

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΑ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ**  
**ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Βέλτιστη διαχείριση υπογείων υδάτων με τη χρήση εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού

**Αθανάσιος Ε. Τσιaráπας**

**Επιβλέπων:** Ευτύχιος Σαρτζετάκης,  
Καθηγητής, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας

Υποβλήθηκε ως απαιτούμενο για την απόκτηση του Διπλώματος Μεταπτυχιακών  
Σπουδών στα Εφαρμοσμένα Οικονομικά

**Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2022**

*Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.*

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΑ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΑ**  
**ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Βέλτιστη διαχείριση υπογείων υδάτων με τη χρήση εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού

Αθανάσιος Ε. Τσιaráπας

**Επιβλέπων:** Ευτύχιος Σαρτζετάκης,  
Καθηγητής, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9<sup>η</sup> Νοεμβρίου 2022.

**Τριμελής εξεταστική επιτροπή**

Ευτύχιος Σαρτζετάκης,  
Καθηγητής, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας

Μαρία Αλιπράντη  
Επίκουρη Καθηγήτρια, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας

Ελευθέριος Φιλιπιάδης  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Οικονομικών Επιστημών, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2022

Αθανάσιος Ε. Τσιaráπας  
Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ.

Copyright © Αθανάσιος Ε. Τσιaráπας, 2022  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πανεπιστημίου Μακεδονίας.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το νερό και ιδιαίτερα το υπόγειο νερό αποτελεί ένα φυσικό πόρο ζωτικής σημασίας για την ανθρωπότητα, η περιορισμένη διαθεσιμότητα του οποίου επιβάλλει τη βέλτιστη και ορθολογική διαχείριση των υφιστάμενων αποθεμάτων. Οι σύγχρονες προσεγγίσεις σχετικά με τη διαχείριση του νερού επιβάλλουν αυτή να λαμβάνει υπ' όψιν μεταξύ άλλων περιβαλλοντικές και οικονομικές παραμέτρους. Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσεται η εργασία αυτή, η οποία επιχειρεί να αναδείξει το ρόλο που μπορούν να διαδραματίσουν οικονομικά εργαλεία, όπως τα εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού, τα οποία θεωρείται ότι αυξάνουν την οικονομική αποδοτικότητα του πόρου, στην αποτελεσματική διαχείριση των υπογείων υδάτων δίνοντας έμφαση στον αγροτικό τομέα, ο οποίος ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης νερού σε χώρες όπως η Ελλάδα. Για το σκοπό αυτό διαμορφώνεται ένα δυναμικό ως προς το χρόνο πρόβλημα που εξετάζει την άντληση νερού από δύο ομάδες αγροτών από έναν υπόγειο υδροφορέα και διερευνώνται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας μεταξύ αυτών ως προς την επίδραση που αυτές έχουν στον υδροφορέα και στους ίδιους. Η πρώτη περίπτωση αντιστοιχεί σε ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών, η δεύτερη περίπτωση σε ένα καθεστώς μερικής συνεργασίας μεταξύ αυτών, οπότε θεωρείται ότι οι δύο ομάδες αγροτών βασιζόμενες σε μία λογική κοινωνικού προγραμματισμού συνεργάζονται μεταξύ τους στο πλαίσιο εφαρμογής ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού και η τρίτη περίπτωση σε ένα καθεστώς πλήρους συνεργασίας μεταξύ αυτών, οπότε θεωρείται ότι οι δύο ομάδες αγροτών βασιζόμενες και πάλι σε μία λογική κοινωνικού προγραμματισμού συνεργάζονται στο πλαίσιο εφαρμογής ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού λαμβάνοντας συγχρόνως υπ' όψιν την περιβαλλοντική καταστροφή που προκαλείται στο τοπικό οικοσύστημα εξαιτίας της εξάντλησης των υδάτινων αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα. Η επίλυση των τριών καθεστώτων συνεργασίας οδηγεί στην εξαγωγή των χρονικών διαδρομών για τη συνολική

κατανάλωση νερού, τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα, το συνολικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού και την τιμή των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού. Τα αποτελέσματα προσομοιώσεων με βάση υδρολογικά και οικονομικά δεδομένα μιας αγροτικής περιοχής στη Βόρεια Ελλάδα δείχνουν πρώτον ότι η πλήρης συνεργασία μεταξύ των χρηστών οδηγεί σε αυξημένα οφέλη τόσο για τους ίδιους όσο και για τον υδροφορέα και δεύτερον ότι η εφαρμογή οικονομικών εργαλείων για τη διαχείριση υδάτων όπως τα συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού αυξάνουν την οικονομική αποδοτικότητα του πόρου.

**Λέξεις – κλειδιά:** διαχείριση υδατικών πόρων · υπόγεια ύδατα · βελτιστοποίηση · οικονομικά εργαλεία · εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού · αγορές νερού

# Optimal groundwater management using tradable water rights

Athanasios E. Tsiarapas

Thesis submitted for the Degree

“Master in Applied Economics”

Department of Economics, School of Economic and Regional Studies, University of

Macedonia, Greece

Supervisor: Dr Eftichios Sartzetakis, Professor, Department of Economics, University of

Macedonia

## **ABSTRACT**

Water and especially groundwater, is a natural resource of vital importance to humanity, the limited availability of which requires optimal and rational management of existing reserves. Modern approaches to water management require that it should consider, among other things, environmental and economic parameters. It is in this context that this paper is set, which attempts to highlight the role that economic instruments such as tradable water rights can play, which are considered to increase the economic efficiency of the resource, in the effective management of groundwater, with emphasis on the agricultural sector, which is responsible for the majority of water consumption in countries such as Greece. For this purpose, a time-dynamic problem is formulated that considers the pumping of water by two groups of farmers from an aquifer and three different cases of cooperation between them are investigated in terms of their impact on the aquifer and on themselves. The first case corresponds to a regime of full competition between the users, the second case to a regime of partial cooperation between them, in which case it is assumed that the two groups of farmers based on a social planner's sense cooperate with each other in the context of implementing a tradable water rights system, and the third case to a regime of full cooperation between them, in which case it is assumed

that the two groups of farmers based again on a social planner's sense cooperate with each other in the context of implementing a tradable water rights system, considering at the same time the environmental damages caused to the local ecosystem due to the depletion of aquifer's water reserves. Solving the three cooperation regimes leads to the derivation of the time paths for total water consumption, the aquifer's water table level, the total net benefit from water consumption and the price of tradable water rights. The results of simulations based on hydrological and economic data of a rural area in Northern Greece show firstly that full cooperation between users leads to increased benefits for both themselves and the aquifer and secondly that the implementation of economic instruments for water resources management such as tradable water rights systems increase the economic efficiency of the resource.

**Keywords:** water resources management · groundwater · optimization · economic instruments  
· tradable water rights · water markets



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

<b>Πίνακας 1.1:</b> Συνολική κατανάλωση νερού και κατανάλωση νερού ανά χρήση για 14 Ευρωπαϊκές χώρες για το 2020.....	7
<b>Πίνακας 3.1:</b> Θεώρηση των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού ως μεθόδου διαχείρισης υπογείων υδάτων και των περιβαλλοντικών εξωτερικοτήτων σε επιλεγμένα άρθρα.....	38
<b>Πίνακας 5.1:</b> Υδρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης.....	67
<b>Πίνακας 5.2:</b> Οικονομικά δεδομένα της περιοχής μελέτης.....	68
<b>Πίνακας 5.3:</b> Ανάλυση ευαισθησίας του αθροιστικού καθαρού οφέλους από την κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού ως προς τις παραμέτρους της περιοχής μελέτης.....	78
<b>Πίνακας 5.4:</b> Ανάλυση ευαισθησίας για τη μεταβολή του αθροιστικού καθαρού οφέλους από την κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού και κατά τη μετάβαση από το ένα καθεστώς συνεργασίας στο άλλο ως προς τις παραμέτρους της περιοχής μελέτης.....	80
<b>Πίνακας Β.1:</b> Αναλυτικά αποτελέσματα καθεστώτος πλήρους ανταγωνισμού.....	B-1
<b>Πίνακας Β.2:</b> Αναλυτικά αποτελέσματα καθεστώτος μερικής συνεργασίας.....	B-2
<b>Πίνακας Β.3:</b> Αναλυτικά αποτελέσματα καθεστώτος πλήρους συνεργασίας.....	B-3

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

<b>Γράφημα 1.1:</b> Κατανάλωση νερού ανά χρήση στην Ελλάδα για το 2020 ως ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης .....	8
<b>Γράφημα 5.1:</b> Χρονικές διαδρομές συνολικής κατανάλωσης νερού κατ' έτος για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας μεταξύ των χρηστών που διερευνήθηκαν.....	71
<b>Γράφημα 5.2:</b> Χρονική διαδρομή για τη στάθμη ου υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας που διερευνήθηκαν..	72
<b>Γράφημα 5.3:</b> Χρονική διαδρομή για το συνολικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού κατ' έτος για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας που διερευνήθηκαν.....	73

<b>Γράφημα 5.4:</b> Χρονική διαδρομή για το συνολικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού κατ' έτος ανά κυβικό μέτρο νερού που καταναλώνεται για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας που διερευνήθηκαν.....	74
<b>Γράφημα 5.5:</b> Χρονική διαδρομή για την τιμή των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας που διερευνήθηκαν και περιλαμβάνουν σύστημα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού.....	76

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<b>Σχήμα 1.1:</b> Κατανομή του νερού στη Γη.....	3
<b>Σχήμα 1.2:</b> Παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τη χάραξη πολιτικών διαχείρισης υδατικών πόρων.....	6
<b>Σχήμα 2.1:</b> Φρεάτιος και περιορισμένος υδροφορέας .....	15
<b>Σχήμα 4.1:</b> Σχηματική απεικόνιση υπόγειου υδροφορέα.....	42
<b>Σχήμα 4.2:</b> Κατακόρυφη τομή γεώτρησης μέσω της οποίας αντλείται νερό από τον υπόγειο υδροφορέα.....	44
<b>Σχήμα 5.1:</b> Χάρτης της περιοχής μελέτης.....	66
<b>Σχήμα 5.2:</b> Ποσοτική κατάσταση υπογείων υδάτινων συστημάτων της περιοχής μελέτης.....	67

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των απαιτήσεων του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στα Εφαρμοσμένα Οικονομικά του Τμήματος Οικονομικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Μακεδονίας για την κτήση του Διπλώματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στα Εφαρμοσμένα Οικονομικά. Αποτελεί μία οικονομική προσέγγιση στο θέμα της διαχείρισης του νερού, το οποίο απασχολεί διαρκώς περισσότερο όσους είναι υπεύθυνοι για τη χάραξη σχετικών πολιτικών.

Η επιλογή του θέματος πραγματοποιήθηκε μετά από μία πρώτη επαφή που είχα με τα οικονομικά εργαλεία και συγκεκριμένα με τα συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων και την εφαρμογή τους στην περίπτωση των βιομηχανικών ρύπων κατά τη διάρκεια της διδασκαλίας του υποχρεωτικού μαθήματος του Προγράμματος με τίτλο «Οικονομικά του Περιβάλλοντος και των Φυσικών Πόρων». Η επαφή αυτή σε συνδυασμό με προγενέστερη ερευνητική ενασχόληση με το αντικείμενο της διαχείρισης υδατικών πόρων δημιούργησε ερωτήματα σχετικά με το κατά πόσο τα δύο αντικείμενα, δηλαδή τα οικονομικά εργαλεία και η διαχείριση υδατικών πόρων μπορούν να συνδυαστούν. Μία σύντομη βιβλιογραφική έρευνα έδειξε ότι τα δύο αντικείμενα μπορούν να συνδυαστούν στο πλαίσιο μιας υδροοικονομικής προσέγγισης. Έτσι, προέκυψε αυτή η εργασία με αντικείμενο τη βέλτιστη διαχείριση υπογείων υδάτων με χρήση των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού.

Ολοκληρώνοντας αυτήν την προσπάθεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Ευτύχιο Σαρτζετάκη, Καθηγητή του Τμήματος Οικονομικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Μακεδονίας, επιβλέποντα της εργασίας αυτής και διδάσκοντα του μαθήματος «Οικονομικά του Περιβάλλοντος και των Φυσικών Πόρων» για το ενδιαφέρον που επέδειξε από την πρώτη στιγμή σχετικά με την ανάληψη της επίβλεψης της εργασίας καθώς και για όλη την υποστήριξη που μου παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής και για τις χρήσιμες συμβουλές που συνέβαλαν καθοριστικά στη διαμόρφωση του τελικού αποτελέσματος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Μαρία Αλιπράντη, Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Οικονομικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Μακεδονίας και τον κύριο Ελευθέριο Φιλίππιαδη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Οικονομικών Επιστημών του Πανεπιστημίου Μακεδονίας για τη συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή της εργασίας, το σύνολο των διδασκόντων του Προγράμματος για το εξαιρετικό επίπεδο διδασκαλίας καθώς και το προσωπικό της γραμματείας του Προγράμματος για την εξαιρετική συνεργασία.

Θεσσαλονίκη, Νοέμβριος 2022

Αθανάσιος Ε. Τσιaráπας

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	1
1.1 Το νερό ως φυσικός πόρος.....	1
1.2 Διαχείριση υδατικών πόρων.....	4
1.3 Σκοπός και αντικειμενικοί στόχοι της εργασίας.....	8
1.4 Αιτιολόγηση του θέματος.....	9
1.5 Δομή της εργασίας.....	10
<b>2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ</b>	13
2.1 Υπόγεια ύδατα και υπόγειοι υδροφορείς.....	13
2.1.1 Ορισμοί και ταξινόμηση.....	13
2.1.2 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και χρησιμότητα υπογείων υδάτων.....	15
2.2 Οικονομικά εργαλεία διαχείρισης υδατικών πόρων.....	18
2.3 Αγορές νερού – Συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού.....	21
2.3.1 Ορισμός, επιστημονικό υπόβαθρο και ταξινόμηση.....	22
2.3.2 Χαρακτηριστικά και λειτουργία.....	25
2.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.....	27
2.3.4 Εφαρμογή σε συγκεκριμένες χώρες.....	29
<b>3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ</b>	33
3.1 Καθορισμός παραμέτρων βιβλιογραφικής έρευνας.....	33
3.2 Αποτελέσματα βιβλιογραφικής έρευνας.....	34
<b>4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ</b>	39
4.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	40
4.2 Προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα.....	41
4.3 Καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών.....	45

4.4 Καθεστώς μερικής συνεργασίας μεταξύ των χρηστών.....	49
4.5 Καθεστώς πλήρους συνεργασίας μεταξύ των χρηστών.....	57
<b>5. ΕΜΠΕΙΡΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ</b>	<b>65</b>
5.1 Περιοχή μελέτης.....	65
5.2 Αποτελέσματα.....	68
5.2.1 Καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών.....	69
5.2.2 Καθεστώς μερικής συνεργασίας μεταξύ των χρηστών.....	69
5.2.3 Καθεστώς πλήρους συνεργασίας μεταξύ των χρηστών.....	69
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων.....	70
5.4 Ανάλυση ευαισθησίας.....	77
<b>6. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b>	<b>83</b>
6.1 Σύνοψη.....	83
6.2 Συμπεράσματα.....	85
6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	88
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ</b>	<b>89</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α</b>	<b>A-1</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β</b>	<b>B-1</b>

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

**Σ**το κεφάλαιο αυτό που είναι και το πρώτο της εργασίας επιχειρείται μια εισαγωγική προσέγγιση στο θέμα που αυτή πραγματεύεται. Για το σκοπό αυτό παρουσιάζονται ορισμένα θεωρητικά στοιχεία σχετικά με το νερό και τη διαχείρισή του.

Παράλληλα, πραγματοποιείται αναφορά στο σκοπό και τους αντικειμενικούς στόχους της εργασίας, στους λόγους εκείνους που καθιστούν ενδιαφέρουσα την ενασχόληση με το θέμα που πραγματεύεται η εργασία καθώς και στη δομή αυτής.

### 1.1 Το νερό ως φυσικός πόρος

Το νερό διαδραματίζει ένα καθοριστικό ρόλο για την ανθρωπότητα, αφού αποτελεί ένα φυσικό πόρο απόλυτα αναγκαίο τόσο για την επιβίωση του ανθρώπου όσο και για την εύρυθμη λειτουργία των κοινωνιών και των φυσικών οικοσυστημάτων (Katusiime and Schütt, 2020; Jhavar et al., 2018). Ενδεικτικό της υψηλής σημασίας του νερού είναι το γεγονός ότι στο Πρόγραμμα του Οργανισμού Ηνωμένων Εθνών με τους 17 στόχους για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη (Ατζέντα 2030 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη) συμπεριλαμβάνεται η παροχή πρόσβασης σε καθαρό, πόσιμο νερό σε κάθε άνθρωπο (UN, 2022).

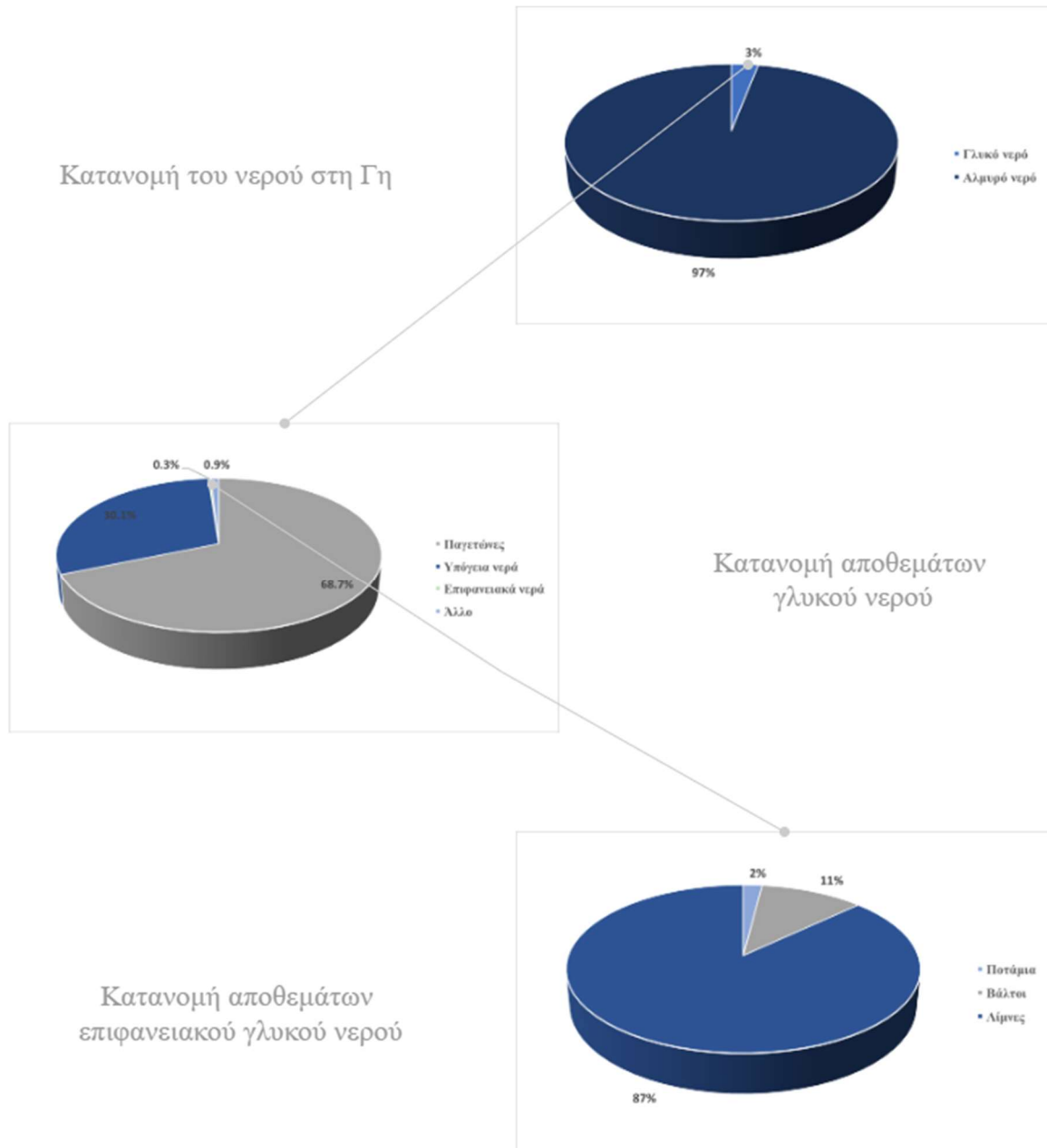
Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι το νερό καλύπτει περίπου το 70% της επιφάνειας της Γης αποτελεί ένα σπάνιο πόρο (Jhavar et al., 2018). Αυτό μπορεί να αποδοθεί μεταξύ άλλων στη

μεγάλη αύξηση των αναγκών για νερό κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, στη σύσταση των παγκοσμίων αποθεμάτων νερού και στον τρόπο με τον οποίο η ανθρωπότητα διαχειρίζεται τα διαθέσιμα αποθέματα. Αξίζει κάποιος σε αυτό το σημείο να επικεντρωθεί στην αύξηση των αναγκών για νερό και στη σύσταση των αποθεμάτων νερού στη Γη, αφού το θέμα της διαχείρισης των υδάτων παρουσιάζεται στην αμέσως επόμενη ενότητα.

Είναι γεγονός ότι τα τελευταία χρόνια η ραγδαία οικονομική ανάπτυξη που σημειώνεται σε πολλές περιοχές της Γης σε συνδυασμό με την πληθυσμιακή αύξηση, τη βελτίωση του επιπέδου ζωής και την αλλαγή στον τρόπο ζωής των ανθρώπων έχουν αυξήσει σημαντικά τη ζήτηση για νερό και κατά συνέπεια έχουν δημιουργήσει σε αρκετές περιοχές προβλήματα που σχετίζονται με την έλλειψη νερού (Borghesi, 2014; Debaere, 2014). Όπως, μάλιστα, προβλέπεται από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών μέχρι το 2025 περίπου 2.8 δισεκατομμύρια άνθρωποι θα υποφέρουν από έλλειψη νερού ενώ μέχρι το 2050 ο μισός πληθυσμός της Γης πρόκειται να ζει σε περιοχές με προβλήματα σχετιζόμενα με το νερό (UN, 2015).

Επιπλέον, η εξυπηρέτηση των καθημερινών ανθρώπινων αναγκών για ύδρευση και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η βιομηχανία, η γεωργία και η παραγωγή ενέργειας απαιτούν γλυκό νερό σε υγρή μορφή, το οποίο αντιστοιχεί μόνο στο 3% των παγκόσμιων αποθεμάτων νερού με το υπόλοιπο 97% να αντιστοιχεί σε θαλασσινό αλμυρό νερό (βλ. Σχήμα 1.1). Ο βαθμός σπανιότητας του νερού στη Γη αυξάνεται ακόμα περισσότερο εάν αναλογιστεί κάποιος ότι αυτό το μικρό ποσοστό γλυκού νερού σε υγρή μορφή δεν είναι εξ' ολοκλήρου προσβάσιμο και κατάλληλο προς χρήση από τους ανθρώπους, αφού μεγάλο μέρος αυτού, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.1 εμφανίζεται στη φύση με τη μορφή παγετώνων, ενώ τόσο τα υπόγεια νερά, τα οποία χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για την ικανοποίηση της





**Σχήμα 1.1:** Κατανομή του νερού στη Γη  
(Πηγή: El-Ghonemy, 2012; ιδία επεξεργασία)

παγκόσμιας ζήτησης για νερό<sup>1.1</sup> όσο και τα επιφανειακά νερά δεν είναι αξιοποιήσιμα στο σύνολό τους (Archibald and Marshall, 2018; Vieira, 2020). Αυτό έχει ως συνέπεια τα χαρακτηριστικά της εύκολης προσβασιμότητας και της καταλληλότητας προς χρήση πληρούνται μόνο από το 0.4% των παγκοσμίων αποθεμάτων νερού (Vieira, 2020). Επομένως,

<sup>1.1</sup> **Σημείωση:** Τα υπόγεια νερά ή υπόγεια ύδατα καλύπτουν περίπου το ήμισυ των παγκόσμιων αναγκών για πόσιμο, σχεδόν το 40% της ζήτησης νερού για άρδευση και σχεδόν το ένα τρίτο της ζήτησης νερού για βιομηχανική χρήση (IGRAC, 2018).

καθίσταται σαφές το ότι η σύσταση των παγκοσμίων αποθεμάτων νερού είναι μία από τις αιτίες που καθιστούν το νερό ένα σπάνιο φυσικό πόρο.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το νερό αποτελεί αναμφισβήτητα ένα φυσικό πόρο ζωτικής σημασίας για την ανθρωπότητα. Τα περιορισμένα υδάτινα αποθέματα, βέβαια, καθιστούν τον πόρο σπάνιο και ως εκ τούτου αναγνωρίζεται η ανάγκη για βέλτιστη διαχείριση των υφιστάμενων αποθεμάτων.

## **1.2 Διαχείριση υδατικών πόρων**

Όπως κατέστη σαφές από την προηγούμενη ενότητα η βέλτιστη διαχείριση των υφιστάμενων αποθεμάτων νερού καθίσταται αναγκαία. Το σκοπό αυτόν εξυπηρετεί ο επιστημονικός κλάδος της διαχείρισης των υδατικών πόρων. Η διαχείριση υδατικών πόρων μπορεί να οριστεί με διαφορετικούς τρόπους και ο τρόπος με τον οποίο αυτή ορίζεται επηρεάζει και τα παραγόμενα αποτελέσματα από την εφαρμογή πολιτικών που συνδέονται με αυτή. Έτσι, εάν οριστεί ως ένας κλάδος με έμφαση στο τεχνικό μέρος, ο οποίος συμβάλλει στο σχεδιασμό και την κατασκευή υποδομών αναγκαίων για την παροχή υπηρεσιών ύδρευσης, είναι σχεδόν βέβαιο ότι δεν θα ανταποκριθεί στις ανάγκες που υπάρχουν. Παράλληλα, εάν οριστεί ως ένας κλάδος με έμφαση στην εφαρμογή πολιτικών ρύθμισης της ζήτησης, είναι επίσης βέβαιο ότι δεν θα ανταποκριθεί στις ανάγκες που υπάρχουν, αφού αυτές σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να ικανοποιηθούν χωρίς τις κατάλληλες υποδομές. Επομένως, η διαχείριση των υδατικών πόρων, προκειμένου να έχει αποτελέσματα πρέπει να είναι ολοκληρωμένη και να λαμβάνει υπ' όψιν τόσο τεχνικά όσο και μη τεχνικά ζητήματα (Grigg, 2016). Ένας περιεκτικός ορισμός, λοιπόν, με βάση τις ανωτέρω παρατηρήσεις είναι ο εξής: η διαχείριση των υδατικών πόρων είναι ένας επιστημονικός κλάδος με τεχνικό και μη τεχνικό περιεχόμενο, ο οποίος αποσκοπεί στην εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων νερού για την

ικανοποίηση των ανθρώπινων αναγκών και την εύρυθμη λειτουργία των οικοσυστημάτων (Grigg, 1996).

Πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι η διαχείριση των υδατικών πόρων πέραν του ότι αποτελεί τη λύση στο πρόβλημα της περιορισμένης διαθεσιμότητας νερού αποτελεί και μία εκ των αιτιών που το δημιουργούν μαζί με την κατανομή του νερού Γη και την αύξηση στη ζήτηση, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει, καθώς σταδιακά αναγνωρίζεται το ότι οι ελλείψεις που παρατηρούνται και σχετίζονται με το νερό δεν προέρχονται μόνο από την ποσοτική έλλειψη αλλά και από τον μη αποδοτικό και μη βιώσιμο τρόπο με τον οποίο το διαχειρίζονται πολλές χώρες (Walter et al., 2010).

Στο ανωτέρω πλαίσιο έχει αναπτυχθεί μία προσέγγιση, η οποία καλείται Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων και ακολουθεί τις προτάσεις του Συνεδρίου των Ηνωμένων Εθνών για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη που πραγματοποιήθηκε στο Ρίο ντε Τζανέιρο το 1992. Το συνέδριο αυτό διοργανώθηκε μετά το Διεθνές Συνέδριο για το Νερό και το Περιβάλλον που πραγματοποιήθηκε στο Δουβλίνο την ίδια χρονιά και το οποίο κατέληξε στη διατύπωση των *Αρχών του Δουβλίνου*, στις οποίες βασίζεται η Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων (Hodgson, 2006).

Η Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων μπορεί να οριστεί ως μία διαδικασία, η οποία προωθεί τη συντονισμένη ανάπτυξη και διαχείριση του νερού, της γης και των σχετικών φυσικών πόρων με στόχο τη μεγιστοποίηση του οικονομικού και κοινωνικού οφέλους χωρίς να διακινδυνεύεται η βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων (Katusiime and Schütt, 2020). Οι τέσσερις αρχές στις οποίες βασίζεται η Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, οι οποίες όπως αναφέρθηκε πριν είναι γνωστός ως *Αρχές του Δουβλίνου* είναι οι εξής: α) το νερό είναι ένας πεπερασμένος ευάλωτος φυσικός πόρος, αναγκαίος για τη διατήρηση της ζωής, της ανάπτυξης των ανθρώπινων κοινοτήτων και του περιβάλλοντος, β) η διαχείριση του νερού

πρέπει να είναι μία συμμετοχική διαδικασία, στην οποία θα λαμβάνουν μέρος οι χρήστες και όσοι διαμορφώνουν σχετικές πολιτικές, γ) οι γυναίκες διαδραματίζουν κεντρικό ρόλο στη διαχείριση και διασφάλιση του νερού και δ) το νερό έχει οικονομική αξία και ως εκ τούτου πέραν του ότι αποτελεί κοινωνικό αγαθό πρέπει να αναγνωρίζεται και ως ένα οικονομικό αγαθό (GWP, 2000; Katusiime and Schütt, 2020).

Συμπεραίνεται, άρα, ότι η Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων αποτελεί μία ολιστική προσέγγιση στο θέμα της διαχείρισης του νερού, η οποία επιτάσσει κάθε σχετική απόφαση να λαμβάνει υπ' όψιν κοινωνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές παραμέτρους (Savenije and Van der Zaag, 2008). Οι παράμετροι αυτές, όπως φαίνεται και στο σχήμα 1.2, συνδέονται με τη δίκαιη χρήση του πόρου, με τη βιώσιμη χρήση αυτού και με την αποδοτική χρήση του αντίστοιχα (Postel, 1992).



**Σχήμα 1.2:** Παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν κατά τη χάραξη πολιτικών διαχείρισης υδατικών πόρων  
(Πηγή: Κατηρτζίδου, 2018; ίδια επεξεργασία)

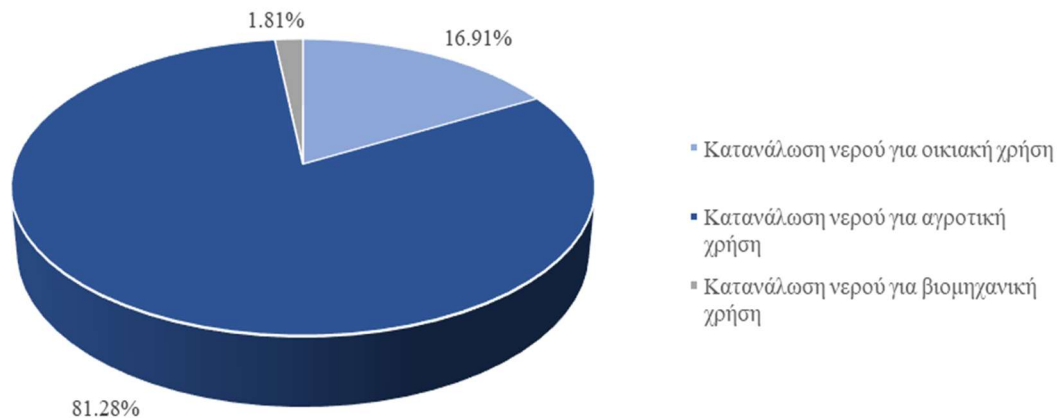
Κλείνοντας με την ενότητα που αφορά στη διαχείριση υδατικών πόρων κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθεί μία σύντομη αναφορά στην περίπτωση της Ελλάδας. Η Ελλάδα αποτελεί μία χώρα με μεγάλη κατανάλωση νερού. Όπως φαίνεται στον πίνακα 1.1 που παρουσιάζεται στη συνέχεια η Ελλάδα έρχεται πρώτη μεταξύ 14 Ευρωπαϊκών χωρών στη συνολική κατανάλωση νερού για το 2020 και μάλιστα με μεγάλη διαφορά από τη δεύτερη χώρα.

**Πίνακας 1.1:** Συνολική κατανάλωση νερού και κατανάλωση νερού ανά χρήση για 14 Ευρωπαϊκές χώρες για το 2020

Χώρα	Συνολική κατανάλωση νερού (εκατ. m <sup>3</sup> )	Κατανάλωση νερού για οικιακή χρήση (εκατ. m <sup>3</sup> )	Κατανάλωση νερού για αγροτική χρήση (εκατ. m <sup>3</sup> )	Κατανάλωση νερού για βιομηχανική χρήση (εκατ. m <sup>3</sup> )
Βουλγαρία	1692.94	815.20	758.88	118.86
Τσεχία	843.20	601.20	38.90	203.10
Δανία	955.53	402.39	527.33	25.81
Εσθονία	134.30	61.06	4.86	68.38
<b>Ελλάδα</b>	<b>9974.61</b>	<b>1687.09</b>	<b>8107.09</b>	<b>180.43</b>
Λετονία	160.78	87.44	56.29	17.05
Λιθουανία	225.31	133.76	60.40	31.15
Λουξεμβούργο	46.88	42.76	0.65	3.47
Μάλτα	38.13	14.53	22.60	1.00
Ρουμανία	6837.00	1057.00	2281.00	3499.00
Σλοβενία	208.88	168.90	2.84	37.14
Σλοβακία	483.30	293.10	28.80	161.40
Αλβανία	769.57	221.67	544.60	3.30
Σερβία	1405.68	677.10	660.67	67.91

(Πηγή: Eurostat, 2022)

Εάν κάποιος εστιάσει στον τρόπο με τον οποίο η κατανάλωση κατανέμεται στις διάφορες χρήσεις στην Ελλάδα, τότε σύμφωνα με το γράφημα 1.1 προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο αγροτικός τομέας ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης, αφού καταναλώνει πάνω από το 80% του νερού που καταναλώνεται συνολικά στη χώρα. Έτσι, με βάση τις δύο τελευταίες παρατηρήσεις αναδεικνύεται η ανάγκη για πιο ορθολογική χρήση και διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών πόρων με έμφαση στον αγροτικό τομέα, ο οποίος αποτελεί και το μεγαλύτερο καταναλωτή.



**Γράφημα 1.1:** Κατανάλωση νερού ανά χρήση στην Ελλάδα για το 2020 ως ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης  
(Πηγή: Eurostat, 2022; ίδια επεξεργασία)

### 1.3 Σκοπός και αντικειμενικοί στόχοι της εργασίας

Ο σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η ανάδειξη του ρόλου που μπορούν να έχουν στην αποτελεσματική και ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων και ιδιαίτερα των υπογείων υδάτων οικονομικά εργαλεία όπως τα εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού. Με βάση αυτή τη γενική διατύπωση μπορούν να προσδιοριστούν και οι αντικειμενικοί στόχοι της εργασίας, οι οποίοι είναι οι εξής:

- ✓ παρουσίαση του θεωρητικού υποβάθρου σχετικά με τα υπόγεια ύδατα και τους υπόγειους υδροφορείς, τα οικονομικά εργαλεία διαχείρισης υδατικών πόρων και τα συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού,
- ✓ παρουσίαση των τάσεων που εμφανίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με το θέμα της βέλτιστης διαχείρισης υδατικών πόρων με έμφαση στα υπόγεια ύδατα,
- ✓ ανάπτυξη κατάλληλης μεθοδολογίας για την εξυπηρέτηση του σκοπού της εργασίας με βάση τις επιταγές της Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Υδατικών Πόρων μέσω της οποίας:

- θα δίνεται έμφαση στον αγροτικό τομέα, ο οποίος ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης νερού σε χώρες, όπως η Ελλάδα,
  - θα λαμβάνονται υπ' όψιν πέραν των οικονομικών παραμέτρων (οι οποίες ενσωματώνονται στην αναπτυσσόμενη μεθοδολογία μέσω των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού) και οι περιβαλλοντικές παράμετροι που συνδέονται με ζητήματα χάραξης πολιτικών για τη διαχείριση υδάτων και σχετίζονται με την επίδραση της άντλησης υπογείων υδάτων από έναν υπόγειο υδροφορέα τόσο σε αυτόν όσο και στο τοπικό οικοσύστημα,
  - θα παρουσιάζονται τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν για την κοινωνία από μία τέτοια προσέγγιση και
  - θα αναδεικνύονται τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από διαφορετικά επίπεδα συνεργασίας μεταξύ των χρηστών κατά την άντληση υπογείων υδάτων,
- ✓ εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής πολιτικών διαχείρισης υδάτων που βασίζονται σε οικονομικά εργαλεία όπως τα εμπορεύσιμα δικαιώματα και στη συνεργασία μεταξύ των χρηστών.

