



# «Βιώσιμη διαχείριση υπόγειων νερών που εκβάλλουν στη θάλασσα»

Ιωάννης Κωτσής

ΠΜΣ «Διαχείριση Περιβάλλοντος»

Σχολή Τεχνολογίας

Τμήμα Περιβάλλοντος

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Κακάβας Κωνσταντίνος

Λάρισα 2024-2025

## Περίληψη

Η εργασία επικεντρώνεται στη διαχείριση των υπόγειων υδάτων που εκβάλλουν σε θαλάσσια περιβάλλοντα και τον ρόλο τους στη βιώσιμη ανάπτυξη. Τα υπόγεια νερά αποτελούν βασικό φυσικό πόρο, καλύπτοντας μεγάλο μέρος των αναγκών ύδρευσης και άρδευσης, ιδιαίτερα σε παράκτιες και νησιωτικές περιοχές. Ωστόσο, η αλληλεπίδραση τους με το θαλάσσιο περιβάλλον δημιουργεί προκλήσεις, όπως η υφαλμύρωση και η ρύπανση, οι οποίες καθιστούν απαραίτητη την εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης.

Η μελέτη ξεκινά με τη γεωλογική και υδρογεωλογική ανάλυση των υπόγειων υδάτων, δίνοντας έμφαση στους καρστικούς υδροφορείς, οι οποίοι αποτελούν σημαντικούς ταμιευτήρες νερού σε πολλές περιοχές της Ελλάδας. Οι καρστικοί υδροφορείς σχηματίζονται μέσω της διάλυσης ασβεστολιθικών και δολομιτικών πετρωμάτων, δημιουργώντας δίκτυα υπόγειων καναλιών και σπηλαίων που επιτρέπουν τη γρήγορη κίνηση του νερού. Παρόλο που η υψηλή διαπερατότητά τους εξασφαλίζει γρήγορη ανανέωση των αποθεμάτων, τους καθιστά επίσης ευάλωτους στη ρύπανση και στην υφαλμύρωση, φαινόμενα που εντείνονται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες και την κλιματική αλλαγή.

Ένα από τα βασικά σημεία της εργασίας είναι οι υποθαλάσσιες πηγές γλυκού νερού, οι οποίες εκρέουν στη θάλασσα μέσω φυσικών ρωγμών και γεωλογικών σχηματισμών. Αυτές οι πηγές, αν και παραμένουν σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτες, έχουν σημαντικές προοπτικές για την υδροδότηση περιοχών με ελλείψεις σε γλυκό νερό. Η εργασία αναλύει τις μεθόδους εντοπισμού και διαχείρισης αυτών των πηγών, προτείνοντας τεχνικές όπως η κατασκευή φραγμάτων ανάσχεσης και η χρήση υποβρύχιων γεωτρήσεων για την αειφόρο αξιοποίησή τους.

Ιδιαίτερη αναφορά γίνεται στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα υπόγεια νερά, καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και οι μεταβολές στα μοτίβα των βροχοπτώσεων επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των υδάτινων αποθεμάτων. Παράλληλα, οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως η υπεράντληση, η ανεξέλεγκτη αστικοποίηση και η βιομηχανική ρύπανση, επιδεινώνουν τα προβλήματα που σχετίζονται με τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτων.

Το νομοθετικό και θεσμικό πλαίσιο αποτελεί άλλο ένα σημαντικό μέρος της μελέτης. Η εργασία εξετάζει την ευρωπαϊκή και ελληνική νομοθεσία που αφορά στη διαχείριση των υδάτων, με έμφαση στην Οδηγία 2000/60/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία προωθεί την ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Παρά την ύπαρξη θεσμικού πλαισίου, διαπιστώνονται ελλείψεις στην εφαρμογή και επιτήρηση των σχετικών κανονισμών, γεγονός που υπονομεύει τη βιώσιμη αξιοποίηση των υπόγειων νερών.

Τέλος, η εργασία προτείνει στρατηγικές για τη βιώσιμη διαχείριση των υπόγειων υδάτων, οι οποίες περιλαμβάνουν τη μείωση της υπεράντλησης, την εφαρμογή τεχνικών τεχνητού εμπλουτισμού, τη βελτίωση της νομοθεσίας και τη χρήση καινοτόμων τεχνολογιών για την παρακολούθηση της ποιότητας και της ποσότητας των υδάτων. Η προστασία των υπόγειων νερών κρίνεται ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας και την αντιμετώπιση των προκλήσεων που σχετίζονται με την κλιματική αλλαγή και την αύξηση της ζήτησης για γλυκό νερό.

## Abstract

This study focuses on the management of groundwater discharging into marine environments and its role in sustainable development. Groundwater is a crucial natural resource, providing a significant portion of water supply for drinking, irrigation, and industrial use, particularly in coastal and island regions. However, its interaction with seawater poses challenges such as salinization and pollution, making the implementation of effective management strategies essential.

The research begins with a geological and hydrogeological analysis of groundwater, emphasizing karst aquifers, which serve as important water reservoirs in many regions of Greece. Karst aquifers form through the dissolution of limestone and dolomite rocks, creating complex networks of underground channels and caves that facilitate rapid water movement. While their high permeability ensures quick replenishment of water reserves, it also makes them highly vulnerable to contamination and seawater intrusion-issues exacerbated by human activities and climate change.

