτήσεις (συνοριακές συνθήκες) και θέσεις των 6 ενεργών γεωτρήσεων εντός του διακριτοποιημένου πλέγματος του υδροφορέα.

Η εφαρμογή του καλοκαιρινού πλάνου ανατροφοδοτήσεων στην περιοχή αντιστοιχεί σε πλαϊνές εισροές νερού (που θυμίζουμε ότι χρησιμοποιούνται ως συνοριακές συνθήκες στο πρόβλημα που μελετάμε) ταυτόσημες με αυτές που χρησιμοποιήσαμε σε προηγούμενες περιπτώσεις, περιγράφονται δε αναλυτικά στο Σχήμα 7.26. Επίσης, η περιοχή του υδροφορέα της Χερσονήσου διακριτοποιήθηκε εκ νέου με στόχο την αποτελεσματικότερη εφαρμογή του κώδικα PTC στο νέο προφίλ των 6 γεωτρήσεων, χρησιμοποιώντας 1919 τριγωνικά χωρία και

1022 κόμβους. Προφανώς, περιμετρικά των θέσεων των ενεργών γεωτρήσεων επιλέχθηκε η πύκνωση του χρησιμοποιούμενου πλέγματος, με στόχο την ακριβέστερη απεικόνιση της συμπεριφοράς της κινούμενης υφάλμυρης σφήνας στις περιοχές αυτές.

Πίνακας 7.14: Μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές δυνατότητες αντλήσεων στις 6 περιοχές ενεργών γεωτρήσεων.

Γεώτρηση j	1	2	3	4	5	6
\overline{Q}_j (m^3/day)	1800.00	2520.00	576.00	2520.00	146.00	2520.00
\underline{Q}_j (m^3/day)	540.00	756.00	172.80	756.00	43.80	756.00

Πίνακας 7.15: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Αποτελέσματα τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων του συνδυαστικού αλγορίθμου ALOPEX-PTC.

Παράμετροι ελέγχου	Τιμές τελικής επανάληψης	Τιμές ολικού μεγίστου	Τιμές κριτηρίου τερματισμού	Βέλτιστες τιμές έως το κριτήριο τερματισμού
k (# επαναλήψεων)	500	256	63	35
$P(\mathbf{Q}^{(k)})$	0.8915	0.9307	0.9107	0.9174
$Q_1^{(k)}$ (m^3/day)	1526.98	1710.00	1710.00	1710.00
$Q_2^{(k)}$ (m^3/day)	900.28	1263.83	1243.65	1303.94
$Q_3^{(k)}$ (m^3/day)	185.01	181.44	181.44	194.16
$Q_4^{(k)}$ (m^3/day)	1954.32	1728.71	1711.83	1805.58
$Q_5^{(k)}$ (m^3/day)	105.44	87.26	83.24	81.42
$Q_6^{(k)}$ (m^3/day)	1979.20	2393.37	2054.27	2012.97
$S(\mathbf{Q}^{(k)})$ (m^3/day)	6651.23	7364.61	6984.42	7108.08
$t^{(k)}$ (secs)	978.4195	500.9408	123.2784	68.488

Οι ονομαστικές μέγιστες και ελάχιστες τιμές αντλήσεων συνολικά για τις 6 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 7.14, ενώ τα αποτελέσματα μιας τυπικής προσομοίωσης 500 επαναλήψεων ακολουθούν.

Η γεώτρηση Νο 1 εξακολουθεί να προσφέρει μονάχα υφάλμυρο νερό στο συνολικό πλάνο αντλήσεων του υδροφορέα. Ως γεώτρηση λοιπόν υπό καθεστώς υφαλμύρισης συμμετέχει στην κατασκευή του συνολικού πλάνου αντλήσεων, αλλά δεν λαμβάνουμε υπόψη τον όγκο υφάλμυρου νερού που προσφέρει στην κοινότητα. Οι μόνοι περιορισμοί που επιβάλλονται από

τον συνδυαστικό αλγόριθμο ALOPEX-PTC στη συγκεκριμένη γεώτρηση είναι, όπως εξηγήσαμε και προηγουμένως, οι τιμές των αντλήσεων της να παραμένουν εντός των μέγιστων και ελάχιστων επιτρεπτών ορίων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.14.

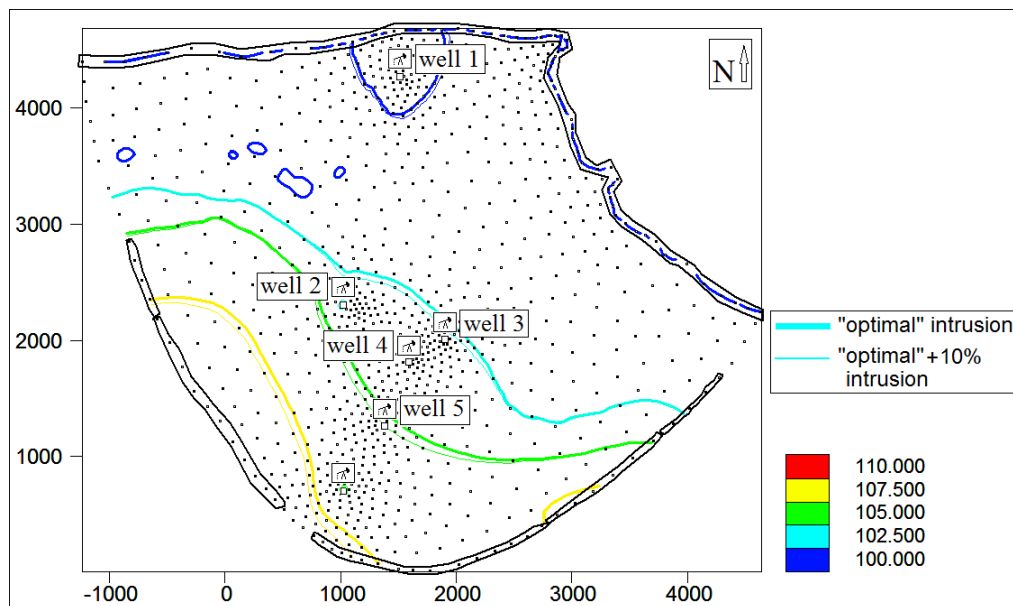
Πίνακας 7.16: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Διαχείριση κυρώσεων ελέγχου στα πλαίσια της προσομοίωσης ALOPEX-PTC που περιγράφεται στον Πίνακα 7.15.

Κυρώσεις ελέγχου ALOPEX	Ποσοστό επίδρασης	Πλήθος ενεργοποιήσεων	Πλήθος ενεργοποιήσεων έως το κριτήριο τερματισμού
$Q_{max}^{local} \text{ penalty}$	5%	86	3
$Q_{min}^{local} \text{ penalty}$	5%	62	3
$Q_{total} \text{ penalty}$	5%	0	0
$x_{movement}^{primary} \text{ penalty}$	5%	258	6
$x_{movement}^{secondary} \text{ penalty}$	5%	788	4

Ο συνολικός όγκος ωφέλιμου γλυκού νερού που προσφέρει αυτή η διάταξη των 5+1 γεωτρήσεων (5 γεωτρήσεις οι οποίες αντλούν γλυκό νερό και 1 που αντλεί υφάλμυρο) ισούται στην 63η επανάληψη, όπου και ενεργοποιείται το κριτήριο τερματισμού, με $S(Q^{(63)}) - Q_1^{(63)} = 6984.42 - 1710.00 = 5274.42 \text{ m}^3/\text{day}$ σε αντίστοιχο χρόνο εκτέλεσης ίσο με $t^{(63)} = 123.2784 \text{ secs}$. Έπειτα, το βέλτιστο πλάνο αντλήσεων μέχρι την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού αντιστοιχεί σε $S(Q^{(35)}) - Q_1^{(35)} = 7108.08 - 1710.00 = 5398.08 \text{ m}^3/\text{day}$, προσφέροντας $5398.08 - 5274.42 = 123.668 \text{ m}^3/\text{day}$ παραπάνω, ικανοποιούμενο στην 35η επανάληψη.