#### 1.4 Αιτιολόγηση του θέματος

Το νερό και ιδιαίτερα το γλυκό νερό αποτελεί ένα φυσικό πόρο υψίστης σημασίας για τον άνθρωπο, τη λειτουργία των σύγχρονων κοινωνιών και των οικοσυστημάτων. Η περιορισμένη διαθεσιμότητα γλυκού νερού, ωστόσο, και το γεγονός ότι μόνο ένα μικρό ποσοστό των περιορισμένων αποθεμάτων αυτού πληροί τα κριτήρια της προσβασιμότητας και της καταλληλότητας προς χρήση καθιστούν αναγκαία τη βέλτιστη διαχείριση του πόρου.

Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 1.2 η σύγχρονη προσέγγιση της Ολοκληρωμένης Διαχείρισης Υδατικών Πόρων επιβάλλει κατά τη χάραξη πολιτικών διαχείρισης νερού να

λαμβάνονται υπ' όψιν κοινωνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές παράμετροι. Οι παράμετροι αυτές αφορούν στη δίκαιη, βιώσιμη και αποδοτική χρήση του πόρου αντίστοιχα.

Παράλληλα, αναγνωρίζεται ότι πρώτον ότι το μεγαλύτερο μέρος των αναγκών σε νερό καλύπτεται από υπόγειους υδατικούς πόρους και δεύτερον ότι σε χώρες όπως η Ελλάδα η αγροτική παραγωγή ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης νερού. Επομένως, η ενασχόληση με τη βέλτιστη διαχείριση υπογείων υδάτων σε ένα πολυδιάστατο πλαίσιο εντός του οποίου δίνεται έμφαση στον αγροτικό τομέα και διερευνώνται τα πιθανά οφέλη τόσο από την εφαρμογή οικονομικών εργαλείων όπως τα εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού όσο και από την υιοθέτηση πρακτικών περιβαλλοντικής προστασίας αποτελεί ένα επίκαιρο, ενδιαφέρον και χρήσιμο αντικείμενο μελέτης.

## 1.5 Δομή της εργασίας

Η εργασία αυτή αναπτύσσεται σε έξι κεφάλαια συμπεριλαμβανομένου του παρόντος και δύο παραρτήματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο, όπως κατέστη ήδη κατανοητό, επιχειρείται μία εισαγωγική προσέγγιση στο θέμα που πραγματεύεται η εργασία, οπότε παρουσιάζονται θεωρητικά στοιχεία σχετικά με το νερό και τη διαχείριση αυτού, αναλύεται ο σκοπός και οι αντικειμενικοί στόχοι της εργασίας και παρουσιάζεται η αιτιολόγηση του θέματος αυτής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται όλο εκείνο το θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο κρίνεται αναγκαίο να έχει κάποιος προκειμένου να κατανοήσει τη μεθοδολογία που αναπτύσσεται στη συνέχεια. Έτσι, πραγματοποιείται αναφορά στα υπόγεια ύδατα και τους υπόγειους υδροφορείς, στα οικονομικά εργαλεία διαχείρισης υδατικών πόρων και στα συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού.



Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι παράμετροι και τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας που διεξήχθη με αντικείμενο τη βέλτιστη διαχείριση υπογείων υδάτων και τη χρήση των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού για το σκοπό αυτόν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την εξυπηρέτηση του σκοπού και των στόχων της εργασίας. Έτσι, περιγράφεται αρχικά το πρόβλημα που εξετάζεται και στη συνέχεια παρουσιάζεται η προτεινόμενη μεθοδολογική προσέγγιση για κάθε περίπτωση του προβλήματος που διερευνάται.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εμπειρική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε μία συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Αναφέρονται, αρχικά, ορισμένα στοιχεία για την περιοχή μελέτης και έπειτα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα προσομοιώσεων με βάση τα υδρολογικά και οικονομικά δεδομένα αυτής, πραγματοποιείται τόσο σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών εκδοχών του προβλήματος που εξετάζεται όσο και ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων.

Στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται μία σύνοψη της εργασίας, εξάγονται συμπεράσματα και πραγματοποιούνται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζονται ορισμένες αποδείξεις εξισώσεων, οι οποίες θεωρήθηκε σκόπιμο να συμπεριληφθούν για λόγους πληρότητας και κατανόησης.

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζονται τα αναλυτικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις που διεξάγονται με βάση τα υδρολογικά και οικονομικά δεδομένα της περιοχής μελέτης.

*Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### Θεωρητικό υπόβαθρο

**Σ**το κεφάλαιο αυτό καταβάλλεται προσπάθεια να παρουσιαστεί όλο εκείνο το θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο είναι αναγκαίο για την πλήρη κατανόηση του θέματος που πραγματεύεται η παρούσα εργασία. Έτσι, πραγματοποιείται αναφορά στα υπόγεια ύδατα και τους υπόγειους υδροφορείς, τα οικονομικά εργαλεία διαχείρισης υδατικών πόρων και εκτενής αναφορά στις αγορές νερού – συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού.

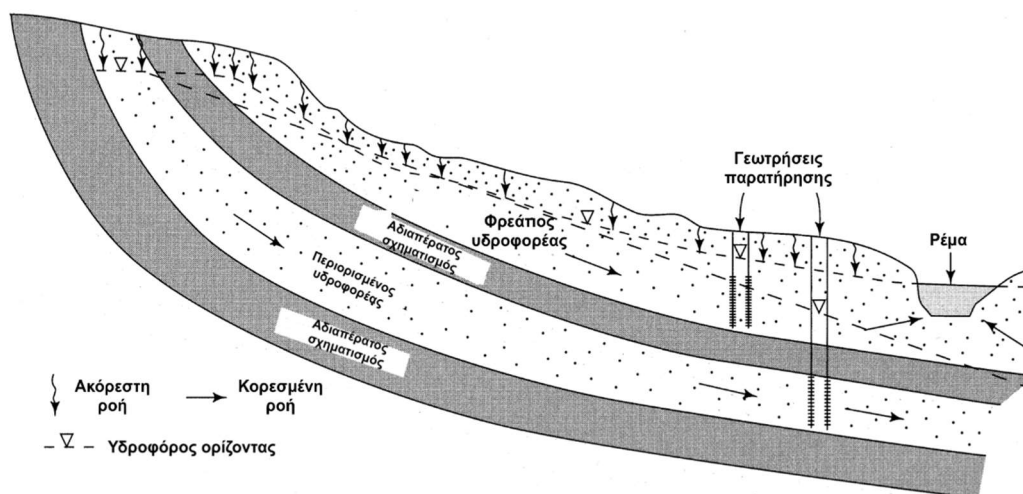
#### 2.1 Υπόγεια ύδατα και υπόγειοι υδροφορείς

##### 2.1.1 Ορισμοί και ταξινόμηση

Τα υπόγεια ύδατα (groundwater) μπορούν να οριστούν ως εκείνα τα υδατικά αποθέματα που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης και πιο συγκεκριμένα κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα εδαφών και γεωλογικών σχηματισμών, οι οποίοι είναι πλήρως κορεσμένοι (Freeze and Cherry, 1979). Βέβαια, ο ορισμός αυτός χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει την έννοια των υποεπιφανειακών υδάτων (subsurface water) και κατά συνέπεια με αυστηρά επιστημονικά κριτήρια δεν είναι απόλυτα σωστός (Bear and Cheng, 2010). Προκειμένου να καταστεί σαφής η διαφορά μεταξύ των δύο αυτών εννοιών (groundwater και subsurface water) πρέπει να πραγματοποιηθεί μια σύντομη αναφορά στις δύο ζώνες στις οποίες διεξάγεται η

κίνηση του νερού εντός του εδάφους, καθώς όπως είναι αναμενόμενο τα υπόγεια ύδατα δεν παραμένουν ακίνητα εντός όλων των γεωλογικών σχηματισμών στους οποίους είναι αποθηκευμένα αλλά έχουν τη δυνατότητα να κινούνται εντός αυτών μέσω των διακένων που υπάρχουν σε μία ειδική κατηγορία αυτών που χαρακτηρίζονται ως υδατοπερατοί με χαρακτηριστικά παραδείγματα τις αλλουβιακές αποθέσεις άμμων και χαλίκων (Λατινόπουλος, 2013). Οι δύο αυτές ζώνες είναι η ζώνη αερισμού (ή ακόρεστη ζώνη), όπου η ροή του νερού πραγματοποιείται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και η ζώνη κορεσμού, όπου η ροή του νερού πραγματοποιείται κατά την οριζόντια διεύθυνση (Λατινόπουλος, 2013). Με βάση αυτόν το διαχωρισμό η πλειοψηφία των επιστημόνων που ασχολούνται με θέματα υπόγειας υδρολογίας χρησιμοποιούν τον όρο υπόγεια ύδατα (groundwater), προκειμένου να περιγράψουν το νερό που υπάρχει εντός της ζώνης κορεσμού (Bear and Cheng, 2010).

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει και ο ορισμός της έννοιας υπόγειος υδροφορέας, ο οποίος μπορεί να οριστεί απλοϊκά ως ένας όγκος γεωλογικού σχηματισμού εντός του οποίου τα υπόγεια ύδατα έχουν δυνατότητα κίνησης ή πιο σύνθετα ως ένας σχηματισμός, ο οποίος μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλη ποσότητα νερού και να μεταφέρει την ποσότητα αυτή με ένα ρυθμό αρκετά γρήγορο, έτσι ώστε να θεωρείται υδρολογικά σημαντικός (Λατινόπουλος, 2013; Dingman, 2015). Η ταξινόμηση των υπόγειων υδροφορέων πραγματοποιείται σύμφωνα με τον Dingman (2015) με κριτήριο το είδος του άνω ορίου της ροής όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Έτσι, διακρίνονται δύο βασικά είδη υπόγειων υδροφορέων, οι φρεάτιοι υδροφορείς και οι περιορισμένοι (ή υπό πίεση) υδροφορείς. Οι φρεάτιοι υδροφορείς είναι αυτοί στους οποίους το άνω όριο της ροής είναι ελεύθερη επιφάνεια του νερού με πίεση ίση με την ατμοσφαιρική ενώ οι περιορισμένοι υδροφορείς είναι αυτοί στους οποίους το άνω όριο της ροής είναι ένας αδιαπέρατος σχηματισμός (Λατινόπουλος, 2013; Dingman, 2015).



Σχήμα 2.1: Φρεάτιος και περιορισμένος υδροφόρας  
(Πηγή: Dingman, 2015; ίδια επεξεργασία)

### 2.1.2 Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και χρησιμότητα υπογείων υδάτων

Όπως κατέστη αντιληπτό από το πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο τα υπόγεια ύδατα διαδραματίζουν έναν καθοριστικό ρόλο για την ανθρωπότητα, καθώς αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό εκμεταλλεύσιμου γλυκού νερού. Η υψηλή σημασία, βέβαια, των υπογείων υδάτων δεν προκύπτει μόνο εξαιτίας της ποσότητας αλλά και εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, τα οποία διαφοροποιούν τα υπόγεια από τα επιφανειακά ύδατα και τα οποία έχουν πρωτίστως καταγραφεί από τον Wiener (1972) και έκτοτε από αρκετούς άλλους μεταξύ των οποίων οι Bear and Cheng (2010), ο Λατινόπουλος (2013) και οι Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης (2017). Τα χαρακτηριστικά αυτά, τα οποία έχουν διπλή ανάγνωση αφού αποτελούν και τα πλεονεκτήματα – μειονεκτήματα των υπογείων υδάτων με προφανή το διαχωρισμό μεταξύ αυτών, είναι (Wiener, 1972; USGS, 1999; Bear and Cheng, 2010; Λατινόπουλος, 2013; Ευστρατιάδης και Κουτσογιάννης, 2017):

- η χωρική κατανομή: ενώ τα επιφανειακά ύδατα ακολουθούν δεδομένες διαδρομές ή εμφανίζονται τοπικά, τα υπόγεια ύδατα καταλαμβάνουν συνήθως αρκετά μεγάλες εκτάσεις, εντός των οποίων αναπτύσσονται υδροβόρες δραστηριότητες με αποτέλεσμα

η άντληση αυτών να μπορεί να καλύψει τη ζήτηση σε τοπικό επίπεδο χωρίς να απαιτούνται κοστοβόρες υποδομές μεταφοράς.

- η **διαθεσιμότητα**: τα υπόγεια ύδατα λόγω της αποθήκευσής τους στο έδαφος δεν εξαρτώνται άμεσα από τις κλιματικές μεταβολές κατά τη διάρκεια του έτους σε αντίθεση με τα επιφανειακά με αποτέλεσμα να μπορούν να καλύψουν τη ζήτηση ακόμα και σε περιόδους ξηρασίας, οπότε οι ποσότητες υπογείων υδάτων λειτουργούν ως «ταμιευτήρες υπερετήσιας ρύθμισης» όπως αναφέρεται από τους Ευστρατιάδη και Κουτσογιάννη (2017).
- το **κόστος εγκατάστασης** και το **κόστος λειτουργίας**: τα έργα αξιοποίησης υπογείων υδάτων διακρίνονται για το υψηλό κόστος λειτουργίας τους και το χαμηλό κόστος εγκατάστασης σε αντίθεση με τα έργα αξιοποίησης επιφανειακών υδάτων, τα οποία διακρίνονται για το χαμηλό κόστος λειτουργίας και το υψηλό κόστος εγκατάστασης. Μάλιστα, η ελκυστικότητα ενός έργου αξιοποίησης υπογείων υδάτων ως προς το κόστος εγκατάστασης ενισχύεται σε σημαντικό βαθμό και από το γεγονός ότι αυτή η κατηγορία έργων επιτρέπει τη σταδιακή ανάπτυξη των απαιτούμενων υποδομών, κάτι που μειώνει τις παρούσες αξίες των επενδύμενων κεφαλαίων. Το υψηλό κόστος λειτουργίας των έργων αξιοποίησης υπογείων υδατικών πόρων οφείλεται στο ενεργειακό κόστος, το οποίο συνεπάγεται η άντληση αυτών. Ενδεικτικό των μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας που απαιτούνται για την άντληση υπογείων υδάτων είναι αυτό που αναφέρεται από τους Ahlfeld and Laverty (2015), ότι δηλαδή στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής περίπου το 1-2% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προορίζεται για την άντληση υπογείων υδάτων.
- η **ποιότητα**: τόσο τα επιφανειακά όσο και τα υπόγεια ύδατα είναι εκτεθειμένα στη ρύπανση εξαιτίας των ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Στην περίπτωση των υπογείων υδάτων, η έκθεση των οποίων σε επιβλαβείς ανθρωπογενείς παράγοντες είναι πιο

περιορισμένη, εάν διαπιστωθεί ρύπανση τότε η διαδικασία αποκατάστασης είναι χρονοβόρα και πολύ δαπανηρή.

- η **ανανέωση**: τα υπόγεια ύδατα δεν είναι μη ανανεώσιμοι φυσικοί πόροι, όπως είναι τα ορυκτά καύσιμα ούτε όμως και πλήρως ανανεώσιμοι όπως η ηλιακή ενέργεια. Η ανανέωση των υπογείων υδάτων επιτυγχάνεται μέσω του εμπλουτισμού των υπογείων υδροφορέων από ένα μέρος των ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων, το οποίο διηθείται στο έδαφος. Βέβαια, ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιείται η ανανέωση αυτή είναι σημαντικά μικρότερος από το ρυθμό με τον οποίο πραγματοποιείται η άντληση υπογείων υδάτων.

Αφού, λοιπόν παρουσιάστηκαν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα οποία διακρίνουν τα υπόγεια από τα επιφανειακά ύδατα κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθεί και μία σύντομη αναφορά στους πολλαπλούς στόχους που εξυπηρετούν τα υπόγεια ύδατα και οι υπόγειοι υδροφορείς πέραν του προφανούς, ότι δηλαδή αποτελούν πηγές νερού (Bear and Cheng, 2010). Τα υπόγεια ύδατα, λοιπόν, εκτός του ότι αποτελούν πολύτιμες πηγές νερού παρέχουν μία σειρά επιτόπιων (*in situ*) υπηρεσιών, οι οποίες έρχονται ως συνέπεια της παραμονής αυτών εντός του εδάφους. Μεταξύ των υπηρεσιών αυτών είναι η πρόληψη των καθιζήσεων του εδάφους, το γεγονός ότι όπως προαναφέρθηκε αποτελούν εργαλείο αντιμετώπισης της ξηρασίας και κατ' επέκταση των ελλείψεων σε νερό, η προστασία ενάντια στη διείσδυση θαλασσινού νερού στον υδροφόρα, η διατήρηση της ποιότητας του νερού μέσω των ικανοτήτων αραίωσης που αυτά διαθέτουν (τεχνητός εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφόρα με ακάθαρτα επιφανειακά ύδατα, τα οποία διηθούνται και καθαρίζονται σταδιακά) καθώς και η εξασφάλιση και διατήρηση της ισορροπίας και βιοποικιλότητας των οικοσυστημάτων (Hellegers, 2001; Λατινόπουλος, 2013). Στα ανωτέρω πρέπει να προστεθεί τόσο η ικανότητα των υπόγειων υδροφορέων να λειτουργούν ως αγωγοί μεταφοράς νερού μέσω της ανθρώπινης παρέμβασης και της «μεταβολής των τοπικών υδραυλικών συνθηκών» όπως αναφέρεται από τον Λατινόπουλο

(2013) όσο και η αποθηκευτική τους ικανότητα, η οποία μπορεί να ενισχυθεί σημαντικά με αξιοποίηση της τεχνικής του τεχνητού εμπλουτισμού (Bear and Cheng, 2010).

## 2.2 Οικονομικά εργαλεία διαχείρισης υδατικών πόρων

Στο πρώτο εισαγωγικό κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε εκτενής αναφορά στην Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων και στην αναγκαιότητα που υπάρχει για αυτή. Όπως επισημάνθηκε, μία από τις βασικές αρχές στις οποίες βασίζεται η Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων, η οποία αποτελεί συγχρόνως και μία από τις τέσσερις *Αρχές του Δουβλίνου* για το νερό, οι οποίες διατυπώθηκαν το 1992, είναι ότι το νερό έχει οικονομική αξία και ως εκ τούτου πρέπει να αναγνωρίζεται ως οικονομικό αγαθό (GWP, 2000). Σε αυτήν την παραδοχή ήρθε να προστεθεί αργότερα και η οδηγία 2000/60 EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η δημοσίευση της οποίας διαμόρφωσε μια νέα πραγματικότητα για την αντιμετώπιση του νερού στην Ευρώπη. Η οδηγία αυτή αν και από τη μια πλευρά ξεκαθαρίζει ότι το νερό δεν είναι ένα «εμπορικό προϊόν όπως όλα τα άλλα, αλλά αποτελεί κληρονομιά που πρέπει να προστατεύεται και να τηγχάνει της κατάλληλης μεταχείρισης», από την άλλη πλευρά αναγνωρίζει την αναγκαιότητα της συμβολής των διαφόρων χρηστών του νερού στην ανάκτηση του κόστους που απαιτείται για την παροχή του, δηλαδή αναγνωρίζει επί της ουσίας το νερό όχι μόνο ως ένα θεμελιώδες κοινωνικό αγαθό αλλά και ως ένα οικονομικό αγαθό (EC, 2000).

Πράγματι, εάν κάποιος αναλογιστεί, πρώτον ότι προκειμένου ένα αγαθό να χαρακτηριστεί ως οικονομικό πρέπει να έχει δύο βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι η χρησιμότητα (δηλαδή τα άτομα να θεωρούν ότι η κατανάλωσή του έχει κάποιο όφελος για τα ίδια) και η σπανιότητα (περιορισμένη διαθεσιμότητα) και δεύτερον ότι το νερό έχει και τα δύο αυτά χαρακτηριστικά, τότε αβίαστα προκύπτει το συμπέρασμα ότι το νερό πρέπει να αντιμετωπίζεται ως οικονομικό αγαθό. Αυτό, βέβαια, σε καμία περίπτωση δεν πρέπει να αναιρεί το γεγονός ότι το νερό αποτελεί θεμελιώδες αγαθό για τον άνθρωπο και κατά συνέπεια



αν και αυτό είναι οικονομικό αγαθό, διαφοροποιείται σημαντικά από οποιοδήποτε άλλο εμπόρευμα (commodity) ή εμπορεύσιμο αγαθό (Farolfi, 2011).

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τα παραπάνω πολλές χώρες προχωρούν σε μεταρρυθμίσεις που σχετίζονται με τον τρόπο που διαχειρίζονται το νερό και την κατανομή του τροποποιώντας τόσο τη σχετική νομοθεσία όσο και την κοινή πρακτική που ακολουθούν έχοντας ως βάση την αντιμετώπιση του νερού ως οικονομικού αγαθού (Rey et al., 2019; Bjornlund and McKay, 2002). Σε αυτό το πλαίσιο υπάρχει ένα διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για το ρόλο που μπορούν να διαδραματίσουν οικονομικά εργαλεία στη βελτίωση και διευκόλυνση της διαχείρισης και της κατανομής του νερού (Walter et al., 2010; Rey et al., 2019). Τα οικονομικά εργαλεία μπορούν να οριστούν ως συστήματα παροχής οικονομικών κινήτρων με στόχο την αλλαγή στη συμπεριφορά των χρηστών και στη διαδικασία λήψης αποφάσεων από αυτούς και απώτερο σκοπό την ενδυνάμωση της περιβαλλοντικής προστασίας και θεωρείται ότι μπορούν να είναι και πιο αποτελεσματικά από παραδοσιακά εργαλεία περιβαλλοντικής πολιτικής (Mattheiß et al., 2009; EC, 2000). Είναι, επομένως, κατανοητό ότι αυτό που επιδιώκεται μέσω της εφαρμογής οικονομικών εργαλείων διαχείρισης υδάτων είναι ένας εθελοντικός εξαναγκασμός των χρηστών να υιοθετήσουν μία δεδομένη συμπεριφορά και η λογική πίσω από την εφαρμογή αυτών των εργαλείων είναι ότι οι άνθρωποι αντιδρούν σε οικονομικά κίνητρα, δηλαδή εν ολίγοις όταν οι τιμές είναι υψηλές τότε αναμένεται ότι αυτοί θα καταναλώνουν μικρότερες ποσότητες νερού (Kemper et al., 2003).

Μολονότι τα οικονομικά εργαλεία που εφαρμόζονται για τη διαχείριση επιφανειακών και υπογείων υδάτων είναι παρόμοια δεν είναι σε καμία περίπτωση ακριβώς τα ίδια εξαιτίας ορισμένων ιδιαίτερων γνωρισμάτων των υπογείων υδάτων, τα οποία συζητήθηκαν εκτενώς προηγουμένως και σχετίζονται με ζητήματα όπως το υψηλό κόστος άντλησης και η δυσκολία στην αντιμετώπιση της ρύπανσης, εφόσον αυτή διαπιστωθεί (Kemper et al., 2003). Δεδομένου ότι η εργασία αυτή πραγματεύεται τη διαχείριση υπογείων υδάτων στη συνέχεια πρόκειται να

πραγματοποιηθεί αναφορά στα οικονομικά εργαλεία διαχείρισης υπογείων υδάτων. Έτσι, τα κυριότερα οικονομικά εργαλεία για τη διαχείριση των υπογείων υδάτων είναι οι φόροι, η τιμολόγηση και οι επιδοτήσεις και οι αγορές νερού-συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού (GWP, 2000; Hellegers, 2001; Kemper et al., 2003; Mattheiß et al., 2009):

- **φόροι:** οι φόροι θεωρούνται ως ένα από τα πιο αποτελεσματικά εργαλεία για τη διαχείριση της ζήτησης για νερό και κατ' επέκταση για την αλλαγή της συμπεριφοράς των χρηστών. Βέβαια, η επιβολή φόρων στο νερό είναι ένα θέμα ιδιαίτερα ευαίσθητο από πολιτική άποψη, αφού η πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό είναι θεμελιώδης ανθρώπινη ανάγκη και αντίστοιχα θεμελιώδες ανθρώπινο δικαίωμα.
- **τιμολόγηση και επιδοτήσεις:** όπως τονίστηκε παραπάνω η οδηγία 2000/60 EC της Ευρωπαϊκής Ένωσης αναγνωρίζει την αναγκαιότητα της συμβολής των χρηστών νερού στην ανάκτηση του κόστους που συνεπάγεται η προσφορά του. Μέσω της θέσπισης τιμολόγησης για το νερό επιτυγχάνεται η ανάκτηση του κόστους προσφοράς και παράλληλα εξασφαλίζεται η άρτια λειτουργία των υποδομών και η βιωσιμότητα των παρόχων. Πρέπει, ωστόσο, στο σημείο αυτό να γίνουν δύο παρατηρήσεις. Η πρώτη παρατήρηση αφορά στο ότι η απλή – ομοιόμορφη τιμολόγηση δεν δίνει κίνητρα στους χρήστες για βιώσιμη και ορθολογική χρήση του πόρου. Είναι κατά συνέπεια αναγκαίο να επιβάλλονται κλιμακωτές χρεώσεις, μέσω των οποίων οι χρήστες που καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες να πληρώνουν μεγαλύτερη τιμή ανά μονάδα. Η δεύτερη παρατήρηση αφορά στο ότι συχνά η ανάγκη για ανάκτηση του κόστους προσφοράς των υπηρεσιών ύδρευσης έρχεται αντιμέτωπη με την ανάγκη για εφαρμογή πολιτικών για την καταπολέμηση της φτώχειας, οπότε και απαιτείται η χορήγηση απευθείας επιδοτήσεων σε οικονομικά αδύναμους.
- **αγορές νερού – συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού:** οι αγορές νερού θεωρείται ότι μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση των υδατικών πόρων, αφού σε ένα

τέτοιο πλαίσιο επί της ουσίας εξασφαλίζεται ότι το νερό χρησιμοποιείται τελικά από τους χρήστες εκείνους που μπορούν να του αποδώσουν μεγαλύτερη αξία. Οι αγορές νερού θεωρούνται, γενικά, πιο ευέλικτες από άλλα οικονομικά εργαλεία διαχείρισης υδάτων και πιο αποδεκτές από τους χρήστες. Η εύρυθμη λειτουργία μιας αγοράς νερού προϋποθέτει την ύπαρξη ενός κατάλληλου θεσμικού πλαισίου, το οποίο θα αντιμετωπίζει τις ατέλειες που υπάρχουν στην αγορά και θα περιορίζει την επίδραση εξωτερικών παραγόντων. Στις αγορές νερού και τα εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στην επόμενη ενότητα.

Ολοκληρώνοντας με την ενότητα των οικονομικών εργαλείων διαχείρισης υδατικών πόρων κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι κατά το στάδιο του σχεδιασμού για την εφαρμογή ενός τέτοιου εργαλείου πρέπει σε κάθε περίπτωση να λαμβάνονται υπ' όψιν πέραν των οικονομικών συνθηκών τόσο περιβαλλοντικές όσο και κοινωνικές παράμετροι. Η εξασφάλιση της περιβαλλοντικής προστασίας και η διατήρηση της κοινωνικής συνοχής, συνεπώς, πρέπει να αποτελούν προτεραιότητες για έναν ιδιωτικό ή δημόσιο φορέα, ο οποίος εισηγείται την εφαρμογή οικονομικών εργαλείων για τη διαχείριση του νερού (GWP, 2000).

### **2.3 Αγορές νερού – Συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού**

Οι αγορές νερού – συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού θεωρούνται ένα εξαιρετικό οικονομικό εργαλείο για τη διαχείριση των υδατικών πόρων και ιδιαίτερα των υπογείων υδάτων, αφού θεωρείται ότι μπορούν να ρυθμίσουν τη ζήτηση και να συμβάλλουν καθοριστικά στην ανακατανομή του νερού σε περιοχές που αντιμετωπίζουν σχετικά προβλήματα, δηλαδή σε περιοχές όπου παρατηρείται αυξανόμενη ζήτηση ενώ η διαθεσιμότητα είναι περιορισμένη (Seidl et al., 2020; Easter et al., 1999). Όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 2.2 αυτό που επί της ουσίας κάνουν οι αγορές νερού είναι να οδηγούν σε μια αποδοτική κατανομή

του νερού στους διάφορους χρήστες, κάτι το οποίο υλοποιείται μέσω της εξισορρόπησης των δυνάμεων της προσφοράς και της ζήτησης (Mattheiß et al., 2009; Hearne and Easter, 1997).

### 2.3.1 Ορισμός, επιστημονικό υπόβαθρο και ταξινόμηση

Μία αγορά νερού ή ένα σύστημα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού μπορεί να οριστεί ως ένα θεσμικό πλαίσιο νομικών ή κοινωνικών επιταγών το οποίο επιτρέπει σε ορισμένους χρήστες - κατόχους δικαιωμάτων νερού - να μεταβιβάζουν αυτά τα δικαιώματα σε άλλους χρήστες – επίσης κατόχους δικαιωμάτων ή και όχι - έναντι κάποιου οικονομικού ανταλλάγματος με βάση συγκεκριμένους κανόνες (Rey et al., 2019). Επομένως, στην πραγματικότητα αυτό που συγκροτεί μια αγορά νερού είναι οι συναλλαγές και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ αγοραστών και πωλητών με την ίδια την αγορά να αποτελεί ένα νομικό ή κοινωνικό θεσμό που αποσκοπεί απλά στη διευκόλυνση των συναλλαγών αυτών (Lee and Jouravlev, 1998). Από τη διατύπωση αυτή καθίσταται σαφές το ότι τα εμπορεύσιμα δικαιώματα δεν αποτελούν από μόνα τους ένα οικονομικό εργαλείο διαχείρισης υδάτων αλλά αποτελούν ουσιαστικά ένα μέσο συναλλαγής, όπως είναι το χρήμα, το οποίο είναι απόλυτα αναγκαίο για τη λειτουργία της αγοράς, η οποία όπως προαναφέρθηκε είναι το οικονομικό εργαλείο.

Η ιδέα της εφαρμογής ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων για την κατανομή φυσικών πόρων και κατά συνέπεια και των αγορών νερού αποδίδεται στον Καναδό οικονομολόγο John Dales, ο οποίος διαμόρφωσε την πρότασή του με βάση το θεώρημα του Coase (Borghesi, 2014). Το θεώρημα του Coase, βέβαια, θεωρείται ότι αποτυγχάνει στην περίπτωση του νερού, καθώς μία βασική παραδοχή του είναι ότι στην αγορά οποιουδήποτε φυσικού πόρου δεν υπάρχει κόστος συναλλαγών κατά τη μεταβίβαση των δικαιωμάτων χρήσης του πόρου από τον ένα χρήστη στον άλλον, παραδοχή που θεωρείται ως μη ρεαλιστική,

αφού σε μία αγορά νερού τα κόστη συναλλαγών όχι μόνο υπάρχουν αλλά είναι και ιδιαίτερα υψηλά (Raffensperger and Milke, 2017).

Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι ανεξάρτητα από το θεώρημα του Coase η βασική ιδέα στην οποία βασίζεται κάθε σύστημα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων για την κατανομή ενός φυσικού πόρου και κατά συνέπεια οι αγορές νερού είναι η αξιοποίηση των ιδιοτήτων που έχουν οι αγορές ως εργαλεία βέλτιστης κατανομής φυσικών πόρων με σκοπό τόσο την επίτευξη οικονομικής αποδοτικότητας όσο και την αποφυγή υπερεκμετάλλευσης των πόρων αυτών (Borghesi, 2014). Πιο συγκεκριμένα και σε ό,τι αφορά την περίπτωση των αγορών νερού θεωρείται ότι σε μια πλήρως ανταγωνιστική αγορά τα δικαιώματα χρήσης νερού αυτά θα καταλήξουν σε εκείνους τους χρήστες που μπορούν να αποδώσουν στον πόρο την υψηλότερη δυνατή αξία (Kraemer et al., 2004).

Οι αγορές νερού μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες: τις επίσημες και τις ανεπίσημες (Hadjigeorgalis, 2009). Η ταξινόμηση αυτή πραγματοποιείται με βάση τις δύο διαφορετικές απόψεις που επικρατούν σχετικά με το θεσμικό περιβάλλον που απαιτείται για την αποδοτική λειτουργία μιας αγοράς νερού: τη νεοκλασική άποψη που υποστηρίζει ότι απαιτείται ένα επίσημα θεσμοθετημένο σύστημα για τη λειτουργία της αγοράς νερού και την πρακτική ή ρεαλιστική άποψη, η οποία υποστηρίζει τη σημασία της προώθησης των ανεπίσημων συμφωνιών μεταξύ των διαφόρων χρηστών (Easter et al., 1999).

Οι επίσημες αγορές είναι αυτές οι οποίες υποστηρίζονται από ένα νομικό σύστημα το οποίο διευκολύνει τις συναλλαγές δικαιωμάτων νερού και τις αντίστοιχες συμβάσεις που υπογράφονται μεταξύ των χρηστών. Επιπλέον, σε μια επίσημη αγορά νερού η μεταβίβαση των δικαιωμάτων χρήσης είναι συνήθως μακροχρόνια γεγονός που καθιστά τον αντίκτυπο της αγοράς στην κοινότητα αρκετά υψηλό (Bjornlund and McKay, 2002). Η επιτυχία μιας επίσημης αγοράς νερού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το νομικό πλαίσιο που τη διέπει ενώ

η εφαρμογή τους ενδείκνυται σε περιοχές όπου χρειάζονται συναλλαγές δικαιωμάτων χρήσης νερού μεταξύ χρηστών που ανήκουν σε διαφορετικούς τομείς της οικονομίας (Hadjigeorgalis, 2009). Υπό ιδανικές συνθήκες σε μια επίσημη αγορά νερού τόσο η τιμή που ένας χρήστης πληρώνει για τη χρήση μια συγκεκριμένης ποσότητας νερού όσο και οι λοιποί όροι που αφορούν στη συγκεκριμένη συναλλαγή αποτελούν αποκλειστικά αντικείμενο διαπραγμάτευσης μεταξύ πωλητή και αγοραστή. Ωστόσο, σε μια επίσημη αγορά νερού συνήθως επιβάλλονται σχετικοί περιορισμοί από κάποια κεντρική αρχή (Holden and Thobani, 1996).

Οι ανεπίσημες αγορές είναι αυτές στις οποίες πραγματοποιούνται συμφωνίες μεταξύ των χρηστών με βάση περισσότερο τις κοινωνικές επιταγές παρά κάποιο νομικό πλαίσιο. Το πλαίσιο λειτουργίας των ανεπίσημων αγορών νερού καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ανάγκες των χρηστών (Hadjigeorgalis, 2009). Στις ανεπίσημες αγορές νερού η μεταβίβαση των δικαιωμάτων χρήσης είναι συνήθως προσωρινή γεγονός που τις καθιστά προτιμητέες από τους χρήστες καθώς ουσιαστικά δεν μεταβάλλουν το «ιδιοκτησιακό καθεστώς» των δικαιωμάτων νερού (Bjornlund and McKay, 2002). Εδώ οι τιμές πώλησης των δικαιωμάτων χρήσης νερού αποτελούν αντικείμενο ελεύθερης διαπραγμάτευσης μεταξύ πωλητή και αγοραστή ενώ η έλλειψη ενός νομικού πλαισίου που να διέπει τις συναλλαγές περιορίζει την εφαρμογή των εν λόγω αγορών σε επίπεδο χρηστών που ανήκουν στον ίδιο τομέα της οικονομίας, όπως είναι για παράδειγμα η πώληση μιας συγκεκριμένης ποσότητας νερού από έναν αγρότη σε έναν άλλο που κατέχει ένα γειτονικό αγροτεμάχιο (Holden and Thobani, 1996; Thobani, 1997). Γενικά, οι ανεπίσημες αγορές νερού έχουν καθιερωθεί σε περιοχές όπου οι κυβερνήσεις απέτυχαν να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις που σχετίζονται με το νερό. Αν και είναι παράνομες οι κυβερνήσεις συχνά παραβλέπουν αυτό το γεγονός καθώς θεωρούν ότι οι ανεπίσημες αγορές επιτυγχάνουν γρήγορη και αποτελεσματική ανακατανομή του νερού (Thobani, 1997).

### 2.3.2 Χαρακτηριστικά και λειτουργία

Τα χαρακτηριστικά που διακρίνουν τις αγορές νερού – συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού και ειδικότερα τις επίσημες αγορές νερού για τις οποίες έχει αναπτυχθεί σχετική βιβλιογραφία από τις άλλες μεθόδους κατανομής νερού σε ανταγωνιστικούς χρήστες και από άλλα οικονομικά εργαλεία διαχείρισης υδατικών πόρων, μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα τρία σημεία (Colby, 1988; Lee and Jouravlev, 1998):

- Τα εμπορεύσιμα δικαιώματα χρήσης νερού δηλαδή οι ποσότητες νερού που αποτελούν αντικείμενο συναλλαγής στο πλαίσιο μιας επίσημης αγοράς νερού έχουν ξεχωριστή αξία τόσο από αυτή των υπηρεσιών που απαιτούνται για τη συναλλαγή όσο και από αυτή της γης που ενδεχομένως να τις περιέχει. Αυτό σημαίνει ότι για μια επίσημη αγορά νερού το νερό αποτελεί μια αυτόνομη οικονομική οντότητα.
- Η κινητήριος δύναμη μιας επίσημης αγοράς νερού είναι η αντίληψη που επικρατεί μεταξύ των διαφόρων χρηστών και δυνητικών αγοραστών ή πωλητών ότι οι συναλλαγές δικαιωμάτων χρήσης νερού λειτουργούν προς όφελός τους και ως εκ τούτου η ανακατανομή του νερού που ακολουθεί κάθε συναλλαγή μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει τη συγκατάθεση των συναλλασσόμενων.
- Καμία κεντρική αρχή δεν καθορίζει την τιμή ή οποιονδήποτε άλλον όρο μιας συναλλαγής δικαιωμάτων νερού που πραγματοποιείται στο πλαίσιο μιας επίσημης αγοράς νερού. Αυτό που μπορεί να κάνει μια κεντρική αρχή είναι να επιβάλλει ένα πλαίσιο κανόνων εντός του οποίου λειτουργεί μια επίσημη αγορά νερού. Αυτό σημαίνει αφ' ενός ότι τόσο η τιμή όσο και οι άλλοι όροι που διέπουν κάθε συναλλαγή αποτελούν αντικείμενο διαπραγμάτευσης μεταξύ αγοραστή και πωλητή και αφ' ετέρου ότι κάθε συναλλαγή μπορεί να είναι χρηματικά επικερδής για τον πωλητή αφού αυτός δεν δεσμεύεται να προβεί στην πώληση σε τιμή κόστους.