A key aspect of this study is the investigation of submarine freshwater springs, which discharge into the seabed through natural fractures and geological formations. Despite being largely underutilized, these springs have significant potential for supplying freshwater to regions facing water shortages. The study explores methods for detecting and managing these springs, proposing techniques such as the construction of retention barriers and the use of underwater drilling to enable their sustainable exploitation.

Special attention is given to the impacts of climate change on groundwater resources. Rising temperatures, sea-level rise, and changes in precipitation patterns affect both the availability and quality of groundwater. Additionally, human activities, including over-extraction, uncontrolled urbanization, and industrial pollution, further exacerbate challenges related to sustainable water management.

The legal and institutional framework is another crucial aspect of the study. The research examines European and Greek legislation on water management, with a focus on the EU Water Framework Directive 2000/60/EC, which promotes integrated water resource management. Despite the existence of a regulatory framework,

significant gaps in enforcement and oversight hinder the sustainable use of groundwater resources.

Finally, the study proposes strategies for sustainable groundwater management, including reducing overextraction, implementing artificial recharge techniques, improving legislation, and utilizing innovative technologies for monitoring water quality and quantity. Protecting groundwater is vital for maintaining ecological balance and addressing challenges related to climate change and the increasing demand for freshwater.

## Περιεχόμενα

|                                                                         |           |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Περίληψη .....</b>                                                   | <b>2</b>  |
| <b>Abstract.....</b>                                                    | <b>4</b>  |
| <b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>                                          | <b>9</b>  |
| <b>Κατάλογος Πινάκων .....</b>                                          | <b>12</b> |
| <b>1. Εισαγωγή .....</b>                                                | <b>13</b> |
| 1.1 Η σημασία των υπόγειων νερών και η διαχείρισή τους .....            | 13        |
| 1.2 Γεωλογική και υδρογεωλογική σημασία των καρστικών υδάτων.....       | 14        |
| 1.3 Υποθαλάσσιες πηγές και η δυνατότητα αξιοποίησής τους .....          | 16        |
| 1.4 Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις στα υπόγεια νερά .....              | 19        |
| 1.5 Νομοθετικό και θεσμικό πλαίσιο διαχείρισης των υπόγειων Νερών.....  | 19        |
| <b>2. Σκοπός της Έρευνας .....</b>                                      | <b>20</b> |
| <b>3. Μεθοδολογία έρευνας .....</b>                                     | <b>22</b> |
| 3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....                                      | 22        |
| 3.2 Πηγές πληροφόρησης.....                                             | 22        |
| 3.3 Θεματικοί άξονες βιβλιογραφικής ανασκόπησης .....                   | 22        |
| 3.3.1 Γεωλογική και υδρογεωλογική ανάλυση .....                         | 23        |
| 3.3.2 Δομή και χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων .....            | 23        |
| 3.3.3 Ιδιαιτερότητες των υποθαλάσσιων πηγών.....                        | 23        |
| 3.3.4 Ανάλυση περιβαλλοντικών και κλιματικών παραμέτρων.....            | 24        |
| 3.3.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αξιοποίησης των υποθαλάσσιων πηγών | 24        |
| 3.4 Νομοθετικό και θεσμικό πλαίσιο.....                                 | 24        |
| <b>4. Υπόγειες πηγές και υδροφορείς.....</b>                            | <b>25</b> |
| 4.1 Δομή και χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων .....              | 25        |
| 4.1.1 Πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες.....                          | 25        |
| 4.1.2 Σχισμές και ρήγματα .....                                         | 26        |
| 4.1.3 Ζώνες καρστικού υδροφορέα.....                                    | 26        |
| 4.2 Χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων.....                        | 27        |
| 4.2.1 Υψηλή διαπερατότητα και ταχεία ροή.....                           | 27        |
| 4.2.2 Χαμηλή ρυθμιστική ικανότητα .....                                 | 27        |
| 4.2.3 Ευαισθησία στη ρύπανση.....                                       | 27        |