Ο συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC κατασκευάζει στην 256η επανάληψη την ολικά βέλτιστη λύση, ανάμεσα στις λύσεις που κατασκευάζονται συνολικά στις 500 επαναλήψεις αυτού του τυπικού ελέγχου. Σύμφωνα με τη λύση αυτή η διαθέσιμη ποσότητα γλυκού νερού από την άντληση των 5+1 ενεργών γεωτρήσεων ισούται με $S(Q^{(256)}) - Q_1^{(256)} = 7364.61 - 1710.00 = 5654.61 \text{ m}^3/\text{day}$.

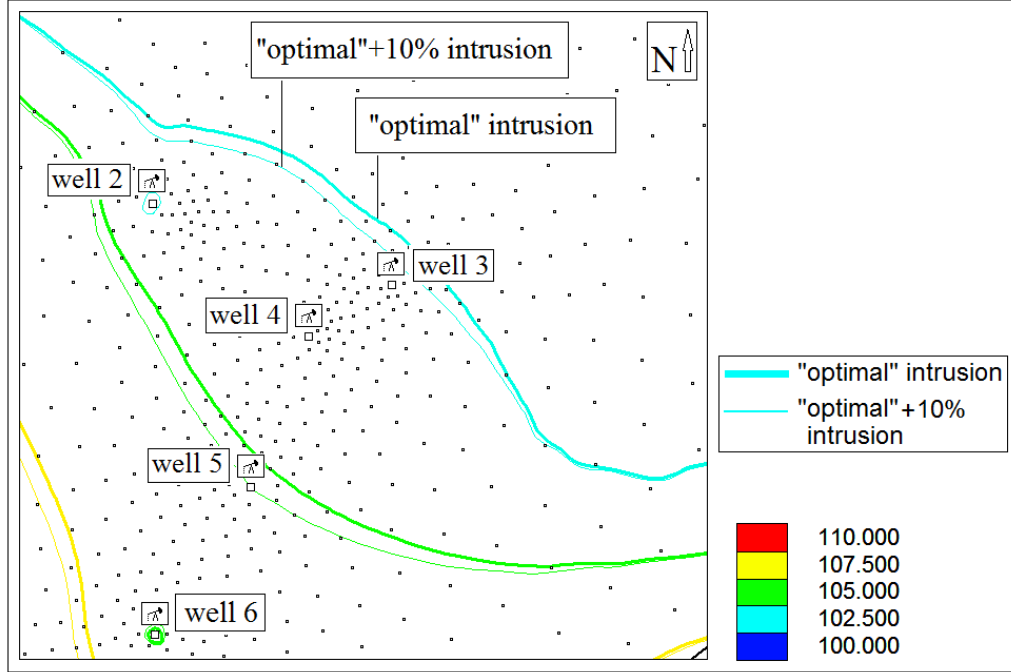
Συγκρίνουμε στη συνέχεια τα αποτελέσματα των δύο συναφών περιπτώσεων Summer_VIa και Summer_VIb, προσπαθώντας να αιτιολογήσουμε την υπεροχή της επιλογής της μίας θέσεως άντλησης υπέρ της άλλης. Πράγματι, η επιλογή της θέσεως στην περίπτωση Summer_VIb παρατηρούμε ότι αποδίδει μεν συνολικά μεγαλύτερο όγκο γλυκού νερού σε σχέση με την



Σχήμα 7.27: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Ισοϋψείς καμπύλες απεικόνισης των μετώπων της υφάλμυρης σφήνας χρησιμοποιώντας τις βέλτιστες αντλήσεις αλλά και τις βέλτιστες τεχνητά προσ αυξημένες κατά 10%.

αρχική περίπτωση Summer_V, αλλά δεν υπερσχύει ταυτόχρονα της προηγούμενης περίπτωσης των 6 γεωτρήσεων αντίστοιχα. Η ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού συμβαίνει σχεδόν ταυτόχρονα και στις δύο αυτές περιπτώσεις, αφού με μέσο χρόνο ολοκλήρωσης κάθε επανάληψης ίσο με $t_{av} = 1.9568 \text{ secs}$ απαιτούνται 63 επαναλήψεις και $t^{(63)} = 123.2784 \text{ secs}$ για την ενεργοποίηση του κριτηρίου τερματισμού, ενώ στην Summer_VIa αντίστοιχα 69 επαναλήψεις σε χρόνο ίσο με $t^{(69)} = 123.2409 \text{ secs}$.

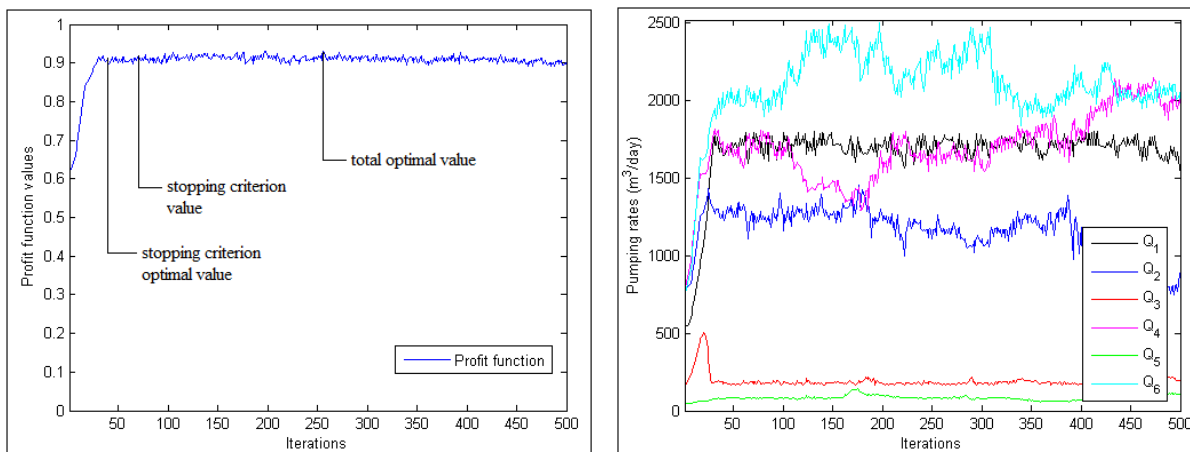
Ως προς τις ολικά βέλτιστες λύσεις όπως αυτές προτείνονται στις περιπτώσεις Summer_VIa και Summer_VIb, παρατηρούμε ότι στην τελευταία υπάρχει μείωση του συνολικού διαθέσιμου όγκου γλυκού νερού ίση με $6445.31 - 5654.61 = 790.70 \text{ m}^3/\text{day}$, που ισοδυναμεί με μείωση 12.27% επί της συνολικής βέλτιστης άντλησης της Summer_VIa. Παρατηρώντας επίσης τα προφίλ αυτών των δύο λύσεων διαπιστώνουμε κατ' αρχάς ότι και στις δύο περιπτώσεις η νέα γεώτρηση που κατασκευάσαμε αντλεί σχεδόν με το μέγιστο των ονομαστικών δυνατοτήτων της, ιδίως στη Summer_VIa. Οι υπόλοιπες γεωτρήσεις όμως υποχρεώνονται στη Summer_VIb να μειώσουν τις επιμέρους αντλήσεις τους με αθροιστικό



Σχήμα 7.28: Κάτοψη παράκτιου υδροφορέα Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Μεγέθυνση του Σχήματος 7.27.

ποσό τα $790.70 \text{ m}^3/\text{day}$ που υπολογίσαμε προηγουμένως. Διακρίνουμε θα λέγαμε με μια γρήγορη ανάγνωση των αποτελεσμάτων, μια πιο αποτελεσματική, από άποψη συνολικής ποσότητας αντλήσεων, επιλογή τοποθέτησης της νέας γεώτρησης στη θέση που περιγράφεται στην περίπτωση Summer_VIa. Φυσικά για τον πλήρη καθορισμό από Μαθηματικής σκοπιάς των περιοχών εντός του υδροφορέα οι οποίες είναι προτιμητέες για την κατασκευή νέων ενεργών γεωτρήσεων, απαιτείται πλήρης στατιστικός έλεγχος δοκιμών των θέσεων αυτών, εργασία την οποία επιφυλασσόμαστε να μελετήσουμε στο άμεσο μέλλον.