Η λειτουργία μιας αγοράς νερού συνίσταται στην αρχική εκχώρηση των δικαιωμάτων χρήσης νερού και στις συναλλαγές δικαιωμάτων χρήσης μεταξύ των χρηστών. Για το λόγο αυτόν μια αγορά νερού διακρίνεται σε δύο υπο-αγορές, την πρωτογενή και τη δευτερογενή αγορά (Wang et al., 2019). Αυτό σημαίνει ότι μια κεντρική αρχή θέτει σε πρώτη φάση ένα ανώτατο όριο κατανάλωσης νερού για κάθε χρήστη το οποίο αντιστοιχεί στη μέγιστη ποσότητα νερού που μπορεί αυτός να καταναλώσει (Borghesi, 2014). Η διαδικασία αυτή η οποία ονομάζεται αρχική κατανομή των δικαιωμάτων χρήσης νερού ή πρωτογενής αγορά νερού (Wang et al., 2019) είναι μια από τις σημαντικότερες διεργασίες για μία αγορά νερού, καθώς θεωρείται ότι μπορεί να αποτελέσει εστία όξυνσης του ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών. Για το λόγο αυτόν η αρχική κατανομή πρέπει να είναι δίκαιη για τους χρήστες. Η αρχική κατανομή μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους εξής τρόπους (Tietenberg, 2006; Armitage et al., 1999):

- Με βάση ιστορικά στοιχεία σχετικά με τη χρήση νερού από κάθε χρήστη,
- Με τυχαίο τρόπο δηλαδή με τη διοργάνωση κάποιου είδους λοταρίας από την κεντρική αρχή που ρυθμίζει την επίσημη αγορά νερού,
- Με βάση συγκεκριμένους κανόνες που επιβάλλονται από την κεντρική αρχή και με βάση τους οποίους καθορίζεται το δικαίωμα συμμετοχής κάποιου χρήστη στη διαδικασία και
- Μέσω δημοπρασιών στις οποίες καλούνται οι διάφοροι χρήστες να συμμετέχουν.

Αφού ολοκληρωθεί η ανωτέρω διαδικασία οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα είτε να αγοράσουν είτε να πουλήσουν τα δικαιώματα αυτά ανάλογα με τις ανάγκες τους σε νερό (Borghesi, 2014). Πιο συγκεκριμένα μετά την αρχική κατανομή των δικαιωμάτων χρήσης νερού τα δικαιώματα αυτά μπορούν να μεταφέρονται από έναν χρήστη σε έναν άλλον μέσω εμπορικών συναλλαγών. Το γεγονός αυτό σηματοδοτεί τη μετάβαση της αγοράς νερού σε μια δεύτερη φάση, η οποία καλείται και δευτερογενής αγορά νερού (Wang et al., 2019).



Η λειτουργία κάθε αγοράς νερού περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το κόστος των συναλλαγών, το οποίο όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 2.3.1 είναι και ένας από τους λόγους που αποτυγχάνει το θεώρημα του Coase στην περίπτωση του νερού. Όταν το κόστος συναλλαγών είναι υψηλό μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του όγκου των συναλλαγών μεταξύ των χρηστών και κατά συνέπεια στον περιορισμό του θετικού οικονομικού αντικτύπου των αγορών νερού (Armitage et al., 1999). Η ύπαρξη του κόστους συναλλαγών γίνεται αισθητή στους συμμετέχοντες σε μία αγορά νερού μέσω της επιβολής τελών και φόρων επί των συναλλαγών που πραγματοποιούνται. Οι δραστηριότητες που αποτελούν πηγή του κόστους συναλλαγής είναι οι εξής τρεις: *αναζήτηση και πληροφόρηση, διαπραγμάτευση, υπογραφή συμβάσεων και λήψη αποφάσεων* καθώς και *εποπτεία, παρακολούθηση και προώθηση* (Lee and Jouravlev, 1998; Armitage et al., 1999).

### **2.3.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα**

Οι αγορές νερού οδηγούν σε σημαντικά οφέλη τόσο για τους χρήστες όσο και για τον ίδιο το φυσικό πόρο. Τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την ίδρυση και τη λειτουργία των αγορών νερού μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα σημεία (Rosegrant and Binswanger, 1994; Rosegrant et al., 1995; Bekchanov et al., 2013; Armitage et al., 1999; Howe et al., 1986; Bonnis et al., 2011; Dinar et al., 1997; Holden and Thobani, 1996):

- Προσφέρεται μεγάλη δυνατότητα ευελιξίας στους συμμετέχοντες στην αγορά ως προς την τιμή στην οποία προμηθεύονται νερό. Αυτό σημαίνει ότι όταν ένας χρήστης θεωρεί υψηλή την τιμή που ζητείται από κάποιον άλλον χρήστη για την πώληση δικαιωμάτων χρήσης νερού μπορεί να αναζητήσει άλλον πωλητή που θα προσφέρει χαμηλότερη τιμή.

- Προσφέρεται η δυνατότητα στους χρήστες να αποκομίσουν πρόσθετα οικονομικά οφέλη από την πώληση μέρους των δικαιωμάτων χρήσης νερού που τους παραχωρήθηκε αρχικά.
- Παρέχεται η δυνατότητα κατά κύριο λόγο στους επαγγελματικούς χρήστες (βιομηχανία και αγρότες) να επαναξιολογήσουν την κερδοφορία των δραστηριοτήτων τους καθώς με την ίδρυση της αγοράς νερού εμφανίζονται για αυτούς νέες επαγγελματικές ευκαιρίες από τις αγοραπωλησίες δικαιωμάτων νερού που ενδέχεται να είναι πιο κερδοφόρες από την κύρια δραστηριότητά τους.
- Η αγορά νερού είναι πιο αποδεκτή από τους χρήστες τόσο συγκριτικά με άλλες μεθόδους κατανομής νερού όσο και συγκριτικά με παραδοσιακές μεθόδους τιμολόγησης του νερού. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι συναλλαγές μέσω της αγοράς νερού εγγυώνται την επικράτηση κλίματος δικαιοσύνης καθώς αν κάποιος θεωρεί ότι δεν έχει συμφέρον από τις αγοραπωλησίες δικαιωμάτων χρήσης νερού μπορεί απλά να μη συμμετέχει σε αυτές.

Παρ' όλα αυτά, τα μειονεκτήματα που διακρίνουν τη λειτουργία των αγορών νερού δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να αγνοηθούν. Έτσι, παρά τα πολλά πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την ίδρυση αγορών νερού υπάρχουν παράγοντες, οι οποίοι μπορούν να αποτελέσουν εμπόδιο στην αποτελεσματική λειτουργία αυτών. Ειδικότερα, τα μειονεκτήματα των αγορών νερού μπορούν να συνοψιστούν στα ακόλουθα σημεία (Dinar et al., 1997; Holden and Thobani, 1996; Thobani, 1997; Lee and Jouravlev, 1998; Delorit and Block, 2018; Bonnis et al., 2011):

- Σε πολλές χώρες επικρατεί η αντίληψη ότι το νερό αποτελεί θεμελιώδες αγαθό για την ανθρώπινη επιβίωση και ως εκ τούτου η διαχείρισή του πρέπει να είναι υπό δημόσιο έλεγχο. Θεωρείται, δηλαδή, ότι τα κοινωνικά οφέλη ξεπερνούν τα ιδιωτικά οικονομικά οφέλη.

- Υπάρχουν πρακτικές δυσκολίες οι οποίες συνδέονται με τη μέτρηση του νερού, τον καθορισμό των δικαιωμάτων καθώς και με τη διαμόρφωση ενός θεσμικού πλαισίου για τη διαμόρφωση της αγοράς.
- Η κατανάλωση μεγάλων ποσοτήτων νερού για αστική και κυρίως βιομηχανική χρήση (η βιομηχανία είναι ικανή να αποδώσει υψηλή οικονομική αξία στο νερό, οπότε σε ένα πλαίσιο εφαρμογής συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων αναμένεται να καταλήγουν σε αυτή μεγάλες ποσότητες νερού) ενδέχεται να οδηγήσει σε αύξηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης εάν δε ληφθούν κατάλληλα μέτρα.
- Οι απαιτήσεις για επενδύσεις σε πάγια κεφάλαια είναι ιδιαίτερα υψηλές και η περίοδος απόσβεσης των κεφαλαίων αυτών μεγάλη οπότε υπάρχει έντονος ο κίνδυνος της ανάπτυξης μονοπωλίων και της εμφάνισης φαινομένων κερδοσκοπίας.
- Ελλοχεύει πάντα ο κίνδυνος της κοινωνικοοικονομικής ανισότητας, δηλαδή άνθρωποι με χαμηλά εισοδήματα να αποκλειστούν από την πρόσβαση σε νερό. Αυτό ισχύει κυρίως για την περίπτωση των μικρών καλλιεργητών, οι οποίοι σε ένα πλαίσιο εφαρμογής συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού σε μία αγροτική περιοχή είτε θα αποκτήσουν περιορισμένα δικαιώματα χρήσης νερού οπότε θα αναγκαστούν να στραφούν σε καλλιέργειες λιγότερο υδροβόρες και κατά συνέπεια λιγότερο κερδοφόρες είτε δεν θα αποκτήσουν καθόλου δικαιώματα χρήσης νερού καθώς αυτά θα καταλήξουν σε μεγάλες εταιρείες και εύπορους ιδιώτες.

#### 2.3.4 Εφαρμογή σε συγκεκριμένες χώρες

Οι αγορές νερού έχουν εφαρμοστεί κατά κύριο λόγο σε περιοχές που βρίσκονται εκτός Ευρώπης και σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Αυστραλία και οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής.

Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής των αγορών νερού στην Ευρώπη είναι η Ισπανία. Στην Ισπανία σε πολλές περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα από την έλλειψη νερού υπάρχουν ανεπίσημες αγορές νερού, οι οποίες έχουν τη μορφή απλών συμφωνιών μεταξύ ιδιωτών για την ανακατανομή νερού χωρίς κάποιον κεντρικό έλεγχο. Οι αγορές νερού στην Ισπανία θεσμοθετήθηκαν και επίσημα το 1999 με τη ψήφιση του νόμου 46/1999, ο οποίος περιελάμβανε το νομικό πλαίσιο με βάση το οποίο αυτές θα λειτουργούσαν στο εξής και προέβλεπε την ίδρυση επίσημων αγορών νερού με τη μορφή τοπικών αγορών και τραπεζών νερού (Palomo-Hierro et al., 2015).

Στην Αμερικανική Ήπειρο οι αγορές νερού έχουν αναπτυχθεί κατά κύριο λόγο στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (Η.Π.Α.) και στη Χιλή. Στις Η.Π.Α. οι αγορές νερού έχουν εφαρμοστεί κυρίως στις δυτικές πολιτείες όπου η μεγάλη πληθυσμιακή αύξηση δημιούργησε ανησυχίες σχετικά με την εξασφάλιση επαρκών ποσοτήτων νερού για τον πληθυσμό (Borghesi, 2014). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι αγορές του Ρίο Γκράντε στην πολιτεία του Νέου Μεξικού, οι αγορές νερού στις πολιτείες του Τέξας και της Καλιφόρνιας (Mattheiß et al., 2009). Η περίπτωση της Καλιφόρνια θεωρείται ιδιαίτερη και αρκετά επιτυχημένη με την επιτυχία να οφείλεται στο γεγονός ότι η επιτήρηση της διαδικασίας συναλλαγών είναι υπό τον έλεγχο της πολιτείας καθώς και στο ότι ο τρόπος λειτουργίας της τη διαφοροποιεί από τις λοιπές αγορές νερού κάνοντάς τη να προσομοιάζει περισσότερο σε μια τράπεζα νερού (Borghesi, 2014; Dinar et al., 1997). Στη Χιλή οι αγορές νερού αποτέλεσαν μέρος μιας ευρύτερης πολιτικής για τη διαχείριση των φυσικών πόρων με όρους ελεύθερης αγοράς, η οποία εισήχθη από τη στρατιωτική κυβέρνηση του Αογκούστο Πινοσέτ. Αυτή η πολιτική είχε σκοπό αφ' ενός την προώθηση των ιδιωτικών επενδύσεων στις υποδομές που χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση του νερού και αφ' ετέρου την ενίσχυση της κοινής πεποίθησης ότι το νερό αποτελεί ένα αντικείμενο όπως όλα τα άλλα και ως εκ τούτου είναι δυνατόν να ανήκει εξ' ολοκλήρου σε κάποιον, επιδίωξη που διαφοροποιεί τη Χιλή και την

καθιστά πρωτοπόρο στην προσέγγιση του νερού ως ενός πλήρως εμπορεύσιμου αγαθού (Raffensperger and Milke, 2017; Bauer, 2005).

Η Αυστραλία, η οποία είναι η πιο ξηρή ήπειρος της Γης είναι μια ακόμα περίπτωση εφαρμογής των αγορών νερού. Όταν οι αγορές νερού ιδρύθηκαν για πρώτη φορά στην Αυστραλία δεν διαμορφώθηκε επαρκές και κατάλληλο νομικό πλαίσιο που να διέπει τη λειτουργία τους με αποτέλεσμα να υπάρξουν κοινωνικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές επιπτώσεις. Η διαμόρφωση ενός τέτοιου πλαισίου έγινε το 1989 με την εισαγωγή του Water Act, το οποίο προέβλεπε κανονισμούς που ρυθμίζουν τις συναλλαγές δικαιωμάτων χρήσης νερού. (Mattheiß et al., 2009). Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα επιτυχημένης αγοράς νερού όχι μόνο στην Αυστραλία αλλά σε ολόκληρο τον κόσμο είναι αυτό της λεκάνης απορροής Murray-Darling (Raffensperger and Milke, 2017). Η επιτυχία αυτή οφείλεται τόσο σε ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής αυτής όπως ο μεγάλος αριθμός αγροτών όσο και άλλα όπως η χρηματοδότηση του εγχειρήματος από κρατικούς πόρους. Παρά την επιτυχία τους βέβαια οι αγορές νερού στην Αυστραλία αντιμετωπίζουν ακόμα προβλήματα με κυριότερα αυτά που σχετίζονται με ζητήματα περιβάλλοντος και αυτά που αφορούν σε θέματα κοινωνικής δικαιοσύνης καθώς και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται το φαινόμενο της επικράτησης των μεγάλων αγροτών έναντι των μικρότερων σε επίπεδο καλλιεργειών (Borghesi, 2014).

*Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Βιβλιογραφική ανασκόπηση

**Σ**το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε σχετικά με τη βέλτιστη διαχείριση υπογείων υδάτων και τη χρήση των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να συνοψίσει τις επικρατούσες επιστημονικές απόψεις σχετικά με το συγκεκριμένο θέμα συμβάλλοντας έτσι στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη χρησιμότητα και κυρίως την πρωτοτυπία της εργασίας αυτής.

#### 3.1 Καθορισμός παραμέτρων βιβλιογραφικής έρευνας

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε κατά τη διεξαγωγή της βιβλιογραφικής έρευνας είναι αυτή της συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης. Το πρώτο βήμα σε μία τέτοια διαδικασία είναι η αναζήτηση κατάλληλων βιβλιογραφικών πηγών, η οποία προϋποθέτει τον καθορισμό του περιεχομένου της. Με δεδομένο ότι το θέμα που πραγματεύεται η εργασία είναι η βέλτιστη διαχείριση υπογείων υδάτων με τη χρήση εμπορεύσιμων δικαιωμάτων σε πρώτη φάση επιλέχθηκαν κατάλληλες λέξεις-φράσεις κλειδιά, προκειμένου να εισαχθούν σε ακαδημαϊκές βάσεις δεδομένων. Αυτές οι λέξεις-φράσεις κλειδιά είναι πρωτίστως οι “groundwater management” και “tradable water rights” με τη χρήση του λογικού τελεστή AND μεταξύ αυτών και δευτερευόντως οι “water markets” και “water trading”, όροι που χρησιμοποιούνται ευρέως προκειμένου να αποδώσουν εναλλακτικά τον όρο “tradable water

rights”. Το δεύτερο βήμα είναι ο καθορισμός των παραμέτρων της έρευνας (είδος πηγών, χρονολογία έκδοσης, βάσεις δεδομένων). Οι πηγές που αναζητήθηκαν ήταν κυρίως επιστημονικά άρθρα αλλά και μελέτες διεθνών οργανισμών, βιβλία και διδακτορικές διατριβές. Στην έρευνα αποφασίστηκε να μην τεθούν χρονικοί περιορισμοί ως προς το έτος δημοσίευσης των πηγών. Καταβλήθηκε, ωστόσο, κάθε δυνατή προσπάθεια προκειμένου οι πηγές που κρίθηκαν ως κατάλληλες για να συμπεριληφθούν στη βιβλιογραφική ανασκόπηση να έχουν δημοσιευτεί κατά την τελευταία δεκαετία με εξαίρεση φυσικά εμβληματικές εργασίες που σηματοδότησαν την έναρξη της ενασχόλησης με το συγκεκριμένο θέμα. Τέλος, οι ακαδημαϊκές βάσεις δεδομένων που επιλέχθηκαν ήταν το Scopus και το Google Scholar και η γλώσσα συγγραφής των βιβλιογραφικών πηγών η αγγλική και η ελληνική.

### **3.2 Αποτελέσματα βιβλιογραφικής έρευνας**

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν ένα συλλογικό πόρο που έχει μελετηθεί εκτενώς στη διεθνή βιβλιογραφία με επίκεντρο κυρίως την εξάντλησή, εξαιτίας της αυξανόμενης ζήτησης για νερό για αγροτική, βιομηχανική και οικιακή χρήση και την απαιτούμενη βιώσιμη διαχείρισή του (Madani and Dinar, 2012; Nasim et al., 2020). Τα βασικά χαρακτηριστικά των περισσότερων σχετικών εργασιών είναι αφ’ ενός ότι διαμορφώνουν προβλήματα που επιλύονται με μεθόδους βελτιστοποίησης και αφ’ ετέρου η δυναμική ως προς το χρόνο προσέγγιση. Το κύριο πλεονέκτημα των μεθόδων βελτιστοποίησης είναι ότι οδηγούν στον προσδιορισμό της καλύτερης δυνατής στρατηγικής διαχείρισης του πόρου βάσει των περιορισμών που τίθενται κάθε φορά (Singh, 2012). Ο δυναμικός ως προς το χρόνο χαρακτήρας των προσεγγίσεων υπαγορεύεται γενικά από την αναγκαιότητα διασφάλισης της δυνατότητας χρήσης του συλλογικού πόρου στο μέλλον και ειδικότερα από τους εξής δύο λόγους: πρώτον, η άντληση υπογείων υδάτων από έναν υδροφορέα στο παρόν μειώνει τη διαθέσιμη ποσότητα νερού σε αυτόν στο μέλλον, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε υδροφορείς με χαμηλούς ρυθμούς επαναπλήρωσης, αφού ελλοχεύει ο κίνδυνος να καταστεί ο πόρος μερικώς μη ανανεώσιμος



και δεύτερον, η άντληση υπογείων υδάτων στο παρόν αυξάνει το κόστος άντλησης στο μέλλον αφού η στάθμη αυτών μειώνεται συνεχώς με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερη ενέργεια για την άνοδό τους στην επιφάνεια και να αυξάνεται το συνολικό κόστος (Bertone Oehninger and Lin Lawell, 2021).

Όπως αναφέρεται από τους Esteban and Albiac (2012) από τις πρώτες προσεγγίσεις που παρουσιάστηκαν σχετικά με τη βέλτιστη διαχείριση υπογείων υδάτων ήταν αυτές του Burt (1964, 1966), ο οποίος προσδιόρισε εκείνες τις ποσότητες υπογείων υδάτων που πρέπει να αντλούνται και τις αντίστοιχες τιμές προκειμένου να καταγραφεί η μεγαλύτερη δυνατή κοινωνική ευημερία και ο οποίος συγχρόνως εισήγαγε και την έννοια των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού ως εργαλείου βέλτιστη διαχείρισης, στα οποία θα πραγματοποιηθεί εκτενέστερη αναφορά στη συνέχεια. Ωστόσο, η πλέον εμβληματική μελέτη στο χώρο της διαχείρισης των υπογείων υδάτων είναι αυτή των Gisser and Sanchez (1980). Η εργασία αυτή εντάσσεται στην κατηγορία των μοντέλων για τη διαχείριση υπογείων υδάτων που ακολουθούν μια υδρο-οικονομική προσέγγιση, επιδιώκουν δηλαδή να διερευνήσουν τα αποτελέσματα που έχουν διαφορετικές πολιτικές διαχείρισης στον πόρο και πιο συγκεκριμένα στην οικογένεια των μοντέλων bathtub, όπου ο υπό μελέτη υδροφορέας θεωρείται ότι έχει ομοιόμορφη στάθμη νερού (Pereau and Pryet, 2018). Η πιο σημαντική συνεισφορά αυτής της εργασίας ήταν ότι οδήγησε στη διατύπωση του αποτελέσματος Gisser-Sanchez (Gisser-Sanchez effect ή εν συντομία GSE), σύμφωνα με το οποίο τα κοινωνικά οφέλη που προκύπτουν από τη βέλτιστη διαχείριση των υπογείων υδάτων υπό ένα καθεστώς συνεργασίας μεταξύ των διαφόρων χρηστών είναι ασήμαντα εάν συγκριθούν με αυτά που προκύπτουν από ένα καθεστώς ελεύθερης πρόσβασης στο συλλογικό πόρο, κάτι που σημαίνει ότι η παρέμβαση δεν μπορεί να αυξήσει την κοινωνική ευημερία που προκύπτει από την κατανάλωση αυτού (Nasim et al., 2020; Pereau and Pryet, 2018; Esteban and Albiac, 2012).

Μετά από την εργασία των Gisser and Sanchez (1980), η οποία χρησιμοποιήθηκε όπως αποδείχθηκε βέβαια εκ των υστέρων εσφαλμένα ως επιχείρημα εναντίον της δημόσιας παρέμβασης στη διαχείριση των υπογείων υδάτων που ως σκοπό είχε τη διαφύλαξη αυτών για μελλοντική χρήση (Quintana-Ashwell et al., 2018), ακολούθησαν αρκετές άλλες, οι οποίες προσπάθησαν να επιβεβαιώσουν ή να απορρίψουν το GSE ή να συγκρίνουν διαφορετικές πολιτικές διαχείρισης ως προς τα αποτελέσματα που αυτές έχουν στη διαφύλαξη του πόρου. Ενδεικτικά αναφέρονται οι εργασίες των Rubio and Casino (2001), Brill and Burness (1994) και Allen and Gisser (1984).

Εκτενής αναφορά στο GSE και την ισχύ του πραγματοποιήθηκε από την Koundouri (2004), η οποία αξιολογώντας τη σχετική βιβλιογραφία κατέληξε στο ότι το GSE ισχύει στις περισσότερες περιπτώσεις, αν και η ποιότητα του αποτελέσματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του υδροφορέα και τις παραμέτρους της συνάρτησης ζήτησης νερού των χρηστών. Στο σημείο αυτό, ωστόσο, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η ισχύς του GSE θεμελιώνεται σε σημαντικό βαθμό στις παραδοχές του μοντέλου, οι οποίες μπορούν να χαρακτηριστούν ιδιαίτερα αυστηρές έως και μη ρεαλιστικές. Η πιο σημαντική εξ' αυτών των παραδοχών είναι αυτή περί στατικής ως προς το χρόνο συνάρτησης ζήτησης, η οποία οδηγεί σε διαδρομές για την αντλούμενη ποσότητα νερού με συγκεκριμένη τάση αν και πρόσφατες έρευνες (βλ. Steward and Allen, 2016) δείχνουν ότι αυτές οι διαδρομές έχουν περιόδους τόσο καθοδικής όσο και ανοδικής τάσης, προσομοιάζοντας την καμπύλη Hubbert (Quintana-Ashwell et al., 2018). Επίσης, υπήρξαν εργασίες, οι οποίες βασιζόμενες στους Gisser and Sanchez (1980) παρουσίασαν διεπιστημονικές προσεγγίσεις, οι οποίες ελάμβαναν υπ' όψιν τα υδρολογικά χαρακτηριστικά των υπό μελέτη υδροφορέων και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του υδρολογικού συστήματος και της οικονομικής δραστηριότητας (Chekireb et al., 2021). Ένα σχετικά πρόσφατο ρεύμα στη σχετική βιβλιογραφία είναι η ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών εξωτερικοτήτων στο μοντέλο των Gisser and Sanchez (1980) (Augeraud-Veron and Pereau,

2022; Biancardi et al., 2022; Esteban and Dinar, 2016; Esteban and Albiac, 2012; Esteban and Albiac, 2011), δηλαδή των αρνητικών επιπτώσεων που δημιουργούνται στα οικοσυστήματα που συνδέονται με κάποιον τρόπο με τα υπόγεια ύδατα από την εκμετάλλευση αυτών, οι οποίες δεν είχαν ληφθεί αρχικά υπ' όψιν (Esteban and Albiac, 2012).

Στο ανωτέρω πλαίσιο της υδρο-οικονομικής προσέγγισης για τη διαχείριση των υπογείων υδάτων έχει προταθεί και η χρήση οικονομικών εργαλείων, όπως τα εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού με στόχο την αποδοτική διαχείριση του πόρου. Ένα τέτοιο σύστημα διαχείρισης θεωρείται ότι μπορεί να εξασφαλίσει ότι το νερό χρησιμοποιείται από εκείνους τους χρήστες που είναι ικανοί να του αποδώσουν τη μέγιστη αξία (Pereau et al., 2018). Η πεποίθηση αυτή ενισχύεται σημαντικά από τα θετικά αποτελέσματα που έχουν προκύψει ως προς τη μείωση κόστους από την εφαρμογή οικονομικών εργαλείων για τη διαχείριση της αέριας ρύπανσης συγκριτικά με άλλες πολιτικές (βλ. Schmalensee and Stavins, 2017). Βέβαια, καθώς η γνώση που έχει συσσωρευθεί σχετικά με την εφαρμογή οικονομικών εργαλείων στη διαχείριση υπογείων υδάτων είναι πιο περιορισμένη (βλ. Pereau et al., 2018; Latinopoulos and Sartzetakis, 2015; Murali et al., 2015) επικρατεί η αντίληψη ότι τα εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού μπορούν να αποδειχθούν τελικά επιβλαβή για τις τοπικές κοινωνίες και το περιβάλλον με αποτέλεσμα να υπάρχουν επιφυλάξεις ως προς τη μαζική υιοθέτησή τους ως πολιτικής διαχείρισης των υπογείων υδάτων<sup>3.1</sup> (Bruno and Sexton, 2020; Murali et al., 2015).

Λαμβάνοντας, λοιπόν, υπ' όψιν όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι ένα μέρος της έρευνας σχετικά με τη διαχείριση υπογείων υδάτων επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση αφ' ενός οικονομικών εργαλείων όπως τα εμπορεύσιμα δικαιώματα στις πολιτικές διαχείρισης και αφ' ετέρου των περιβαλλοντικών εξωτερικοτήτων στα μοντέλα που αναπτύσσονται με βάση τη λογική των Gisser and Sanchez (1980) για το σκοπό αυτόν. Στον πίνακα 3.1 έχουν

---

<sup>3.1</sup> **Σημείωση:** Βλ. ενότητα 2.3, κεφάλαιο 2 για μία πιο λεπτομερή, θεωρητική ανάλυση των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού.

συγκεντρωθεί στοιχεία από 12 σχετικά πρόσφατες μελέτες με αντικείμενο τη διαχείριση υπογείων υδάτων. Οι μελέτες αυτές αξιολογήθηκαν ως προς το εάν η προσέγγιση που αναπτύσσουν, η οποία αντλεί σε κάθε περίπτωση στοιχεία από τους Gisser and Sanchez (1980) περιλαμβάνει τα εμπορεύσιμα δικαιώματα και τις περιβαλλοντικές εξωτερικότητες. Όπως προκύπτει από τον πίνακα 3.1 καμία από τις μελέτες δεν περιλαμβάνει τόσο τα εμπορεύσιμα δικαιώματα όσο και τις περιβαλλοντικές εξωτερικότητες. Επομένως, μία προσέγγιση βασισμένη στην εμβληματική εργασία των Gisser-Sanchez, η οποία θα λαμβάνει υπ' όψιν τις περιβαλλοντικές εξωτερικότητες και συγχρόνως θα θεωρεί τα εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού ως μία εναλλακτική πολιτική διαχείρισης αποτελεί ένα αντικείμενο μελέτης που τουλάχιστον εξ' όσων είναι σε θέση να γνωρίζει ο συγγραφέας δεν εμφανίζεται στη σχετική βιβλιογραφία.

**Πίνακας 3.1:** Θεώρηση των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού ως μεθόδου διαχείρισης υπογείων υδάτων και των περιβαλλοντικών εξωτερικοτήτων σε επιλεγμένα άρθρα

Άρθρο	Εμπορεύσιμα δικαιώματα	Περιβαλλοντικές εξωτερικότητες
Augeraud-Veron and Pereau (2022)	✗	✓
Biancardi et al. (2022)	✗	✓
Pereau and Pryet (2018)	✗	✓
Pereau et al. (2018)	✓	✗
Quintana-Ashwell et al. (2018)	✗	✗
Shaheen (2018)	✗	✗
Esteban and Dinar (2016)	✗	✓
Latinopoulos and Sartzetakis (2015)	✓	✗
Murali et al. (2015)	✓	✗
Guilfoos et al. (2013)	✗	✗
Esteban and Albiac (2012)	✗	✓
Esteban and Albiac (2011)	✗	✓

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Μεθοδολογία

**Σ**το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε για την εξυπηρέτηση των στόχων της εργασίας, έτσι όπως αυτοί διατυπώθηκαν στο εισαγωγικό κεφάλαιο. Ειδικότερα, μετά από μία σύντομη περιγραφή του προβλήματος που εξετάζεται και του τρόπου προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθείται σε κάθε μία εκ των τριών διαφορετικών ως προς τη συνεργασία μεταξύ των χρηστών περιπτώσεων που διερευνώνται, έτσι ώστε να προκύψουν οι χρονικές διαδρομές για τη συνολική κατανάλωση νερού, τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα και μία σειρά άλλων μεγεθών. Η πρώτη εκ των τριών περιπτώσεων που διερευνώνται αντιστοιχεί σε ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών, η δεύτερη σε ένα καθεστώς μερικής συνεργασίας μεταξύ αυτών στο πλαίσιο ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού και η τρίτη σε ένα καθεστώς πλήρους συνεργασίας μεταξύ αυτών στο πλαίσιο ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού εντός του οποίου λαμβάνεται υπ' όψιν από τους ίδιους η περιβαλλοντική καταστροφή που προκαλείται στο τοπικό οικοσύστημα εξαιτίας της εξάντλησης των υδάτινων αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα.

## 4.1 Περιγραφή προβλήματος

Το πρόβλημα, το οποίο εξετάζεται, περιλαμβάνει δύο ομάδες αγροτών ( $r = 1,2$ ), κάθε μία εκ των οποίων εκμεταλλεύεται αγροτική γη έκτασης  $M$  εκταρίων και οι οποίες αντλούν νερό για την κάλυψη των υδατικών απαιτήσεων των καλλιεργειών τους από τον ίδιο υπόγειο υδροφορέα για μία χρονική περίοδο  $T$  ετών. Θεωρείται πρώτον ότι οι αγρότες έχουν πραγματοποιήσει υψηλές επενδύσεις σε πάγια κεφάλαια και δεύτερον ότι οι ίδιοι αντιμετωπίζουν σημαντικούς περιορισμούς σχετιζόμενους με την αγορά διάθεσης προϊόντων αγροτικής παραγωγής. Έτσι, οι αγρότες δεν μπορούν να αλλάξουν καλλιέργεια κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου των  $T$  ετών (Latinopoulos and Sartzetakis, 2015). Με βάση αυτές τις υποθέσεις προκύπτει ότι κάθε μία εκ των δύο ομάδων αγροτών έχει δεδομένη συνάρτηση παραγωγής  $f(q_{r,t})$  ως προς την ανά εκτάριο καταναλισκόμενη ποσότητα νερού  $q_{r,t}$  για κάθε έτος της χρονικής περιόδου των  $T$  ετών. Η συνάρτηση αγροτικής παραγωγής της ομάδας αγροτών  $r$  για το έτος  $t$  δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση (Latinopoulos and Sartzetakis, 2015):

$$f(q_{r,t}) = a_r q_{r,t} - b_r q_{r,t}^2 + g_r \quad (1)$$

όπου  $a_r, b_r$  και  $g_r$  συντελεστές της συνάρτησης αγροτικής παραγωγής, οι οποίοι είναι διαφορετικοί για κάθε είδος καλλιέργειας και εξαρτώνται από τις κλιματικές συνθήκες κάθε περιοχής, τις ιδιότητες του εδάφους και τις εφαρμοζόμενες καλλιεργητικές μεθόδους.

Το καθαρό όφελος  $NB_{r,t}$  που αποκομίζει η ομάδα αγροτών  $r$  κατά το έτος  $t$  από την κατανάλωση νερού ταυτίζεται με το κέρδος που αυτή έχει από τη διάθεση των αγροτικών προϊόντων που παράγει κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Το κέρδος της ομάδας κατά το έτος  $t$  προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ των συνολικών της εσόδων και των συνολικών της εξόδων κατά το έτος  $t$ . Τα συνολικά έσοδα κατά το έτος  $t$  είναι ίσα με το γινόμενο της συνολικής αγροτικής παραγωγής, η οποία είναι  $Mf(q_{r,t})$  και της τιμής πώλησης των

αγροτικών προϊόντων  $p_r$ . Τα συνολικά έξοδα κατά το έτος  $t$  είναι ίσα με το άθροισμα του συνολικού κόστους άντλησης νερού, το οποίο είναι  $AC_t M q_{r,t}$ , όπου  $AC_t$  το μέσο κόστος άντλησης ανά κυβικό μέτρο νερού και των λοιπών εξόδων που σχετίζονται με την αγροτική παραγωγή  $C_{agr,r,t}$ . Επομένως, το καθαρό όφελος  $NB_{r,t}$  που αποκομίζει η ομάδα αγροτών  $r$  κατά το έτος  $t$  από την κατανάλωση νερού δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$NB_{r,t} = M \left[ p_r f(q_{r,t}) - AC_t q_{r,t} \right] - C_{agr,r,t} \quad (2)$$

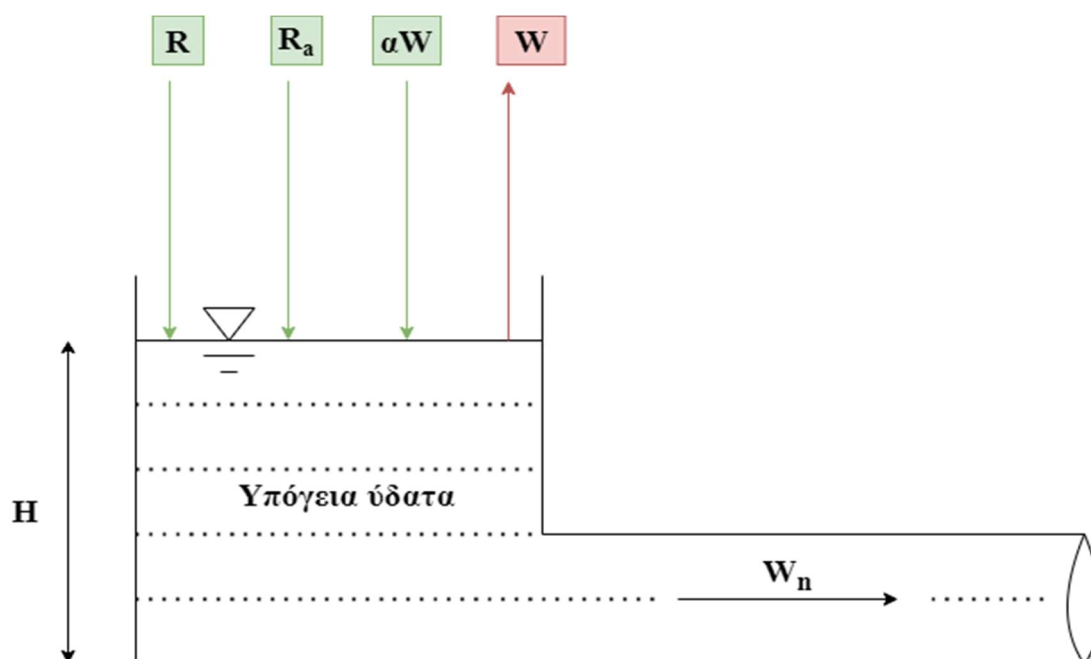
Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι η συνολική ποσότητα νερού που καταναλώνεται από τις δύο ομάδες αγροτών και κατά συνέπεια αντλείται από τον υπόγειο υδροφόρο κατά το έτος  $t$  θα είναι:

$$Q_t = M \sum_{r=1}^2 q_{r,t} \quad (3)$$

## 4.2 Προσομοίωση υπόγειου υδροφόρου

Όπως είναι αναμενόμενο η άντληση νερού από έναν υπόγειο υδροφόρο προκαλεί σταδιακά την πτώση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Κατά συνέπεια για την εξυπηρέτηση των αναγκών του προβλήματος που εξετάζεται απαιτείται μία εξίσωση, η οποία θα περιγράφει την πορεία, δηλαδή τη σταδιακή πτώση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Η εξίσωση αυτή είναι μία διαφορική εξίσωση της στάθμης  $H$  του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, η οποία καλείται και υδραυλικό ύψος, ως προς το χρόνο  $t$ . Η εξαγωγή αυτής της εξίσωσης πραγματοποιείται σύμφωνα με όσα αναφέρονται από τους Gisser and Mercado (1973). Οι Gisser and Mercado (1973) θεωρούν έναν μη περιορισμένο,

μονοκυτταρικό<sup>4.1</sup> (single cell) υδροφορέα με άπειρη υδραυλική αγωγιμότητα<sup>4.2</sup>, ο οποίος προσομοιώνεται με ένα μοντέλο “bathtub”<sup>4.3</sup>. Οι υπόγειοι υδροφορείς, οι οποίοι προσομοιώνονται με ένα μοντέλο “bathtub” θεωρείται ότι έχουν ομοιόμορφο υδραυλικό ύψος σε όλη τους την έκταση (Latinopoulos and Sartzetakis, 2015). Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται μια σχηματική απεικόνιση του υπόγειου υδροφορέα με τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν και ο οποίος προσομοιώνεται με ένα μοντέλο “bathtub”.