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3 Διαχείριση και προστασία των καρστικών υδροφορέων .....                                 | 27        |
| 4.3.1 Σημασία για την ύδρευση και την άρδευση.....                                          | 27        |
| 4.3.2 Προκλήσεις στη διαχείριση .....                                                       | 28        |
| 4.4 Συμπεράσματα .....                                                                      | 28        |
| 4.5 Υποθαλάσσιες πηγές νερού: δομή, χαρακτηριστικά και διαχείριση.....                      | 29        |
| 4.6 Δομή και σχηματισμός των υποθαλάσσιων πηγών .....                                       | 29        |
| 4.6.1 Υδρογεωλογικοί Μηχανισμοί Σχηματισμού .....                                           | 29        |
| 4.6.2 Τύποι υποθαλάσσιων πηγών .....                                                        | 30        |
| 4.7 Χαρακτηριστικά των υποθαλάσσιων πηγών.....                                              | 30        |
| 4.7.1 Σχέση με το θαλασσινό νερό .....                                                      | 30        |
| 4.7.2 Ρυπαντικές επιδράσεις.....                                                            | 30        |
| 4.7.3 Οικολογικός ρόλος.....                                                                | 30        |
| 4.8 Διαχείριση και Προστασία των Υποθαλάσσιων Πηγών.....                                    | 30        |
| 4.8.1 Ανάγκη προστασίας .....                                                               | 30        |
| 4.8.2 Μέτρα διαχείρισης.....                                                                | 31        |
| 4.9 Συμπεράσματα .....                                                                      | 31        |
| 4.10 Νομοθεσία για τη διαχείριση των υπόγειων και υποθαλάσσιων υδροφορέων στην Ελλάδα ..... | 31        |
| 4.11 Γενικό νομικό πλαίσιο για τη διαχείριση των υδάτων .....                               | 31        |
| 4.12 Νομοθεσία για τους υπόγειους υδροφορείς .....                                          | 32        |
| 4.13 Νομοθεσία για τις υποθαλάσσιες υδροπηγές .....                                         | 32        |
| 4.14 Ρυθμιστικές αρχές και διαχειριστικά σχέδια .....                                       | 32        |
| 4.15 Διεθνείς και ευρωπαϊκές επιρροές στη νομοθεσία .....                                   | 33        |
| 4.16 Προκλήσεις και μελλοντικές τάσεις .....                                                | 33        |
| 4.17 Συμπεράσματα .....                                                                     | 33        |
| <b>5. Θερμές πηγές που εκβάλλουν στη θάλασσα στην Ελλάδα .....</b>                          | <b>34</b> |
| 5.1 Θερμές πηγές Λουτρακίου, Κορινθία.....                                                  | 34        |
| 5.2 Θερμές πηγές Καμένων Βούρλων, Φθιώτιδα.....                                             | 35        |
| 5.3 Θερμές πηγές Θερμοπυλών, Φθιώτιδα .....                                                 | 36        |
| 5.4 Θερμές πηγές Πολιχνίτου, Λέσβος .....                                                   | 37        |
| 5.5 Θερμές πηγές Καρλοβάσσου, Σάμος.....                                                    | 39        |
| 5.6 Συμπεράσματα .....                                                                      | 40        |

|                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Κεφάλαιο 6. Υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες με ψυχρό νερό που εκβάλλουν στη Θάλασσα στην Ελλάδα .....</b>          | <b>41</b> |
| 6.1 Υδροφόρος ορίζοντας Καλυβίων, Αττική.....                                                                      | 41        |
| 6.2 Υδροφόρος ορίζοντας Πολυχνίτου, Λέσβος.....                                                                    | 42        |
| 6.3 Υδροφόρος ορίζοντας Αργολικού κόλπου, Πελοπόννησος.....                                                        | 43        |
| 6.4 Υδροφόρος ορίζοντας Θήρας, Κυκλάδες .....                                                                      | 51        |
| 6.6 Υδροφόρος ορίζοντας του Αλμυρού, Μαγνησία.....                                                                 | 54        |
| 6.7 Υδροφόρος ορίζοντας του Ζάρακα, Πελοπόννησος .....                                                             | 58        |
| 6.8 Υδροφόρος ορίζοντας Αλμυρού, Κρήτη.....                                                                        | 62        |
| <b>Κεφάλαιο 7. Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων .....</b>                                                        | <b>70</b> |
| 7.1 Διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων στην Ελλάδα και αξιο-<br>ποίησης τους με όραμα τη βιώσιμη ανάπτυξη..... | 72        |
| 7.2 Νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων.....                                                   | 73        |
| 7.3 Προβλήματα και απειλές για τα υπόγεια νερά .....                                                               | 74        |
| 7.4 Συμπεράσματα .....                                                                                             | 76        |
| <b>Κεφάλαιο 8. Κλιματική αλλαγή και υπόγεια νερά.....</b>                                                          | <b>77</b> |
| <b>Κεφάλαιο 9. Τεχνολογίες παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων.....</b>                                             | <b>90</b> |
| <b>Κεφάλαιο 10. Βιβλιογραφία .....</b>                                                                             | <b>99</b> |
| 8.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.....                                                                                   | 99        |
| 8.2 Ελληνική βιβλιογραφία .....                                                                                    | 108       |