Ο μέγιστος δυνατός όγκος αντλήσεων χρησιμοποιώντας και τις 6 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα ισούται με $\sum_{j=1}^6 \bar{Q}_j = 10082.00 \text{ m}^3/\text{day}$, ενώ υπό την ισχύ του βέλτιστου πλάνου αντλήσεων στην 256η επανάληψη ο όγκος του αντλούμενου γλυκού νερού ισούται με $\sum_{j=1}^6 Q_{j,fresh}^{(256)} = 5654.61 \text{ m}^3/\text{day}$. Ισχύει δηλαδή ότι $Q_{1,fresh}^{(256)} = 0 \text{ m}^3/\text{day}$ και $Q_{j,fresh}^{(256)} = Q_j^{(256)}$, για $j \in \{2, 3, 4, 5, 6\}$. Επομένως, ο συντελεστής αποδοτικότητας του βέλτιστου διαχειριστικού πλάνου σε αυτό το σενάριο αντλήσεων ισούται με $a_{eff}^{(256)} = \frac{5654.61}{10082.00} 100\% =$



(α') Αντικειμενική συνάρτηση $P(Q)$. Εικόνα σύγκλισης της διαδικασίας βελτιστοποίησης έπειτα από περίπου 60 επαναλήψεις σε μια περιοχή ισοδύναμων βέλτιστων λύσεων.

(β') Αντλήσεις των 6 ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα. Έχοντας σταθεροποιήσει τις τιμές άντλησης της 3ης και της 5ης γεώτρησης, ο αλγόριθμος υπό την επίδραση πάντοτε του στοχαστικού όρου θορύβου, προτείνει ισοδύναμα σύνολα βέλτιστων λύσεων, όπου εξετάζονται διαφορετικοί συνδυασμοί άντλησης από τη 2η, την 4η και την 6η γεώτρηση.

Σχήμα 7.29: Υδροφορέας Χερσονήσου, περίπτωση Summer_VIb. Συνδυαστικός αλγόριθμος ALOPEX-PTC 500 επαναλήψεων.

56.09%. Δηλαδή, το 56.09% του συνολικού δυνατού όγκου αντλήσεων μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα.

Το πλήθος ενεργοποιήσεων των κυρώσεων ελέγχου (Πίνακας 7.16) της διαδικασίας βελτιστοποίησης αντιπροσωπεύει την προσπάθεια του αλγορίθμου να περιορίσει τις προτεινόμενες τιμές αντλήσεων εντός των μέγιστων και ελάχιστων ονομαστικών τιμών του Πίνακα 7.14, και ταυτόχρονα, χρησιμοποιώντας τις αντλήσεις αυτές να διατηρήσει το υφάλμυρο μέτωπο σε απόσταση ασφαλείας περιμετρικά των γεωτρήσεων του υδροφορέα. Ιδιαίτερη αναφορά οφείλουμε να κάνουμε στη δραστηριότητα του $x_{movement}^{secondary} penalty$, όπου το πλήθος ενεργοποιήσεων του ίσο με 788 φορές αντιπροσωπεύει την προσπάθεια του αλγορίθμου να διαμοιράσει τις κυρώσεις προσέγγισης σε όλες τις γεωτρήσεις άντλησης γλυκού νερού του υδροφορέα (καμία δηλαδή εφαρμογή κυρώσεων προσέγγισης στην υφαλμυρισμένη γεώτρηση No 1). Ενώ δηλαδή με την εφαρμογή της κυρώσεως ελέγχου $x_{movement}^{primary} penalty$ μειώνονται οι τρέχουσες

τιμές αντλήσεων μονάχα στις γεωτρήσεις που άμεσα κινδυνεύουν, η εφαρμογή των κυρώσεων $x_{movement}^{secondary}$ *penalty* προσπαθεί να αναχαιτίσει το μέτωπο μειώνοντας τη δραστηριότητες αντλήσεων στις υπόλοιπες, θεωρητικά ασφαλείς, γεωτρήσεις του υδροφορέα.

Στις γραφικές παραστάσεις των Σχημάτων 7.27 και 7.28 παρατηρούμε τις διαδοχικές θέσεις του υφάλμυρου μετώπου υπό τη ισχύ αρχικά των ολικά βέλτιστων τιμών άντλησης και έπειτα υπό τις ίδιες τιμές προσαυξημένες τεχνητά κατά 10%. Είναι σαφές ότι οι βέλτιστες αντλήσεις προσφέρουν ασφάλεια κατ' αρχάς στη γεώτρηση No 3 και έπειτα στις υπόλοιπες του υδροφορέα, κάτι το οποίο δεν συμβαίνει και με τις τεχνητά προσαυξημένες κατά 10% τιμές. Το μέτωπο βρίσκεται πολύ κοντά στην 3η γεώτρηση προσδίδοντας σε αυτή άμεσο κίνδυνο υφαλμύρισης.

Η γραφική παράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης $P = P(Q)$ (Σχήμα 7.29α') παρουσιάζει συγκλίνουσα συμπεριφορά από την 60η περίπου επανάληψη και έπειτα, όχι τόσο ομοιόμορφη θα λέγαμε σε σχέση με το αντίστοιχο γράφημα της περίπτωσης Summer_VIa. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην προσπάθεια του αλγορίθμου να εξετάσει και νέα σύνολα λύσεων με εντελώς διαφορετικό προφίλ από τα προηγούμενα. Ωστόσο, οι λύσεις αυτές είναι ισοδύναμες μεταξύ τους ως προς την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης στη οποία αντιστοιχούν. Όπως χαρακτηριστικά παρατηρούμε και στο Σχήμα 7.29β' τα διαφορετικά αυτά προφίλ λύσεων προκύπτουν από τη μεταβαλλόμενη συμπεριφορά της 2ης, 4ης και 6ης γεώτρησης αντίστοιχα.

7.9 Υδροφορέας Χερσονήσου. Συμπεράσματα

Ο υδροφορέας στο Δήμο Χερσονήσου στο βόρειο τμήμα του Ελληνικού νησιού της Κρήτης επιλέχθηκε στη συγκεκριμένη ενότητα ως ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα παράκτιου, ελεύθερου και μη ομοιογενούς υδροφορέα, που βρίσκεται άμεσα αντιμέτωπος με το σοβαρό πρόβλημα της υφαλμύρισης. Η παρούσα κατάσταση διαχείρισης των αντλήσεων γλυκού νερού χρησιμοποιώντας τις 5 επίσημες γεωτρήσεις στο εσωτερικό του, μπορεί να χαρακτηριστεί ως άκρως αναποτελεσματική και επικίνδυνη για τη βιωσιμότητα του ίδιου του υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα, 3 από τις 5 γεωτρήσεις αυτού βρίσκονται υπό καθεστώς υφαλμύρισης, με

συνέπεια η συνολική απόδοση του υδροφορέα να είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Σύμφωνα με το χρησιμοποιούμενο πλάνο διαχείρισης αυτών των αντλήσεων μόλις $2666.00 \text{ m}^3/\text{day}$ γλυκού νερού αποδίδονται στην τοπική κοινότητα από το συνολικό αντλούμενο όγκο των $7562.00 \text{ m}^3/\text{day}$. Οι αντλήσεις αυτές αντιστοιχούν σε έναν συντελεστή αποδοτικότητας ίσο με 35.26%, γεγονός το οποίο καθιστά επιτακτική την ανάγκη βελτιστοποίησης του συνολικού διαχειριστικού πλάνου του υδροφορέα.

Πίνακας 7.17: Παράχτιος υδροφορέας Χερσονήσου. Συγκριτική παρουσίαση των διαχειριστικών πλάνων άντλησης Summer_V, Summer_IV και Winter_V.

Διαχειριστικό πλάνο αντλήσεων	Summer_V	Summer_IV	Winter_V
# ενεργών γεωτρήσεων	5	4	5
# υφαλμυρισμένων γεωτρήσεων	1	0	1
k_{opt}	404	331	198
$\sum_{j=1}^M \bar{Q}_j \text{ (m}^3/\text{day)}$	7562.00	5762.00	7562.00
$\sum_{j=1}^M Q_{j,fresh}^{(k_{opt})} \text{ (m}^3/\text{day)}$	4586.38	4604.08	5707.83
$a_{eff}^{(k_{opt})}$	60.65%	79.90%	75.48%
$t^{(k_{opt})} \text{ (secs)}$	378.5076	304.5862	178.7148

Υπενθυμίζουμε ότι $\sum_{j=1}^M \bar{Q}_j$ είναι το άθροισμα των μέγιστων ονομαστικών δυνατοτήτων άντλησης όλων των ενεργών γεωτρήσεων του υδροφορέα, ενώ $\sum_{j=1}^M Q_{j,fresh}^{(k_{opt})}$ είναι το άθροισμα των αντλήσεων μονάχα γλυκού νερού στην επανάληψη k_{opt} όπου ο αλγόριθμος παρουσιάζει την ολικά βέλτιστη λύση του. Αντίστοιχα, με $a_{eff}^{(k_{opt})}$ συμβολίζουμε το συντελεστή αποδοτικότητας σε γλυκό νερό του προτεινόμενου πλάνου αντλήσεων στην ίδια επανάληψη.