**Σχήμα 4.1:** Σχηματική απεικόνιση υπόγειου υδροφορέα  
(Πηγή: Gisser and Mercado, 1973; ίδια επεξεργασία)

Όπως προκύπτει από το σχήμα 4.1 και σύμφωνα με τους Gisser and Mercado (1973) κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου στον υπόγειο υδροφορέα παρατηρούνται

<sup>4.1</sup>**Σημείωση:** Ο χαρακτηρισμός μονοκυτταρικός (single cell) για την ακρίβεια δεν αποτελεί κάποια ειδική κατηγορία υπογείων υδροφορέων. Είναι ένας τρόπος προσομοίωσης ενός υπόγειου υδροφορέα από υδρολογική άποψη και είναι η απλούστερη σχετική προσέγγιση, αφού αντιμετωπίζει τον υδροφορέα ως ένα ενιαίο κύτταρο σε όλη του την έκταση.

<sup>4.2</sup>**Σημείωση:** Η άπειρη υδραυλική αγωγιμότητα είναι ένας τεχνικός όρος, ο οποίος χρησιμοποιείται για να περιγράψει έναν υπόγειο υδροφορέα, το υδατικό απόθεμα του οποίου δεν εξαντλείται ποτέ ανεξάρτητα από το ρυθμό με τον οποίο αντλείται νερό από αυτόν (Koundouri, 2004).

<sup>4.3</sup>**Σημείωση:** Μια βασική παραδοχή σε ένα μοντέλο “bathtub” είναι ότι η ροή των υπογείων υδάτων πραγματοποιείται ακαριαία. Η παραδοχή αυτή οδηγεί στην υποεκτίμηση του κόστους άντλησης και κατ’ επέκταση στην υποεκτίμηση των δυνατοτήτων και του οφέλους που προκύπτει από την εφαρμογή πολιτικών διαχείρισης υπογείων υδάτων (Guilfoos et al., 2013).



εκροές, οι οποίες οφείλονται στην ποσότητα του νερού  $W$  που αντλείται για την ικανοποίηση των αναγκών των διαφόρων χρηστών και στη φυσική εκροή (natural discharge)  $W_n$ . Κατά τη διάρκεια της ίδιας χρονικής περιόδου, βέβαια, παρατηρούνται και εισροές προερχόμενες από τρεις διαφορετικές πηγές: το φυσικό εμπλουτισμό  $R$  (natural recharge), τον τεχνητό εμπλουτισμό  $R_a$  (artificial recharge) και τη ροή επιστροφής  $aW$  (return flow), όπου  $a < 1$  ο συντελεστής ροής επιστροφής (return flow coefficient) και  $W$  η αντλούμενη από τους χρήστες ποσότητα νερού κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου.

Θεωρώντας ότι δεν υπάρχει τεχνητός εμπλουτισμός, δηλαδή ότι  $R_a = 0$  καθώς και ότι η φυσική εκροή του υδροφορέα είναι αμελητέα, δηλαδή ότι  $W_n = 0$ , η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την πορεία του υδραυλικού ύψους του υπόγειου υδροφορέα ως συνάρτηση του χρόνου είναι η εξής (Gisser and Mercado, 1973):

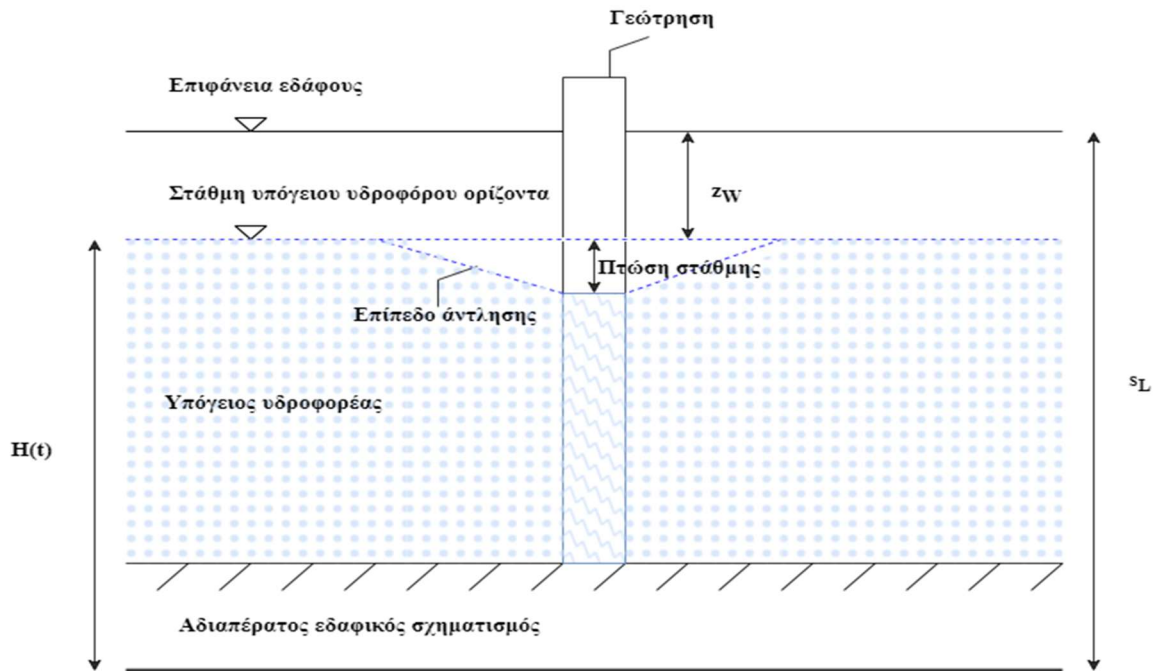
$$\dot{H} = \frac{1}{AS} [R - (1 - a)W] \quad (4)$$

όπου  $A$  η συνολική έκταση του υδροφορέα,  $S$  ο συντελεστής αποθηκευτικότητας<sup>4.4</sup> (storativity coefficient) του υδροφορέα και οι άλλες παράμετροι όπως ορίστηκαν προηγουμένως.

Μετά την εξαγωγή της διαφορικής εξίσωσης της στάθμης  $H$  του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα πρέπει να προσδιοριστεί και η συνάρτηση που αφορά στο μέσο κόστος άντλησης νερού  $AC_t$ , το οποίο συμμετέχει στη σχέση (2). Για το σκοπό αυτόν θεωρείται μία κατακόρυφη τομή μίας γεώτρησης μέσω της οποίας πραγματοποιείται η άντληση νερού από τον υπόγειο

<sup>4.4</sup> **Σημείωση:** Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας  $S$  σε ένα μη περιορισμένο υπόγειο υδροφορέα εκφράζει τον όγκο νερού που απελευθερώνει ο υδροφορέας από τα υδατικά του αποθέματα ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας και ανά μονάδα μεταβολής του υδραυλικού ύψους (Freeze and Cherry, 1979, p. 61). Επομένως, θα είναι:  $S = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta H}$ , όπου  $\Delta V$  η μεταβολή στον όγκο του υδατικού αποθέματος του υπόγειου υδροφορέα,  $A$  η οριζόντια επιφάνειά του και  $\Delta H$  η μεταβολή του υδραυλικού ύψους. Έτσι, προκύπτει ότι ο ρυθμός μεταβολής του υδραυλικού ύψους ενός υπόγειου υδροφορέα ως προς το χρόνο, όταν από αυτόν αφαιρείται ποσότητα νερού ίση με  $W_{out}$ , είναι ( $W_{out} = \Delta V / \Delta t$ ):  $\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{1}{AS} W_{out}$ . Θεωρώντας ότι οι μεταβολές των  $H$  και  $t$  είναι απειροστές, καθώς και ότι  $W_{out} = R + aW - W = R - (1 - a)W$ , προκύπτει η σχέση (4):  $\dot{H} = \frac{1}{AS} [R - (1 - a)W]$ .

υδροφορέα. Η τομή αυτή παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 4.2. Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.2 το επίπεδο άντλησης  $z_w$ , θεωρώντας αμελητέα την πτώση στάθμης εντός της γεώτρησης,



Σχήμα 4.2: Κατακόρυφη τομή γεώτρησης μέσω της οποίας αντλείται νερό από τον υπόγειο υδροφορέα

(Πηγή: Latinopoulos and Sartzetakis, 2015; ίδια επεξεργασία)

αφού θεωρείται ότι αυτή έχει μικρή επίδραση στο επίπεδο άντλησης (Latinopoulos and Sartzetakis, 2015), θα είναι:

$$z_w = s_L - H(t) \quad (5)$$

όπου  $s_L$  το μέσο υψόμετρο του εδάφους με αναφορά στην επιφάνεια της θάλασσας και  $H(t)$  το υδραυλικό ύψος κατά το έτος  $t$ .

Σύμφωνα με τα παραπάνω και θεωρώντας μία γραμμική συνάρτηση κόστους για το μέσο κόστος άντλησης  $AC_t$  κατά το έτος  $t$ , το οποίο είναι ίσο με το οριακό κόστος άντλησης  $MC_t$  κατά το έτος  $t$ , προκύπτει η ακόλουθη συνάρτηση κόστους (Latinopoulos and Sartzetakis, 2015):

$$AC_t = MC_t = c_0(s_L - H(t)) \quad (6)$$

όπου  $c_0$  το οριακό κόστος άντλησης ανά κυβικό μέτρο νερού και ανά μέτρο άντλησης.

### 4.3 Καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών

Κάτω από ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών θεωρείται ότι δεν υφίσταται κάποιο θεσμικό πλαίσιο που να διέπει τη διαχείριση και κατ' επέκταση την κατανάλωση των υπογείων υδάτων. Η απουσία ενός τέτοιου πλαισίου οδηγεί τους χρήστες, εν προκειμένω τις δύο ομάδες αγροτών, να υιοθετήσουν μία συμπεριφορά άντλησης νερού, η οποία αγνοεί τις επιπτώσεις που αυτή έχει για τους άλλους χρήστες και για το υδατικό απόθεμα του υπόγειου υδροφορέα. Αυτού του είδους η συμπεριφορά άντλησης, η οποία στη βιβλιογραφία συχνά καλείται και “myopic”, δηλαδή κοντόφθαλμη, θεωρείται ότι ταιριάζει σε περιοχές στις οποίες υπάρχει ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μικρών καλλιεργητών, οι οποίοι αντλούν νερό από ένα σχετικά μεγάλο υπόγειο υδροφορέα (Latinopoulos and Sartzetakis, 2015). Επομένως, κάθε χρήστης αντλεί νερό με σκοπό τη μεγιστοποίηση του ετήσιου καθαρού οφέλους που έχει από την κατανάλωση αυτού, το οποίο στην περίπτωση των αγροτών εκφράζεται από την εξίσωση (2). Κατά συνέπεια κάθε χρήστης αντλεί κάθε έτος εκείνη την ποσότητα νερού, η οποία θέτει το οριακό καθαρό όφελος  $MNB_{r,t} = \frac{\partial NB_{r,t}}{\partial q_{r,t}}$  που έχει από την κατανάλωση νερού ίσο με το μηδέν ( $MNB_{r,t} = 0$ ) (Hellegers, 2001). Με βάση αυτή τη συνθήκη και ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφεται στη συνέχεια προκύπτουν οι χρονικές διαδρομές για τη συνολική κατανάλωση νερού και τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα.

Αρχικά, λοιπόν, βάσει των εξισώσεων (1), (2) και (6) προκύπτει η συνάρτηση για το καθαρό όφελος  $NB_{r,t}$  που αποκομίζει η ομάδα αγροτών  $r$  κατά το έτος  $t$  από την κατανάλωση νερού, η οποία θα είναι ( $H(t) = H_t$ ):

$$NB_{r,t} = M \left[ p_r (a_r q_{r,t} - b_r q_{r,t}^2 + g_r) - c_0 (s_L - H_t) q_{r,t} \right] - C_{agr,r,t} \quad (7)$$

Έτσι, το οριακό καθαρό όφελος  $MNB_{r,t}$  θα είναι:

$$MNB_{r,t} = \frac{\partial NB_{r,t}}{\partial q_{r,t}} \stackrel{(7)}{\Rightarrow}$$

$$MNB_{r,t} = M[p_r(a_r - 2b_r q_{r,t}) - c_0(s_L - H_t)] \quad (8)$$

Θέτοντας το οριακό καθαρό όφελος  $MNB_{r,t}$  ίσο με το μηδέν, προκύπτει ότι:

$$MNB_{r,t} = 0 \stackrel{(8)}{\Rightarrow}$$

$$q_{r,t} = \frac{a_r}{2b_r} - \frac{1}{2b_r p_r} c_0(s_L - H_t) \quad (9)$$

Συνεπώς, η συνολική κατανάλωση νερού  $Q_t$  από τις δύο ομάδες αγροτών κατά το έτος  $t$  υπό ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού μεταξύ τους βάσει των εξισώσεων (3) και (9) θα είναι:

$$Q_t = M[\Psi - \Omega c_0(s_L - H_t)] \quad (10)^{4.5}$$

όπου  $\Psi = \sum_{r=1}^2 \frac{a_r}{2b_r}$  και  $\Omega = \sum_{r=1}^2 \frac{1}{2b_r p_r}$ .

Η εξίσωση (10) σε συνδυασμό με την εξίσωση (4) οδηγούν στη διαμόρφωση μιας διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την πορεία του υδραυλικού ύψους του υπόγειου υδροφορέα ως συνάρτηση του χρόνου. Η διαφορική αυτή εξίσωση είναι η εξής:

$$\dot{H} + \frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS} H = \frac{R}{AS} - \frac{M\Psi(1-a)}{AS} + \frac{M\Omega c_0(1-a)s_L}{AS} \quad (11)^{4.6}$$

Η εξίσωση (11) αντιστοιχεί σε μία διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης με σταθερούς συντελεστές. Η γενική λύση αυτής της διαφορικής εξίσωσης προκύπτει ως το άθροισμα της λύσης της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης (διαφορική εξίσωση χωρίς σταθερό όρο)  $H_h(t)$  και της ειδικής λύσης  $\bar{H}(t)$ . Επομένως, η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (11) πραγματοποιείται

<sup>4.5</sup> Σημείωση: Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (10).

<sup>4.6</sup> Σημείωση: Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (11).

σε τρία στάδια, τα οποία είναι: Α) λύση της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης, Β) προσδιορισμός ειδικής λύσης και Γ) προσδιορισμός γενικής λύσης με τη χρήση κάποιας αρχικής συνθήκης.

### Α) Λύση ομογενούς διαφορικής εξίσωσης

Η ομογενής διαφορική εξίσωση είναι:

$$\dot{H} + \frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS} H = 0 \quad (12)$$

Η εξίσωση (12) θέτοντας  $\dot{H} = \frac{dH}{dt}$  γράφεται:

$$\frac{1}{H} dH = -\frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS} dt \quad (13)$$

Ολοκληρώνοντας κατά μέλη την εξίσωση (13) προκύπτει η λύση της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης, η οποία είναι::

$$\int \frac{1}{H} dH = \int -\frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS} dt \Rightarrow \ln H = -\frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS} t + c \Rightarrow$$

$$H_h(t) = e^c e^{-\frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS} t} \quad (14)$$

όπου  $c$  η σταθερά ολοκλήρωσης.

### Β) Προσδιορισμός ειδικής λύσης

Για τον προσδιορισμό της ειδικής λύσης της διαφορικής εξίσωσης δοκιμάζεται η απροσδιόριστη σταθερά  $k_1$ , θεωρείται δηλαδή ότι  $\bar{H}(t) = k_1$ . Έτσι, με βάση την εξίσωση (11) προκύπτει ότι:

$$\frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS} k_1 = \frac{R}{AS} - \frac{M\Psi(1-a)}{AS} + \frac{M\Omega c_0(1-a)s_L}{AS} \Rightarrow$$

$$k_1 = \bar{H}(t) = \frac{R - M\Psi(1-a) + M\Omega c_0(1-a)s_L}{M\Omega c_0(1-a)} \quad (15)$$

### Γ) Προσδιορισμός γενικής λύσης

Η γενική λύση  $H^m(t)$ <sup>4.7</sup> της διαφορικής εξίσωσης (11) προκύπτει, όπως προαναφέρθηκε, ως το άθροισμα της λύσης της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης  $H_h(t)$  και της ειδικής λύσης  $\bar{H}(t)$ , δηλαδή, βάσει των εξισώσεων (14) και (15) θα είναι:

$$H^m(t) = H_h(t) + \bar{H}(t) \xrightarrow{(14),(15)}$$

$$H^m(t) = e^c e^{-\frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS}t} + \frac{R-M\Psi(1-a)+M\Omega c_0(1-a)s_L}{M\Omega c_0(1-a)} \quad (16)$$

Η αρχική συνθήκη που χρησιμοποιείται είναι  $H^m(0) = H_0$ . Η συνθήκη αυτή δείχνει ότι στην αρχή της περιόδου σχεδιασμού η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα είναι γνωστή και ίση με  $H_0$ . Έτσι, βάσει της εξίσωσης (16) και της αρχικής συνθήκης που αναφέρθηκε θα είναι:

$$H^m(0) = H_0 \xrightarrow{(16)}$$

$$e^c = H_0 - \frac{R-M\Psi(1-a)+M\Omega c_0(1-a)s_L}{M\Omega c_0(1-a)} \quad (17)$$

και τελικά προκύπτει ότι η χρονική διαδρομή για τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα (ή για το υδραυλικό ύψος) θα είναι:

$$H_t^m = \left( H_0 - \frac{R-M\Psi(1-a)+M\Omega c_0(1-a)s_L}{M\Omega c_0(1-a)} \right) e^{-\frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS}t} + \frac{R-M\Psi(1-a)+M\Omega c_0(1-a)s_L}{M\Omega c_0(1-a)} \quad (18)$$

Με βάση την εξίσωση (10) και την εξίσωση (18) προκύπτει και η χρονική διαδρομή  $Q_t^m$  για τη συνολική κατανάλωση νερού κατά το έτος  $t$  κάτω από ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών. Η διαδρομή αυτή είναι η εξής:

<sup>4.7</sup> Σημείωση: Ο δείκτης  $m$  χρησιμοποιείται για να δηλώσει τον όρο “myopic”.

$$Q_t^m = \left( M\Omega c_0 H_0 - \frac{R - M\Psi(1-a) + M\Omega c_0(1-a)s_L}{(1-a)} \right) e^{-\frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS}t} + \frac{R - M\Psi(1-a) + M\Omega c_0(1-a)s_L}{(1-a)} + M(\Psi - \Omega c_0 s_L) \quad (19)^{4.8}$$

#### 4.4 Καθεστώς μερικής συνεργασίας μεταξύ των χρηστών

Κάτω από ένα καθεστώς μερικής συνεργασίας μεταξύ των χρηστών θεωρείται ότι αυτοί «συνεργάζονται» μεταξύ τους στο πλαίσιο ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού. Αυτό το πλαίσιο συνεργασίας επιβάλλεται επί της ουσίας στους χρήστες εξαιτίας δημόσιας (κρατικής) παρέμβασης που ως στόχο έχει τη βέλτιστη δυνατή αξιοποίηση των υδάτινων αποθεμάτων και την προστασία του υπόγειου υδροφορέα από τον οποίο αυτοί αντλούν νερό για την ικανοποίηση των αναγκών τους. Σε αυτό το πλαίσιο, λοιπόν, υφίσταται μία λογική κοινωνικού προγραμματισμού, κάτι που σημαίνει ότι οι δύο ομάδες αγροτών δε λειτουργούν πλήρως ανταγωνιστικά (Latinopoulos and Sartzetakis, 2015). Έτσι, σε αυτήν την περίπτωση σε κάθε έτος  $t$  δε μεγιστοποιείται το καθαρό όφελος κάθε ομάδας αλλά η παρούσα αξία του αθροίσματος του συνολικού κοινωνικού οφέλους  $NB_{tot,t}$  από την κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού, το οποίο προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους ιδιωτικών οφελών των δύο ομάδων αγροτών, δηλαδή θα είναι:

$$NB_{tot,t} = \sum_{r=1}^2 NB_{r,t} \quad (20)$$

Επιπλέον, στην περίπτωση αυτή επιβάλλεται περιορισμός ως προς την επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα στο πέρας της περιόδου σχεδιασμού, δηλαδή στο έτος  $T$ , η οποία πρέπει να είναι ίση με μία ελάχιστη τιμή  $H_{min}$ . Ο περιορισμός αυτός εξυπηρετεί το στόχο της προστασίας του υπόγειου υδροφορέα. Η αρχική συνθήκη που

<sup>4.8</sup> Σημείωση: Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (19).

χρησιμοποιείται είναι η ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στο καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού, δηλαδή  $H(0) = H_0$ .

Κατά συνέπεια κάτω από ένα καθεστώς μερικής συνεργασίας μεταξύ των χρηστών το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί, προκειμένου να προσδιοριστούν οι χρονικές διαδρομές για το υδραυλικό ύψος και τη συνολική κατανάλωση νερού είναι το ακόλουθο πρόβλημα αρίστου ελέγχου:

$$\max \int_0^T e^{-\delta t} \{NB_{tot,t}\} dt$$

$$\text{υπό τον περιορισμό} \quad \dot{H} = \frac{1}{AS} [R - (1 - a)Q_t] \quad (21)$$

$$H(0) = H_0, \quad H(T) = H_{min}$$

όπου  $e^{-\delta t}$  ο παράγοντας προεξόφλησης (αυτός που μετατρέπει δηλαδή το συνολικό κοινωνικό όφελος από την κατανάλωση νερού κατά το έτος  $t$   $NB_{tot,t}$  σε παρούσα αξία),  $\delta$  το επιτόκιο προεξόφλησης και  $T$  η περίοδος σχεδιασμού.

Πριν την παρουσίαση της επίλυσης του προβλήματος κρίνεται σκόπιμο να διευκρινιστούν ορισμένα θέματα που σχετίζονται με το σύστημα των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού και τη λειτουργία του. Με βάση όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, θεωρείται ότι κάθε ομάδα αγροτών  $r$  λαμβάνει κάθε έτος  $t$  έναν συγκεκριμένο αριθμό δικαιωμάτων νερού  $\bar{q}_{r,t}$  χωρίς χρέωση. Μετά την αρχική κατανομή των δικαιωμάτων κάθε ομάδα αγροτών αποφασίζει ποια ποσότητα νερού εξ' αυτών που τις χορηγήθηκαν θα χρησιμοποιήσει για άρδευση, ποια ποσότητα θα διαθέσει στην άλλη ομάδα εφόσον έχει περίσσειμα και ποια ποσότητα θα αγοράσει από την άλλη ομάδα εφόσον έχει έλλειμμα (Latinopoulos and Sartzetakis, 2015). Οι τέσσερις υποθέσεις πάνω στις οποίες βασίζεται η λειτουργία του συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού που περιγράφηκε είναι οι εξής (Latinopoulos and Sartzetakis, 2015): πρώτον, στην αγορά των



εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού επικρατούν συνθήκες τέλει ανταγωνισμού, δεύτερον δεν υπάρχουν κόστη συναλλαγής κατά τη μεταβίβαση δικαιωμάτων χρήσης νερού από τη μία ομάδα αγροτών στην άλλη, τρίτον, τα δικαιώματα νερού δεν είναι μεταβιβάσιμα στο χρόνο και δεν επιτρέπεται δανεισμός αυτών, οπότε σε κάθε έτος η ποσότητα νερού που διατίθεται στους χρήστες καταναλώνεται από αυτούς, δηλαδή  $Q_t = M \sum_{r=1}^2 q_{r,t} = M \sum_{r=1}^2 \bar{q}_{r,t}$  και τέταρτον, στην αγορά των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού επικρατούν συνθήκες τέλει ανταγωνισμού, οπότε στο σημείο ισορροπίας της (ζήτηση για δικαιώματα νερού ίση με προσφορά για δικαιώματα νερού) ισχύει ότι  $MNB_{1,t} = MNB_{2,t}$ .

Η συνθήκη αποτελεσματικότητας ( $MNB_{1,t} = MNB_{2,t}$ ) και ο περιορισμός που σχετίζεται με τη συνολική κατανάλωση νερού από τις δύο ομάδες αγροτών ( $Q_t = M \sum_{r=1}^2 q_{r,t} = M \sum_{r=1}^2 \bar{q}_{r,t}$ ) διαμορφώνουν ένα σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους, η επίλυση του οποίου οδηγεί στον προσδιορισμό της συνολικής ποσότητας νερού  $q_{i,t}$  ανά εκτάριο που καταναλώνει η κάθε ομάδα κατ' έτος. Η ποσότητα αυτή είναι:

$$q_{i,t} = s_i \frac{Q_t}{M} + \theta_i \quad (22)^{4,9}$$

όπου  $s_i = \frac{p_j b_j}{p_i b_i + p_j b_j}$  και  $\theta_i = \frac{p_i a_i - p_j a_j}{2(p_i b_i + p_j b_j)}$  με  $i, j = 1, 2$  και  $s_1 + s_2 = 1$ ,  $\theta_1 + \theta_2 = 0$

Βάσει των εξισώσεων (7) και (22) προκύπτει ότι το καθαρό όφελος  $NB_{r,t}$  της ομάδας  $r$  κατά το έτος  $t$  θα είναι:

$$NB_{r,t} = M \left\{ p_r \left[ (a_r (s_r \frac{Q_t}{M} + \theta_r) - b_r (s_r \frac{Q_t}{M} + \theta_r)^2 + g_r) \right] - c_0 (s_L - H_t) (s_r \frac{Q_t}{M} + \theta_r) \right\} \quad (23)$$

Με βάση όλα όσα έχουν αναφερθεί είναι πλέον δυνατό να παρουσιαστεί η επίλυση του προβλήματος άριστου ελέγχου που περιγράφεται από τη σχέση (21). Η επίλυση του

<sup>4,9</sup> Σημείωση: Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (22).

προβλήματος αρίστου ελέγχου πραγματοποιείται με βάση όσα αναφέρονται από τους Ξεπαπαδέα και Γιαννίκο (2009).

Η επίλυση του προβλήματος απαιτεί σε πρώτη φάση τη διαμόρφωση της Χαμιλτονιανής συνάρτησης τρέχουσας αξίας. Αυτή, βάσει των (20) και (21) είναι:

$$\mathcal{H} = \sum_{r=1}^2 NB_{r,t} + \mu \frac{1}{AS} [R - (1-a)Q_t] \quad (24)$$

όπου  $\mu$  βοηθητική μεταβλητή, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση εκφράζει τη σκιώδη τιμή<sup>4.10</sup> των υπογείων υδάτων.

Η Χαμιλτονιανή συνάρτηση θεωρείται ότι είναι κοίλη στο  $Q_t$ , οπότε υπάρχει εσωτερική λύση. Οι αναγκαίες συνθήκες για βελτιστοποίηση βάσει της αρχής του μεγίστου – Pontryagin είναι (Ξεπαπαδέας και Γιαννίκος, 2009):

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial Q_t} = 0 \quad (25)$$

και

$$\dot{\mu} = \delta\mu - \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H_t} \quad (26)$$

Εφαρμόζοντας την πρώτη αναγκαία συνθήκη, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση (25) προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για τη βοηθητική μεταβλητή  $\mu$ :

$$\mu = \frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{R-AS\dot{H}}{\Omega M(1-a)} - c_0(s_L - H_t) \right] \quad (27)^{4.11}$$

<sup>4.10</sup> **Σημείωση:** Η σκιώδης τιμή μπορεί να οριστεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με την εφαρμογή στο πλαίσιο της οποίας αυτή εμφανίζεται (βλ. Bierkens et al. (2019)). Στο πλαίσιο μιας εφαρμογής βελτιστοποίησης, όπως αυτή που εξετάζεται, η οποία επιδιώκει τον προσδιορισμό των χρονικών διαδρομών για τη συνολικά αντλούμενη παροχή και το υδραυλικό ύψος που μεγιστοποιούν το άθροισμα της παρούσας αξίας του κοινωνικού οφέλους κατά τη διάρκεια μιας περιόδου σχεδιασμού, η σκιώδης τιμή ορίζεται ως η οριακή τιμή (marginal value) των υπογείων υδάτων που παραμένουν στο έδαφος, η οποία προκειμένου να προκύψει το βέλτιστο διαχρονικά αποτέλεσμα, πρέπει να είναι ίση με το καθαρό όφελος από μία μονάδα αντλούμενου υπόγειου νερού (Bierkens et al., 2019).

<sup>4.11</sup> **Σημείωση:** Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (27).

Λαμβάνοντας την πρώτη παράγωγο της βοηθητικής μεταβλητής  $\mu$  ως προς το χρόνο  $t$ , η οποία δίνεται από την εξίσωση (27) προκύπτει ότι:

$$\dot{\mu} = \frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{AS}{\Omega M(1-a)} \ddot{H} + c_0 \dot{H} \right] \quad (28)$$

Για την εφαρμογή της δεύτερης αναγκαίας συνθήκης απαιτείται ο υπολογισμός της μερικής παραγώγου  $\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H_t}$ , η οποία βάσει των εξισώσεων (23) και (24) ορίζεται ως εξής:

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H_t} = M c_0 \left( s_1 \frac{Q_t}{M} + \theta_1 \right) + M c_0 \left( s_2 \frac{Q_t}{M} + \theta_2 \right) = c_0 M (q_{1,t} + q_{2,t}) = c_0 Q_t \quad (29)$$

Επιλύοντας τη διαφορική εξίσωση που περιγράφει την πορεία της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα στο χρόνο ως προς τη συνολική κατανάλωση νερού  $Q_t$  κατά το έτος  $t$ , έτσι όπως αυτή περιγράφεται στη σχέση (21), προκύπτει ότι:

$$Q_t = \frac{R}{(1-a)} - \frac{AS}{(1-a)} \dot{H} \quad (30)$$

Επομένως, συνδυάζοντας τις εξισώσεις (29) και (30) προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H_t} = \frac{c_0 R}{(1-a)} - \frac{c_0 AS}{(1-a)} \dot{H} \quad (31)$$

Έτσι, εφαρμόζοντας τη δεύτερη αναγκαία συνθήκη για βελτιστοποίηση, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση (26) και αξιοποιώντας τις εξισώσεις για τα  $\mu$ ,  $\dot{\mu}$  και  $\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H_t}$ , δηλαδή τις εξισώσεις (27), (28) και (31) προκύπτει ότι:

$$\ddot{H} - \delta \dot{H} - \frac{\delta c_0 \Omega M(1-a)}{AS} H = \frac{1}{AS} \left[ \delta M \Psi (1-a) - \delta R - \Omega M (1-a) \left( \delta c_0 s_L + \frac{c_0 R}{AS} \right) \right] \quad (32)^{4.12}$$

Η εξίσωση (32) αντιστοιχεί σε μία διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης με σταθερούς συντελεστές. Η γενική λύση αυτής της διαφορικής εξίσωσης προκύπτει όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 4.3 ως το άθροισμα της λύσης της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης (διαφορική

<sup>4.12</sup> **Σημείωση:** Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (32).

εξίσωση χωρίς σταθερό όρο)  $H_h^{pc}(t)$  και της ειδικής λύσης  $\bar{H}^{pc}(t)$ . Επομένως, η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (32) πραγματοποιείται όπως και στην ενότητα 4.3 σε τρία στάδια, τα οποία είναι: Α) λύση της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης, Β) προσδιορισμός ειδικής λύσης και Γ) προσδιορισμός γενικής λύσης με τη χρήση των συνοριακών συνθηκών που αναφέρονται στη σχέση (21).

#### Α) Λύση ομογενούς διαφορικής εξίσωσης

Η ομογενής διαφορική εξίσωση είναι:

$$\ddot{H} - \delta \dot{H} - \frac{\delta c_0 \Omega M (1-a)}{AS} H = 0 \quad (33)$$

Δοκιμάζεται λύση της μορφής  $e^{\lambda t}$  και προκύπτει η χαρακτηριστική εξίσωση της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης, η οποία είναι:

$$\lambda^2 - \delta \lambda - \frac{\delta c_0 \Omega M (1-a)}{AS} = 0 \quad (34)^{4.13}$$

Η διακρίνουσα της χαρακτηριστικής εξίσωσης είναι:

$$\Delta = \delta^2 + \frac{4\delta c_0 \Omega M (1-a)}{AS} \quad (35)$$

Παρατηρείται ότι  $\Delta > 0$ , οπότε υπάρχουν δύο πραγματικές άνισες ρίζες της χαρακτηριστικής εξίσωσης, οι οποίες είναι οι εξής:

$$\lambda_{1,2} = \frac{\delta \pm \sqrt{\delta^2 + \frac{4\delta c_0 \Omega M (1-a)}{AS}}}{2} = \frac{\delta}{2} \pm \sqrt{\frac{\delta^2}{4} + \frac{\delta c_0 \Omega M (1-a)}{AS}} \quad (36)$$

Η λύση της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης είναι η ακόλουθη:

$$H_h^{pc}(t) = X_1^{pc} e^{\lambda_1 t} + X_2^{pc} e^{\lambda_2 t} \quad (37)$$

<sup>4.13</sup> Σημείωση: Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (34).

όπου  $X_1^{pc}$ <sup>4.14</sup> και  $X_2^{pc}$  σταθερές που προκύπτουν με βάση της συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.

### B) Προσδιορισμός ειδικής λύσης

Για τον προσδιορισμό της ειδικής λύσης της διαφορικής εξίσωσης δοκιμάζεται η απροσδιόριστη σταθερά  $k_2$ , θεωρείται δηλαδή ότι  $\bar{H}^{pc}(t) = k_2$ . Έτσι, με βάση την εξίσωση (32) προκύπτει ότι:

$$-\frac{\delta c_0 \Omega M(1-a)}{AS} k_2 = \frac{1}{AS} \left[ \delta M \Psi(1-a) - \delta R - \Omega M(1-a) \left( \delta c_0 s_L + \frac{c_0 R}{AS} \right) \right] \Rightarrow$$

$$k_2 = \bar{H}^{pc}(t) = -\frac{\Psi}{c_0 \Omega} + \frac{R}{\Omega M c_0 (1-a)} + s_L + \frac{R}{\delta AS} \quad (38)$$

### Γ) Προσδιορισμός γενικής λύσης

Η γενική λύσης  $H^{pc}(t)$  της διαφορικής εξίσωσης (32), η οποία είναι και χρονική διαδρομή για το υδραυλικό ύψος, προκύπτει, όπως προαναφέρθηκε, ως το άθροισμα της λύσης της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης  $H_h^{pc}(t)$  και της ειδικής λύσης  $\bar{H}^{pc}(t)$ , δηλαδή, βάσει των εξισώσεων (37) και (38) θα είναι:

$$H^{pc}(t) = H_h^{pc}(t) + \bar{H}^{pc}(t) \xrightarrow{(37),(38)}$$

$$H^{pc}(t) = X_1^{pc} e^{\lambda_1 t} + X_2^{pc} e^{\lambda_2 t} - \frac{\Psi}{c_0 \Omega} + \frac{R}{\Omega M c_0 (1-a)} + s_L + \frac{R}{\delta AS} \quad (39)$$

Με βάση την εξίσωση (39) και την εξίσωση (30) προκύπτει και η χρονική διαδρομή για την συνολική κατανάλωση νερού κατ' έτος, η οποία είναι:

$$Q^{pc}(t) = -\frac{AS}{(1-a)} \lambda_1 X_1^{pc} e^{\lambda_1 t} - \frac{AS}{(1-a)} \lambda_2 X_2^{pc} e^{\lambda_2 t} + \frac{R}{(1-a)} \quad (40)$$

Με βάση τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος αρίστου ελέγχου, όπως αυτό περιγράφεται από τη σχέση (21), προσδιορίζονται και οι τιμές των σταθερών  $X_1^{pc}$  και  $X_2^{pc}$ .