## Κατάλογος Εικόνων

| Αριθμός   | Λεζάντα                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Σελίδα |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Εικόνα 1  | Σχηματική απεικόνιση του παγκόσμιου κύκλου του νερού (Kuang et al., 2024)                                                                                                                                                                                                                                                                       | 12     |
| Εικόνα 2  | Σχηματική απεικόνιση των ανθρακικών πετρωμάτων της Μεσογείου (ανοιχτό γκρι), στο οποίο επισημαίνονται οι κύριες πηγές (μαύροι κύκλοι) καθώς και οι παράκτιες και υποθαλάσσιες καρστικές πηγές (κόκκινοι κύκλοι). Προσαρμογή από Bakalowicz (2015).                                                                                              |        |
| Εικόνα 3  | Υποθαλάσσια καρστική πηγή ("Vrulja") στα παράλια της Κροατίας, βόρεια του Brela. Η ισχυρή υδραυλική πίεση καθιστά ορατή την άνοδο του γλυκού νερού μέσω του καρστικού αγωγού (Πηγή: <a href="https://commons.wikimedia.org/">https://commons.wikimedia.org/</a> ).                                                                              | 16     |
| Εικόνα 4  | Εκτιμώμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους ανανεώσιμους υπόγειους υδατικούς πόρους έως τα μέσα του 21ου αιώνα, βάσει σεναρίου χαμηλών εκπομπών. Με κόκκινο συμβολίζονται οι περιοχές με τη μεγαλύτερη ευαλωτότητα. Προσαρμοσμένο από Royal Meteorological Society ( <a href="https://www.metlink.org/">https://www.metlink.org/</a> ). | 17     |
| Εικόνα 5  | Δομή και σχηματισμός καρστικών υδροφορέων (Προσαρμογή από Λυμπεροπούλου, 2019).                                                                                                                                                                                                                                                                 | 22     |
| Εικόνα 6  | Σχηματική απεικόνιση των τριών βασικών ζωνών ενός καρστικού υδροφορέα (Πηγή: Thompson Rivers University, <a href="https://environmental-geol.pressbooks.tru.ca/">https://environmental-geol.pressbooks.tru.ca/</a> ).                                                                                                                           | 23     |
| Εικόνα 7  | Καρστική πηγή στην Άνω Αρκαδία Πελοποννήσου. Πηγή: Wikimedia Commons ( <a href="https://commons.wikimedia.org/">https://commons.wikimedia.org/</a> )                                                                                                                                                                                            | 25     |
| Εικόνα 8  | Υποθαλάσσια καρστική πηγή νερού στο Κιβέρι του Αργολικού Κόλπου, Πελοπόννησος, Ελλάδα (πηγή Wikimedia Commons <a href="https://commons.wikimedia.org/">https://commons.wikimedia.org/</a> ).                                                                                                                                                    | 26     |
| Εικόνα 9  | Θερμές πηγές Λουτρακίου, Κορινθία.                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 32     |
| Εικόνα 10 | Η τοποθεσία των θερμών πηγών «Καμένων Βούρλων», Φθιώτιδα.                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 32     |
| Εικόνα 11 | Φωτογραφία από τις θερμές πηγές των Θερμοπυλών (πηγή: Hellenic Republic Asset Development Fund, <a href="https://hradf.com/">https://hradf.com/</a> ).                                                                                                                                                                                          | 33     |
| Εικόνα 12 | Τοποθεσία θερμών πηγών Πολιχνίτου, Λέσβος.                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 34     |
| Εικόνα 13 | Οι θερμές πηγές Καρλοβάσσου στη Σάμου ως περιοχή μελέτης.                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 34     |
| Εικόνα 14 | Η περιοχή μελέτης: ο υδροφόρος ορίζοντας των Καλυβίων, Αττικής                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 36     |
| Εικόνα 15 | Ο γεωλογικός χάρτης της Λέσβου όπου απεικονίζονται οι τοποθεσίες των θερμών πηγών ( συμπεριλαμβανομένης της περιοχής Πολυχνίτου) και πηγαδιών (Mendrinis et al., 2010) .                                                                                                                                                                        | 37     |
| Εικόνα 16 | Η Αργολική χερσόνησος. Προσαρμογή από Matiatos & Alexopoulos (2011).                                                                                                                                                                                                                                                                            | 39     |
| Εικόνα 17 | Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης στον οποίο απεικονίζονται οι περιοχές δειγματοληψίας των υπόγειων υδάτων (Matiatos & Alexopoulos, 2011).                                                                                                                                                                                   | 42     |
| Εικόνα 18 | (Α) Πιεζομετρικός χάρτης και (Β) χωρική κατανομή ιόντων                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 45     |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|           | χλωρίου (Cl <sup>-</sup> ) του Αργολικού υδροφορέα. Προσαρμογή από Mitropapas et al., (2016).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
| Εικόνα 19 | Γεωλογικός χάρτης Θήρας έκδοσης ΙΓΜΕ κλ. 1:50.000 (Στράντζαλης, 2008).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 47 |
| Εικόνα 20 | Χάρτης που δείχνει τις τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σταθμούς παρακολούθησης υδροφορέων στο νησί της Ρόδου για: (α) 2019 και (β) 2020 (Alexakis, 2022).                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 48 |
| Εικόνα 21 | Χάρτης της λεκάνης του Αλμυρού Μαγνησίας στον οποίο απεικονίζονται επίσης τα υδρογραφικά δίκτυα (Sidiropoulos, 2016).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 49 |
| Εικόνα 22 | Αποτελέσματα προσομοίωσης υπόγειων υδάτων για τις υπάρχουσες γεωργικές και διαχειριστικές συνθήκες υδάτων και για το νερό που παρέχεται μέσω άντλησης υπόγειων υδάτων: (α) υδραυλικές ποσότητες, (β) έκπλυση νιτρικών, (γ) συγκεντρώσεις χλωριούχων ιόντων και (δ) συγκέντρωση νιτρικών ιόντων τον Σεπτέμβριο του 2018 (Lyra et al., 2022).                                                                                                                             | 51 |
| Εικόνα 23 | Γεωλογική τομή σε κατεύθυνση Δ – Α που δείχνει την ανύψωση των κοιτασμάτων του Τυρού. Τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν τις θέσεις όπου πραγματοποιήθηκαν γεωηλεκτρικές βυθομετρήσεις προκειμένου να προσδιοριστεί το απόλυτο υψόμετρο των κοιτασμάτων του Τυρού. Στην ανατολική πλευρά της περιοχής της Κρεμαστής, το βάθος των κοιτασμάτων του Τυρού έχει προσδιοριστεί με βάση στρωματογραφικά, τεκτονικά και υδρογεωλογικά δεδομένα (Lappas, Sabatakakis & Stefouli, 2011) | 54 |
| Εικόνα 24 | Συνδυαστικός χάρτης υδρογεωλογικών πληροφοριών. Το έδαφος με την επιφανειακή καρστικοποίηση και οι εκροές έχουν εξαχθεί από την δορυφορική εικόνα. Τα σκούρα μπλε βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση ροής των υπόγειων υδάτων εντός του καρστικού υδροφορέα. Το διάγραμμα με ροζέτα δείχνει τις κύριες τεκτονικές κατευθύνσεις στους γεωλογικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000, στην περιοχή του πιλοτικού έργου (Lappas, Sabatakakis & Stefouli, 2011).                       | 56 |
| Εικόνα 25 | Η τοποθεσία της πηγής Αλμυρού, στην περιοχή Ηρακλείου στην Κρήτη (Archontelis & Ganoulis, 2014).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 59 |
| Εικόνα 26 | Γενικός χάρτης της περιοχής τροφοδοσίας: γεωλογική δομή, υψόμετρα, βουνοκορφές και πόλεις (Γιάνναρου, 2009).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 61 |
| Εικόνα 27 | Η πηγή Αλμυρού, στη βορειοανατολική άκρη του Ψηλορείτη (Πηγή: UNESCO sites in Crete, <a href="https://www.unescositesincrete.gr/">https://www.unescositesincrete.gr/</a> ).                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 63 |
| Εικόνα 28 | Πιθανές πηγές ρύπανσης των υπόγειων όγκων από ανθρώπινες δραστηριότητες. Πηγή: International Atomic Energy Agency ( <a href="https://www.iaea.org/">https://www.iaea.org/</a> ).                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 68 |
| Εικόνα 29 | Χάρτες Κινδύνου και Ρύπανσης του καρστικού υδροφορέα Δαμάσι-Τιτάνου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο PaPRIKaRa. Εστιασμένες περιοχές στον ποταμό Τιταρήσιο (α) και τον ποταμό Πηνειό (β) (Kazakis et al., 2018).                                                                                                                                                                                                                                                               | 70 |
| Εικόνα 30 | Σχηματικό μοντέλο των κύριων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υπόγειους υδροφορείς (Taylor et al., 2013)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 73 |