Με στόχο την αποτελεσματικότερη διαχείριση των αντλήσεων του συγκεκριμένου υδροφορέα, και κατά συνέπεια την προστασία αυτού από το φαινόμενο της υφαλμύρισης, χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο στοχαστικής βελτιστοποίησης ALOPEX σε συνδυασμό με τον υβριδικό κώδικα πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών PTC. Σύμφωνα με το συνδυαστικό αυτό κώδικα, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης εντός του αναλαμβάνει την κατασκευή πλάνων άντλησης που μεγιστοποιούν την ασφαλή χρήση του υδροφορέα, λαμβάνοντας πληροφορίες για τη θέση του υφάλμυρου μετώπου στο εσωτερικό του από τον κώδικα PTC.

Η μελέτη της συνολικής απόδοσης του υδροφορέα πραγματοποιείται μέσω του ελέγχου

Πίνακας 7.18: Παράδειγμα υδροφορέας Χερσονήσου. Συγκριτική παρουσίαση των διαχειριστικών πλάνων άντλησης Summer_VIa και Summer_VIb.

Διαχειριστικό πλάνο άντλησεων	Summer_VIa	Summer_VIb
# ενεργών γεωτρήσεων	6	6
# υφαλμυρισμένων γεωτρήσεων	1	1
k_{opt}	188	256
$\sum_{j=1}^M \bar{Q}_j \text{ (m}^3/\text{day)}$	10082.00	10082.00
$\sum_{j=1}^M Q_{j,fresh}^{(k_{opt})} \text{ (m}^3/\text{day)}$	6445.31	5654.61
$a_{eff}^{(k_{opt})}$	63.93%	56.09%
$t^{(k_{opt})} \text{ (secs)}$	337.5729	500.9408

κατάλληλων σεναρίων άντλησης και ανατροφοδότησής του, τα οποία αντιστοιχούν σε ρεαλιστικές συνθήκες ροής. Επιλέγουμε έτσι τη μελέτη 5 διαδοχικών σεναρίων, μέσα από τα οποία ταυτόχρονα εξετάζουμε την επίδραση στο συνολικό πλάνο άντλησης των συνθηκών ανατροφοδότησης αλλά και την επίδραση των επιμέρους θέσεων των γεωτρήσεων στο εσωτερικό του υδροφορέα. Μπορούμε λοιπόν να παρουσιάσουμε εν συντομία τα αποτελέσματα των παραπάνω ελέγχων.

- Κατ' αρχάς η γεώτρηση No 1 βρίσκεται υπό μη αναστρέψιμο καθεστώς φυσικής υφαλμύρισης. Ακόμη δηλαδή και όταν επιβάλουμε όλες οι γεωτρήσεις του υδροφορέα να παραμείνουν ανενεργές, το μέτωπο της υφάλμυρης σφήνας έχει κατακλύσει τη συγκεκριμένη γεώτρηση και το νερό που αντλείται από αυτή είναι μη αξιοποιήσιμο ως υφάλμυρο. Αιτία, προφανώς, είναι η λανθασμένη εξ' αρχής κατασκευή της γεώτρησης πολύ κοντά στη θαλάσσια ακτογραμμή.
- Σύμφωνα με το πρώτο σενάριο ελέγχου, που το ονομάζουμε χαρακτηριστικά Summer_V, η συνολική απόδοση του υδροφορέα σε γλυκό νερό μπορεί να αυξηθεί σημαντικά σε σχέση με την υπάρχουσα κατάσταση ή ακόμη και τις λύσεις που προτάθηκαν παλαιότερα στη βιβλιογραφία. Προτείνουμε έτσι ένα πλάνο διαχείρισης των αντλήσεων του, όπου λαμβάνοντας υπόψη ότι η 1η γεώτρηση παραμένει υφαλμυρισμένη χωρίς να μπορεί να διασωθεί, ο συνολικός όγκος ωφέλιμου γλυκού νερού που μπορεί να αποδοθεί στην τοπική κοινότητα προέρχεται από τις άλλες 4 γεωτρήσεις και ισούται με

$4586.38 \text{ m}^3/\text{day}$. Το συγκεκριμένο πλάνο αντλήσεων, προτεινόμενο από τον αλγόριθμο ALOPEX-PTC, έχει συντελεστή αποδοτικότητας σε γλυκό νερό $a_{eff}^{(404)} = 60.65\%$, μεγιστοποιεί τις αντλήσεις γλυκού νερού του υδροφορέα και παράλληλα προστατεύει τις 4 από τις 5 θέσεις των ενεργών γεωτρήσεων του.

- Υπό τη συνθήκη του χειμερινού σεναρίου ανατροφοδότησης Winter_V, οι αυξημένες πλευρικές εισροές γλυκού νερού εντός του υδροφορέα παρέχουν τη δυνατότητα κατασκευής ενός πλάνου αντλήσεων ικανό να τροφοδοτήσει την τοπική κοινότητα με αυξημένες ποσότητες γλυκού νερού, συγκρινόμενο με το προηγούμενο και επίσης επιτυχημένο πλάνο αντλήσεων Summer_V. Έτσι, ο αντλούμενος όγκος γλυκού νερού από τις 5 ενεργές γεωτρήσεις του υδροφορέα ισούται πλέον με $5707.83 \text{ m}^3/\text{day}$, προερχόμενος στην ουσία από τη λειτουργία 4 εξ' αυτών, οι οποίες και παραμένουν ασφαλείς από το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Η 1η γεώτρηση παραμένει υφαλμυρισμένη χωρίς δυνατότητα διάσωσης και κατά συνέπεια συμμετοχής της στο βελτιστοποιημένο πλάνο αντλήσεων γλυκού νερού. Επίσης, ο συντελεστής αποδοτικότητας σε γλυκό νερό του συγκεκριμένου διαχειριστικού πλάνου, αναμενόμενα αυξημένος σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, ισούται με $a_{eff}^{(198)} = 75.48\%$.
- Ακολουθεί η εφαρμογή του σεναρίου Summer_IV, όπου πλέον επεμβαίνουμε στο πλήθος των ενεργών γεωτρήσεων εντός του υδροφορέα. Η γεώτρηση Νο 1 είναι υφαλμυρισμένη, χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα διάσωσής της. Έτσι, επιλέγουμε την πλήρη αδρανοποίηση αυτής. Η διαδικασία βελτιστοποίησης ελέγχοντας πλέον τη συμπεριφορά λιγότερων σε πλήθος γεωτρήσεων, αποκτά μικρότερο υπολογιστικό κόστος και ολοκληρώνεται πιο σύντομα σε σχέση με την περίπτωση Summer_V. Ταυτόχρονα, οι προσομοιώσεις που εφαρμόζουμε προτείνουν βέλτιστες στρατηγικές διαχείρισης των αντλήσεων ταυτόσημες με αυτές που παρήχθησαν κατά την αρχική Summer_V περίπτωση, με μεγαλύτερο όμως συντελεστή αποδοτικότητας σε γλυκό νερό και ίσο με $a_{eff}^{(331)} = 79.90\%$. Υπενθυμίζουμε ότι ο ρόλος του συγκεκριμένου συντελεστή είναι η εκτίμηση του ποσοστού του συνολικά μέγιστου δυνατού αντλούμενου όγκου νερού το οποίο αποδίδεται τελικά ως ωφέλιμο στην τοπική κοινότητα. Έτσι, η αδρανοποίηση της υφαλμυρισμένης 1ης γεώτρησης συνεισφέρει ουσιαστικά στην αύξηση της τιμής

του συντελεστή αυτού, αφού πλέον αντλείται μονάχα γλυκό νερό από τον υδροφορέα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη ενότητα, αναδεικνύουν την αξία της δημιουργίας διαχειριστικών πλάνων άντλησης, όπου η υφαλμυρισμένη γεώτρηση παραμένει αδρανοποιημένη με εστίαση της προσοχής μας στην αξιοποίηση των υπολοίπων.