<sup>4.14</sup> Σημείωση: Ο δείκτης  $pc$  χρησιμοποιείται για να δηλώσει τον όρο "partial cooperation".

Οι συνοριακές συνθήκες είναι  $H(0) = H_0$  και  $H(T) = H_{min}$ . Έτσι, με βάση τη συνοριακή συνθήκη αρχής, δηλαδή  $H(0) = H_0$  είναι:

$$H(0) = H_0 \Rightarrow X_1^{pc} + X_2^{pc} + k_2 = H_0 \Rightarrow$$

$$X_1^{pc} = H_0 - k_2 - X_2^{pc} \quad (41)$$

Με βάση τη συνοριακή συνθήκη πέρατος, δηλαδή  $H(T) = H_{min}$  προκύπτει η σταθερά  $X_2^{pc}$ , αφού είναι:

$$H(T) = H_{min} \Rightarrow X_1^{pc} e^{\lambda_1 T} + X_2^{pc} e^{\lambda_2 T} + k_2 = H_{min} \Rightarrow$$

$$X_2^{pc} = \frac{H_{min} - k_2 - e^{\lambda_1 T} (H_0 - k_2)}{e^{\lambda_2 T} - e^{\lambda_1 T}} \quad (42)$$

Άρα βάσει των εξισώσεων (41) και (42) προκύπτει και η σταθερά  $X_1^{pc}$ , ως εξής:

$$X_1^{pc} = H_0 - k_2 - X_2^{pc} \stackrel{(42)}{\Rightarrow}$$

$$X_1^{pc} = \frac{e^{\lambda_2 T} (H_0 - k_2) - H_{min} + k_2}{e^{\lambda_2 T} - e^{\lambda_1 T}} \quad (43)$$

Εφόσον έχει θεωρηθεί ότι στην αγορά των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού επικρατούν συνθήκες τέλει ανταγωνισμού, τιμή  $P_t^{pc}$  των δικαιωμάτων νερού κάτω από ένα καθεστώς μερικής συνεργασίας μεταξύ των χρηστών προκύπτει βάσει της συνθήκης  $P_t^{pc} = MNB_{r,t}^{pc}$ , οπότε αξιοποιώντας την εξίσωση (23) θα είναι:

$$P_t^{pc} = \left[ \frac{2b_r p_r A S s_r}{M(1-a)} \lambda_1 X_1^{pc} + c_0 X_1^{pc} \right] e^{\lambda_1 t} +$$

$$+ \left[ \frac{2b_r p_r A S s_r}{M(1-a)} \lambda_2 X_2^{pc} + c_0 X_2^{pc} \right] e^{\lambda_2 t} + (p_r a_r - c_0 s_L) + \dots \quad (44)^{4.15,4.16}$$

<sup>4.15</sup> **Σημείωση:** Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (44).

<sup>4.16</sup> **Σημείωση:** Η εξίσωση (44) περιγράφει τη χρονική διαδρομή για την τιμή των δικαιωμάτων νερού εκφραζόμενη σε χρηματικές μονάδες/κυβικό μέτρο νερού. Βάσει της συνθήκης  $P_t^{pc} = MNB_{r,t}^{pc}$  και εξ'ορισμού του οριακού οφέλους (μέγιστο ποσό που είναι διατεθειμένη να πληρώσει η ομάδα αγροτών  $r$ , για να αποκτήσει μία επιπλέον μονάδα  $q_{r,t}$ ) και του  $q_{r,t}$  προκύπτει ότι αυτή δίνει το μέγιστο ποσό που είναι διατεθειμένη να πληρώσει η ομάδα αγροτών  $r$ , για να αποκτήσει μία επιπλέον «μονάδα νερού» για κάθε εκτάριο γης που αυτή καλλιεργεί, οπότε η τιμή των δικαιωμάτων νερού ανά κυβικό μέτρο νερού προκύπτει επί της ουσίας ως  $P_t^{pc} = \frac{MNB_{r,t}^{pc}}{M}$ .

$$\dots + c_0 \left[ -\frac{\Psi}{c_0 \Omega} + \frac{R}{\Omega M c_0 (1-a)} + s_L + \frac{R}{\delta AS} \right] - 2b_r p_r \left[ \frac{s_r R}{M(1-a)} + \theta_r \right]$$

#### 4.5 Καθεστώς πλήρους συνεργασίας μεταξύ των χρηστών

Κάτω από ένα καθεστώς πλήρους συνεργασίας μεταξύ των χρηστών θεωρείται ότι εκτός του ότι αυτοί «συνεργάζονται» μεταξύ τους στο πλαίσιο ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού, συνυπολογίζουν το κόστος της περιβαλλοντικής καταστροφής που προκαλείται στο τοπικό οικοσύστημα εξαιτίας της εξάντλησης των υδάτινων αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα. Σε αυτό το πλαίσιο, υφίσταται και πάλι μία λογική κοινωνικού προγραμματισμού, κάτι που σημαίνει ότι οι δύο ομάδες αγροτών και σε αυτήν την περίπτωση δε λειτουργούν πλήρως ανταγωνιστικά. Για την περίπτωση της πλήρους συνεργασίας ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.4 για το σύστημα των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού, τη λειτουργία του και τις υποθέσεις στις οποίες αυτή βασίζεται. Άρα η συνθήκη αποτελεσματικότητας και ο περιορισμός σχετικά με τη συνολική κατανάλωση νερού κατ' έτος είναι ίδια με αυτά της ενότητας 4.4, οπότε η εξίσωση (22) ισχύει και σε αυτήν την περίπτωση.

Κάτω από ένα καθεστώς πλήρους συνεργασίας μεταξύ των χρηστών το πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί, προκειμένου να προσδιοριστούν οι χρονικές διαδρομές για το υδραυλικό ύψος και τη συνολική κατανάλωση νερού είναι και πάλι ένα πρόβλημα αρίστου ελέγχου, το οποίο περιγράφεται από τη σχέση (21) με μία διαφορετική όμως συνάρτηση προς μεγιστοποίηση, αφού στην περίπτωση αυτή πρέπει, όπως προαναφέρθηκε, να λαμβάνεται υπ' όψιν και το κόστος της περιβαλλοντικής καταστροφής που προκαλείται στο τοπικό οικοσύστημα εξαιτίας της εξάντλησης των υδάτινων αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα.

Το κόστος της περιβαλλοντικής καταστροφής είναι επί της ουσίας κοινωνικό κόστος της άντλησης, το οποίο κατά κανόνα δε λαμβάνεται υπ' όψιν από τους χρήστες που αντλούν νερό από έναν υπόγειο υδροφορέα (Esteban and Albiac, 2011). Δεδομένου ότι οι περιβαλλοντικές καταστροφές που προκαλεί η εξάντληση των υδάτινων αποθεμάτων ενός υπόγειου υδροφορέα

καθορίζονται από πολύπλοκες φυσικές διεργασίες με δυναμικά και μη γραμμικά χαρακτηριστικά, η μοντελοποίηση αυτών είναι δύσκολη. Ως εκ τούτου προκειμένου να συμπεριληφθούν στο πρόβλημα που εξετάζεται οι περιβαλλοντικές καταστροφές απαιτούνται παραδοχές, οι οποίες απλοποιούν τη μοντελοποίηση αυτών. Η βασική παραδοχή είναι ότι η συνάρτηση κόστους των περιβαλλοντικών καταστροφών είναι γραμμική ως προς τον όγκο νερού κατά τον οποίο μειώνεται το υδάτινο απόθεμα του υπόγειου υδροφορέα ανά έτος εξαιτίας της άντλησης (Esteban and Albiac, 2011). Θεωρώντας ότι δεν υπάρχει τεχνητός εμπλουτισμός καθώς και ότι η φυσική εκροή του υδροφορέα είναι αμελητέα σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.2 ο όγκος νερού  $Q_{dep}$  κατά τον οποίο μειώνεται το υδάτινο απόθεμα του υπόγειου υδροφορέα ανά έτος εξαιτίας της άντλησης είναι (Esteban and Albiac, 2011):

$$Q_{dep} = (1 - a)W - R \quad (45)$$

Κατά συνέπεια εάν  $\beta$  είναι ένας συντελεστής που μετατρέπει σε οικονομικούς όρους την περιβαλλοντική καταστροφή που συνεπάγεται η εξάντληση των υδάτινων αποθεμάτων υπόγειου υδροφορέα, τότε το συνολικό κόστος  $C_{env,t}$  της περιβαλλοντικής καταστροφής κατά το έτος  $t$  θα είναι (Esteban and Albiac, 2011):

$$C_{env,t} = \beta[(1 - a)W - R] \quad (46)$$

Σύμφωνα με τα όλα τα παραπάνω, το καθαρό όφελος  $NB_{r,t}$  της ομάδας  $r$  κατά το έτος  $t$  κάτω από ένα καθεστώς πλήρους συνεργασίας θα είναι<sup>4.17</sup>:

$$NB_{r,t} = M \left\{ p_r \left[ \left( a_r \left( s_r \frac{Q_t}{M} + \theta_r \right) - b_r \left( s_r \frac{Q_t}{M} + \theta_r \right)^2 + g_r \right) \right] - c_0 (s_L - H_t) \left( s_r \frac{Q_t}{M} + \theta_r \right) \right\} \\ - \beta \left[ (1 - a) \left( s_r \frac{Q_t}{M} + \theta_r \right) M - R \right] - C_{agr} \quad (47)$$

<sup>4.17</sup> **Σημείωση:** Κάθε ομάδα αγροτών καταναλώνει κατά το έτος  $t$  συνολική ποσότητα νερού ίση με  $Mq_{r,t} = M \left( s_r \frac{Q_t}{M} + \theta_r \right)$ .



Η επίλυση του προβλήματος αρίστου ελέγχου που περιγράφεται από τη σχέση (21) για το καθεστώς της πλήρους συνεργασίας μεταξύ των χρηστών πραγματοποιείται με αντίστοιχο τρόπο με αυτόν που πραγματοποιήθηκε η επίλυση για το καθεστώς της μερικής συνεργασίας. Συνεπώς, η επίλυση του προβλήματος αρίστου ελέγχου πραγματοποιείται και πάλι με βάση όσα αναφέρονται από τους Ξεπαπαδέα και Γιαννίκο (2009).

Η Χαμιλτονιανή συνάρτηση τρέχουσας αξίας είναι αυτή που περιγράφεται από την εξίσωση (24). Η Χαμιλτονιανή συνάρτηση θεωρείται και εδώ ότι είναι κοίλη στο  $Q_t$ , προκειμένου να υπάρξει εσωτερική λύση. Οι αναγκαίες συνθήκες για βελτιστοποίηση βάσει της αρχής του μεγίστου – Pontryagin είναι αυτές που περιγράφεται από τις εξισώσεις (25) και (26).

Εφαρμόζοντας την πρώτη αναγκαία συνθήκη, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση (25) για την περίπτωση της πλήρους συνεργασίας προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για τη βοηθητική μεταβλητή  $\mu$ :

$$\mu = \frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{R-ASH}{\Omega M(1-a)} - c_0(s_L - H_t) - \beta(1-a) \right] \quad (48)^{4.18}$$

Λαμβάνοντας την πρώτη παράγωγο της βοηθητικής μεταβλητής  $\mu$  ως προς το χρόνο  $t$ , η οποία δίνεται από την εξίσωση (48) προκύπτει και πάλι η εξίσωση (28).

Για την εφαρμογή της δεύτερης αναγκαίας συνθήκης για την περίπτωση της πλήρους συνεργασίας απαιτείται και πάλι ο υπολογισμός της μερικής παραγώγου  $\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H_t}$ , η οποία δίνεται και πάλι από την εξίσωση (29).

Επιλύοντας τη διαφορική εξίσωση που περιγράφει την πορεία της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα στο χρόνο ως προς τη συνολική κατανάλωση νερού  $Q_t$  κατά το έτος  $t$ , έτσι όπως

<sup>4.18</sup> **Σημείωση:** Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (48).

αυτή περιγράφεται στη σχέση (21), προκύπτει η εξίσωση (30). Επομένως, συνδυάζοντας τις εξισώσεις (29) και (30) προκύπτει και πάλι η εξίσωση (31)

Έτσι, εφαρμόζοντας τη δεύτερη αναγκαία συνθήκη για βελτιστοποίηση, η οποία περιγράφεται από την εξίσωση (26) και αξιοποιώντας τις εξισώσεις για τα  $\mu$ ,  $\dot{\mu}$  και  $\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H_t}$ , δηλαδή τις εξισώσεις (48), (28) και (31) προκύπτει ότι:

$$\begin{aligned} \dot{H} - \delta H - \frac{\delta c_0 \Omega M (1 - a)}{AS} H = \\ \frac{1}{AS} \left[ \delta M \Psi (1 - a) - \delta R - \Omega M (1 - a) \left( \delta c_0 s_L + \delta \beta (1 - a) + \frac{c_0 R}{AS} \right) \right] \end{aligned} \quad (49)^{4.19}$$

Η εξίσωση (49) αντιστοιχεί σε μία διαφορική εξίσωση δεύτερης τάξης με σταθερούς συντελεστές. Η γενική λύση αυτής της διαφορικής εξίσωσης προκύπτει όπως και πριν ως το άθροισμα της λύσης της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης (διαφορική εξίσωση χωρίς σταθερό όρο)  $H_h^{fc}(t)$  και της ειδικής λύσης  $\bar{H}^{fc}(t)$ . Επομένως, η επίλυση της διαφορικής εξίσωσης (48) πραγματοποιείται όπως και στην ενότητα 4.4 σε τρία στάδια, τα οποία είναι: Α) λύση της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης, Β) προσδιορισμός ειδικής λύσης και Γ) προσδιορισμός γενικής λύσης με τη χρήση των συνοριακών συνθηκών που αναφέρονται στη σχέση (21).

#### Α) Λύση ομογενούς διαφορικής εξίσωσης

Η ομογενής διαφορική εξίσωση είναι ίδια με αυτή που δίνεται στην εξίσωση (33). Η λύση της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης είναι η ακόλουθη:

$$H_h^{fc}(t) = X_1^{fc} e^{\lambda_1 t} + X_2^{fc} e^{\lambda_2 t} \quad (50)$$

<sup>4.19</sup> **Σημείωση:** Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (49).

όπου  $X_1^{fc}$ <sup>4.20</sup> και  $X_2^{fc}$  σταθερές που προκύπτουν με βάση της συνοριακές συνθήκες του προβλήματος.

## Β) Προσδιορισμός ειδικής λύσης

Για τον προσδιορισμό της ειδικής λύσης της διαφορικής εξίσωσης δοκιμάζεται η απροσδιόριστη σταθερά  $k_3$ , θεωρείται δηλαδή ότι  $\bar{H}^{fc}(t) = k_3$ . Έτσι, με βάση την εξίσωση (49) προκύπτει ότι:

$$-\frac{\delta c_0 \Omega M(1-a)}{AS} k_3 = \frac{1}{AS} \left[ \delta M \Psi(1-a) - \delta R - \Omega M(1-a) \left( \delta c_0 s_L + \delta \beta(1-a) + \frac{c_0 R}{AS} \right) \right] \Rightarrow$$

$$k_3 = \bar{H}^{fc}(t) = -\frac{\Psi}{c_0 \Omega} + \frac{R}{\Omega M c_0(1-a)} + s_L + \frac{\beta(1-a)}{c_0} + \frac{R}{\delta AS} \quad (51)$$

## Γ) Προσδιορισμός γενικής λύσης

Η γενική λύσης  $H^{fc}(t)$  της διαφορικής εξίσωσης (49), η οποία είναι και χρονική διαδρομή για το υδραυλικό ύψος, προκύπτει, όπως προαναφέρθηκε, ως το άθροισμα της λύσης της ομογενούς διαφορικής εξίσωσης  $H_h^{fc}(t)$  και της ειδικής λύσης  $\bar{H}^{fc}(t)$ , δηλαδή, βάσει των εξισώσεων (50) και (51) θα είναι:

$$H^{fc}(t) = H_h^{fc}(t) + \bar{H}^{fc}(t) \xrightarrow{(50),(51)}$$

$$H^{fc}(t) = X_1^{fc} e^{\lambda_1 t} + X_2^{fc} e^{\lambda_2 t} - \frac{\Psi}{c_0 \Omega} + \frac{R}{\Omega M c_0(1-a)} + s_L + \frac{\beta(1-a)}{c_0} + \frac{R}{\delta AS} \quad (52)$$

Με βάση την εξίσωση (52) και την εξίσωση (30) προκύπτει και η χρονική διαδρομή για την συνολική κατανάλωση νερού κατ' έτος, η οποία είναι:

$$Q^{fc}(t) = -\frac{AS}{(1-a)} \lambda_1 X_1^{fc} e^{\lambda_1 t} - \frac{AS}{(1-a)} \lambda_2 X_2^{fc} e^{\lambda_2 t} + \frac{R}{(1-a)} \quad (53)$$

Με βάση τις συνοριακές συνθήκες του προβλήματος αρίστου ελέγχου, όπως αυτό περιγράφεται από τη σχέση (21), προσδιορίζονται και οι τιμές των σταθερών  $X_1^{fc}$  και  $X_2^{fc}$ .

<sup>4.20</sup> Σημείωση: Ο δείκτης  $fc$  χρησιμοποιείται για να δηλώσει τον όρο "full cooperation".

Οι συνοριακές συνθήκες είναι  $H(0) = H_0$  και  $H(T) = H_{min}$ . Έτσι, με βάση τη συνοριακή συνθήκη αρχής, δηλαδή  $H(0) = H_0$  είναι:

$$H(0) = H_0 \Rightarrow X_1^{fc} + X_2^{fc} + k_3 = H_0 \Rightarrow$$

$$X_1^{fc} = H_0 - k_3 - X_2^{fc} \quad (54)$$

Με βάση τη συνοριακή συνθήκη πέρατος, δηλαδή  $H(T) = H_{min}$  προκύπτει η σταθερά  $X_2^{fc}$ , αφού είναι:

$$H(T) = H_{min} \Rightarrow X_1^{fc} e^{\lambda_1 T} + X_2^{fc} e^{\lambda_2 T} + k_3 = H_{min} \Rightarrow$$

$$X_2^{fc} = \frac{H_{min} - k_3 - e^{\lambda_1 T} (H_0 - k_3)}{e^{\lambda_2 T} - e^{\lambda_1 T}} \quad (55)$$

Άρα βάσει των εξισώσεων (54) και (55) προκύπτει και η σταθερά  $X_1^{fc}$ , ως εξής:

$$X_1^{fc} = H_0 - k_3 - X_2^{fc} \stackrel{(55)}{\Rightarrow}$$

$$X_1^{fc} = \frac{e^{\lambda_2 T} (H_0 - k_3) - H_{min} + k_3}{e^{\lambda_2 T} - e^{\lambda_1 T}} \quad (56)$$

Εφόσον έχει θεωρηθεί ότι στην αγορά των εμπορευσιμων δικαιωμάτων νερού επικρατούν συνθήκες τέλει ανταγωνισμού, τιμή  $P_t^{fc}$  των δικαιωμάτων νερού κάτω από ένα καθεστώς πλήρους συνεργασίας μεταξύ των χρηστών προκύπτει βάσει της συνθήκης  $P_t^{fc} = MNB_{r,t}^{fc}$ , οπότε αξιοποιώντας την εξίσωση (47) θα είναι:

$$P_t^{fc} = \left[ \frac{2b_r p_r A S_s r}{M(1-a)} \lambda_1 X_1^{pc} + c_0 X_1^{fc} \right] e^{\lambda_1 t} +$$

$$+ \left[ \frac{2b_r p_r A S_s r}{M(1-a)} \lambda_2 X_2^{fc} + c_0 X_2^{fc} \right] e^{\lambda_2 t} + \dots \quad (57)^{4.21,4.22}$$

<sup>4.21</sup> **Σημείωση:** Βλ. Παράρτημα Α για την απόδειξη της εξίσωσης (57).

<sup>4.22</sup> **Σημείωση:** Η εξίσωση (57) περιγράφει τη χρονική διαδρομή για την τιμή των δικαιωμάτων νερού εκφραζόμενη σε χρηματικές μονάδες/κυβικό μέτρο νερού. Ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση όσα αναφέρθηκαν στη σημείωση 4.16.

$$\dots + c_0 \left[ -\frac{\Psi}{c_0 \Omega} + \frac{R}{\Omega M c_0 (1-a)} + s_L + \frac{R}{\delta AS} \right] + [p_r a_r - c_0 s_L - \beta(1-a)] \\ - 2b_r p_r \left[ \frac{s_r R}{M(1-a)} + \theta_r \right]$$

*Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### Εμπειρική εφαρμογή

**Σ**το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο για την αντιμετώπιση του προβλήματος της άντλησης υδάτων από έναν υπόγειο υδροφόρα σε μία συγκεκριμένη περιοχή μελέτης. Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιούνται επί της ουσίας προσομοιώσεις των όσων αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι προσομοιώσεις κρίνονται αναγκαίες, αφού χωρίς αυτές δεν μπορεί να υπάρξει σύγκριση των αποτελεσμάτων που αντιστοιχούν στα τρία διαφορετικά καθεστάτα συνεργασίας μεταξύ των χρηστών εξαιτίας της πολυπλοκότητας των λύσεων. Ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου, συνεπώς, είναι να παρουσιαστούν ποσοτικά και να συγκριθούν μεταξύ τους τα οφέλη που προκύπτουν από τα διαφορετικά επίπεδα συνεργασίας μεταξύ των χρηστών, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

#### 5.1 Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε είναι αυτή της Δημοτικής Ενότητας Μουδανιών του Δήμου Νέας Προποντίδας, ο οποίος βρίσκεται στην Περιφερειακή Ενότητα Χαλκιδικής της Περιφέρειας Κεντρικής Μακεδονίας. Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζεται ένας χάρτης της περιοχής μελέτης.



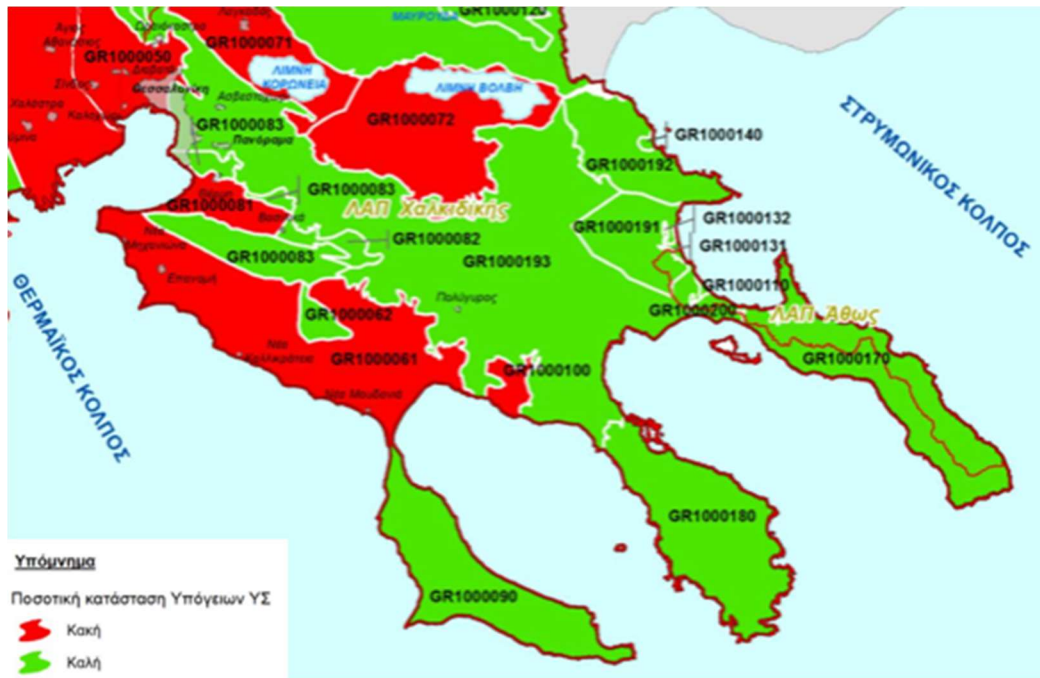
**Σχήμα 5.1:** Χάρτης της περιοχής μελέτης  
(Πηγή: Latinopoulos and Sartzetakis, 2015; ίδια επεξεργασία)

Τα χαρακτηριστικά της περιοχής αυτής, τα οποία την καθιστούν ιδανική ως περιοχή μελέτης για τη διεξαγωγή προσομοιώσεων των όσων αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο είναι τα εξής (Latinopoulos and Sartzetakis, 2015; ΕΓΥ, 2014): α) η γεωργία αποτελεί μία από τις κύριες οικονομικές δραστηριότητες, β) τα υπόγεια ύδατα χρησιμοποιούνται εντατικά για άρδευση<sup>5.1</sup>, γ) υπάρχει έλλειμμα στο υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης απορροής λόγω υπεράντλησης υπογείων υδάτων, όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.2, όπου η ποσοτική κατάσταση των υπογείων υδάτινων συστημάτων της Δημοτικής Ενότητας Μουδανιών χαρακτηρίζεται ως κακή αναδεικνύοντας τη σταδιακή εξάντληση των υπογείων υδάτινων αποθεμάτων, και δ) υπάρχει μεγάλος αριθμός μικρών καλλιεργητών, οι οποίοι αντλούν νερό από έναν μεγάλο σχετικά υδροφόρα, οπότε σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 4.3 του προηγούμενου κεφαλαίου η συμπεριφορά των αγροτών μπορεί να χαρακτηριστεί ως “myopic”.

Δεδομένου ότι σχεδόν το 50% της αρδευόμενης έκτασης στην περιοχή μελέτης καταλαμβάνεται από ελαιόδεντρα και το 30% από οπωροφόρα δέντρα, οι δύο ομάδες αγροτών θεωρείται ότι καλλιεργούν ελιές (ομάδα 1) και οπωροφόρα (ομάδα 2) αντίστοιχα. Για λόγους απλούστευσης, βέβαια, θα θεωρηθεί ότι η αρδευόμενη έκταση καταλαμβάνεται εξίσου από τις δύο καλλιέργειες.

<sup>5.1</sup> **Σημείωση:** Οι απολήψεις υπογείων υδάτων στην ευρύτερη περιοχή με σκοπό την άρδευση αντιστοιχούν περίπου στο 85% των συνολικών απολήψεων υπογείων υδάτων (ΕΓΥ, 2014).





Σχήμα 5.2: Ποσοτική κατάσταση υπογείων υδάτινων συστημάτων της περιοχής μελέτης (Πηγή: ΕΓΥ, 2014)

Τα υδρολογικά και οικονομικά δεδομένα της περιοχής μελέτης παρουσιάζονται στους πίνακες 5.1 και 5.2 αντίστοιχα.

Πίνακας 5.1: Υδρολογικά δεδομένα της περιοχής μελέτης

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
$\alpha$	Συντελεστής ροής επιστροφής (return flow coefficient)	$\alpha = 0.166$
$R$	Ετήσιος φυσικός εμπλουτισμός (natural recharge)	$R = 9691620 \text{ m}^3$
$A$	Συνολική έκταση του υπόγειου υδροφορέα	$A = 12700 \text{ ha}$
$S$	Συντελεστής αποθηκευτικότητας (storativity coefficient) του υπόγειου υδροφορέα	$S = 0.064$
$S_L$	Μέσο υψόμετρο του εδάφους με αναφορά στην επιφάνεια της θάλασσας	$s_L = 210 \text{ m}$
$H_0$	Στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα στην αρχή της περιόδου σχεδιασμού	$H_0 = 60 \text{ m}$
$H_{min}$	Επιθυμητή στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα στο πέρας της περιόδου σχεδιασμού	$H_{min} = 50 \text{ m}$
$T$	Περίοδος σχεδιασμού	$T = 40 \text{ έτη}$

(Πηγή: Latinopoulos and Sartzetakis, 2015)

Πίνακας 5.2: Οικονομικά δεδομένα της περιοχής μελέτης

Παράμετρος	Περιγραφή	Τιμή
$M$	Καλλιεργήσιμη έκταση από κάθε ομάδα αγροτών	$M = 1300 \text{ ha}$
$f(q_{1,t})$	Συνάρτηση αγροτικής παραγωγής ομάδας 1 (kg/ha)	$f(q_{1,t}) = 0.778q_{1,t} - 0.000058q_{1,t}^2 + 1440g_r$
$f(q_{2,t})$	Συνάρτηση αγροτικής παραγωγής ομάδας 2 (kg/ha)	$f(q_{2,t}) = 1.501q_{2,t} - 0.000094q_{2,t}^2 + 4910$
$p_1$	Τιμή πώλησης των αγροτικών προϊόντων ομάδας 1 (€/kg)	$p_1 = 1.20 \text{ €/kg}$
$p_2$	Τιμή πώλησης των αγροτικών προϊόντων ομάδας 2 (€/kg)	$p_2 = 0.42 \text{ €/kg}$
$C_{agr,1,t}$	Λοιπά έξοδα κατ' έτος που σχετίζονται με την αγροτική παραγωγή ομάδας 1 (€/ha)	$C_{agr,1,t} = 2700 \text{ €/ha}$
$C_{agr,2,t}$	Λοιπά έξοδα κατ' έτος που σχετίζονται με την αγροτική παραγωγή ομάδας 2 (€/ha)	$C_{agr,2,t} = 3150 \text{ €/ha}$
$c_0$	Οριακό κόστος άντλησης ανά κυβικό μέτρο νερού και ανά μέτρο άντλησης Συντελεστής που μετατρέπει σε οικονομικούς όρους την περιβαλλοντική	$c_0 = 0.0004 \text{ €/m}^3$
$\beta$	καταστροφή που συνεπάγεται η εξάντληση των υδάτινων αποθεμάτων υπόγειου υδροφορέα	$\beta = 0.05 \text{ €/m}^3$
$\delta$	Επιτόκιο προεξόφλησης	$\delta = 3\%$

(Πηγή: Latinopoulos and Sartzetakis, 2015; Esteban and Albiac, 2011)

## 5.2 Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάζονται στη συνέχεια προκύπτουν αντικαθιστώντας τα δεδομένα των πινάκων 5.1 και 5.2 στις εξισώσεις που περιγράφουν τις χρονικές διαδρομές για τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα και τη συνολική κατανάλωση νερού κατ' έτος για κάθε περίπτωση συνεργασίας που παρουσιάστηκε στο τέταρτο κεφάλαιο. Σημειώνεται ότι όλες οι εξισώσεις με αποτελέσματα που παρουσιάζονται ισχύουν για  $t = 0, \dots, 40$ . Με βάση τα αποτελέσματα αυτά μπορούν εύκολα να προκύψουν και οι χρονικές διαδρομές άλλων μεγεθών

### 5.2.1 Καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών

Για το καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού αντικαθιστώντας τα δεδομένα των πινάκων 5.1 και 5.2 στις εξισώσεις (18) και (19) προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα<sup>5.2</sup>:

$$H_t^m = 574.484e^{-0.001t} - 514.484 \quad (58)$$

$$Q_t^m = 619789.193e^{-0.00106t} + 16930244.871 \quad (59)$$

### 5.2.2 Καθεστώς μερικής συνεργασίας μεταξύ των χρηστών

Για το καθεστώς μερικής συνεργασίας αντικαθιστώντας τα δεδομένα των πινάκων 5.1 και 5.2 στις εξισώσεις (39) και (40) προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα<sup>5.3</sup>:

$$H_t^{pc} = 4.586e^{0.03102t} + 530.151e^{-0.00102t} - 474.738 \quad (60)$$

$$Q_t^{pc} = -1386761.757e^{0.0310t} + 5291199.885e^{-0.00102t} + 11620647.482 \quad (61)$$

Στην περίπτωση αυτή προκύπτει επιπλέον η χρονική διαδρομή για την τιμή  $P_t^{pc}$  των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού, η οποία αντικαθιστώντας τα δεδομένα των πινάκων 5.1 και 5.2 στην εξίσωση (44) είναι η εξής:

$$P_t^{pc} = 0.056e^{0.03102t} + 0.007e^{-0.00102t} + 0.016 \quad (62)$$

### 5.2.3 Καθεστώς πλήρους συνεργασίας μεταξύ των χρηστών

Για το καθεστώς πλήρους συνεργασίας αντικαθιστώντας τα δεδομένα των πινάκων 5.1 και 5.2 στις εξισώσεις (52) και (53) προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα<sup>5.4</sup>:

$$H_t^{fc} = 2.912e^{0.03102t} + 427.576e^{-0.00102t} - 370.488 \quad (63)$$

---

<sup>5.2</sup> **Σημείωση:** Βλ. Πίνακα Β.1, Παράρτημα Β για τα αναλυτικά αποτελέσματα του καθεστώτος πλήρους ανταγωνισμού.

<sup>5.3</sup> **Σημείωση:** Βλ. Πίνακα Β.2, Παράρτημα Β για τα αναλυτικά αποτελέσματα του καθεστώτος μερικής συνεργασίας.

<sup>5.4</sup> **Σημείωση:** Βλ. Πίνακα Β.3, Παράρτημα Β για τα αναλυτικά αποτελέσματα του καθεστώτος πλήρους συνεργασίας.

$$Q_t^{fc} = -880535.737e^{0.03102t} + 4267438.081e^{-0.0010t} + 11620647.482 \quad (64)$$

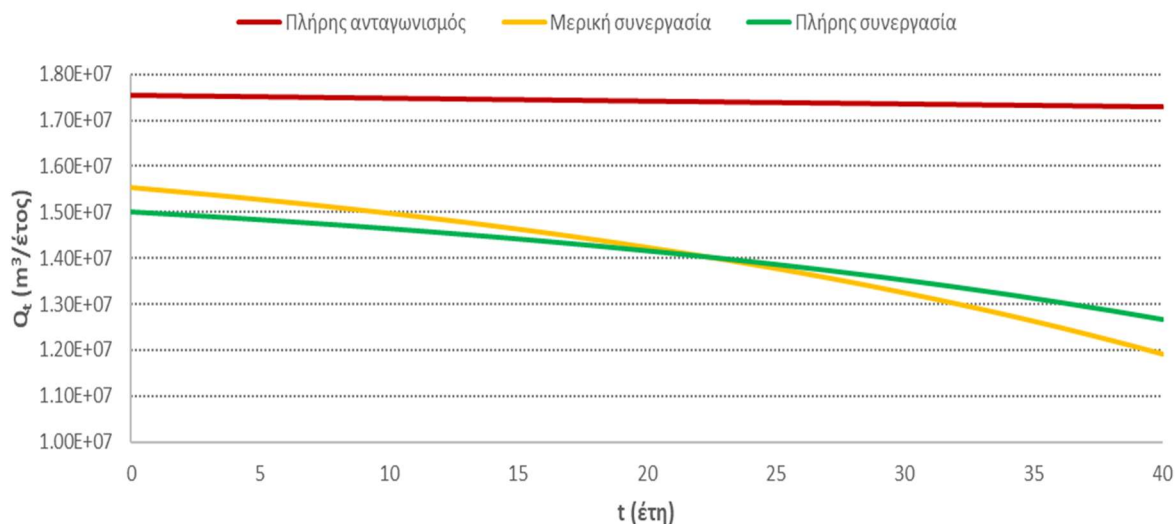
Στην περίπτωση αυτή προκύπτει επιπλέον, όπως και πριν, η χρονική διαδρομή για την τιμή  $P_t^{fc}$  των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού, η οποία αντικαθιστώντας τα δεδομένα των πινάκων 5.1 και 5.2 στην εξίσωση (57) είναι η εξής:

$$P_t^{fc} = 0.035e^{0.03102t} + 0.006e^{-0.00102t} + 0.016 \quad (65)$$

### 5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις για τις τρεις περιπτώσεις συνεργασίας πραγματοποιείται σύγκριση αυτών. Η σύγκριση πραγματοποιείται με τη βοήθεια γραφημάτων που απεικονίζουν τις χρονικές διαδρομές για το μέγεθος που απαιτείται κάθε φορά.