|           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 31 | Απεικόνιση των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και της αλλαγής χρήσης γης στα υπόγεια ύδατα. Ο συνδυασμένος αντίκτυπος θα επηρεάσει όλες τις διαφορετικές διεργασίες των υπόγειων υδάτων: Α-Διάχυση, Β-Απορρόφηση, Γ-Βασική ροή, Δ-Απόρριψη από τον υδροφορέα και Ε-Αποθήκευση σε ρωγμές και πόρους. Η άντληση υπόγειων υδάτων και η κλιματική αλλαγή μπορούν να επηρεάσουν τόσο τους περιφερειακούς όσο και τους παγκόσμιους υδροφορείς (Amanambu et al., 2020).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 75 |
| Εικόνα 32 | Εννοιολογική απεικόνιση τεσσάρων διαφορετικών μηχανισμών επαναφόρτισης στο πλαίσιο του κλίματος του 20ού αιώνα (α) και του μελλοντικού κλίματος (β). Ανάκτηση από Meixner et al., (2016).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 78 |
| Εικόνα 33 | Μοντέλο παρακολούθησης των προβλεπόμενων αλλαγών στην επαναφόρτιση σημαντικών υδροφορέων στη δυτική ενδοχώρα των ΗΠΑ. Για κάθε υδροφορέα, η αλλαγή σε κάθε μηχανισμό επαναφόρτισης αντιπροσωπεύεται από ένα βέλος με πλάτος ανάλογο με το κλάσμα της συνολικής επαναφόρτισης, με βάση τις τρέχουσες κλιματικές συνθήκες. Η συνολική επαναφόρτιση αντιπροσωπεύεται από το σκούρο γκρι βέλος,. Η κατεύθυνση του βέλους (πάνω, κάτω ή αμφίδρομη) υποδεικνύει την κατεύθυνση της αλλαγής που αναμένεται. Δύο βέλη που δείχνουν αντίθετες κατευθύνσεις υποδεικνύουν ίση πιθανότητα θετικών και αρνητικών αλλαγών. Τα γράμματα L (χαμηλή), M (μέτρια) και H (υψηλή) αναφέρονται στο ποσοστό εμπιστοσύνης εκτίμησης της αλλαγής. Οι ποσοτικές εκτιμήσεις του μεγέθους αλλαγής εμφανίζονται ως ποσοστά. Προσαρμογή από Meixner et al., (2016). | 80 |
| Εικόνα 34 | Η Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΟΔΥΠ) είναι μια προσέγγιση για τη διαχείριση του νερού και των σχετικών φυσικών πόρων σε επίπεδο κοινότητας. Η αφίσα παρουσιάζει τις καλές πρακτικές για τη βιώσιμη χρήση του νερού. Πηγή: WWF Nepal ανάκτηση μέσω <a href="https://wwf.panda.org/">https://wwf.panda.org/</a> .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 82 |
| Εικόνα 35 | Διαδικασία κατασκευής και εφαρμογής ενός προβλεπτικού εννοιολογικού μοντέλου για υδρογεωλογικά συστήματα. Προσαρμογή από Zhou & Li (2011).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 84 |
| Εικόνα 36 | Αξιολόγηση της ευπάθειας των υπόγειων υδάτων σε διείσδυση θαλασσινού νερού χρησιμοποιώντας το μοντέλο DRASTIC σε παράκτια περιοχή στην περιοχή Patuakhali, Μπαγκλαντές (Hasan et al., 2023).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 86 |
| Εικόνα 37 | Επανασχεδιασμός και παρακολούθηση δικτύων ποιότητας και ποσότητας υπόγειων υδάτων χρησιμοποιώντας τη θεωρία της εντροπίας χρησιμοποιώντας ως περιοχή μελέτης την περιοχή Nagadeh στο Ιράν.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 88 |
| Εικόνα 38 | Το έργο SMART IWRM Medjerda εφαρμόζει ένα σύστημα παρακολούθησης υπόγειων υδάτων που βασίζεται σε ένα δίκτυο ασύρματα συνδεδεμένων αισθητήρων πίεσης. Το προτεινόμενο σύστημα θα επιτρέψει στους ερευνητές υπόγειων υδάτων και στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να έχουν                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 90 |