- Στη συνέχεια, με στόχο τον έλεγχο των δυνατοτήτων του υδροφορέα να αποδώσει μεγαλύτερο όγκο γλυκού νερού, δοκιμάζουμε ενδεικτικά την προσθήκη μιας μονάχα επιπλέον γεώτρησης στο εσωτερικό του. Για να διερευνηθεί ταυτόχρονα και η συμπεριφορά της νέας γεώτρησης ανάλογα με τη θέση τοποθέτησής της, εξετάζουμε δύο σενάρια θέσεων. Στο πρώτο εξ αυτών, γνωστό ως σενάριο Summer_VIa, η νέα γεώτρηση τοποθετείται στο βορειοδυτικό άκρο του υδροφορέα. Έτσι, τα αποτελέσματα των πραγματοποιούμενων προσομοιώσεων δείχνουν μια σημαντική αύξηση του αντλούμενου όγκου γλυκού νερού, σε σχέση πάντοτε με το επιτυχημένο και αποδοτικό πλάνο αντλήσεων Summer_V που παρουσιάσαμε προηγουμένως. Ο συνολικός αντλούμενος όγκος νερού ισούται με $8155.31 \text{ m}^3/\text{day}$, όπου εξαιρώντας τις τιμές αντλήσεων της υφάλμυρης 1ης γεώτρησης, ο ωφέλιμος όγκος γλυκού νερού που απομένει ισούται με $6445.31 \text{ m}^3/\text{day}$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο μέγιστος δυνατός όγκος άντλησης ισούται με $10082.00 \text{ m}^3/\text{day}$, ο συντελεστής αποδοτικότητας του συγκεκριμένου διαχειριστικού πλάνου ισούται με $a_{eff}^{(188)} = 63.93\%$. Αν και η τιμή του συντελεστή αυτού είναι μόλις κατά 3.28% αυξημένη σε σχέση με την αντίστοιχη του σεναρίου Summer_V, προσδίδει στο διαχειριστικό πλάνο μια σημαντική αύξηση $1858.93 \text{ m}^3/\text{day}$ σε γλυκό νερό. Είναι δηλαδή σαφές ότι ο αντλούμενος όγκος γλυκού νερού στον υδροφορέα υπό μελέτη μπορεί να αυξηθεί σημαντικά, τοποθετώντας νέες θέσεις ενεργών γεωτρήσεων σε ασφαλείς περιοχές στο εσωτερικό του.
- Στην τελευταία περίπτωση που εξετάζουμε, χαρακτηριζόμενη ως σενάριο Summer_VIb, εστιάζουμε το ενδιαφέρον μας στην τοποθέτηση της νέας υποθετικής γεώτρησης σε διαφορετική θέση εντός του υδροφορέα. Θυμίζουμε ότι στο εσωτερικό του συναντάμε

περιοχές με πετρώματα διαφορετικής υδραυλικής αγωγιμότητας, με συνέπεια να εξετάζουμε έτσι την επίδραση των πετρωμάτων αυτών στο συνολικό πλάνο αντλήσεων του υδροφορέα. Έτσι, ο συνολικός αντλούμενος όγκος νερού ισούται με $7364.61 \text{ m}^3/\text{day}$, όπου εξαιρώντας τις τιμές αντλήσεων της υφάλμυρης 1ης γεώτρησης, ο ωφέλιμος όγκος γλυκού νερού που απομένει ισούται με $5654.61 \text{ m}^3/\text{day}$. Λαμβάνοντας υπόψη ομοίως με πριν, ότι ο μέγιστος δυνατός όγκος άντλησης ισούται με $10082.00 \text{ m}^3/\text{day}$, ο συντελεστής αποδοτικότητας του συγκεκριμένου διαχειριστικού πλάνου ισούται με $a_{eff}^{(256)} = 56.09\%$. Η νέα αυτή περίπτωση αποδεικνύεται ότι προσφέρει μεγαλύτερο αντλούμενο όγκο γλυκού νερού σε σχέση πάντοτε με την αρχική περίπτωση Summer_V, άλλα δεν υπερσχύει της προηγούμενης επιλογής διαφορετικής διάταξης των 6 γεωτρήσεων του υδροφορέα.

- Η διαδικασία βελτιστοποίησης του διαχειριστικού πλάνου αντλήσεων που επιλέγουμε να εφαρμόσουμε σε αυτόν τον παράκτιο υδροφορέα γλυκού νερού διαθέτει ένα χαρακτηριστικό με ιδιαίτερη αξία. Μπορεί να προσαρμοσθεί κατάλληλα στη στρατηγική εκμετάλλευσης της υπερκείμενης περιοχής του υδροφορέα, δηλαδή έχουμε τη δυνατότητα να κατασκευάσουμε βέλτιστα πλάνα αντλήσεων που να ικανοποιούν επακριβώς τις τοπικές ανάγκες της περιοχής σε νερό. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος του πληθυσμού της περιοχής, το είδος των γεωργικών καλλιεργειών κ.α. τοπικές παραμέτρους περιμετρικά κάθε γεώτρησης, μπορούμε να προσαρμόσουμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης έτσι ώστε να αποδίδει διαφορετικές ποσότητες γλυκού νερού ανά περιοχή. Ορίζουμε λοιπόν εξειδικευμένα ανά γεώτρηση ανώτερα και κατώτερα επιτρεπτά όρια αντλήσεων, έτσι ώστε να διοχετεύουμε τον αντλούμενο όγκο νερού εκεί που είναι περισσότερο αναγκαίος. Οι οριακές αυτές τιμές πρέπει φυσικά να λαμβάνουν υπόψη τις μέγιστες και ελάχιστες ονομαστικές δυνατότητες των επιμέρους θέσεων γεώτρησης, δυνατότητες εξαρτώμενες από το είδος των γεωτρήσεων, των χρησιμοποιούμενων σωληνώσεων και αντλιών. Ο προγραμματισμός του κώδικα ALOPEX ώστε να λαμβάνει υπόψη του αυτές τις πληροφορίες, όπως αναφέραμε προηγουμένως και στην περίπτωση του υδροφορέα της Καλύμνου, είναι ιδιαίτερα απλός και σύντομος.
- Ο συνολικός χρόνος πραγματοποίησης καθενός εκ των παραπάνω ελέγχων πλήθους

500 επαναλήψεων ο καθένας, διαρκεί μόλις λίγα λεπτά. Το γεγονός αυτό αποτελεί τεράστια πρόοδο στην κατεύθυνση μελέτης ανάλογων διαδικασιών, σε σχέση πάντοτε με τους συνολικά κατά πολύ μεγαλύτερους χρόνους εφαρμογής προηγούμενων μεθόδων της βιβλιογραφίας. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι ο αντίστοιχος έλεγχος μέσω της μεθοδολογίας των γενετικών αλγορίθμων (Σ. Καρτεράκης [64]), έχει υπολογιστικό κόστος με συνολικό χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης της διαδικασίας που προσμετράται σε μέρες και όχι σε λεπτά.

Ο παράκτιος υδροφορέας στο Δήμου Χερσονήσου είναι ένας υδροφορέας, όπου τα αποθέματά του σε γλυκό νερό δεν αξιοποιούνται επαρκώς. Ταυτόχρονα, το εφαρμοζόμενο μη αποδοτικό πλάνο διαχείρισης των αντλήσεων του βαθμιαία επιφέρει την καταστροφή του από το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Κρίνεται λοιπόν ως επείγουσα η ανάγκη αντικατάστασης του χρησιμοποιούμενου πλάνου διαχείρισης των αντλήσεων του, από διαχειριστικά πλάνα αντίστοιχα με αυτά που παρουσιάσαμε και αποδείξαμε την αποτελεσματικότητά τους παραπάνω, ώστε να εξασφαλιστεί κατ' αρχάς η βιωσιμότητα του υδροφορέα και στη συνέχεια η ορθολογική του χρήση. Περαιτέρω μελέτες τόσο από την σκοπιά των Μαθηματικών όσο και από τη σκοπιά του τομέα της Υδρογεωλογίας είναι επίσης απαραίτητες, ώστε να επιτευχθεί ο μέγιστος βαθμός ασφαλούς αξιοποίησης των αποθεματικών του υδροφορέα αυτού.