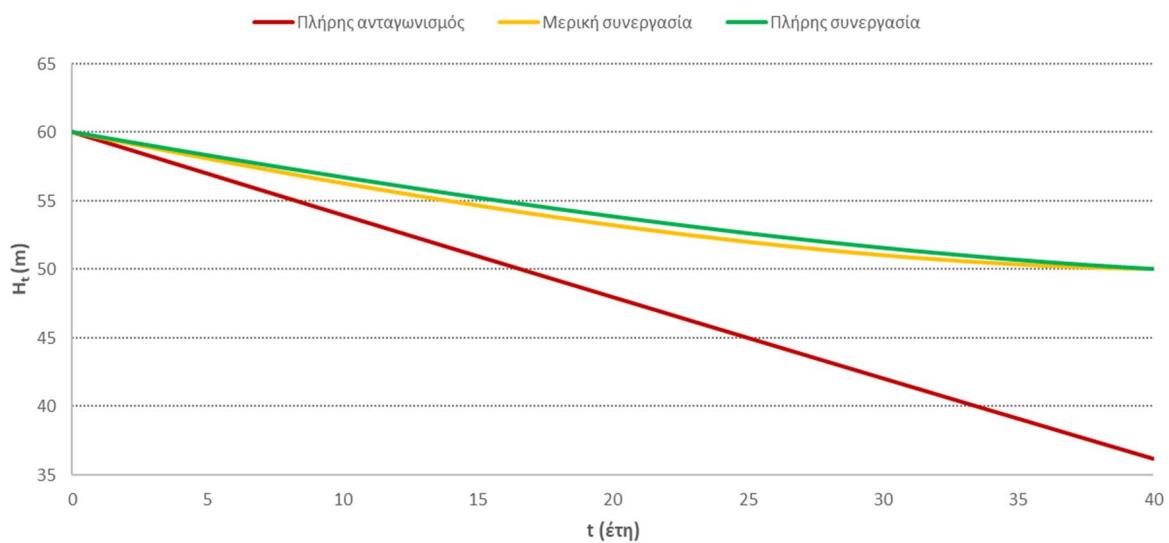
Αρχικά, λοιπόν, από το γράφημα 5.1 φαίνεται ότι η συνολική κατανάλωση νερού είναι ιδιαίτερα αυξημένη κάτω από ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού σε σχέση με τα δύο άλλα καθεστάτα συνεργασίας, γεγονός που δείχνει την υπερεκμετάλλευση των υδάτινων αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα από τις δύο ομάδες αγροτών, όταν αυτοί λειτουργούν ανταγωνιστικά. Η συνολική κατανάλωση νερού κατ' έτος στην περίπτωση του πλήρους ανταγωνισμού παραμένει σχεδόν σταθερή κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού ακολουθώντας μία εξαιρετικά ήπια πτωτική τάση (η μείωση που παρατηρείται στη συνολική κατανάλωση νερού κατά το τελευταίο έτος της περιόδου σχεδιασμού ανέρχεται σε 1.4% της συνολικής κατανάλωσης κατά το πρώτο έτος) σε αντίθεση με τη συνολική κατανάλωση κατ' έτος στις περιπτώσεις της μερικής και τη πλήρους συνεργασίας, η οποία ακολουθεί ξεκάθαρα πτωτική πορεία. Έτσι, αποδεικνύεται ότι όταν οι δύο ομάδες αγροτών λειτουργούν ανταγωνιστικά επί της ουσίας δεν αντιλαμβάνονται το γεγονός ότι το νερό δεν αποτελεί μία απλή οικονομική εισροή στην παραγωγική τους διαδικασία αλλά ένα σπάνιο συλλογικό πόρο.



**Γράφημα 5.1:** Χρονικές διαδρομές συνολικής κατανάλωσης νερού κατ' έτος για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας μεταξύ των χρηστών που διερευνήθηκαν

Η συνεργασία μεταξύ των χρηστών είτε αυτή είναι μερική είτε πλήρης φαίνεται, ωστόσο ότι οδηγεί σε σημαντική μείωση της αθροιστικής κατανάλωσης νερού κατ' έτος κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού από τις δύο ομάδες αγροτών κατά 24%. Από το γράφημα 5.1 φαίνεται, επίσης, ότι η συνολική κατανάλωση νερού μέχρι το έτος  $t = 21$  είναι μεγαλύτερη σε κάθε έτος στην περίπτωση της μερικής συνεργασίας ενώ από το έτος  $t = 21$  και μέχρι το πέρας της περιόδου σχεδιασμού αυτή είναι μεγαλύτερη σε κάθε έτος στην περίπτωση της πλήρους συνεργασίας. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι στην περίπτωση της πλήρους συνεργασίας μεταξύ των χρηστών μπορούν να προκύψουν μακροπρόθεσμα οφέλη για τους ίδιους, αφού η συντηρητική κατανάλωση νερού κατά τα πρώτα έτη επιτρέπει σε αυτούς να καταναλώσουν μεγάλες ποσότητες νερού στο απώτερο μέλλον. Αντίθετα, στην περίπτωση της μερικής συνεργασίας μεταξύ των χρηστών φαίνεται ότι ισχύει το αντίστροφο, καθώς οι χρήστες καταναλώνουν μεγάλες ποσότητες νερού κατά τα πρώτα έτη προκαλώντας ταχεία πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα συγκριτικά με την περίπτωση της πλήρους συνεργασίας (βλ. γράφημα 5.2), η οποία τους αναγκάζει να προβούν στον περιορισμό της κατανάλωσης στο απώτερο μέλλον προκειμένου να είναι συνεπείς με τον τελικό περιορισμό που έχει επιβληθεί και σχετίζεται με τη διατήρηση μιας δεδομένης ελάχιστης

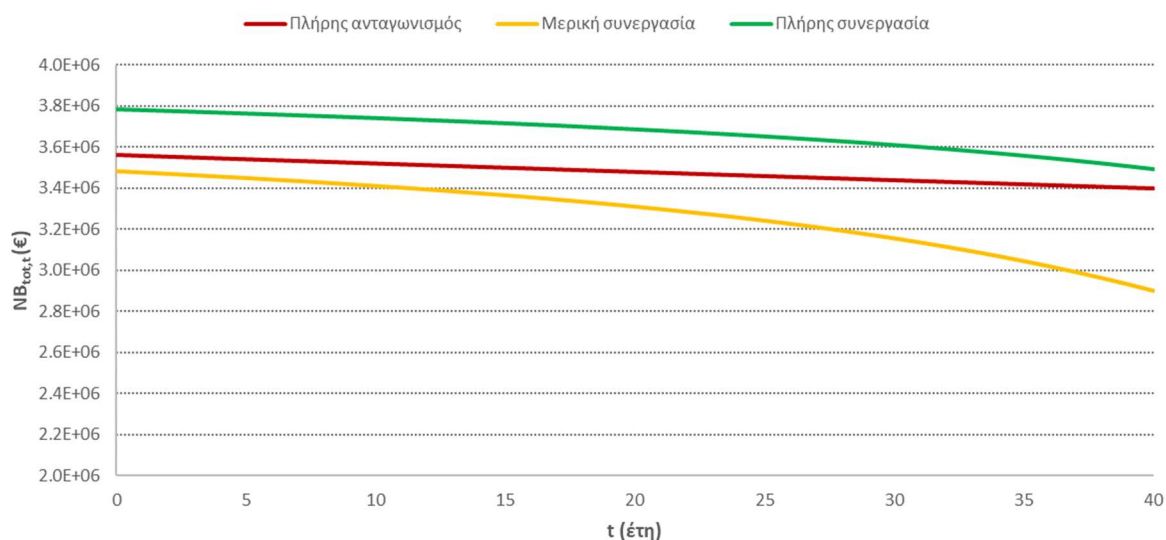
στάθμης υδροφόρου ορίζοντα στο πέρας της περιόδου σχεδιασμού. Η διαφορά στη συνολική κατανάλωση νερού μεταξύ του καθεστώτος της πλήρους συνεργασίας και του καθεστώτος της μερικής συνεργασίας κατά το έτος  $t = 0$  είναι περίπου ίση με  $-0.5 \text{ εκατ. } m^3$  ενώ κατά έτος  $t = 40$  καταλήγει να είναι περίπου ίση με  $7.5 \text{ εκατ. } m^3$ . Είναι αξιοσημείωτο, επίσης, το γεγονός ότι η πλήρης συνεργασία μεταξύ των χρηστών επιτρέπει την κατανάλωση αθροιστικά μεγαλύτερης ποσότητας νερού κατά τα την περίοδο των 40 ετών με την ίδια επίπτωση στον υδροφορέα.



**Γράφημα 5.2:** Χρονική διαδρομή για τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας που διερευνήθηκαν

Σε ό,τι αφορά τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα, όπως προαναφέρθηκε και όπως είναι εμφανές στο γράφημα 5.2 η αυξημένη κατανάλωση νερού υπό το καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού οδηγεί στην ταχεία υποβάθμιση αυτής. Ειδικότερα, στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού αυτή βρίσκεται στα  $36.172 \text{ m}$ , κάτι που σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια των 40 ετών παρατηρείται συνολική πτώση στάθμης ίση με  $23.828 \text{ m}$  ή  $59.6 \text{ m/έτος}$  κατά μέσο όρο. Στην περίπτωση της μερικής συνεργασίας η στάθμη οδηγείται σε μικρότερη όπως είναι αναμενόμενο εξαιτίας του περιορισμού και πιο ήπια πτώση συγκριτικά με την περίπτωση του πλήρους ανταγωνισμού αλλά σε πιο απότομη πτώση

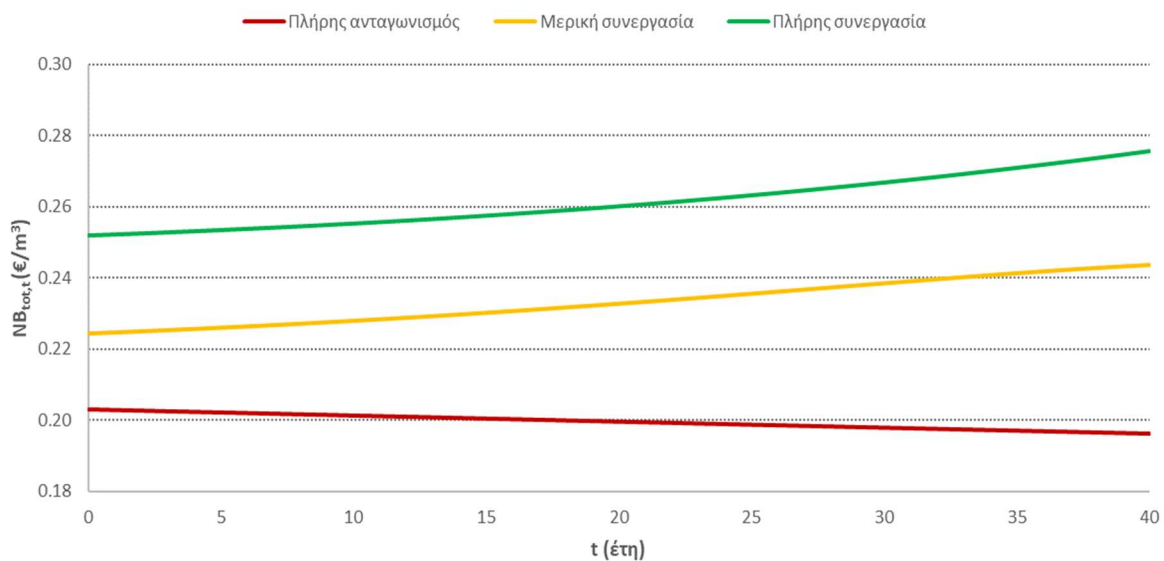
συγκριτικά με την περίπτωση της πλήρους συνεργασίας εξαιτίας της αυξημένης κατανάλωσης κατά τα πρώτα έτη. Από το γράφημα 5.2, δηλαδή, προκύπτει ότι η καμπύλη της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα για την περίπτωση της πλήρους συνεργασίας ακολουθεί όπως είναι λογικό και αναμενόμενο πτωτική πορεία αλλά με ηπιότερο ρυθμό σχετικά με αυτόν της μερικής συνεργασίας. Σε αυτό ακριβώς το γεγονός, δηλαδή στην ήπια καθοδική πορεία της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα εξαιτίας της συνεργασίας μεταξύ των χρηστών, οφείλεται και αυτό που αναφέρθηκε προηγουμένως και σχετίζεται με την αθροιστικά μεγαλύτερη κατανάλωση που προκύπτει υπό το καθεστώς της πλήρους συνεργασίας.



**Γράφημα 5.3:** Χρονική διαδρομή για το συνολικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού κατ' έτος για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας που διερευνήθηκαν

Στο γράφημα 5.3 παρουσιάζεται η πορεία του συνολικού καθαρού οφέλους κατ' έτος που προκύπτει από την κατανάλωση νερού για τις τρεις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν. Ο πλήρης ανταγωνισμός οδηγεί σε διαχρονικά μεγαλύτερα οφέλη για τους χρήστες συγκριτικά με τη μερική συνεργασία και σε διαχρονικά μικρότερα οφέλη για αυτούς από την πλήρη συνεργασία. Το γεγονός αυτό δείχνει ότι η θέσπιση ενός πλαισίου συνεργασίας με βάση τα εμπορεύσιμα δικαιώματα σημαίνει κόστος για τους χρήστες, το οποίο στην προκειμένη περίπτωση και για τη μερική συνεργασία μεταφράζεται σε 79455.84 € σε όρους παρούσας

αξίας για το πρώτο έτος και σε 150445.00 € σε όρους παρούσας αξίας για το τελευταίο έτος της περιόδου σχεδιασμού. Βέβαια, το κόστος αυτό περιορίζεται σημαντικά εάν λάβει κάποιος υπ' όψιν ότι η ταχεία υποβάθμιση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού οδηγεί στην εισροή αλμυρού νερού στον υπόγειο υδροφόρα, κάτι το οποίο αλλοιώνει την ποιότητα των υπογείων υδάτων και έχει οπωσδήποτε επίπτωση στην ποιότητα και στην παραγόμενη ποσότητα των αγροτικών προϊόντων. Ακόμη, το κόστος αυτό φαίνεται ανεπαίσθητο όταν αντί για το συνολικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού κατ' έτος απεικονιστεί σε ένα γράφημα το συνολικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού κατ' έτος μεν αλλά ανά κυβικό μέτρο νερού που καταναλώνεται, όπως φαίνεται στο γράφημα 5.4.



**Γράφημα 5.4:** Χρονική διαδρομή για το συνολικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού κατ' έτος ανά κυβικό μέτρο νερού που καταναλώνεται για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας που διερευνήθηκαν

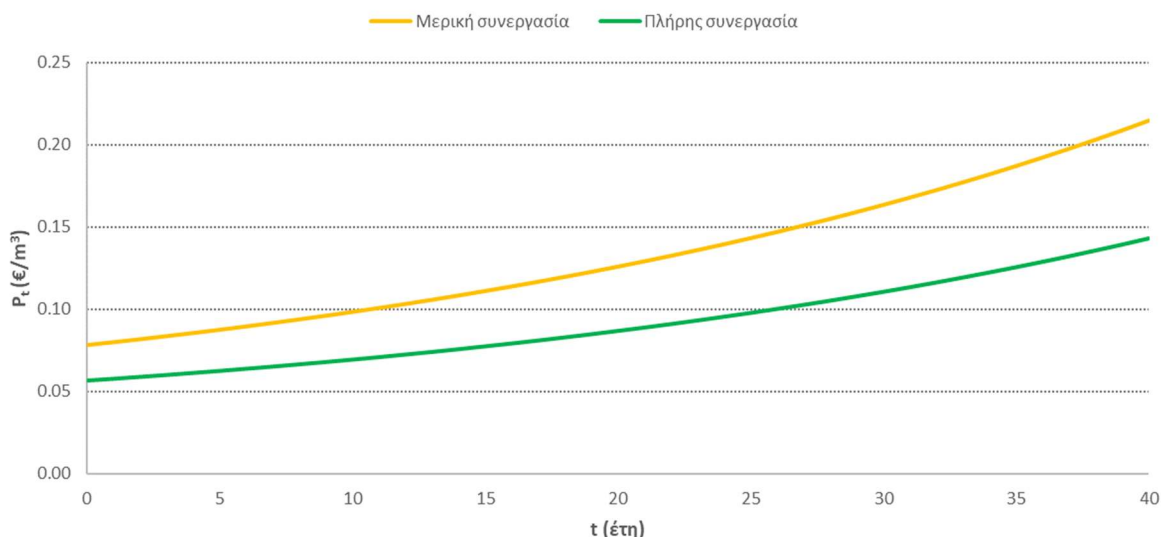
Από το γράφημα 5.4 εξάγεται εύκολα το συμπέρασμα ότι ο πλήρης ανταγωνισμός οδηγεί σε μικρά και διαρκώς μειούμενα οφέλη ανά κυβικό μέτρο νερού που καταναλώνεται, οπότε το όποιο κόστος επιβολής ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού εξανεμίζεται. Επίσης, από το γράφημα αυτό φαίνεται ότι επαληθεύονται οι προσδοκίες για αύξηση της οικονομικής αποδοτικότητας του νερού μέσω ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων



νερού, αφού η επιβολή ενός τέτοιου συστήματος αυξάνει σημαντικά το καθαρό όφελος ανά κυβικό μέτρο νερού, κάτι που σημαίνει ότι αποδίδεται σε αυτόν το συλλογικό και σπάνιο πόρο υψηλή οικονομική αξία.

Η πλήρης συνεργασία μεταξύ των δύο ομάδων αγροτών οδηγεί, όπως φαίνεται από το γράφημα 5.3, σε μεγαλύτερα συνολικά οφέλη σε κάθε έτος από την αρχή έως το πέρας της περιόδου σχεδιασμού και, όπως φαίνεται από το γράφημα 5.4, σε μεγαλύτερα οφέλη ανά κυβικό μέτρο καταναλισκόμενου νερού. Μάλιστα είναι εμφανές ότι η διαφορά μεταξύ του συνολικού καθαρού οφέλους της πλήρους και της μερικής συνεργασίας αυξάνεται και ανέρχεται σε περίπου 600000 € κατά το έτος  $t = 40$  από περίπου 300000 € κατά το έτος  $t = 0$ , δηλαδή σχεδόν διπλασιάζεται.

Στο σημείο αυτό, βέβαια, τίθεται ένα εύλογο ερώτημα σχετικά με το που οφείλεται αυτή η μεγάλη διαφορά στο συνολικό καθαρό όφελος κατ' έτος. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό προκύπτει εάν αναλογιστεί κάποιος ποιο είναι το κόστος άντλησης νερού σε κάθε μία εκ των δύο περιπτώσεων που διερευνήθηκαν, καθώς στην περίπτωση της πλήρους συνεργασίας το κόστος άντλησης νερού επί της ουσίας αυξάνεται κατά μία ποσότητα λόγω της θεώρησης της περιβαλλοντικής καταστροφής που προκαλείται στον υδροφορέα. Το αυξημένο κόστος οδηγεί τους χρήστες στην αναπροσαρμογή της συμπεριφοράς τους σε ό,τι αφορά την άντληση νερού, η οποία γίνεται πιο συντηρητική με αποτέλεσμα η δραστηριότητά τους να προκαλεί μικρότερη υποβάθμιση στο υδραυλικό ύψος του υδροφορέα κάτι που τελικά οδηγεί σε μικρότερο κόστος άντλησης για αυτούς. Κατά συνέπεια η μεγάλη διαφορά που παρατηρείται στο συνολικό καθαρό όφελος κατ' έτος οφείλεται στο μειωμένο κόστος άντλησης νερού, το οποίο προκύπτει υπό το καθεστώς της πλήρους συνεργασίας. Αυτή η διαφορά στο καθαρό όφελος οδηγεί σε μεγαλύτερο αθροιστικό καθαρό όφελος για την περίπτωση της πλήρους συνεργασίας κατά 8889880.92€ σε όρους παρούσας αξίας ή εναλλακτικά κατά 0.015€/m<sup>3</sup>.



**Γράφημα 5.5:** Χρονική διαδρομή για την τιμή των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας που διερευνήθηκαν και περιλαμβάνουν σύστημα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού

Τέλος, στο γράφημα 5.5 παρουσιάζεται η χρονική διαδρομή για την τιμή των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού για τις δύο διαφορετικές περιπτώσεις συνεργασίας που διερευνήθηκαν και περιλαμβάνουν σύστημα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού. Η τιμή των δικαιωμάτων φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις ακολουθεί εκθετικά αυξητική πορεία με το χρόνο, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι με το πέρασμα του χρόνου αυξάνεται η σπανιότητα του νερού εξαιτίας της συνεχόμενης άντλησης και της συνεπαγόμενης πτώσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα. Η τιμή των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού στην περίπτωση της πλήρους συνεργασίας ανέρχεται σε περίπου  $0.06 \text{ €/m}^3$  κατά το πρώτο έτος της περιόδου σχεδιασμού και σε περίπου  $0.14 \text{ €/m}^3$  κατά το τελευταίο έτος της περιόδου σχεδιασμού, δηλαδή παρατηρείται αύξηση που ξεπερνάει το 100%. Στην περίπτωση της μερικής συνεργασίας οι αντίστοιχες τιμές είναι  $0.08 \text{ €/m}^3$  και  $0.22 \text{ €/m}^3$ , δηλαδή παρατηρείται αύξηση της τιμής κατά περίπου 200%. Επομένως, κάτω από ένα καθεστώς μερικής συνεργασίας το νερό καθίσταται ακριβότερο σε σχέση με ένα καθεστώς πλήρους συνεργασίας, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι υπό το καθεστώς μερικής συνεργασίας αυτό είναι πιο σπάνιο. Αυτή η διαφορά στην τιμή των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων μεταξύ των δύο καθεστώτων αποτελεί και μία από τις αιτίες που προκαλούν τα αυξημένα οφέλη στην

περίπτωση της πλήρους συνεργασίας, αφού μεταφράζεται σε μειωμένη τιμή προμήθειας για το νερό που αποτελεί με τη σειρά του παράγοντα κόστους για τις δύο ομάδες αγροτών.

#### 5.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν και συζητήθηκαν στις δύο προηγούμενες ενότητες προέκυψαν βάσει των υδρολογικών και οικονομικών δεδομένων της περιοχής μελέτης. Επομένως, τίθεται εύλογα το ερώτημα σχετικά με το ποια θα ήταν η επίπτωση στα αποτελέσματα από μία αλλαγή στην τιμή κάποιας εκ των παραμέτρων των πινάκων 5.1 και 5.2. Για την απάντηση αυτού του ερωτήματος πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων ως προς συγκεκριμένες παραμέτρους που κρίνεται εκ των προτέρων ότι έχουν σημαντική επίδραση σε αυτά. Η ανάλυση ευαισθησίας θα δείξει ποια είναι η αλλαγή σε ένα αντιπροσωπευτικό μέγεθος, το οποίο εν προκειμένω είναι το αθροιστικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού, όταν μεταβάλλεται η τιμή μιας παραμέτρου κατά μία συγκεκριμένη ποσότητα.

Η ανάλυση ευαισθησίας της τιμής του αθροιστικού καθαρού οφέλους από την κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού ως προς 12 οικονομικές και υδρολογικές παραμέτρους του προβλήματος που εξετάστηκε θεωρώντας ως σενάριο βάσης για τη διεξαγωγή συγκρίσεων αυτό που αντιστοιχεί στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων βάσει των δεδομένων των πινάκων 5.1 και 5.2 παρουσιάζεται στον πίνακα 5.3. Η διάταξη του πίνακα είναι η εξής: στην πρώτη στήλη αναγράφεται η παράμετρος, στη δεύτερη στήλη τρεις διαφορετικές τιμές για αυτή μία εκ των οποίων αντιστοιχεί στο σενάριο βάσης, στην τρίτη, τέταρτη και πέμπτη στήλη το αθροιστικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού έτσι όπως αυτό προκύπτει κάτω από ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού, μερικής συνεργασίας και πλήρους συνεργασίας αντίστοιχα και στην έκτη,

**Πίνακας 5.3:** Ανάλυση ευαισθησίας του αθροιστικού καθαρού οφέλους από την κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού ως προς τις παραμέτρους της περιοχής μελέτης<sup>5.5</sup>

Παράμετρος	Τιμή	Αθροιστικό καθαρό όφελος κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού (εκατ. €)			Μεταβολή στο αθροιστικό καθαρό όφελος κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού σε σχέση με το σενάριο βάσης (%)		
		Πληρ. ανταγ.	Μερ. συν.	Πληρ. συν.	Πληρ. ανταγ.	Μερ. συν.	Πληρ. συν.
$p_1$ (€/kg)	0.6	14.35	8.85	26.76	-89.94	-93.40	-82.21
	<b>1.2</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
$p_2$ (€/kg)	1.8	271.81	259.59	276.91	90.47	93.53	84.04
	0.21	22.66	19.37	36.84	-84.12	-85.56	-75.52
$p_2$ (€/kg)	<b>0.42</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	0.63	264.06	249.01	266.49	85.03	85.64	77.11
$\alpha_1$	0.389	31.03	3.27	45.26	-78.26	-97.57	-69.92
	<b>0.778</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
$b_1$	1.167	336.58	261.13	305.04	135.85	94.68	102.73
	0.000029	280.42	176.67	220.09	96.50	31.71	46.27
$b_1$	<b>0.000058</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	0.000087	95.86	83.09	111.45	-32.83	-38.06	-25.93
$\alpha_2$	0.751	58.00	42.42	69.74	-59.35	-68.38	-53.65
	<b>1.501</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
$b_2$	2.252	292.72	220.37	249.97	105.12	64.29	66.13
	0.000047	242.57	156.28	182.58	69.98	16.51	21.35
$b_2$	<b>0.000094</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	0.000141	111.29	103.36	123.92	-22.02	-22.95	-17.64
$C_{agr,1}$ (€/ha)	1350	214.66	206.09	222.42	50.42	53.64	47.82
	<b>2700</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
$C_{agr,2}$ (€/ha)	4050	70.75	62.18	78.51	-50.42	-53.64	-47.82
	1575	226.65	218.08	234.41	58.83	62.58	55.79
$C_{agr,2}$ (€/ha)	<b>3150</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	4725	58.76	50.19	66.52	-58.83	-62.58	-55.79
$c_0$ (€/m <sup>3</sup> )	0.0002	166.16	151.35	167.86	16.43	12.83	11.56
	<b>0.0004</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
$H_T$ (m)	0.0006	120.79	116.79	132.94	-15.36	-12.93	-11.65
	45	142.71	139.70	153.67	0.00	4.15	2.13
$\beta$ (€/m <sup>3</sup> )	<b>50</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	55	142.71	125.80	144.48	0.00	-6.21	-3.97
$\delta$	0.025	142.71	134.14	142.33	0.00	0.00	-5.41
	<b>0.050</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
$\delta$	0.075	142.71	134.14	158.54	0.00	0.00	5.37
	0.02	142.71	134.79	150.77	0.00	0.49	0.20
$\delta$	<b>0.03</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>	<b>0.00</b>
	0.04	142.71	133.24	150.05	0.00	-0.66	-0.28

<sup>5.5</sup> Σημείωση: Οι τιμές με έντονη γραφή αντιστοιχούν στο σενάριο βάσης.

έβδομη και όγδοη στήλη η μεταβολή στο αθροιστικό καθαρό όφελος σε σχέση με το σενάριο βάσης. Στο σημείο αυτό απαιτείται προσοχή σχετικά με τα ποσοστά που αναγράφονται στην έκτη, έβδομη και όγδοη στήλη. Η ερμηνεία κάθε ποσοστού εξ' αυτών είναι η ακόλουθη: αυτή είναι η ποσοστιαία μεταβολή στο αθροιστικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού σε σχέση με το σενάριο βάσης, όταν η αντίστοιχη παράμετρος και μόνο αυτή μεταβληθεί και λάβει την τιμή που αναγράφεται στην κάθε γραμμή, οπότε θεωρείται ότι οι άλλες παράμετροι παραμένουν αμετάβλητες.

Με βάση τα ανωτέρω προκύπτει ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα ως προς τις οικονομικές παραμέτρους  $p_1, p_2, a_1, b_1, a_2, b_2, C_{agr,1}$  και  $C_{agr,2}$ , αφού όπως φαίνεται στον πίνακα 5.3 η μείωση ή η αντίστοιχη αύξηση της τιμής αυτών οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές στο αθροιστικό καθαρό όφελος. Αυτές οι σημαντικές μεταβολές οφείλονται στο γεγονός ότι η μεταβολή των τιμών αυτών των παραμέτρων επηρεάζει άμεσα το οικονομικό αποτέλεσμα κάθε ομάδας αγροτών, η οποία κάτω από τις συνθήκες που επιβάλλονται μέσω των μεταβολών για τις ανάγκες της διεξαγωγής ανάλυσης ευαισθησίας οδηγείται άλλοτε σε ζημίες και άλλοτε σε υπερκέρδη. Επιπρόσθετα, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα είναι μεν ευαίσθητα ως προς το κόστος άντλησης  $c_0$  αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό όπως ως προς τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν πριν ενώ επίσης προκύπτει εξαιρετικά χαμηλή ευαισθησία ως προς τις παραμέτρους  $H_T, \beta$  και  $\delta$ .

Η ανάλυση ευαισθησίας επεκτείνεται και στη μεταβολή που παρατηρείται στο αθροιστικό καθαρό όφελος από την κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού κατά τη μετάβαση από το ένα καθεστώς συνεργασίας στο άλλο και τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 5.4. Η διάταξη του πίνακα είναι η εξής: οι πέντε πρώτες στήλες είναι ίδιες με αυτές του πίνακα 5.3, η έκτη και η έβδομη στήλη δείχνουν την ποσοστιαία μεταβολή που παρατηρείται στο αθροιστικό καθαρό όφελος κατά τη μετάβαση από ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού σε ένα μερικής συνεργασίας και από ένα καθεστώς μερικής

**Πίνακας 5.4:** Ανάλυση ευαισθησίας για τη μεταβολή του αθροιστικού καθαρού οφέλους από την κατανάλωση νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού και κατά τη μετάβαση από το ένα καθεστώς συνεργασίας στο άλλο ως προς τις παραμέτρους της περιοχής μελέτης<sup>5,6</sup>

Παράμετρος	Τιμή	Αθροιστικό καθαρό όφελος κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού (εκατ. €)			Μεταβολή στο αθροιστικό καθαρό όφελος κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού (%)	
		Πληρ. ανταγ.	Μερ. συν.	Πληρ. συν.	Μερ. συν. - Πληρ. ανταγ.	Πληρ. συν. - Μερ. συν.
$p_1$ (€/kg)	0.6	14.35	8.85	26.76	-38.34	2.02
	<b>1.2</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	1.8	271.81	259.59	276.91	-4.49	0.07
$p_2$ (€/kg)	0.21	22.66	19.37	36.84	-14.51	0.90
	<b>0.42</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	0.63	264.06	249.01	266.49	-5.70	0.07
$\alpha_1$	0.389	31.03	3.27	45.26	-89.47	12.86
	<b>0.778</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	1.167	336.58	261.13	305.04	-22.42	0.17
$b_1$	0.000029	280.42	176.67	220.09	-37.00	0.25
	<b>0.000058</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	0.000087	95.86	83.09	111.45	-13.33	0.34
$\alpha_2$	0.751	58.00	42.42	69.74	-26.87	0.64
	<b>1.501</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	2.252	292.72	220.37	249.97	-24.72	0.13
$b_2$	0.000047	242.57	156.28	182.58	-35.57	0.17
	<b>0.000094</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	0.000141	111.29	103.36	123.92	-7.13	0.20
$C_{agr,1}$ (€/ha)	1350	214.66	206.09	222.42	-3.99	0.08
	<b>2700</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	4050	70.75	62.18	78.51	-12.11	0.26
$C_{agr,2}$ (€/ha)	1575	226.65	218.08	234.41	-3.78	0.07
	<b>3150</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	4725	58.76	50.19	66.52	-14.59	0.33
$c_0$ (€/m <sup>3</sup> )	0.0002	166.16	151.35	167.86	-8.92	0.11
	<b>0.0004</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	0.0006	120.79	116.79	132.94	-3.31	0.14
$H_T$ (m)	45	142.71	139.70	153.67	-2.11	0.10
	<b>50</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	55	142.71	125.80	144.48	-11.85	0.15
$\beta$ (€/m <sup>3</sup> )	0.025	142.71	134.14	142.33	-6.01	0.06
	<b>0.050</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	0.075	142.71	134.14	158.54	-6.01	0.18
$\delta$	0.02	142.71	134.79	150.77	-5.55	0.12
	<b>0.03</b>	<b>142.71</b>	<b>134.14</b>	<b>150.46</b>	<b>-6.01</b>	<b>0.12</b>
	0.04	142.71	133.24	150.05	-6.63	0.13

<sup>5,6</sup> Σημείωση: Οι τιμές με έντονη γραφή αντιστοιχούν στο σενάριο βάσης.

συνεργασίας σε ένα πλήρους συνεργασίας αντίστοιχα, όταν η αντίστοιχη παράμετρος και μόνο αυτή μεταβληθεί και λάβει την τιμή που αναγράφεται στην κάθε γραμμή, οπότε θεωρείται ότι οι άλλες παράμετροι παραμένουν αμετάβλητες.

Από τον πίνακα 5.4 είναι εμφανές ότι η μεταβολή των τιμών των παραμέτρων  $p_1, p_2, a_1, b_1, a_2, b_2, C_{agr,1}$  και  $C_{agr,2}$  έχει σημαντική επίδραση στη μεταβολή του αθροιστικού καθαρό οφέλους κατά τη μετάβαση από ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού σε ένα μερικής συνεργασίας ενώ η μεταβολή των τιμών των παραμέτρων  $H_T, \beta$  και  $\delta$  όχι ιδιαίτερα σημαντική επίδραση κατά την ίδια μετάβαση. Η ανάλυση ευαισθησίας δείχνει, ακόμη, ότι η μεταβολή των τιμών των παραμέτρων που αναφέρονται στον πίνακα 5.4 δεν οδηγεί σε σημαντικές μεταβολές στο αθροιστικό καθαρό όφελος κατά μετάβαση από ένα καθεστώς μερικής συνεργασίας σε ένα πλήρους συνεργασίας. Οι σημαντικές μεταβολές που παρατηρούνται στο αθροιστικό καθαρό όφελος κατά τη μεταβολή των τιμών των παραμέτρων του πίνακα 5.4 και κατά τη μετάβαση από τον πλήρη ανταγωνισμό στη μερική συνεργασία οφείλονται στο γεγονός ότι κάτω από ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού προσφέρεται ένα περιβάλλον με δυνατότητες υψηλής κερδοφορίας για τους χρήστες, η οποία μεταβάλλεται ανάλογα με τις τιμές συγκεκριμένων οικονομικών παραμέτρων (κυρίως των  $p_1, p_2, a_1, b_1, a_2, b_2, C_{agr,1}, C_{agr,2}$  και  $c_0$ ) και η οποία φαίνεται ότι περιορίζεται σημαντικά όταν επιβάλλεται ένα σύστημα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού και κατ' επέκταση η μερική συνεργασία μεταξύ αυτών.

*Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.*



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Σύνοψη και συμπεράσματα

**Σ**το κεφάλαιο αυτό, το οποίο είναι και το τελευταίο της εργασίας πραγματοποιείται μία σύνοψη αυτής και παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν με βάση τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν και συζητήθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, προτείνονται ορισμένες επεκτάσεις της μεθοδολογικής προσέγγισης που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μελλοντική επιστημονική έρευνα σχετικά με τη διαχείριση υπογείων υδάτων και την εφαρμογή συστημάτων εμπορεύσιμων δικαιωμάτων για το σκοπό αυτόν.

#### 6.1 Σύνοψη

Η εργασία αυτή είχε ως θέμα τη βέλτιστη διαχείριση υπογείων υδάτων με χρήση των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού. Βασικός σκοπός της εργασίας ήταν η ανάδειξη του ρόλου που μπορούν να διαδραματίσουν οικονομικά εργαλεία, εν προκειμένω τα συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού στην αποτελεσματική και ορθολογική διαχείριση του νερού και ιδιαίτερα των υπογείων υδάτων, τα οποία αποτελούν τη μεγαλύτερη πηγή γλυκού νερού για την ανθρωπότητα.

Για την εξυπηρέτηση του σκοπού της εργασίας θεωρήθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί σε πρώτη φάση όλο το θεωρητικό υπόβαθρο, το οποίο σχετίζεται με το θέμα της εργασίας. Έτσι,

παρουσιάστηκε όλο εκείνο το θεωρητικό υπόβαθρό που σχετίζεται με τα υπόγεια ύδατα και τους υπόγειους υδροφορείς κάνοντας αναφορά στους ακριβείς ορισμούς αυτών, στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους και στις κατηγορίες τους, και τα οικονομικά εργαλεία διαχείρισης υδατικών πόρων. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στο θεωρητικό υπόβαθρο των συστημάτων εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού οπότε και αναπτύχθηκαν ζητήματα όπως ο σχετικός ορισμός και το επιστημονικό υπόβαθρο, οι κύριες κατηγορίες αυτών, τα χαρακτηριστικά και ο τρόπος λειτουργίας τους, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά τους και η εφαρμογή τους σε συγκεκριμένες χώρες.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα σχετικά τόσο με τις μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί για τη βέλτιστη διαχείριση υπογείων υδάτων όσο και με τη χρήση των συστημάτων εμπορεύσιμων δικαιωμάτων για το σκοπό αυτόν. Η βιβλιογραφική έρευνα έδειξε ότι υφίσταται ένα ερευνητικό κενό σχετικά με την ενσωμάτωση των περιβαλλοντικών εξωτερικοτήτων σε ένα δυναμικό ως προς το χρόνο μοντέλο βελτιστοποίησης του οφέλους που προκύπτει από την κατανάλωση νερού, το οποίο συγχρόνως αξιοποιεί τα εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού.

Με βάση τα παραπάνω διαμορφώθηκε ένα πρόβλημα που σχετίζεται με την άντληση νερού από δύο ομάδες αγροτών από έναν υπόγειο υδροφόρο και τα οφέλη που προκύπτουν από τη διαδικασία αυτή. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές εκδοχές αυτού του προβλήματος ως προς τη συνεργασία μεταξύ των χρηστών, η επίλυση των οποίων οδήγησε στην εξαγωγή των χρονικών διαδρομών για τη συνολική κατανάλωση νερού κατ' έτος, τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφόρου, την τιμή των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού, όπου αυτά χρησιμοποιήθηκαν και μία σειρά άλλων μεγεθών. Η πρώτη περίπτωση αντιστοιχούσε σε ένα καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού μεταξύ των χρηστών, δηλαδή μηδενικής συνεργασίας μεταξύ αυτών. Η δεύτερη περίπτωση αντιστοιχούσε σε ένα καθεστώς μερικής συνεργασίας μεταξύ των χρηστών, οπότε θεωρήθηκε ότι αυτοί βασιζόμενοι σε μία λογική κοινωνικού

προγραμματισμού συνεργάζονται μεταξύ τους στο πλαίσιο εφαρμογής ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού και επιλύθηκε κατά συνέπεια ένα πρόβλημα αρίστου ελέγχου. Η τρίτη περίπτωση αντιστοιχούσε σε ένα καθεστώς πλήρους συνεργασίας μεταξύ των χρηστών, οπότε θεωρήθηκε ότι αυτοί βασιζόμενοι και πάλι σε μία λογική κοινωνικού προγραμματισμού συνεργάζονται στο πλαίσιο εφαρμογής ενός συστήματος εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού λαμβάνοντας συγχρόνως υπ' όψιν την περιβαλλοντική καταστροφή που προκαλείται στο τοπικό οικοσύστημα εξαιτίας της εξάντλησης των υδάτινων αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα.