|  |                                                                                                                                                                                 |  |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  | γρήγορη πρόσβαση στα δεδομένα των υπόγειων υδάτων με λιγότερη προσπάθεια και κόστος (Πηγή: <a href="https://smartmedjerda.agrinet.tn/">https://smartmedjerda.agrinet.tn/</a> ). |  |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|

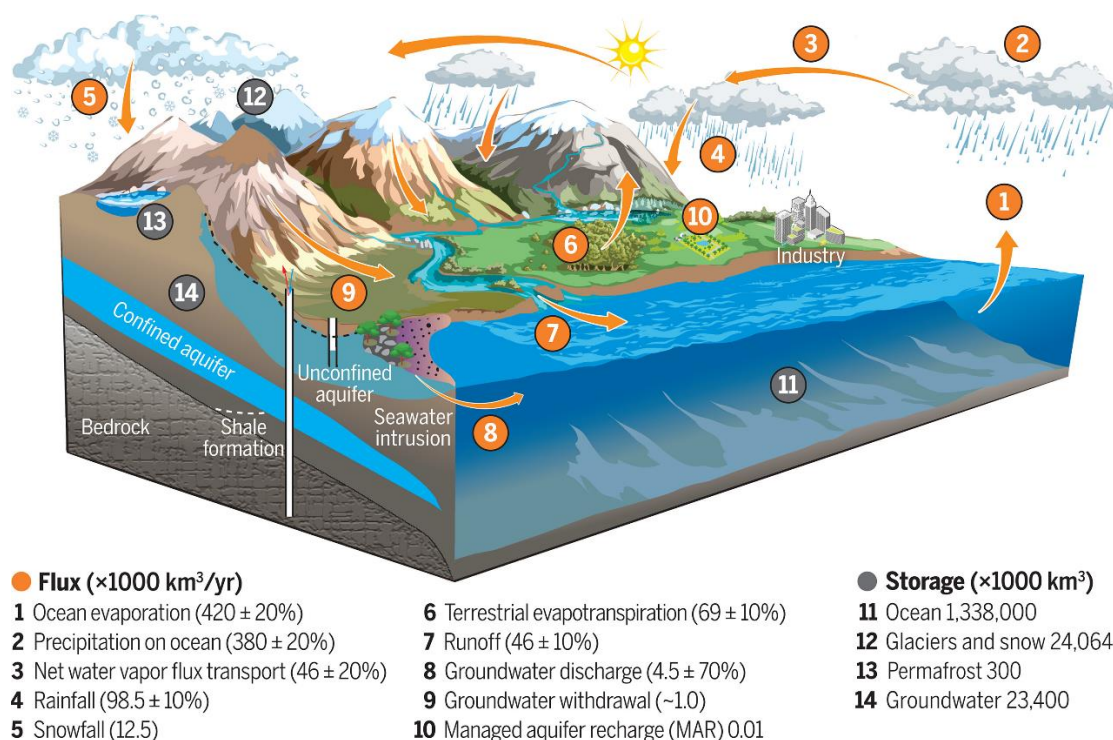
## Κατάλογος Πινάκων

| Αριθμός   | Λεζάντα                                            | Σελίδα |
|-----------|----------------------------------------------------|--------|
| Πίνακας 1 | Σημαντικές πηγές του Αργολικού υδροφόρου ορίζοντα. | 41     |

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Η σημασία των υπόγειων νερών και η διαχείρισή τους

Τα υπόγεια ύδατα (Εικόνα 1) αποτελούν έναν από τους πλέον πολύτιμους φυσικούς πόρους του πλανήτη, συνιστώντας περίπου το 30% των συνολικών αποθεμάτων γλυκού νερού και καλύπτοντας τις ανάγκες δισεκατομμυρίων ανθρώπων σε όλο τον κόσμο (Voudouris & Kazakis, 2021). Στην Ελλάδα, λόγω της ποικιλομορφίας του εδάφους και της γεωμορφολογίας της, τα υπόγεια υδροφόρα συστήματα, με έμφαση στα καρστικά, διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο τόσο στην ύδρευση όσο και στην άρδευση και τη βιομηχανική χρήση (Kallioras & Marinou, 2015). Παρ' όλα αυτά, η εντεινόμενη πίεση από την κλιματική αλλαγή, την αστικοποίηση και τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες καθιστά επιτακτική την ανάγκη εφαρμογής μιας στρατηγικής διαχείρισης που να διασφαλίζει τη βιωσιμότητα αυτών των πόρων (Jiménez Cisneros et al., 2014).



Εικόνα 114 Σχηματική απεικόνιση του παγκόσμιου κύκλου του νερού (Kuang et al., 2024).