Κεφάλαιο 8

Λογισμικά και υλικό στην παρούσα εργασία

Για την εκτέλεση όλων των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία, με στόχους αφενός τη μοντελοποίηση του προβλήματος της υφαλμύρισης σε παράκτιους υδροφορείς και αφετέρου την κατασκευή διαχειριστικών πλάνων άντλησης για τους υδροφορείς της Καλύμνου και της Χερσονήσου, χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα προγράμματα:

- Λογισμικό MATLAB (versions R2012a-R2016a) της εταιρίας MathWorks Inc. ©1984-2016.
- Λογισμικό ArgusONE (Student version 4.2.0q) της εταιρίας Argus Holdings Ltd. ©1992-1999, ως πλατφόρμα διαχείρισης του κώδικα PTC.
- Λειτουργικό περιβάλλον Windows Professional 64-bit (versions 7, 10) της εταιρίας Microsoft Corporation, ©1975-2016.
- Λογισμικό Paint, ενσωματωμένο στο εκάστοτε λειτουργικό Windows Professional, με στόχο την επιμέλεια των Σχημάτων του κάθε Κεφαλαίου.

Η συγγραφή της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τα παρακάτω προγράμματα:

- Λογισμικό MiKTeX, Christian Schenk, ©2016.
- Λογισμικό Texmaker (version 4.0.2), Pascal Brachet, ©2003-2016, ως πλατφόρμα διαχείρισης του κώδικα MiKTeX.

Τέλος, ο ηλεκτρονικός υπολογιστής στον οποίο πραγματοποιήθηκαν όλες οι παραπάνω προσομοιώσεις διαθέτει τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

- Επεξεργαστής Intel(R) Core(TM) i7-2600K CPU 3.40GHz.
- Μνήμη RAM 8.00 GB DDR3.

Κεφάλαιο 9

Συναφείς δημοσιεύσεις

- **Stratis P.**, Saridakis Y., Papadopoulou E. and Zakynthinaki M., *ALOPEX Stochastic Optimization for Pumping Management in Freshwater Coastal Aquifers*, Journal of Physics: Conference Series, 490, 012112, 2014.
- **Stratis P.**, Dokou Z., Karatzas G., Papadopoulou E. and Saridakis Y., *Stochastic Optimization and Numerical Simulation for Pumping Management of the Hersonissos Freshwater Coastal Aquifer in Crete*, Proceedings of INASE/CSCC-WHH 2015, Recent Advances in Environmental and Earth Sciences and Economics, 329-334, Zakynthos, 2015.
- Athanasakis I., Dokou Z., Mathioudakis E., **Stratis P.** and Vilanakis N., *Combining Stochastic Optimization and Numerical Methods Software for the Pumping Management of Coastal Aquifers: Case Study of a Rectangular Homogeneous Aquifer*, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 9:740-747, ISSN:1998-0140, 2015.
- **Stratis P.**, Dokou Z., Karatzas G., Papadopoulou E. and Saridakis Y., *PTC Simulations, Stochastic Optimization and Safety Strategies for Groundwater Pumping Management: Case Study of the Hersonissos Coastal Aquifer in Crete*, Applied Water Science, DOI 10.1007/s13201-016-0438-8, 2016.
- **Stratis P.**, Karatzas G., Papadopoulou E., Zakynthinaki M. and Saridakis Y., *Stochastic Optimization for an Analytical Model of Saltwater Intrusion in Coastal Aquifers*, PLoS ONE, 11(9):e0162783, DOI:10.1371/journal.pone.0162783, 2016.

Βιβλιογραφία

9.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

- [1] Alimohammadi S. and AfsharUnit A., *Response Matrix Coefficients Development: ANN Approach*, Proceedings of the 5th WSEAS/IASME Int. Conf. on Systems Theory and Scientific Computation, September 15-17, Malta, 17-25, 2005.
- [2] Ababou R. and Al-Bitar A., *Salt water intrusion with heterogeneity and uncertainty: mathematical modeling and analyses*, Developments Water Sci., 55:1559-1571, 2004.
- [3] Athanasakis I., Dokou Z., Mathioudakis E., Stratis P. and Vilanakis N., *Combining Stochastic Optimization and Numerical Methods Software for the Pumping Management of Coastal Aquifers: Case Study of a Rectangular Homogeneous Aquifer*, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, 9:740-747, ISSN:1998-0140, 2015.
- [4] Aivalioti M. and Karatzas G., *Modeling the flow and leachate transport in the vadose and saturated Zone - A field application*, Env Model Assess., 11(1):81-87, 2006.
- [5] Babu D., Pinder G., Niemi A., Ahlfeld D. and Stothoff S., *Chemical transport by three-dimensional groundwater flows*, Princeton University, 84-WR-3, USA, (Revised) June 1997.
- [6] Cooper Jr.H.H., Kohout F.A., Henry H.R. and Glover R.E., *Seawater in coastal aquifers*, U. S. Geol. Surv. Water Supply Pap., 1613-C, 70-84, 1964.
- [7] Cheng A.H.-D., Halhal D., Naji A. and Ouazar D., *Pumping optimization in saltwater-intruded coastal aquifers*, Water Resour. Res., 36(8):2155-2165, 2000.

- [8] Cheng A.H.-D. and Ouazar D., *Analytical solutions, in Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Concepts, Methods, and Practices*, edited by J. Bear et al., Kluwer Acad., Norwell, Mass., 163-191, 1999.
- [9] Cheng A.H.-D. and Ouazar D., *Coastal aquifer management: Monitoring, modeling and case studies*, Lewis: Boca Raton, Fla, 2004.
- [10] Cooper Jr.H.H., *A hypothesis concerning the dynamic balance of freshwater and saltwater in a coastal aquifer*, Journal of Geophysical Research, 64(4):461-467, 1959.
- [11] Diersch H.-J.G. and Kolditz O., *Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges*, Advances in Water Resources, 25(8?12):899-944, 2002.
- [12] Dokou Z. and Karatzas G., *Saltwater intrusion estimation in a karstified coastal system using density-dependent modelling and comparison with the sharp-interface approach*, Hydrological Sciences Journal, 57(5):985-999, 2012.
- [13] Dokou Z. and Pinder G., *Extension and field application of an integrated DNAPL source identification algorithm that utilizes stochastic modeling and a Kalman filter*, J. Hydrol., 398(3-4):277-291, 2011.
- [14] Fetter C.W., *Applied Hydrogeology*, Merrill Publishing Company, 1988.
- [15] Fetter C.W., *Applied Hydrogeology, 3rd edition*, Macmillan College Publishing Inc., New York, pp.616, 1994.
- [16] Ghyben W.B., *Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsterdam*, Tijdschrift van het Kononklijk Instituut van Ingenieurs, The Hague, The Netherlands, 9:8-22, 1888.
- [17] Glover R.E., *Groundwater movement*, Eng. Monograph No. 31. U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, 1964.

- [18] Guo W. and Langevin C.D., *User's guide to seawat: A computer program for simulation of three dimensional variable density groundwater ow.*, Report no., U.S. Geol. Surv., Open File, 01-434, 2002.
- [19] Guvanase V., Wade S. and Barcelo M., *Simulation of regional ground water flow and salt water intrusion in Hernando County, Florida*, Ground Water, 38(5):772-783, 2000.
- [20] Henry H.R., *Effects of dispersion on salt encroachment in coastal aquifers*, Sea Water in Coastal Aquifers, US Geological Survey Supply Paper, 1613-C, 71-84, 1964.
- [21] Herzberg A., *Die Wasserversorgung einiger Nordseebader*, Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, 44:815-819, 1901.
- [22] Harth E., Kalogeropoulos T. and Sobolewski Z., *An Electronic Device for Mylti-Parameter Adaptive Control*, NY 13244-1130, Syracuse.
- [23] Harth E. and Tzanakou E., *Alopex: A stochastic method for determining visual receptive fields*, Vision Research, 14:1475-1482, 1974.
- [24] Hubbert M.K., *The theory of ground-water motion*, Journal of Geology, 48(8):785-944, 1940.
- [25] Harth E. and Kalogeropoulos T., *Multiparameter optimization circuit*, U.S. Patent No 4. 912 624, March 1990.
- [26] Iannetta M. and Colonna N., *Salinisation*, LUCINDA, leaflet series:B, number:3.
- [27] Katsifarakis K., *Groundwater pumping cost minimization - an analytical approach*, Water Resources Management 22:1089-1099, 2007.
- [28] Karatzas G. and Dokou Z., *Managing the saltwater intrusion phenomenon in the coastal aquifer of Malia, Crete using multi-objective optimization*, Hydrogeology, 2015, accepted.