Έπειτα, παρουσιάστηκαν και συζητήθηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εμπειρική εφαρμογή των όσων αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο σε μία περιοχή μελέτης αξιοποιώντας τα υδρολογικά και οικονομικά δεδομένα αυτής. Επίσης, διενεργήθηκε ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν ως προς επιλεγμένες οικονομικές και υδρολογικές παραμέτρους.

Τέλος, παρουσιάστηκαν ή για την ακρίβεια παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την εργασία μαζί με μία σύνοψη αυτής και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

## **6.2 Συμπεράσματα**

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αυτή σχετίζονται κατά κύριο λόγο με τη σύγκριση των τριών διαφορετικών καθεστώτων συνεργασίας μεταξύ των χρηστών. Η σύγκριση μεταξύ των τριών καθεστώτων συνεργασίας πραγματοποιείται με βάση τις χρονικές διαδρομές της συνολικής κατανάλωσης νερού κατ' έτος, της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα, του συνολικού καθαρού οφέλους ανά κυβικό μέτρο νερού και επιπλέον της τιμής των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού όπου αυτά αξιοποιήθηκαν.

Το καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού προέκυψε ότι οδηγεί σε αυξημένη κατανάλωση νερού κατ' έτος και σε ταχεία πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα σε σχέση με τα δύο καθεστάτα συνεργασίας. Προέκυψε, ακόμη, ότι οδηγεί σε χαμηλότερο και με πτωτική τάση συνολικό καθαρό όφελος ανά κυβικό μέτρο νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού συγκριτικά με τα δύο καθεστάτα συνεργασίας. Κατά συνέπεια, μπορεί να χαρακτηριστεί ως το χειρότερο καθεστώς για τον υπόγειο υδροφορέα, το νερό ως φυσικό πόρο και τους χρήστες.

Το καθεστώς μερικής συνεργασίας προέκυψε ότι οδηγεί σε σαφώς χαμηλότερη κατανάλωση νερού κατ' έτος και σε αθροιστικά μικρότερη (αφού επιβλήθηκε σχετικός περιορισμός) και πιο ήπια πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα σε σχέση με το καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού. Προέκυψε, επίσης, ότι οδηγεί σε υψηλότερο και με ανοδική τάση συνολικό καθαρό όφελος ανά κυβικό μέτρο νερού κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού συγκριτικά με το καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού, κάτι το οποίο δείχνει ότι η εφαρμογή οικονομικών εργαλείων όπως τα συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων αυξάνουν την αποδοτικότητα του νερού. Εάν, επιπλέον, συγκριθεί με το καθεστώς πλήρους συνεργασίας φαίνεται ότι οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση νερού από αυτό κατά τα πρώτα έτη και σε μικρότερη κατανάλωση νερού κατά τα τελευταία έτη της περιόδου σχεδιασμού, σε πιο απότομη και ίση αθροιστικά (αφού επιβλήθηκε και στις δύο περιπτώσεις ο ίδιος σχετικός περιορισμός) πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα, σε διαχρονικά μικρότερο συνολικό καθαρό όφελος ανά κυβικό μέτρο νερού και σε διαχρονικά μεγαλύτερη τιμή για τα εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού. Κατά συνέπεια, μπορεί να χαρακτηριστεί ως καλύτερο καθεστώς από αυτό του πλήρους ανταγωνισμού αλλά λιγότερο καλό από αυτό της πλήρους συνεργασίας για τον υπόγειο υδροφορέα, το νερό ως φυσικό πόρο και τους χρήστες.

Το καθεστώς πλήρους συνεργασίας είναι αυτό, το οποίο οδηγεί στα καλύτερα αποτελέσματα για τον υπόγειο υδροφόρο, το νερό ως φυσικό πόρο και τους χρήστες και μπορεί ως εκ τούτου να χαρακτηριστεί ως το καλύτερο καθεστώς. Η σύγκρισή τόσο με το καθεστώς πλήρους ανταγωνισμού όσο και με το καθεστώς μερικής συνεργασίας καταλήγει σε σαφή υπεροχή του. Οδηγεί στην ίδια ή σε μικρότερη αθροιστικά πτώση στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφόρου, και σε μεγαλύτερο διαχρονικά όφελος ανά κυβικό μέτρο νερού συγκριτικά με τα άλλα δύο καθεστώτα και σε μικρότερη τιμή για τα εμπορεύσιμα δικαιώματα νερού σε σχέση με το καθεστώς μερικής συνεργασίας.

Επομένως, εάν κάποιος θελήσει να συνοψίσει τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αυτή μπορεί να περιοριστεί σε δύο σημεία, τα οποία είναι πρώτον ότι η συνεργασία μεταξύ των χρηστών οδηγεί σε αυξημένα οφέλη τόσο για τους ίδιους όσο και για τους υδροφορείς και το νερό ως φυσικό πόρο και δεύτερον ότι η χρήση – εφαρμογή οικονομικών εργαλείων διαχείρισης υδατικών πόρων, όπως τα συστήματα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού αυξάνουν την οικονομική αποδοτικότητα του πόρου.

Στο σημείο αυτό, αφού ολοκληρώθηκε και η εξαγωγή των γενικών συμπερασμάτων της εργασίας, αξίζει κάποιος να επιστρέψει στο σκοπό και στους αντικειμενικούς στόχους αυτής που είχαν διατυπωθεί στο πρώτο κεφάλαιο και να αναρωτηθεί εάν αυτός εκπληρώθηκε και αυτοί επιτεύχθηκαν. Ανατρέχοντας, λοιπόν, στο σκοπό και στους αντικειμενικούς στόχους της εργασίας και συνδυάζοντας τα όσα εκεί αναφέρονται με αυτά που γράφονται τόσο στη σύνοψη αυτής που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα όσο και στα συμπεράσματα αυτής που παρουσιάστηκαν στην παρούσα ενότητα, προκύπτει κατά τη γνώμη του συγγραφέα ότι ο σκοπός εκπληρώθηκε και οι στόχοι επιτεύχθηκαν

### 6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ολοκληρώνοντας αυτήν την εργασία θεωρείται σκόπιμο να προταθούν ορισμένες επεκτάσεις της μεθοδολογικής προσέγγισης που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής, οι οποίες μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μελλοντική επιστημονική έρευνα σχετικά με τη διαχείριση υπογείων υδάτων και την εφαρμογή συστημάτων εμπορεύσιμων δικαιωμάτων για το σκοπό αυτόν. Μία πρόταση περιλαμβάνει την επέκταση του προβλήματος που εξετάστηκε, έτσι ώστε αυτό να περιέχει και άλλες χρήσεις πέραν της αγροτικής, όπως η οικιακή και η βιομηχανική. Μία τέτοια προσέγγιση παρουσιάζει ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, αφού υπάρχουν χώρες στις οποίες η κατανάλωση νερού για οικιακή και βιομηχανική χρήση υπερβαίνει κατά πολύ την κατανάλωση για αγροτική χρήση. Μία δεύτερη και αρκετά ενδιαφέρουσα πρόταση αντιστοιχεί στην επέκταση του προβλήματος που εξετάστηκε έτσι ώστε να περιλαμβάνει την επίδραση που έχει στη συνολική κατανάλωση νερού, στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα του υπόγειου υδροφορέα και στο όφελος από τη χρήση νερού ένα σύστημα εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού στο οποίο εμφανίζονται συμπεριφορές μονοπωλίου ή μονοψωνίου και οι οποίες επιδρούν καθοριστικά στη διαμόρφωση της τιμής των εμπορεύσιμων δικαιωμάτων νερού.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Allen, R. and Gisser, M. (1984) “Competition versus Optimal Control in Groundwater Pumping when Demand is Nonlinear”, *Water Resources Research*, 20, pp.752-756.
- Ahlfeld, D.P. and Laverty, M.M. (2015). “Field scale minimization of energy use for groundwater pumping”. *Journal of Hydrology*, 525, pp. 489-495.
- Archibald, T.W. and Marshall, S.E. (2018). “Review of mathematical Programming Applications in Water Resources Management Under Uncertainty”, *Environmental Modelling and Assessment*, 23, pp. 753-777.
- Armitage, R.M., Nieuwoudt, W.L. and Backeberg, G.R. (1999). “Establishing tradable water rights: Case studies of two irrigation districts in South Africa”. *Water*, 25 (3), pp. 301–310.
- Augeraud-Veron, E. and Pereau, J.C. (2022). “Sustainable Groundwater Management in a Two-Cell Aquifer Model”, *Environmental Modeling and Assessment*, 27, pp. 693-713.
- Bauer, C.J. (2005). “In the image of the market: the Chilean model of water resources management”. *International Journal of Water*, 3 (2), pp. 146–165.
- Bear, J. and Cheng, A.H.D. (2010). *Modelling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Springer.
- Bekchanov, M., Bhaduri, A. and Ringler, C. (2013). “How market- based water allocation can improve water use efficiency in the Aral Sea basin?”. ZEF Discussion Papers on Development Policy, 177. University of Bonn, Center for Development Research (ZEF), Bonn.
- Bertone Oehninger, E. and Lin Lawell, C.Y.C. (2021). “Property rights and groundwater management in the High Plains Aquifer”, *Resource and Energy Economics*, 63, pp. 1-31.
- Biancardi, M., Iannucci, G. and Villani, G. (2022). “Groundwater Exploitation and Illegal Behaviors in a Differential Game”, *Dynamic Games and Applications*, 12, pp. 996-1009.
- Bierkens, M.F.P., Reinhard, S., de Bruijin, J.A., Veninga, W. and Wada, Y. (2019). “The Shadow Price of Irrigation Water in Major Groundwater-Depleting Countries”, *Water Resources Research*, 55, pp. 4266-4287.
- Bjornlund, H. and McKay, J. (2002). “Aspects of water markets for developing countries: Experiences from Australia, Chile, and the US”. *Environment and Development Economics*, 7, pp. 769–795.
- Bonnis, G., Maestu, J. and Gomez, C.M. (2011). “Economic instruments as tools for water management in the transition towards a green economy”. *Proceedings of the UN-Water International Conference*, October 3-5, Zaragoza, Spain, pp. 1-7.
- Borghesi, S. (2014). “Water tradable permits: a review of theoretical and case studies”. *Journal of Environmental Planning and Management*, 57 (9), pp. 1305-1332.
- Brill, T.C. and Burness, H.S. (1994). “Planning versus Competitive Rates of Ground- water Pumping”, *Water Resources Research*, 30 (6), pp.1873-1880.

- Bruno, E.M. and Sexton, R.J. (2020). “The Gains from Agricultural Groundwater Trade and the Potential for Market Power: Theory and Application”, *American Journal of Agricultural Economics*, 102 (3), pp. 884–910.
- Burt, O.R. (1964). “Optimal Resource Use Over Time with an Application to Ground Water”, *Management Science*, 11 (1), pp. 80-93.
- Burt, O.R. (1966). “Economic Control of Groundwater Reserves”, *Journal of Farm Economics*, 48 (3), pp. 632-647.
- Chekireb, A., Goncalves, J., Stahn, H. and Tomini, A. (2021). “Private exploitation of the North-Western Sahara Aquifer System”, Working Papers, Aix-Marseille School of Economics.
- Colby, B.G. (1988). “Economic Impacts of Water Law-State Law and Water Market Development in the Southwest”. *Natural Resources Journal*, 28 (4), pp. 721-749.
- Debaere, P. (2014). “The Global Economics of Water: Is water a Source of Comparative Advantage?” *American Economic Journal: Applied Economics*, 6, pp. 32-48.
- Delorit, J.D. and Block, P.J. (2018). “Promoting Competitive Water Resource Use Efficiency at the Water-Market Scale: An Intercooperative Demand Equilibrium-Based Approach to Water Trading”. *Water Resources Research*, 54, pp. 5394–5421.
- Dinar, A., Rosegrant, M. W. and Meinzen-Dick, R. (1997). “Water allocation mechanisms- Principles and Examples”. Policy Research Working Paper. The World Bank, Washington DC, USA.
- Dingman, S.L. (2015). *Physical Hydrology*. Long Grove, Iowa: Waveland Press.
- Easter, K.W., Rosegrant, M.W. and Dinar, A. (1999). “Formal and informal markets for water: Institutions, performance, and constraints”. *The World Bank Research Observer*, 14 (1), pp. 99-116.
- El-Ghonemy, A.M.K. (2012). “Future sustainable water desalination technologies for the Saudi Arabia: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp. 6566-6597.
- Esteban, E. and Albiac, J. (2011). “Groundwater and ecosystems damages: Questioning the Gisser-Sánchez effect”, *Ecological Economics*, 70 (11), pp. 2062–2069.
- Esteban, E. and Albiac, J. (2012). “The problem of sustainable groundwater management: the case of La Mancha aquifers, Spain”, *Hydrogeology Journal*, 20 (5), pp. 851–863.
- Esteban, E. and Dinar, A. (2016). “The role of groundwater-dependent ecosystems in groundwater management”, *Natural Resource Modeling*, 29 (1), pp. 98–129.
- European Commission (2000). Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for community action in the field of water policy. Official Journal of the European Communities, Vol. 43.
- Eurostat (2022). Water statistics. Διαθέσιμο στο: [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV\\_WAT\\_ABS/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=e8728b33-b674-42f6-bbd4-973164e9d9f8](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ENV_WAT_ABS/bookmark/table?lang=en&bookmarkId=e8728b33-b674-42f6-bbd4-973164e9d9f8). Προσπελάστηκε στις 18/09/2022.
- Farolfi, S. (2011). “An Introduction to Water Economics and Governance in Southern Africa”. Notes for the course “Water Economics and Governance”. University Eduardo Mondlane.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Gisser, M. and Mercado, A. (1973). “Economic Aspects of Ground Water Resources and Replacement Flows in Semiarid Agricultural Areas”, *American Journal of Agricultural Economics*, 55 (3), pp. 461-466.
- Gisser, M. and Sanchez, D. (1980). “Competition versus optimal control in groundwater pumping”, *Water Resources Research*, 16 (4), pp. 638–642.
- Global Water Partnership (2000). “Integrated Water Resources Management”. Technical Advisory Committee Background Papers, Paper No. 4. Stockholm.



- Grigg, N.S. (1996). *Water Resources Management: Principles, Regulations and Cases*. McGraw Hill Professional.
- Grigg, N.S. (2016). *Integrated Water Resources Management: An Interdisciplinary Approach*. London: Macmillan Publishers Ltd.
- Guilfoos, T., Pape, A.D., Khanna, N. and Salvage, K. (2013). “Groundwater management: The effect of water flows on welfare gains”, *Ecological Economics*, 95, pp. 31–40.
- Hadjigeorgalis, E. (2009). “A place for water markets: Performance and challenges”. *Review of Agricultural Economics*, 31 (1), pp. 50–67.
- Hearne, R.R. and Easter, K.W. (1997). “The economic and financial gains from water markets in Chile”. *Agricultural Economics*, 15, pp. 187-199.
- Hellegers, P.J.G.J. (2001). “Groundwater management for Agriculture and Nature: an Economic Analysis”. PhD thesis. Wageningen University, Netherlands.
- Hodgson, S. (2006). “Modern Water Rights: Theory and Practice 116. Legislative Study, 92.” Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Holden, P. and Thobani, M. (1996). “Tradable water rights: a property rights approach to resolving water shortages and promoting investment”. Policy Research Dissemination Center, Working Paper 1627. The World Bank, Washington DC, USA.
- Howe, C.W., Schurmeier, D.R. and Shaw, W.D. (1986). “Innovative Approaches to Water Allocation: The Potential for Water Markets”. *Water Resources Research*, 22 (4), pp. 439–445.
- International Groundwater Resources Assessment Centre (2018). “Groundwater Overview: Making the invisible visible”. UN-Water category III publication.
- Jhavar, S., Agarwal, S. Oberoi, T., Sharma, T. and Thakkar, A. (2018). “Application of game theory in water resource management”, *International Journal of Advance Research and Development*, 3 (10), pp. 63-68.
- Katusiime, J. and Schütt, B. (2020). “Integrated Water Resources Management Approaches to Improve Water Resources Governance”, *Water*, 12, pp. 1-22.
- Kemper, K., Foster, S., Garduno, H., Nanni, M. and Tuinhof, A. (2003). “Economic Instruments for Groundwater Management”. World Bank, Global Water Partnership Associate Program, Briefing Note Series, Briefing Note 7.
- Koundouri, P. (2004). “Potential for groundwater management: Gisser-Sanchez effect reconsidered”, *Water Resources Research*, 40 (6).
- Kraemer, R.A., Kampa, E. and Interwies, E. (2004). “The Role of Tradable Permits in Water Pollution Control”. Inter-American Development Bank, Sustainable Development Department, Environment Division.
- Latinopoulos, D. and Sartzetakis, E.S. (2015). “Using Tradable Water Permits in Irrigated Agriculture”, *Environmental and Resource Economics*, 60 (3), pp. 349–370.
- Lee, T.R. and Jouravlev, A.S. (1998). “Prices, property and markets in water allocation”. Economic Commission for Latin America and the Caribbean, United Nations, Santiago, Chile.
- Madani, K. and Dinar, A. (2012). “Non-cooperative institutions for sustainable common pool resource management: Application to groundwater”, *Ecological Economics*, 74, pp. 34–45.
- Mattheiß, V., Le Mat, O. and Strosser, P. (2009). “Which role for economic instruments in the management of water resources in Europe? In search for innovative ideas for application in the Netherlands”. Report for the Dutch Ministry of Transport, Public Works and Water Management, France.
- Murali, K., Lim, M.K. and Petruzzi, N.C. (2015). “Municipal Groundwater Management: Optimal Allocation and Control of a Renewable Natural Resource”, *Production and Operations Management*, 24 (9), pp. 1453–1472.

- Nasim, S., Helfand, S. and Dinar, A. (2020). “Groundwater management under heterogeneous land tenure arrangements”, *Resource and Energy Economics*, 62, pp. 1-14.
- Palomo-Hierro, S., Gomez-Limon, J.A. and Riesgo, L. (2015) “Water Markets in Spain: Performance and Challenges”. *Water*, 7, pp. 652-678.
- Pereau, J.C., Mouysset, L. and Doyen, L. (2018). “Groundwater Management in a Food Security Context”, *Environmental and Resource Economics*, 71 (2), pp. 319–336.
- Pereau, J.C. and Pryet, A. (2018). “Environmental flows in hydro-economic models”, *Hydrogeology Journal*, 26 (7), pp. 2205–2212.
- Postel, S. (1992). *Last Oasis, Facing Water Scarcity*. New York: W.W. Norton and Company Ltd.
- Quintana Ashwell, N.E., Peterson, J.M. and Hendricks, N.P. (2018). “Optimal groundwater management under climate change and technical progress”, *Resource and Energy Economics*, 51, pp. 67–83.
- Raffensperger, J.F. and Milke, M.W. (2017). *Smart markets for water resources: a manual for implementation*. Springer International Publishing AG, Cham, Switzerland.
- Rey, D., Pérez-Blanco, C.D., Escriva-Bou, A., Girard, C. and Veldkamp, T.I.E. (2019). “Role of economic instruments in water allocation reform: lessons from Europe”. *International Journal of Water Resources Development*, 35, pp. 206–239.
- Rosegrant, M.W. and Binswanger, H.P. (1994). “Markets in tradable water rights: Potential for efficiency gains in developing country water resource allocation”. *World Development*, 22 (11), pp. 1613–1625.
- Rosegrant, M.W., Schleyer, R.G. and Yadav, S.N. (1995). “Water policy for efficient agricultural diversification: market-based approaches”. *Food Policy*, 20 (3), pp. 203–223.
- Rubio, S.J. and Casino, B. (2001). “Competitive versus Efficient Extraction of a Common Property Resource: The Groundwater Case”, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 25, pp. 1117-1137.
- Savenije, H.H.G. and Van der Zaag, P. (2008). “Integrated water resources management: Concepts and issues”, *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, pp. 290-297.
- Schmalensee, R. and Stavins, R.N. (2017). “The Design of Environmental Markets: What Have We Learned from Experience with Cap and Trade?”, *Oxford Review of Economic Policy*, 33 (4), pp. 572–88.
- Seidl, C., Wheeler, S.A. and Zuo, A. (2020). “Treating water markets like stock markets: Key water market reform lessons in the Murray-Darling Basin”. *Journal of Hydrology*, 581, pp. 1-16.
- Shaheen, F.A. (2018). “Sustaining Water and Energy Use in Semi-Arid Agriculture Region in Gujarat, India: Application of Optimal Control Model”, *International Journal of Water Resources and Arid Environments*, 7 (1), pp. 116–129.
- Singh, A. (2012). “An overview of the optimization modelling applications”, *Journal of Hydrology*, 466–467, pp. 167–182.
- Steward, D.R. and Allen, A.J. (2016). “Peak groundwater depletion in the High Plains Aquifer, projections from 1930 to 2110”, *Agricultural Water Management*, 170, pp. 36-48.
- Thobani, M. (1997). “Formal Water Markets: Why, When and How to Introduce Tradable Water Rights”. *The World Bank Research Observer*, 12 (2), pp. 161-179.
- Tietenberg T. (2006). Tradable Permits in Principle and Practice. In: Freeman J., Kolstad C. (eds) *Moving to Markets in Environmental Regulation*. Oxford University Press, Oxford: pp. 63-94.
- United Nations (2015). The 2030 Agenda for Sustainable Development.
- United Nations (2022). The Sustainable Development Goals Report 2022.
- United States Geological Survey (1999). “Sustainability of Ground-Water Resources”. Denver, Colorado: U.S. Government Printing Office.

- Vieira, E.O. (2020). Integrated Water Resources Management: Theoretical Concepts, Basis, Responsibilities, and Challenges of IWRM. In: Vieira, E.O., Sandoval-Solis, S, Pedrosa, V.A. and Ortiz-Partida, J.P. (ed.) *Integrated Water Resource Management: Cases from Africa, Asia, Australia, Latin America and USA*. Springer, Cham, Switzerland: pp. 1-12.
- Walter, T., Kloos, J. and Tsegai, D. (2010). “Improving water use efficiency under worsening scarcity: Evidence from the middle Olifants sub-basin in South Africa”. ZEF Discussion Papers on Development Policy, 143. University of Bonn, Center for Development Research (ZEF), Bonn.
- Wang, L., Zhao, Y., Huang, Y., Wang, J., Li, H., Zhai, J., Zhu, Y., Wang, Q. and Jiang, S. (2019). “Optimal Water Allocation Based on Water Rights Transaction Models with Administered and Market-Based Systems: A Case Study of Shiyang River Basin, China”. *Water*, 11 (577), pp. 1-17.
- Wiener, A. (1972). *The Role of Water in Development*. New York: McGraw-Hill.
- Ειδική Γραμματεία Υδάτων (2014). “Σχέδιο διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας”. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής.
- Ευστρατιάδης, Α. και Κουτσογιάννης, Δ. (2017). “Υδατικοί πόροι και έργα αξιοποίησης”. Σημειώσεις στο πλαίσιο του μαθήματος “Διαχείριση Υδατικών Πόρων”. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Κατηρτζίδου, Μ. (2018). “Διαχείριση υδατικών πόρων υπό συνθήκες κλιματικής αλλαγής με τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης”. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Λατινόπουλος, Π. (2013). Υδρολογία Υπόγειων Νερών. Στο: Τσακίρης Γ. (επιμ.) *Υδατικοί Πόροι Ι: Τεχνική Υδρολογία*. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα: σελ. 317-350.
- Ξεπαπαδέας, Α.Π. και Γιαννίκος, Ι.Χ. (2009). *Μαθηματικές Μέθοδοι στα Οικονομικά*. Εκδόσεις Gutenberg, Αθήνα.

*Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.*

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### Αποδείξεις εξισώσεων

#### Απόδειξη εξίσωσης (10)

Αξιοποιώντας τις εξισώσεις (3) και (9) προκύπτει:

$$(3) \Rightarrow Q_t = M(q_{1,t} + q_{2,t}) \stackrel{(9)}{\Rightarrow}$$
$$Q_t = M \left[ \frac{a_1}{2b_1} - \frac{1}{2b_1 p_1} c_0 (s_L - H_t) + \frac{a_2}{2b_2} - \frac{1}{2b_2 p_2} c_0 (s_L - H_t) \right]$$
$$Q_t = M \left[ \frac{a_1}{2b_1} + \frac{a_2}{2b_2} - \left( \frac{1}{2b_1 p_1} + \frac{1}{2b_2 p_2} \right) c_0 (s_L - H_t) \right]$$

Θέτοντας  $\Psi = \frac{a_1}{2b_1} + \frac{a_2}{2b_2} = \sum_{r=1}^2 \frac{a_r}{2b_r}$  και  $\Omega = \frac{1}{2b_1 p_1} + \frac{1}{2b_2 p_2} = \sum_{r=1}^2 \frac{1}{2b_r p_r}$  προκύπτει η εξίσωση (10):

$$Q_t = M[\Psi - \Omega c_0 (s_L - H_t)]$$

#### Απόδειξη εξίσωσης (11)

Αξιοποιώντας τις εξισώσεις (4) και (10) και θέτοντας  $W = Q_t$  προκύπτει:

$$(4) \Rightarrow AS\dot{H} = R - (1 - a)Q_t \stackrel{(10)}{\Rightarrow}$$
$$AS\dot{H} = R - (1 - a)M[\Psi - \Omega c_0 (s_L - H_t)] \Rightarrow$$
$$AS\dot{H} = R - M\Psi(1 - a) + M\Omega c_0(1 - a)(s_L - H_t) \Rightarrow$$

$$AS\dot{H} = R - M\Psi(1-a) + M\Omega c_0(1-a)s_L - M\Omega c_0(1-a)H_t$$

Διαιρώντας με  $AS$  και αναδιατάσσοντας τους όρους της τελευταίας εξίσωσης προκύπτει η εξίσωση (11):

$$\dot{H} + \frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS} H = \frac{R}{AS} - \frac{M\Psi(1-a)}{AS} + \frac{M\Omega c_0(1-a)s_L}{AS}$$

### Απόδειξη εξίσωσης (19)

Αξιοποιώντας τις εξισώσεις (10) και (18) προκύπτει:

$$(10) \Rightarrow Q_t^m = M\Psi - M\Omega c_0 s_L + M\Omega c_0 H_t^m \stackrel{(18)}{\Rightarrow}$$

$$Q_t^m = M\Psi - M\Omega c_0 s_L + M\Omega c_0 \left[ \left( H_0 - \frac{R - M\Psi(1-a) + M\Omega c_0(1-a)s_L}{M\Omega c_0(1-a)} \right) e^{-\frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS}t} + \right.$$

$$\left. \frac{R - M\Psi(1-a) + M\Omega c_0(1-a)s_L}{M\Omega c_0(1-a)} \right]$$

Με απλές πράξεις στην τελευταία εξίσωση προκύπτει η εξίσωση (19):

$$Q_t^m = \left( M\Omega c_0 H_0 - \frac{R - M\Psi(1-a) + M\Omega c_0(1-a)s_L}{(1-a)} \right) e^{-\frac{M\Omega c_0(1-a)}{AS}t} +$$

$$\frac{R - M\Psi(1-a) + M\Omega c_0(1-a)s_L}{(1-a)} + M(\Psi - \Omega c_0 s_L)$$

### Απόδειξη εξίσωσης (22)

Το σύστημα εξισώσεων που επιλύεται είναι το εξής:

$$MNB_{1,t} = MNB_{2,t}$$

$$Q_t = M \sum_{r=1}^2 q_{r,t}$$

Με βάση την εξίσωση (8) και την πρώτη εξίσωση του συστήματος προκύπτει ότι:

$$MNB_{1,t} = MNB_{2,t} \stackrel{(8)}{\Rightarrow}$$

$$M \left[ p_1 (a_1 - 2b_1 q_{1,t}) - c_0 (s_L - H_t) \right] = M \left[ p_2 (a_2 - 2b_2 q_{2,t}) - c_0 (s_L - H_t) \right] \Rightarrow$$

$$q_{1,t} = \frac{p_1 a_1 - a_2 + 2b_2 q_{2,t}}{2b_1 p_1}$$

Με βάση την τελευταία εξίσωση και τη δεύτερη εξίσωση του συστήματος προκύπτει, επίσης, ότι:

$$Q_t = M \sum_{r=1}^2 q_{r,t} \Rightarrow Q_t = M (q_{1,t} + q_{2,t}) \Rightarrow \frac{Q_t}{M} = \frac{p_1 a_1 - a_2 + 2b_2 q_{2,t}}{2b_1 p_1} + q_{2,t} \Rightarrow$$

$$q_{2,t} = \frac{p_1 b_1}{p_2 b_2 + p_1 b_1} \frac{Q_t}{M} + \frac{p_2 a_2 - p_1 a_1}{2(p_2 b_2 + p_1 b_1)}$$

Με αντικατάσταση προκύπτει αντίστοιχα ότι:

$$q_{1,t} = \frac{p_2 b_2}{p_1 b_1 + p_2 b_2} \frac{Q_t}{M} + \frac{p_1 a_1 - p_2 a_2}{2(p_1 b_1 + p_2 b_2)}$$

Η ποσότητα  $q_{i,t}$  τελικά είναι:

$$q_{i,t} = s_i \frac{Q_t}{M} + \theta_i$$

όπου  $s_i = \frac{p_j b_j}{p_i b_i + p_j b_j}$  και  $\theta_i = \frac{p_i a_i - p_j a_j}{2(p_i b_i + p_j b_j)}$  με  $i, j = 1, 2$  και  $s_1 + s_2 = 1$ ,  $\theta_1 + \theta_2 = 0$

### Απόδειξη εξίσωσης (27)

Με βάση την εξίσωση (25) και αξιοποιώντας τις εξισώσεις (23) και (24) προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial Q_t} = 0 \xrightarrow{(23),(24)}$$

$$\left[ M p_1 a_1 \frac{s_1}{M} - 2M b_1 p_1 \left( s_1 \frac{Q_t}{M} + \theta_1 \right) \frac{s_1}{M} - M c_0 (s_L - H_t) \frac{s_1}{M} \right] + \left[ M p_2 a_2 \frac{s_2}{M} - 2M b_2 p_2 \left( s_2 \frac{Q_t}{M} + \theta_2 \right) \frac{s_2}{M} - M c_0 (s_L - H_t) \frac{s_2}{M} \right] - \mu \frac{1}{AS} (1 - a) = 0 \Rightarrow$$

$$(p_1 a_1 s_1 + p_2 a_2 s_2) + \left[ -2b_1 p_1 \left( s_1 \frac{Q_t}{M} + \theta_1 \right) s_1 - 2b_2 p_2 \left( s_2 \frac{Q_t}{M} + \theta_2 \right) s_2 \right] + [-c_0 (s_L - H_t) s_1 - c_0 (s_L - H_t) s_2] - \mu \frac{1}{AS} (1 - a) = 0 \quad (\text{A.1})$$

Ο όρος  $(p_1 a_1 s_1 + p_2 a_2 s_2)$  της εξίσωσης (A.1), αξιοποιώντας τον τρόπο που ορίστηκαν τα  $s_i$  γράφεται:

$$p_1 a_1 s_1 + p_2 a_2 s_2 = p_1 a_1 \frac{p_2 b_2}{p_1 b_1 + p_2 b_2} + p_2 a_2 \frac{p_1 b_1}{p_2 b_2 + p_1 b_1} = \frac{p_1 p_2 (a_1 b_2 + a_2 b_1)}{p_1 b_1 + p_2 b_2}$$

Διαιρώντας τον αριθμητή και τον παρονομαστή του κλάσματος που προκύπτει με το γινόμενο  $2p_1 p_2 b_1 b_2$  θα είναι:

$$p_1 a_1 s_1 + p_2 a_2 s_2 = \frac{\frac{p_1 p_2 (a_1 b_2 + a_2 b_1)}{2p_1 p_2 b_1 b_2}}{\frac{p_1 b_1 + p_2 b_2}{2p_1 p_2 b_1 b_2}} = \frac{\frac{a_1 + a_2}{2b_1 + 2b_2}}{\frac{1}{2b_1 p_1} + \frac{1}{2b_2 p_2}} = \frac{\Psi}{\Omega}$$

Ο όρος  $\left[-2b_1 p_1 \left(s_1 \frac{Q_t}{M} + \theta_1\right) s_1 - 2b_2 p_2 \left(s_2 \frac{Q_t}{M} + \theta_2\right) s_2\right]$  της εξίσωσης (Α.1) γράφεται:

$$\begin{aligned} & -2b_1 p_1 \left(s_1 \frac{Q_t}{M} + \theta_1\right) s_1 - 2b_2 p_2 \left(s_2 \frac{Q_t}{M} + \theta_2\right) s_2 = \\ & -2b_1 p_1 s_1^2 \frac{Q_t}{M} - 2b_2 p_2 s_2^2 \frac{Q_t}{M} - 2b_1 p_1 s_1 \theta_1 - 2b_2 p_2 s_2 \theta_2 = \\ & -2 \frac{Q_t}{M} (b_1 p_1 s_1^2 + b_2 p_2 s_2^2) - 2b_1 p_1 s_1 \theta_1 - 2b_2 p_2 s_2 \theta_2 \end{aligned} \quad (\text{Α.2})$$

Με βάση τον τρόπο που ορίστηκαν τα  $s_i$ ,  $\theta_i$  και  $\Omega$  η εξίσωση (Α.2) γράφεται:

$$\begin{aligned} & -2b_1 p_1 \left(s_1 \frac{Q_t}{M} + \theta_1\right) s_1 - 2b_2 p_2 \left(s_2 \frac{Q_t}{M} + \theta_2\right) s_2 = \\ & -2 \frac{Q_t}{M} \left[ b_1 p_1 \left(\frac{p_2 b_2}{p_1 b_1 + p_2 b_2}\right)^2 + b_2 p_2 \left(\frac{p_1 b_1}{p_2 b_2 + p_1 b_1}\right)^2 \right] - 2b_1 p_1 \frac{p_2 b_2}{p_1 b_1 + p_2 b_2} \frac{p_1 a_1 - p_2 a_2}{2(p_1 b_1 + p_2 b_2)} \\ & - 2b_2 p_2 \frac{p_1 b_1}{p_2 b_2 + p_1 b_1} \frac{p_2 a_2 - p_1 a_1}{2(p_2 b_2 + p_1 b_1)} = \\ & -2 \frac{Q_t}{M} b_1 p_1 b_2 p_2 \left( \frac{p_2 b_2}{(p_1 b_1 + p_2 b_2)^2} + \frac{p_1 b_1}{(p_2 b_2 + p_1 b_1)^2} \right) - \frac{b_1 p_1 b_2 p_2 [(p_1 a_1 - p_2 a_2) + (p_2 a_2 - p_1 a_1)]}{(p_1 b_1 + p_2 b_2)^2} = \\ & -2 \frac{Q_t}{M} \frac{b_1 p_1 b_2 p_2}{p_1 b_1 + p_2 b_2} (s_1 + s_2) - 0 = -2 \frac{Q_t}{M} \frac{1}{\frac{p_1 b_1 + p_2 b_2}{b_1 p_1 b_2 p_2}} = -2 \frac{Q_t}{M} \frac{1}{\frac{1}{b_2 p_2} + \frac{1}{b_1 p_1}} = \\ & = -2 \frac{Q_t}{M} \frac{1}{\frac{1}{b_2 p_2} + \frac{1}{b_1 p_1}} = -\frac{Q_t}{M} \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{1}{b_2 p_2} + \frac{1}{b_1 p_1}} = -\frac{Q_t}{M} \frac{1}{\frac{1}{2b_2 p_2} + \frac{1}{2b_1 p_1}} = -\frac{Q_t}{M} \frac{1}{\Omega} \end{aligned}$$

Ο όρος  $[-c_0(s_L - H_t)s_1 - c_0(s_L - H_t)s_2]$  με βάση τον τρόπο που ορίστηκαν τα  $s_i$  γράφεται:



$$-c_0(s_L - H_t)s_1 - c_0(s_L - H_t)s_2 = -c_0(s_L - H_t)(s_1 + s_2) = -c_0(s_L - H_t)$$

Συνεπώς, η εξίσωση (Α.1) μπορεί να γραφτεί με βάση όσα προηγήθηκαν ως εξής:

$$\frac{\Psi}{\Omega} - \frac{Q_t}{M} \frac{1}{\Omega} - c_0(s_L - H_t) - \mu \frac{1}{AS} (1 - a) = 0 \Rightarrow$$

$$\mu = \frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{1}{\Omega M} Q_t - c_0(s_L - H_t) \right]$$

Αντικαθιστώντας στην τελευταία εξίσωση τη συνολική κατανάλωση νερού  $Q_t$  κατά το έτος  $t$  με βάση την εξίσωση (30) προκύπτει η εξίσωση (27):

$$\mu = \frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{R-ASH}{\Omega M(1-a)} - c_0(s_L - H_t) \right]$$