Ένα από τα πλέον κρίσιμα ζητήματα στη διαχείριση των υπόγειων νερών είναι η αλληλεπίδρασή τους με το θαλάσσιο περιβάλλον, ιδιαίτερα σε παράκτιες περιοχές (Diamantopoulou & Voudouris, 2008). Η υπέρμετρη άντληση μπορεί να προκαλέσει

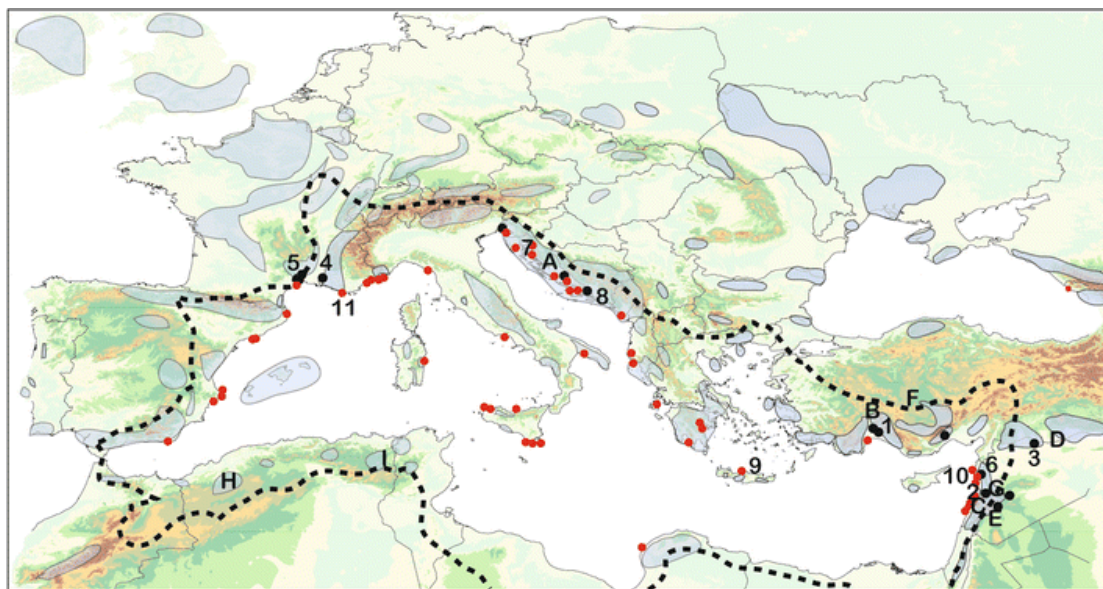
υφαλμύρωση, καθιστώντας τα αποθέματα γλυκού νερού μη κατάλληλα για χρήση (Kresic, 2010). Παράλληλα, οι υποθαλάσσιες πηγές γλυκού νερού, οι οποίες εκβάλλουν στη θάλασσα, παραμένουν έως σήμερα σε μεγάλο βαθμό ανεκμετάλλευτες, παρά το γεγονός ότι ενδέχεται να αποτελέσουν σημαντική λύση στην αντιμετώπιση της λειψυδρίας (Nisa & Umar, 2024).

## 1.2 Γεωλογική και υδρογεωλογική σημασία των καρστικών υδάτων

Οι καρστικοί υδροφορείς αποτελούν θεμελιώδεις αποθήκες υπόγειων υδάτων, ιδιαίτερα στις μεσογειακές περιοχές (Kallioras & Marinos, 2015). Σχηματίζονται κυρίως σε ανθρακικά πετρώματα, όπως ασβεστόλιθο και δολομίτες, μέσω της διάβρωσης που προκαλεί το νερό, διαμορφώνοντας πολύπλοκα δίκτυα σπηλαίων, καταβόθρων και υπόγειων καναλιών (Alfaro & Wallace, 1994). Τα συστήματα αυτά παρουσιάζουν υψηλή διαπερατότητα και ταχεία ροή νερού, γεγονός που τα καθιστά ιδιαίτερα ευάλωτα τόσο στη ρύπανση όσο και στην υφαλμύρωση (Mace, 2022).

Με βάση τους Xanke et al., (2024) οι καρστικοί υδροφορείς στη Μεσόγειο (Εικόνα 2) βρίσκονται υπό αυξανόμενη πίεση, γεγονός που έχει σημαντικές επιπτώσεις στις πηγές, τα ποτάμια, τα εξαρτώμενα οικοσυστήματα και την ύδρευση. Οι κλιματικές προβλέψεις για τη Μεσόγειο είναι δυσοίωνες, με αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση της διαθεσιμότητας νερού, αν και με τοπικές διαφοροποιήσεις. Οι κύριες αιτίες της μείωσης των υπόγειων υδάτων σχετίζονται με την υπεράντληση και τον μειωμένο φυσικό εμπλουτισμό. Σε ορισμένες περιοχές, θετικές τάσεις μπορεί να συνδέονται με επιστροφές αρδευτικών υδάτων. Στην εστιασμένη περιοχή της Μεσογείου (ζώνη 250 km), το 39.5% καλύπτεται από ανθρακικά πετρώματα (~1.2 εκατ. km<sup>2</sup>), ενώ μόλις 1.7% αποτελείται από εκτεθειμένα εξατμισιγενή πετρώματα. Οι χώρες της Μέσης Ανατολής έχουν το υψηλότερο ποσοστό ανθρακικών πετρωμάτων (30.5%), ακολουθούμενες από τις ευρωπαϊκές (25.8%) και τις βορειοαφρικανικές (25.3%). Οι μεγαλύτερες συνεχείς εκτάσεις ανθρακικών πετρωμάτων βρίσκονται στη Βόρεια Αφρική, με την Αλγερία (301,000 km<sup>2</sup>), την Αίγυπτο (402,000 km<sup>2</sup>) και τη Λιβύη (505,000 km<sup>2</sup>) να διαθέτουν τα εκτενέστερα αποθέματα. Από τις χώρες με έκταση >20,000 km<sup>2</sup>, η Ιορδανία (72.7%), η Σλοβενία (47.3%) και το Ισραήλ (44.9%) έχουν τα υψηλότερα ποσοστά καρστικοποίησης. Περίπου 14,000 km της μεσογειακής ακτογραμμής (~33.6%) αποτελείται από ανθρακικά και εξατμισιγενή πετρώματα. Η Ελλάδα διαθέτει το