- [29] Karterakis S., Karatzas G., Nikolos I. and Papadopoulou M., *Application of linear programming and differential evolutionary optimization methodologies for the solution of coastal subsurface water management problems subject to environmental criteria*, J. Hydrol., 342(3-4):270-282, 2007.
- [30] Koukadaki M., Karatzas G., Papadopoulou M. and Vafidis A., *Identification of the saline zone in a coastal aquifer using electrical tomography data and simulation*, Water Resour. Manag., 21(11):1881-1898, 2007.
- [31] Kopsiaftis G., Mantoglou A. and Giannouloupoulos P., *Variable density coastal aquifer models with application to an aquifer on Thira Island*, Desalination, 237(1?3):65-80, 2009.
- [32] Kalogeropoulos T., Saridakis Y. and Zakynthinaki M., *Improved Stochastic Optimization Algorithms for Adaptive Optics*, Computer Physics Communications, 99:255-269, 1997.
- [33] Liu L., *Saline Water Intrusion*, Article 1.7.3.5 of the Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), 2002.
- [34] Llopis-Albert C., Pulido-Velazquez D., *Discussion about the validity of sharp-interface models to deal with seawater intrusion in coastal aquifers*, Hydrological Processes 28:3642-3654, 2014.
- [35] Luszczynski N.J., *Head and flow of ground water of variable density*, Journal of Geophysical Research, 66(12):4247-4256, 1961.
- [36] Mantoglou A., *Pumping management of coastal aquifers using analytical models of saltwater intrusion*, Water Resources Research, 39(12):1335-1346, 2003.
- [37] Mantoglou A. and Papantoniou M., *Optimal Design Of Pumping Networks In Coastal Aquifers Using Sharp Interface Models*, J. Hydrol., 361:52-63, 2008.

- [38] Mantoglou A., Papantoniou M. and Giannouloupoulos P., *Management of coastal aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms*, J. Hydrol., 297(1-4):209-228, 2004.
- [39] Ospina J., Guarin N. and Velez M., *Analytical Solutions for Confined Aquifers with non constant Pumping using Computer Algebra*, Proceedings of the 2006 IA-SME/WSEAS Int. Conf. on Water Resources, Hydraulics & Hydrology, 7-12, Chalkida, Greece, May 11-13, 2006.
- [40] Park C. and Aral M., *Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers*, Journal of Hydrology, 290:80-99, 2004.
- [41] Papadopoulou M., Karatzas G., Koukadaki M., Trichakis Y., *Modeling the saltwater intrusion phenomenon in coastal aquifers - A case study in the industrial zone of Heraklion in Crete*, Global NEST Journal, 7(2):197-203, 2005.
- [42] Papadopoulou M., Varouchakis E. and Karatzas G., *Simulation of complex aquifer behaviour using numerical and geostatistical methodologies*, Desalination, 237:42-53, 2009.
- [43] Papadopoulou M., Varouchakis E. and Karatzas G., *Terrain Discontinuity Effects in the Regional Flow of a Complex Karstified Aquifer*, Environ. Model Assess, 15(5):319-328, 2010.
- [44] Reilly T. and Goodman A., *Quantitative Analysis of Saltwater Fresh-Water Relationships in Groundwater Systems - a Historical Perspective*, J. Hydrol., 80(1-2):125-160, 1985.
- [45] Strack O.D.L., *A single potential solution for regional interface problems in coastal aquifers*, Water Resour. Res., 12:1165-1174, 1976.
- [46] Strack O.D.L., *Groundwater Mechanics*, Prentice Hall, 1989.

- [47] Stratis P., Dokou Z., Karatzas G., Papadopoulou E. and Saridakis Y., *Stochastic Optimization and Numerical Simulation for Pumping Management of the Hersonissos Freshwater Coastal Aquifer in Crete*, Procs. of INASE/CSCC-WHH 2015, Recent Advances in Environmental and Earth Sciences and Economics, 329-334, Zakynthos, 2015.
- [48] Stratis P., Dokou Z., Karatzas G., Papadopoulou E. and Saridakis Y., *PTC Simulations, Stochastic Optimization and Safety Strategies for Groundwater Pumping Management: Case Study of the Hersonissos Coastal Aquifer in Crete*, Applied Water Science, DOI 10.1007/s13201-016-0438-8, 2016.
- [49] Stratis P., Karatzas G., Papadopoulou E., Zakynthinaki M. and Saridakis Y., *Stochastic optimization for an analytical model of saltwater intrusion in coastal aquifers*, PLoS ONE, 11(9):e0162783, DOI:10.1371/journal.pone.0162783, 2016.
- [50] Schincariol R. and Schwartz F., *An experimental investigation of variable density flow and mixing in homogeneous and heterogeneous media*, Water Resources Research, 26(10):2317-2329, 1990.
- [51] Stratis P., Saridakis Y., Papadopoulou E. and M. Zakynthinaki, *ALOPEX stochastic optimization for pumping management in freshwater coastal aquifers*, Journal of Physics: Conference Series, 490, 012112, 2014.
- [52] Sidiropoulos E. and Tolikas P., *Well locations and constraint handling in groundwater pumping cost minimization via genetic algorithms*, Water Air Soil Poll, 4:227-239, 2004.
- [53] Saridakis Y. and Zakynthinaki M., *Towards the Improvement of the ALOPEX II Optimization Algorithm*, Proc. of the third Hellenic-European conference on Mathematics and Informatics (HERMES), LEA ed., 251-258, September 26-28, Athens, 1996.
- [54] Tzanakou T., Michalak R. and Harth E., *The Alopex Process: Visual Receptive Fields by Response Feedback*, Biological Cybernetics, 35:161-174, 1979.

- [55] Voudouris K., Mandilaras D. and Antonakos A., *Methods to define the areal distribution of the salt intrusion: Examples from South Greece*, 18 SWIM. Cartagena, Spain. (Ed. Aragus, Custod Io and Manzano), 2004.
- [56] Zakynthinaki M. and Saridakis Y., *Stochastic optimization for a tip-tilt adaptive correcting system*, Comp. Phys. Commun., 150(3):274, 2003.

9.2 Ελληνική βιβλιογραφία

- [57] Δεττοράκη Μ., *Συνδυασμός του μοντέλου προσομοίωσης ροής υπογείων υδάτων VISUAL MODFLOW με το μοντέλο βελτιστοποίησης GWM για τη βέλτιστη διαχείριση του παράκτιου υδροφορέα Τυμπακίου*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, ΜΗ.ΠΕΡ., πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2012.
- [58] Διαμαντής Ι., Πεταλάς Χ. και Πλιάκας Φ., *Προβλήματα υφαλμύρισης υπόγειων νερών παράκτιων πεδίων Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης - Μέθοδοι αντιμετώπισης*, Πρακτικά ημερίδας του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος με θέμα Υφαλμύρωση υπόγειων υδάτων, Αθήνα, 1998.
- [59] Ελληνική Υδροτεχνική Ένωση, *Πρακτικά 9ου Πανελλήνιου Συνεδρίου*, 2003.
- [60] Ζακυνθινάκη Μ., *Στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σε μοντέλα Προσαρμοστικής Οπτικής*, Διπλωματική Εργασία Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Γενικό τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 1995.
- [61] Ζακυνθινάκη Μ., *Στοχαστική βελτιστοποίηση για προσαρμοστική διόρθωση ατμοσφαιρικών παραμορφώσεων στην αστρονομική παρατήρηση*, Διδακτορική Διατριβή, Γενικό τμήμα, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2001.
- [62] Hamdan H., *Ανάπτυξη τεχνικών συνδυασμένης επεξεργασίας γεωφυσικών δεδομένων (ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων)*

για την απεικόνιση της υφαλμύρισης σε παράκτιους υδροφορείς, Διδακτορική Διατριβή, ΜΗΧ.Ο.Π., Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2010.