### Απόδειξη εξίσωσης (32)

Με βάση την εξίσωση (26) και αξιοποιώντας τις εξισώσεις (27), (28), (29) και (30) προκύπτει ότι:

$$\dot{\mu} = \delta\mu - \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H_t} \xrightarrow{(27),(28),(29),(30)}$$

$$\frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{AS}{\Omega M(1-a)} \dot{H} + c_0 \dot{H} \right] = \delta \frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{R-ASH}{\Omega M(1-a)} - c_0(s_L - H_t) \right] - c_0 \left[ \frac{R}{(1-a)} - \frac{AS}{(1-a)} \dot{H} \right] \Rightarrow$$

$$\frac{A^2 S^2}{\Omega M(1-a)^2} \dot{H} + \frac{c_0 AS}{(1-a)} \dot{H} = \frac{\delta AS}{(1-a)} \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{\delta AS}{(1-a)} \frac{R-ASH}{\Omega M(1-a)} - \frac{\delta AS c_0}{(1-a)} (s_L - H_t) - \frac{c_0 R}{(1-a)} + \frac{c_0 AS}{(1-a)} \dot{H}$$

Πολλαπλασιάζοντας την τελευταία εξίσωση με  $(1 - a)$  θα είναι:

$$\frac{A^2 S^2}{\Omega M(1-a)} \dot{H} + c_0 AS \dot{H} =$$

$$\delta AS \frac{\Psi}{\Omega} - \delta AS \frac{R}{\Omega M(1-a)} + \delta AS \frac{ASH}{\Omega M(1-a)} - \delta AS c_0 (s_L - H_t) - c_0 R + c_0 AS \dot{H} \Rightarrow$$

$$\frac{A^2 S^2}{\Omega M(1-a)} \dot{H} + (c_0 AS - \delta AS \frac{AS}{\Omega M(1-a)} - c_0 \dot{AS}) \dot{H} - \delta AS c_0 H_t =$$

$$\delta AS \frac{\Psi}{\Omega} - \delta AS \frac{R}{\Omega M(1-a)} - \delta AS c_0 s_L - c_0 R \Rightarrow$$

Διαιρώντας την τελευταία εξίσωση με  $A^2 S^2$  θα είναι:

$$\frac{1}{\Omega M(1-a)} \ddot{H} - \frac{\delta}{\Omega M(1-a)} \dot{H} - \frac{\delta c_0}{AS} H_t = \frac{\delta}{AS} \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{\delta R}{AS \Omega M(1-a)} - \frac{\delta c_0 s_L}{AS} - \frac{c_0 R}{AS} \Rightarrow$$

Πολλαπλασιάζοντας την ανωτέρω εξίσωση με  $\Omega M(1-a)$  προκύπτει η εξίσωση (32), η οποία είναι:

$$\ddot{H} - \delta \dot{H} - \frac{\delta c_0 \Omega M(1-a)}{AS} H = \frac{1}{AS} \left[ \delta M \Psi (1-a) - \delta R - \Omega M(1-a) \left( \delta c_0 s_L + \frac{c_0 R}{AS} \right) \right]$$

### Απόδειξη εξίσωσης (34)

Αφού δοκιμάζεται λύση της μορφής  $e^{\lambda t}$ , βάσει της εξίσωσης (33) θα είναι:

$$\lambda^2 e^{\lambda t} - \delta \lambda e^{\lambda t} - \frac{\delta c_0 \Omega M(1-a)}{AS} e^{\lambda t} = 0 \Rightarrow e^{\lambda t} \left[ \lambda^2 - \delta \lambda - \frac{\delta c_0 \Omega M(1-a)}{AS} \right] = 0$$

Εφόσον  $e^{\lambda t} \neq 0$ , προκύπτει η εξίσωση (34), η οποία είναι:

$$\lambda^2 - \delta \lambda - \frac{\delta c_0 \Omega M(1-a)}{AS}$$

### Απόδειξη εξίσωσης (44)

Βάσει της συνθήκης  $P_t^{pc} = MNB_{r,t}^{pc}$  και της εξίσωσης (23) προκύπτει ότι:

$$P_t^{pc} = MNB_{r,t}^{pc} = Mp_r a_r - 2Mp_r b_r q_{r,t} - Mc_0(s_L - H_t^{pc})$$

Η ανωτέρω σχέση λαμβάνοντας υπ' όψιν την εξίσωση (22) γράφεται ως εξής:

$$P_t^{pc} = MNB_{r,t}^{pc} = Mp_r a_r - 2Mp_r b_r \left( s_r \frac{Q_t^{pc}}{M} + \theta_r \right) - Mc_0(s_L - H_t^{pc}) \Rightarrow$$

$$P_t^{pc} = MNB_{r,t}^{pc} = M(p_r a_r - 2p_r b_r s_r \frac{Q_t^{pc}}{M} - 2p_r b_r \theta_r - c_0 s_L + c_0 H_t^{pc})$$

Με βάση τις σχέσεις (39) και (40) θα είναι:

$$\begin{aligned}
 P_t^{pc} &= MNB_{r,t}^{pc} = M\{p_r a_r - 2p_r b_r \theta_r - c_0 s_L \\
 &- 2p_r b_r s_r \left[ -\frac{AS}{(1-a)} \lambda_1 X_1^{pc} e^{\lambda_1 t} - \frac{AS}{(1-a)} \lambda_2 X_2^{pc} e^{\lambda_2 t} + \frac{R}{(1-a)} \right] \frac{1}{M} \\
 &+ c_0 \left[ X_1^{pc} e^{\lambda_1 t} + X_2^{pc} e^{\lambda_2 t} - \frac{\Psi}{c_0 \Omega} + \frac{R}{\Omega M c_0 (1-a)} + s_L + \frac{R}{\delta AS} \right] \}
 \end{aligned}$$

Με παραγοντοποιήσεις στην τελευταία εξίσωση και λαμβάνοντας υπ' όψιν τη σημείωση 4.16 προκύπτει η εξίσωση (44), η οποία είναι:

$$\begin{aligned}
 P_t^{pc} &= \left[ \frac{2b_r p_r AS s_r}{M(1-a)} \lambda_1 X_1^{pc} + c_0 X_1^{pc} \right] e^{\lambda_1 t} + \\
 &+ \left[ \frac{2b_r p_r AS r}{M(1-a)} \lambda_2 X_2^{pc} + c_0 X_2^{pc} \right] e^{\lambda_2 t} \\
 &+ c_0 \left[ -\frac{\Psi}{c_0 \Omega} + \frac{R}{\Omega M c_0 (1-a)} + s_L + \frac{R}{\delta AS} \right] + (p_r a_r - c_0 s_L) \\
 &- 2b_r p_r \left[ \frac{s_r R}{M(1-a)} + \theta_r \right]
 \end{aligned}$$

### Απόδειξη εξίσωσης (48)

Με βάση την εξίσωση (25) και αξιοποιώντας τις εξισώσεις (47) και (24) προκύπτει ότι:

$$\frac{\partial \mathcal{H}}{\partial Q_t} = 0 \xrightarrow{(47),(24)}$$

$$\begin{aligned}
 &\left[ M p_1 a_1 \frac{s_1}{M} - 2M b_1 p_1 \left( s_1 \frac{Q_t}{M} + \theta_1 \right) \frac{s_1}{M} - M c_0 (s_L - H_t) \frac{s_1}{M} - \beta(1-a) M \frac{s_1}{M} \right] + \left[ M p_2 a_2 \frac{s_2}{M} - \right. \\
 &2M b_2 p_2 \left( s_2 \frac{Q_t}{M} + \theta_2 \right) \frac{s_2}{M} - M c_0 (s_L - H_t) \frac{s_2}{M} - \beta(1-a) M \frac{s_2}{M} \left. \right] - \mu \frac{1}{AS} (1-a) = 0 \Rightarrow \\
 &(p_1 a_1 s_1 + p_2 a_2 s_2) + \left[ -2b_1 p_1 \left( s_1 \frac{Q_t}{M} + \theta_1 \right) s_1 - 2b_2 p_2 \left( s_2 \frac{Q_t}{M} + \theta_2 \right) s_2 \right] + [-c_0 \\
 &(s_L - H_t) s_1 - c_0 (s_L - H_t) s_2] + [-\beta(1-a) s_1 - \beta(1-a) s_2] - \mu \frac{1}{AS} (1-a) = 0 \quad \mathbf{(A.3)}
 \end{aligned}$$

Από την απόδειξη της εξίσωσης (27) έχει προκύψει ότι:

$$p_1 a_1 s_1 + p_2 a_2 s_2 = \frac{\Psi}{\Omega}$$

$$-2b_1 p_1 \left( s_1 \frac{Q_t}{M} + \theta_1 \right) s_1 - 2b_2 p_2 \left( s_2 \frac{Q_t}{M} + \theta_2 \right) s_2 = -\frac{Q_t}{M} \frac{1}{\Omega}$$

$$-c_0 (s_L - H_t) s_1 - c_0 (s_L - H_t) s_2 = -c_0 (s_L - H_t)$$

Επιπλέον, με βάση τον τρόπο που ορίστηκαν τα  $s_i$  προκύπτει ότι:

$$-\beta(1-a)s_1 - \beta(1-a)s_2 = -\beta(1-a)(s_1 + s_2) = -\beta(1-a)$$

Συνεπώς, η εξίσωση (Α.3) μπορεί να γραφτεί με βάση όσα προηγήθηκαν ως εξής:

$$\frac{\Psi}{\Omega} - \frac{Q_t}{M} \frac{1}{\Omega} - c_0 (s_L - H_t) - \beta(1-a) - \mu \frac{1}{AS} (1-a) = 0 \Rightarrow$$

$$\mu = \frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{1}{\Omega M} Q_t - c_0 (s_L - H_t) - \beta(1-a) \right]$$

Αντικαθιστώντας στην τελευταία εξίσωση τη συνολική κατανάλωση νερού  $Q_t$  κατά το έτος  $t$  με βάση την εξίσωση (30) προκύπτει η εξίσωση (48):

$$\mu = \frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{R-ASH}{\Omega M(1-a)} - c_0 (s_L - H_t) - \beta(1-a) \right]$$

### Απόδειξη εξίσωσης (49)

Με βάση την εξίσωση (26) και αξιοποιώντας τις εξισώσεις (48), (28), (29) και (30) προκύπτει ότι:

$$\dot{\mu} = \delta\mu - \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial H_t} \xrightarrow{(48),(28),(29),(30)}$$

$$\frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{AS}{\Omega M(1-a)} \dot{H} + c_0 \dot{H} \right] =$$

$$\delta \frac{AS}{(1-a)} \left[ \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{R-ASH}{\Omega M(1-a)} - c_0 (s_L - H_t) - \beta(1-a) \right] - c_0 \left[ \frac{R}{(1-a)} - \frac{AS}{(1-a)} \dot{H} \right] \Rightarrow$$

$$\frac{A^2 S^2}{\Omega M(1-a)^2} \dot{H} + \frac{c_0 AS}{(1-a)} \dot{H} = \frac{\delta AS}{(1-a)} \frac{\Psi}{\Omega} - \frac{\delta AS}{(1-a)} \frac{R-ASH}{\Omega M(1-a)} - \frac{\delta AS c_0}{(1-a)} (s_L - H_t) - \delta AS \beta - \frac{c_0 R}{(1-a)} + \frac{c_0 AS}{(1-a)} \dot{H}$$

Πολλαπλασιάζοντας την τελευταία εξίσωση με  $(1 - a)$  θα είναι:

$$\frac{A^2 S^2}{\Omega M(1-a)} \ddot{H} + c_0 A S \dot{H} =$$

$$\delta A S \frac{\Psi}{\Omega} - \delta A S \frac{R}{\Omega M(1-a)} + \delta A S \frac{A S \dot{H}}{\Omega M(1-a)} - \delta A S c_0 (s_L - H_t) - \delta A S \beta (1 - a) - c_0 R + c_0 A S \dot{H} \Rightarrow$$

$$\frac{A^2 S^2}{\Omega M(1-a)} \ddot{H} + (c_0 A S - \delta A S \frac{A S}{\Omega M(1-a)} - c_0 \dot{A} S) \dot{H} - \delta A S c_0 H_t =$$

$$\delta A S \frac{\Psi}{\Omega} - \delta A S \frac{R}{\Omega M(1-a)} - \delta A S c_0 s_L - \delta A S \beta (1 - a) - c_0 R$$

Διαιρώντας την τελευταία εξίσωση με  $A^2 S^2$  θα είναι:

$$\frac{1}{\Omega M(1-a)} \ddot{H} - \frac{\delta}{\Omega M(1-a)} \dot{H} - \frac{\delta c_0}{A S} H_t = \frac{\delta \Psi}{A S \Omega} - \frac{\delta R}{A S \Omega M(1-a)} - \frac{\delta c_0 s_L}{A S} - \frac{\delta \beta (1-a)}{A S} - \frac{c_0 R}{A S} \Rightarrow$$

Πολλαπλασιάζοντας την ανωτέρω εξίσωση με  $\Omega M(1 - a)$  προκύπτει η εξίσωση (49), η οποία είναι:

$$\ddot{H} - \delta \dot{H} - \frac{\delta c_0 \Omega M(1-a)}{A S} H =$$

$$\frac{1}{A S} \left[ \delta M \Psi (1 - a) - \delta R - \Omega M (1 - a) \left( \delta c_0 s_L + \delta \beta (1 - a) + \frac{c_0 R}{A S} \right) \right]$$

### Απόδειξη εξίσωσης (57)

Βάσει της συνθήκης  $P_t^{fc} = M N B_{r,t}^{fc}$  και της εξίσωσης (47) προκύπτει ότι:

$$P_t^{fc} = M N B_{r,t}^{fc} = M p_r a_r - 2 M p_r b_r q_{r,t} - M c_0 (s_L - H_t^{fc}) - M \beta (1 - a)$$

Η ανωτέρω σχέση λαμβάνοντας υπ' όψιν την εξίσωση (22) γράφεται ως εξής:

$$P_t^{fc} = M N B_{r,t}^{fc} = M p_r a_r - 2 M p_r b_r \left( s_r \frac{Q_t^{fc}}{M} + \theta_r \right) - M c_0 (s_L - H_t^{fc}) - M \beta (1 - a) \Rightarrow$$

$$P_t^{fc} = M N B_{r,t}^{fc} = M [p_r a_r - 2 p_r b_r s_r \frac{Q_t^{fc}}{M} - 2 p_r b_r \theta_r - c_0 s_L + c_0 H_t^{fc} - \beta (1 - a)]$$

Με βάση τις σχέσεις (52) και (53) θα είναι:

$$\begin{aligned}
 P_t^{fc} = MNB_{r,t}^{fc} = M\{p_r a_r - 2p_r b_r \theta_r - c_0 s_L - \beta(1-a) \\
 - 2p_r b_r s_r \left[ -\frac{AS}{(1-a)} \lambda_1 X_1^{fc} e^{\lambda_1 t} - \frac{AS}{(1-a)} \lambda_2 X_2^{fc} e^{\lambda_2 t} + \frac{R}{(1-a)} \right] \frac{1}{M} \\
 + c_0 \left[ X_1^{fc} e^{\lambda_1 t} + X_2^{fc} e^{\lambda_2 t} - \frac{\Psi}{c_0 \Omega} + \frac{R}{\Omega M c_0 (1-a)} + s_L + \frac{R}{\delta AS} \right] \}
 \end{aligned}$$

Με παραγοντοποιήσεις στην τελευταία εξίσωση και λαμβάνοντας υπ' όψιν τη σημείωση 4.22, προκύπτει η εξίσωση (57), η οποία είναι:

$$\begin{aligned}
 P_t^{fc} = \left[ \frac{2b_r p_r AS s_r}{M(1-a)} \lambda_1 X_1^{fc} + c_0 X_1^{fc} \right] e^{\lambda_1 t} + \\
 + \left[ \frac{2b_r p_r AS s_r}{M(1-a)} \lambda_2 X_2^{fc} + c_0 X_2^{fc} \right] e^{\lambda_2 t} \\
 + c_0 \left[ -\frac{\Psi}{c_0 \Omega} + \frac{R}{\Omega M c_0 (1-a)} + s_L + \frac{R}{\delta AS} \right] + [p_r a_r - c_0 s_L - \beta(1-a)] \\
 - 2b_r p_r \left[ \frac{s_r R}{M(1-a)} + \theta_r \right]
 \end{aligned}$$

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

## Αναλυτικά αποτελέσματα προσομοιώσεων

Πίνακας Β.1: Αναλυτικά αποτελέσματα καθοριστικής πλήρους ανταγωνισμού

t (έτη)	H <sub>i</sub> (m)	Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	q <sub>h,i</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	q <sub>z,i</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	NB <sub>z,i</sub> (€)	NB <sub>z,i</sub> (€)	NB <sub>tot,i</sub> (€)	Παρούσα αξία NB <sub>tot,i</sub> (€)	NB <sub>tot,i</sub> (€/m <sup>3</sup> )	ΔH <sub>i</sub> (m)
0	60.000	17550034.064	6275.862	7224.164	2300085.52	1264385.01	3564470.53	3564470.53	0.2031	-
1	59.392	17543757.900	6274.115	7221.084	2298101.35	1262101.20	3560202.54	3454982.66	0.2029	-0.608
2	58.784	17537488.379	6272.369	7218.006	2296119.83	1259820.77	3555940.61	3348858.75	0.2028	-0.607
3	58.178	17531225.495	6270.626	7214.933	2294140.96	1257543.73	3551684.70	3245995.41	0.2026	-0.607
4	57.572	17524969.240	6268.884	7211.862	2292164.74	1255270.07	3547434.81	3146292.43	0.2024	-0.606
5	56.966	17518719.607	6267.144	7208.794	2290191.16	1252999.79	3543190.94	3049652.71	0.2023	-0.606
6	56.361	17512476.589	6265.406	7205.730	2288220.21	1250732.87	3538953.07	2955982.08	0.2021	-0.605
7	55.757	17506240.179	6263.669	7202.669	2286251.89	1248469.31	3534721.20	2865189.32	0.2019	-0.604
8	55.153	17500010.370	6261.935	7199.612	2284286.20	1246209.11	3530495.31	2777185.97	0.2017	-0.604
9	54.550	17493787.156	6260.202	7196.557	2282323.14	1243952.26	3526275.39	2691886.33	0.2016	-0.603
10	53.948	17487570.529	6258.471	7193.506	2280362.70	1241698.75	3522061.44	2609207.29	0.2014	-0.602
11	53.346	17481360.482	6256.742	7190.458	2278404.87	1239448.58	3517853.45	2529068.34	0.2012	-0.602
12	52.745	17475157.008	6255.015	7187.413	2276449.65	1237201.75	3513651.40	2451391.40	0.2011	-0.601
13	52.145	17468960.100	6253.290	7184.372	2274497.05	1234958.24	3509455.29	2376100.83	0.2009	-0.600
14	51.545	17462769.752	6251.567	7181.333	2272547.04	1232718.06	3505265.11	2303123.29	0.2007	-0.600
15	50.946	17456585.956	6249.845	7178.298	2270599.64	1230481.20	3501080.84	2232387.71	0.2006	-0.599
16	50.348	17450408.706	6248.125	7175.266	2268654.84	1228247.65	3496902.48	2163825.18	0.2004	-0.598
17	49.750	17444237.994	6246.407	7172.237	2266712.63	1226017.40	3492730.03	2097368.94	0.2002	-0.598
18	49.152	17438073.814	6244.691	7169.212	2264773.00	1223790.45	3488563.46	2032954.26	0.2001	-0.597
19	48.556	17431916.158	6242.977	7166.190	2262835.97	1221566.80	3484402.77	1970518.40	0.1999	-0.597
20	47.960	17425765.020	6241.264	7163.171	2260901.51	1219346.44	3480247.95	1910000.57	0.1997	-0.596
21	47.365	17419620.393	6239.553	7160.155	2258969.63	1217129.37	3476099.00	1851341.83	0.1996	-0.595
22	46.770	17413482.270	6237.844	7157.142	2257040.33	1214915.57	3471955.90	1794485.04	0.1994	-0.595
23	46.176	17407350.645	6236.137	7154.132	2255113.59	1212705.04	3467818.64	1739374.84	0.1992	-0.594
24	45.582	17401225.509	6234.432	7151.126	2253189.42	1210497.79	3463687.21	1685957.56	0.1990	-0.593
25	44.989	17395106.857	6232.728	7148.123	2251267.82	1208293.80	3459561.61	1634181.19	0.1989	-0.593
26	44.397	17388994.681	6231.027	7145.123	2249348.77	1206093.06	3455441.83	1583995.31	0.1987	-0.592
27	43.806	17382888.975	6229.327	7142.126	2247432.27	1203895.58	3451327.85	1535351.03	0.1985	-0.592
28	43.215	17376789.732	6227.629	7139.133	2245518.33	1201701.34	3447219.67	1488201.01	0.1984	-0.591
29	42.624	17370696.944	6225.932	7136.142	2243606.93	1199510.34	3443117.27	1442499.32	0.1982	-0.590
30	42.035	17364610.606	6224.238	7133.155	2241698.08	1197322.58	3439020.66	1398201.46	0.1980	-0.590
31	41.446	17358530.710	6222.545	7130.171	2239791.77	1195138.05	3434929.81	1355264.30	0.1979	-0.589
32	40.857	17352457.250	6220.854	7127.190	2237887.99	1192956.74	3430844.73	1313646.04	0.1977	-0.588
33	40.269	17346390.218	6219.165	7124.212	2235986.74	1190778.66	3426765.40	1273306.15	0.1975	-0.588
34	39.682	17340329.608	6217.478	7121.237	2234088.02	1188603.78	3422691.80	1234205.35	0.1974	-0.587
35	39.096	17334275.413	6215.792	7118.266	2232191.83	1186432.12	3418623.95	1196305.57	0.1972	-0.587
36	38.510	17328227.627	6214.108	7115.297	2230298.15	1184263.66	3414561.81	1159569.91	0.1971	-0.586
37	37.924	17322186.242	6212.426	7112.332	2228406.99	1182098.40	3410505.39	1123962.61	0.1969	-0.585
38	37.340	17316151.251	6210.746	7109.370	2226518.35	1179936.33	3406454.68	1089449.00	0.1967	-0.585
39	36.756	17310122.649	6209.068	7106.411	2224632.21	1177777.45	3402409.66	1055995.48	0.1966	-0.584
40	36.172	17304100.428	6207.391	7103.455	2222748.58	1175621.75	3398370.33	1023569.47	0.1964	-0.583
<b>Σύνολο</b>		<b>714475052.502</b>	<b>255897.027</b>	<b>293699.167</b>	<b>92704359.70</b>	<b>50002630.83</b>	<b>142706990.53</b>	<b>83755304.86</b>		<b>-23.828</b>

**Πίνακας Β.2:** Αναλυτικά αποτελέσματα καθεστώτος μερικής συνεργασίας

t (έτη)	ι	Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	Σκώδης τιμή (€/m <sup>3</sup> )	q <sub>1,i</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	q <sub>2,i</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	NB <sub>1,i</sub> (€)	NB <sub>2,i</sub> (€)	NB <sub>tot,i</sub> (€)	Παρούσα αξία NB <sub>tot,i</sub> (€)	NB <sub>tot,i</sub> (€/m <sup>3</sup> )	P <sub>i</sub> (€/m <sup>3</sup> )	ΔH <sub>i</sub> (m)
0	60.000	15525085.610	0.0231	5712.091	6230.282	2271327.57	1213687.11	3485014.68	3485014.68	0.2245	0.0785	-
1	59.602	15475972.389	0.0243	5698.417	6206.177	2268735.96	1209913.21	3478649.17	3375839.55	0.2248	0.0802	-0.3981
2	59.209	15425487.793	0.0255	5684.362	6181.398	2266090.59	1206034.32	3472124.91	3269924.10	0.2251	0.0820	-0.3930
3	58.821	15373588.429	0.0267	5669.912	6155.925	2263387.76	1202043.66	3465431.42	3167165.84	0.2254	0.0839	-0.3878
4	58.439	15320229.537	0.0280	5655.057	6129.735	2260623.55	1197934.01	3458557.56	3067465.38	0.2258	0.0858	-0.3824
5	58.062	15265364.947	0.0294	5639.782	6102.807	2257793.78	1193697.70	3451491.48	2970726.25	0.2261	0.0878	-0.3768
6	57.691	15208947.034	0.0308	5624.074	6075.116	2254893.99	1189326.57	3444220.56	2876854.84	0.2265	0.0898	-0.3711
7	57.326	15150926.672	0.0323	5607.921	6046.638	2251919.46	1184811.93	3436731.39	2785760.32	0.2268	0.0919	-0.3652
8	56.966	15091253.188	0.0338	5591.307	6017.349	2248865.13	1180144.56	3429009.69	2697354.56	0.2272	0.0941	-0.3592
9	56.613	15029874.313	0.0354	5574.218	5987.224	2245725.63	1175314.65	3421040.28	2611552.00	0.2276	0.0963	-0.3530
10	56.267	14966736.130	0.0371	5556.640	5956.234	2242495.24	1170311.75	3412807.00	2528269.61	0.2280	0.0986	-0.3466
11	55.927	14901783.024	0.0388	5538.556	5924.354	2239167.88	1165124.77	3404292.65	2447426.78	0.2284	0.1010	-0.3400
12	55.594	14834957.628	0.0406	5519.951	5891.555	2235737.05	1159741.90	3395478.94	2368945.27	0.2289	0.1035	-0.3333
13	55.267	14766200.765	0.0424	5500.808	5857.808	2232195.85	1154150.57	33866346.42	2292749.13	0.2293	0.1060	-0.3263
14	54.948	14695451.397	0.0444	5481.111	5823.083	2228536.95	1148337.44	3376874.39	2218764.58	0.2298	0.1086	-0.3191
15	54.636	14622646.562	0.0464	5460.841	5787.349	2224752.51	1142288.30	3367040.81	2146920.01	0.2303	0.1113	-0.3118
16	54.332	14547721.312	0.0485	5439.981	5750.574	2220834.21	1135988.03	3356822.24	2077145.85	0.2307	0.1141	-0.3042
17	54.036	14470608.654	0.0507	5418.512	5712.726	2216773.18	1129420.58	3346193.76	2009374.56	0.2312	0.1170	-0.2964
18	53.747	14391239.486	0.0530	5396.414	5673.770	2212559.98	1122568.85	3335128.83	1943540.50	0.2317	0.1199	-0.2884
19	53.467	14309542.526	0.0554	5373.669	5633.672	2208184.58	1115414.65	3323599.23	1879579.91	0.2323	0.1230	-0.2801
20	53.196	14225444.248	0.0578	5350.255	5592.395	2203636.27	1107938.66	3311574.93	1817430.86	0.2328	0.1261	-0.2716
21	52.933	14138868.808	0.0604	5326.151	5549.902	2198903.67	1100120.30	3299023.97	1757033.12	0.2333	0.1294	-0.2629
22	52.679	14049737.973	0.0631	5301.336	5506.155	2193974.67	1091937.70	3285912.37	1698328.19	0.2339	0.1327	-0.2538
23	52.434	13957971.045	0.0660	5275.787	5461.114	2188836.37	1083367.58	3272203.94	1641259.19	0.2344	0.1362	-0.2446
24	52.199	13863484.783	0.0689	5249.481	5414.738	2183475.03	1074385.19	3257860.22	1585770.81	0.2350	0.1398	-0.2350
25	51.974	13766193.324	0.0720	5222.394	5366.986	2177876.04	1064964.21	3242840.24	1531809.27	0.2356	0.1434	-0.2252
26	51.759	13666008.099	0.0753	5194.501	5317.813	2172023.84	1055076.62	3227100.46	1479322.25	0.2361	0.1472	-0.2150
27	51.555	13562837.748	0.0786	5165.777	5267.175	2165901.89	1044692.63	3210594.52	1428258.87	0.2367	0.1511	-0.2046
28	51.361	13456588.033	0.0822	5136.196	5215.026	2159492.55	1033780.55	3193273.10	1378569.60	0.2373	0.1552	-0.1939
29	51.178	13347161.746	0.0859	5105.730	5161.317	2152777.06	1022306.68	3175083.74	1330206.25	0.2379	0.1594	-0.1828
30	51.007	13234458.619	0.0898	5074.352	5106.001	2145735.46	1010235.14	3155970.60	1283121.89	0.2385	0.1637	-0.1714
31	50.847	13118375.220	0.0939	5042.033	5049.025	2138346.50	997577.80	3135874.30	1237270.84	0.2390	0.1681	-0.1597
32	50.699	12998804.861	0.0982	5008.743	4990.337	2130587.56	984144.07	3114731.62	1192608.58	0.2396	0.1727	-0.1476
33	50.564	12875637.492	0.1027	4974.452	4929.885	2122434.55	970040.78	3092475.34	1149091.75	0.2402	0.1774	-0.1351
34	50.442	12748759.595	0.1074	4939.127	4867.611	2113861.87	955172.03	3069033.90	1106678.10	0.2407	0.1823	-0.1223
35	50.333	12618054.075	0.1124	4902.737	4803.458	2104842.24	939488.95	3044331.20	1065326.41	0.2413	0.1873	-0.1091
36	50.237	12483400.149	0.1177	4865.248	4737.367	2095346.63	922939.59	3018286.22	1024996.50	0.2418	0.1925	-0.0955
37	50.156	12344673.227	0.1232	4826.625	4669.278	2085344.16	905468.66	2990812.81	985649.16	0.2423	0.1978	-0.0814
38	50.089	12201744.793	0.1291	4786.832	4599.126	2074801.93	887017.35	2961819.28	947246.14	0.2427	0.2033	-0.0670
39	50.037	12054482.282	0.1353	4745.832	4526.847	2063684.97	867523.10	2931208.07	909750.08	0.2432	0.2090	-0.0521
40	50.000	11902748.952	0.1418	4703.588	4452.373	2051956.03	846919.35	2898875.39	873124.49	0.2435	0.2149	-0.0368
<b>Σύνολο</b>		575989052.47		217340.800	225727.702	89774440.15	44361301.50	134135741.65	79643226.07			-10.000



Πίνακας Β.3: Αναλυτικά αποτελέσματα καθεστώτος πλήρους συνεργασίας

t (έτη)	H <sub>i</sub> (m)	Q <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	Σκωδής τιμή (€/m <sup>3</sup> )	q <sub>h,i</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	q <sub>e,i</sub> (m <sup>3</sup> /ha)	NB <sub>h,i</sub> (€)	NB <sub>s,i</sub> (€)	NB <sub>tot,i</sub> (€)	Παρούσα αξία NB <sub>tot,i</sub> (€)	Nb <sub>tot,i</sub> (€/m <sup>3</sup> )	P <sub>i</sub> (€/m <sup>3</sup> )	ΔH <sub>i</sub> (m)
0	60.000	15007549.825	0.0369	5568.003	5976.266	2437488.75	1345068.37	3782557.11	3782557.11	0.2520	0.0568	-
1	59.654	14975435.847	0.0377	5559.062	5960.504	2435821.07	1342818.99	3778640.06	3666964.37	0.2523	0.0579	-0.3459
2	59.312	14942452.055	0.0385	5549.879	5944.315	2434133.19	1340527.32	3774660.50	3554841.39	0.2526	0.0591	-0.3425
3	58.972	14908570.893	0.0394	5540.446	5927.686	2432423.63	1338190.60	3770614.23	3446081.93	0.2529	0.0603	-0.3391
4	58.637	14873763.942	0.0403	5530.755	5910.602	2430690.84	1335805.88	3766496.72	3340582.92	0.2532	0.0615	-0.3356
5	58.305	14838001.883	0.0412	5520.799	5893.049	2428933.16	1333370.05	3762303.21	3238244.38	0.2536	0.0627	-0.3320
6	57.977	14801254.476	0.0422	5510.568	5875.013	2427148.81	1330879.78	3758028.59	3138969.33	0.2539	0.0640	-0.3283
7	57.652	14763490.527	0.0431	5500.054	5856.478	2425335.90	1328331.54	3753667.44	3042663.69	0.2543	0.0654	-0.3244
8	57.332	14724677.861	0.0442	5489.248	5837.428	2423492.43	1325721.58	3749214.01	2949236.20	0.2546	0.0667	-0.3205
9	57.015	14684783.286	0.0452	5478.141	5817.847	2421616.26	1323045.90	3744662.16	2858598.31	0.2550	0.0681	-0.3165
10	56.703	14643772.568	0.0463	5466.723	5797.718	2419705.11	1320300.26	3740005.36	2770664.12	0.2554	0.0696	-0.3123
11	56.395	14601610.392	0.0475	5454.984	5777.024	2417756.54	1317480.14	3735236.69	2685350.31	0.2558	0.0711	-0.3080
12	56.091	14558260.331	0.0487	5442.915	5755.747	2415767.98	1314580.76	3730348.75	2602576.01	0.2562	0.0727	-0.3037
13	55.792	14513684.810	0.0499	5430.505	5733.868	2413736.67	1311597.01	3725333.68	2522262.78	0.2567	0.0743	-0.2991
14	55.498	14467845.071	0.0512	5417.742	5711.369	2411659.67	1308523.47	3720183.14	2444334.50	0.2571	0.0759	-0.2945
15	55.208	14420701.134	0.0525	5404.617	5688.230	2409533.87	1305354.35	3714888.23	2368717.31	0.2576	0.0777	-0.2897
16	54.923	14372211.760	0.0539	5391.117	5664.431	2407355.94	1302083.55	3709349.49	2295339.55	0.2581	0.0794	-0.2848
17	54.643	14322334.411	0.0553	5377.230	5639.950	2405122.34	1298704.52	3703826.86	2224131.65	0.2586	0.0812	-0.2798
18	54.369	14271025.207	0.0568	5362.945	5614.767	2402829.30	1295210.33	3698039.63	2155026.13	0.2591	0.0831	-0.2746
19	54.099	14218238.888	0.0583	5348.249	5588.858	2400472.80	1291593.62	3692066.42	2087957.48	0.2597	0.0851	-0.2693
20	53.836	14163928.765	0.0599	5333.128	5562.202	2398048.56	1287846.53	3685895.09	2022862.12	0.2602	0.0871	-0.2638
21	53.578	14108046.681	0.0616	5317.570	5534.774	2395552.05	1283960.72	3679512.77	1959678.33	0.2608	0.0891	-0.2581
22	53.325	14054295.959	0.0633	5301.560	5506.550	2392978.40	1279927.32	3672905.72	1898346.22	0.2614	0.0913	-0.2523
23	53.079	13991366.360	0.0651	5285.085	5477.505	2390322.46	1275736.90	3666059.37	1838807.65	0.2620	0.0934	-0.2463
24	52.839	13930464.027	0.0670	5268.129	5447.613	2387578.74	1271379.43	3658958.17	1781006.14	0.2627	0.0957	-0.2401
25	52.605	13867781.440	0.0689	5250.677	5416.847	2384741.38	1266844.22	3651585.61	1724886.91	0.2633	0.0980	-0.2338
26	52.378	13803262.360	0.0709	5232.714	5385.180	2381804.17	1262119.94	3643924.11	1670396.72	0.2640	0.1005	-0.2273
27	52.157	13736848.778	0.0730	5214.224	5352.583	2378760.46	1257194.52	3635954.98	1617483.90	0.2647	0.1029	-0.2206
28	51.943	13668480.854	0.0752	5195.189	5319.027	2375603.20	1252055.11	3627658.31	1566098.27	0.2654	0.1055	-0.2136
29	51.737	13598096.865	0.0775	5175.594	5284.481	2372324.88	1246688.06	3619012.93	1516191.08	0.2661	0.1082	-0.2065
30	51.538	13525633.143	0.0799	5155.419	5248.914	2368917.49	1241078.85	3609996.34	1467714.98	0.2669	0.1109	-0.1992
31	51.346	13451024.013	0.0824	5134.647	5212.295	2365372.52	1235212.03	3600584.55	1420623.99	0.2677	0.1137	-0.1917
32	51.162	13374201.732	0.0850	5113.258	5174.589	2361680.91	1229071.18	3590752.08	1374873.43	0.2685	0.1166	-0.1839
33	50.986	13295096.421	0.0877	5091.234	5135.763	2357833.00	1222638.81	3580471.81	1330419.87	0.2693	0.1196	-0.1759
34	50.819	13213636.000	0.0905	5068.555	5095.781	2353818.51	1215896.35	3569714.86	1287221.12	0.2702	0.1227	-0.1677
35	50.659	13129746.118	0.0934	5045.199	5054.606	2349626.52	1208824.02	3558450.55	1245236.17	0.2710	0.1259	-0.1592
36	50.509	13043350.082	0.0965	5021.145	5012.201	2345245.39	1201400.80	3546646.18	1204425.18	0.2719	0.1292	-0.1504
37	50.368	12954368.781	0.0997	4996.372	4968.527	2340662.71	1193604.31	3534267.02	1164749.37	0.2728	0.1326	-0.1414
38	50.235	12862720.613	0.1031	4970.856	4923.545	2335865.30	1185410.77	3521276.06	1126171.07	0.2738	0.1361	-0.1322
39	50.113	12768321.402	0.1066	4944.574	4877.212	2330839.11	1176794.86	3507633.97	1088653.63	0.2747	0.1397	-0.1226
40	50.000	12671084.323	0.1103	4917.502	4829.486	2325569.21	1167729.67	3493298.88	1052161.40	0.2757	0.1434	-0.1128
<b>Σύνολο</b>		576117666.89		217376.608	225790.828	98094169.22	52370602.40	150464771.63	88533306.99			-10.000

*Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.*