- [63] Καλλέργης Γ.Α., *Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία*, Τόμος Β, Αθήνα, 2000.
- [64] Καρτεράκης Σ., *Διαχείριση των υπόγειων υδάτων με χρήση συνδυασμού μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης*, Διπλωματική Εργασία Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2005.
- [65] Καλλιάνης Γ. και Χατζηθεοχάρους Κ., *Θεωρία υφάλμυρης διείσδυσης - Μέθοδοι αποκατάστασης*, Χανιά, 2004.
- [66] Κουράκος Γ., *Βελτιστοποίηση Αντλήσεων Παράκτιων Υδροφορέων με Περιβαλλοντικά και Οικονομικά Κριτήρια*, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων, Εργαστήριο Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2010.
- [67] Κουτάντου Π., *Καρστικοί υδροφορείς - Αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης στην περιοχή της Χερσονήσου Ηρακλείου Κρήτης προσομοιώνοντας τη μέθοδο του τεχνητού εμπλουτισμού*, Διπλωματική Εργασία Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2006.
- [68] Μαντόγλου Α. και Γιαννουλόπουλος Π., *Βελτιστοποίηση αντλήσεων παράκτιων υδροφορέων για πρόληψη υφαλμύρισης*, Πρακτικά Συμποσίου Αιγαίο - Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη, Πάρος, 2001.
- [69] Μαριολάκος Η., *Γεωοικολογική Αντιμετώπιση της Υφαλμύρισης των Υπόγειων Υδροφορέων*, Ημερίδα Υφαλμύρισης Υπόγειων Υδάτων, 1998.
- [70] Νάνου Γιάνναρου Α., *Υφαλμύρωση παράκτιων υδροφορέων*, Πρακτικά Συμποσίου Αιγαίο - Νερό - Βιώσιμη Ανάπτυξη, Πάρος, 2001.
- [71] Σούλιος Γ.Κ., *Γενική υδρογεωλογία, Τόμος Β, Ροή του υπόγειου νερού προς τα υδρομαστευτικά έργα*, Θεσσαλονίκη, 1996.

- [72] Στάμος Κ., *Προσομοίωση παράκτιου υπόγειου υδροφορέα Ζεφυρίας Μήλου*, Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2010.
- [73] Τεγόπουλος και Φυτράκης, *Ελληνικό Λεξικό*, Δέκατη τέταρτη έκδοση, Εκδόσεις Αρμονία, Αθήνα, 2005.
- [74] Χατζάκης Α., *Προσομοίωση της στάθμης υδροφορέα με χρήση ANN και σύγκριση με τα αποτελέσματα του μοντέλου PTC*, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2014.

9.3 Χρήσιμοι ιστότοποι

- [75] <http://www.argusone.com>
- [76] <http://karst.iah.org>
- [77] <https://en.wikipedia.org/wiki/Kalymnos>
- [78] <https://kalymnos.gov.gr>
- [79] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hersonissos>

Ευρετήριο

penalty

Q_{max}^{local} , 96

Q_{min}^{local} , 96

Q_{total} , 96

potential, 97

$x_{movement}^{primary}$, 97

$x_{movement}^{secondary}$, 97

αγωγιμότητα

υδραυλική, 30

αλάτωση, 14

αλγόριθμος

ALOPEX IIIa, 60

ALOPEX III, 61

ALOPEX II, 59

ALOPEX IVa, 61

ALOPEX IV, 62

ALOPEX I, 58

ALOPEX V, 63

ALOPEX, 3, 57

ασυμπτωτική συμπεριφορά, 157

στοχαστικής βελτιστοποίησης, 57

συνδυαστικός

ALOPEX-PTC, 182

υπολογιστικό κόστος, 156

ανατροφοδότηση

επιφανειακή, 30

αντλήσεις

ασφαλείς, 97

απόσταση

ασφαλείας, 54

διαδικασία

αφαλάτωσης, 12

βελτιστοποίησης

κρίσιμα σημεία, 160

μνήμης, 78

στοχαστικής βελτιστοποίησης, 57

τυχαίου περιπάτου, 60

ψύξης, 12

διεπιφάνεια, 15

απότομη, 24

πεπερασμένου πάχους

μεταβλητής πυκνότητας, 21

σταθερής πυκνότητας, 20

δυναμικό ροής

καταβόθρα, 98

εκροή νερού

οριζόντια, 30

εξίσωση

Ghyben-Herzberg, 25, 31, 32

φαινόμενο

αλάτωσης, 14

υφαλμύρισης, 10	εξατμισοδιαπνοής, 14
γεωτρήσεις	παράγοντας
εμπλουτισμού, 39	θορύβου, 63
υποθετικές, 92	λευκού θορύβου, 59
ιδιότητες	μνήμης, 59, 63
υδραυλικές, 31	παραδοχή
κόμβοι	Dupuit, 33
ασφαλείας, 194	απότομης διεπιφάνειας, 32
κώδικας	περιοχή
PTC, 182, 183	ενδιάμεσης πυκνότητας, 28
Princeton Transport Code, 182, 183	ισοδύναμων τοπικών μεγίστων, 111, 120
κώνος	περιορισμός
ανύψωσης, 16, 97	δυναμικού, 55
κατάπτωσης, 13, 97	πλάνο αντλήσεων
κρίσιμα σημεία	ασφαλές, 83
δυναμικού ροής, 99	βέλτιστο, 83
υφάλμυρου μετώπου, 99	διαχειριστικό, 83
κυκλικός δίσκος ασφαλείας, 102	Προφίλ
λύση	Μοντελοποίησης
ολικά βέλτιστη, 111, 120	II, 112
λογάριθμοι	I, 112
φυσικοί, 98	προσέγγιση
μέθοδος	απότομης διεπιφάνειας, 31
Εικόνων, 37	προσομοίωση
ανακλάσεις, 38, 40	τυπική, 93, 193
υπέρθεσης λύσεων, 37, 39	ρυθμός
μηχανισμός	άντλησης, 30

σύστημα	Zone 2, 29
υδροφόρο, 10	Zone 3, 29
σενάριο	απείρου μήχους, 38
ανατροφοδότησης, 191	απείρων διαστάσεων, 36
καλοκαιρινό, 191	ελεύθερος, 28, 85
χειμερινό, 191	εξιδανικευμένος, 3, 83
αντλήσεων, 190	τύπου I, 36
σημεία	τύπου II, 38
ελέγχου, 105	τύπου III, 39, 87
προστασίας, 103	ισότροπος, 28
σχηματισμοί	Κάλυμνος
υδατοστεγείς, 180	εξιδανικευμένος, 86
υδρολογικοί, 180	φυσική υφαλμύριση, 90
υδροπερατοί, 180	κυρώσεις ελέγχου, 93
στρατηγική	σενάριο Ia, 115
αποσβενόμενου θορύβου, 78	σενάριο Ib, 124
θορύβου ομοιόμορφου πλάτους, 77	σενάριο IIa, 130
συνάρτηση	σενάριο IIb, 139
αντικειμενική, 54	σενάριο III, 146
συνθήκες	σενάριο IV, 152
μόνιμης κατάστασης, 24, 31	υδραυλικά χαρακτηριστικά, 85
συνοριακές	Καλύμνου, 83
Dirichlet, 185	καρστικός, 28, 85
Neumann, 186	ομοιογενής, 28
συντελεστής	ορθογώνιας γεωμετρίας, 39
αποδοτικότητας, 113	παράκτιος, 27
υδραυλική κεφαλή, 31	πεπερασμένου πλάτους, 38
υδροφορέας	πεπερασμένων διαστάσεων, 39
Zone 1, 29	Χερσόνησος

σενάριο Summer_IV, 210	υφαλμύριση, 10
σενάριο Summer_VIa, 217	ενεργητική, 13
σενάριο Summer_VIb, 223	φυσική
σενάριο Summer_V, 196	υδροφορέα Καλύμνου, 90
σενάριο Winter_V, 204	υδροφορέα Χερσονήσου, 197
Χερσονήσου, 179	παθητική, 13
ρεαλιστικός, 83	πλαϊνή, 104
σενάρια αντλήσεων, 111	συνέπειες, 13
υδρολογική λεκάνη, 10	ζώνη
υφαλμυρη σφήνα, 29	διάχυσης, 15