μεγαλύτερο μήκος ασυνεχούς παράκτιων καρστικών εδαφών (~5,016 km), ακολουθούμενη από την Κροατία (~3,491 km) και την Ιταλία (~1,367 km). Η Μάλτα και η Βοσνία-Ερζεγοβίνη έχουν ακτές που είναι 100% καρστικές, ενώ η Κροατία (87.7%) και το Μαυροβούνιο (67.9%) ακολουθούν. Η αναπλήρωση των καρστικών υδροφορέων είναι υψηλότερη στο βόρειο τμήμα της Μεσογείου, με συνολικό όγκο ~244,600 εκατ. m<sup>3</sup>/έτος στην εστιασμένη περιοχή (250 km ζώνη). Η Γαλλία έχει τη μεγαλύτερη μέση ετήσια αναπλήρωση καρστικών υπόγειων υδάτων (83,435 εκατ. m<sup>3</sup>). Ωστόσο, οι περισσότερες περιοχές παρουσιάζουν αρνητικές τάσεις στην αποθήκευση των καρστικών υδάτων. Εξαιρέσεις αποτελούν ορισμένα τμήματα της οροσειράς του Άτλαντα (Μαρόκο, Αλγερία, Τυνησία) και εκτεταμένες περιοχές στη Λιβύη και την Αίγυπτο, όπου καταγράφονται ελαφρώς θετικές τάσεις. Συνολικά, στην περιοχή παρατηρείται ετήσια απώλεια ~436.2 εκατ. m<sup>3</sup> καρστικών υπόγειων υδάτων.



Εικόνα 222 Σχηματική απεικόνιση των ανθρακικών πετρωμάτων της Μεσογείου (ανοιχτό γκρι), στο οποίο επισημαίνονται οι κύριες πηγές (μαύροι κύκλοι) καθώς και οι παράκτιες και υποθαλάσσιες καρστικές πηγές (κόκκινοι κύκλοι). Προσαρμογή από Bakalowicz (2015).

Η Ελλάδα διαθέτει σημαντικά αποθέματα καρστικού νερού, με πολλές πηγές να τροφοδοτούν φυσικά υδάτινα οικοσυστήματα, όπως λίμνες, ποτάμια και υποθαλάσσιες εκβολές (Kresí, 2010). Παρά τα πλούσια υδατικά αποθέματα, η έλλειψη οργανωμένης παρακολούθησης της ποιότητας και της ποσότητας των καρστικών υδάτων, σε συνδυασμό με την απουσία ενός συνεκτικού δια-χειριστικού πλαισίου, έχει οδηγήσει σε υπερεκμετάλλευση και ρύπανση (Voudouris & Kazakis, 2021).

Στο πλαίσιο μιας μελέτης από τους Li Vigni et al., (2023) συλλέχθηκαν δείγματα από 172 φυσικές καρστικές πηγές σε όλη την Ελλάδα και αναλύθηκαν ως προς τα κύρια ιόντα και τα ιχνοστοιχεία τους, συγκρινόμενα με τα όρια της ΕΕ για το πόσιμο νερό. Οι πηγές ταξινομήθηκαν σε δύο βασικές ομάδες, με βάση την περιεκτικότητα σε χλωριούχα:

- Χαμηλής περιεκτικότητας (<100 mg/L)
- Υψηλής περιεκτικότητας (>100 mg/L)

Μια επιπλέον ομάδα πηγών χαρακτηρίστηκε από ασβεστιούχο-θειική σύνθεση. Η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων ήταν κάτω από το όριο της ΕΕ (50 mg/L), αν και σε ορισμένες πηγές βρέθηκαν αυξημένες τιμές. Τα επίπεδα ιχνοστοιχείων όπως B, Sr, As και Pb ξεπερνούσαν σποραδικά τα επιτρεπόμενα όρια, αλλά αυτά τα φαινόμενα ήταν σπάνια.

Γενικά, τα ελληνικά καρστικά ύδατα θεωρούνται καλής ποιότητας τόσο για ανθρώπινη κατανάλωση όσο και για γεωργική χρήση. Τα κυριότερα προβλήματα εντοπίζονται:

- Στη διείσδυση θαλασσινού νερού στους υδροφορείς των παράκτιων περιοχών.
- Στη ρύπανση από νιτρικά, κυρίως στις ίδιες περιοχές με έντονες ανθρώπινες δραστηριότητες.

Σε υψηλά επίπεδα δυνητικά επιβλαβών ιχνοστοιχείων (π.χ. As, Se), τα οποία όμως είναι περιορισμένα και προέρχονται από φυσικές πηγές όπως η γεωθερμική δραστηριότητα και τα μεταλλοφόρα κοιτάσματα (Li Vigni et al., 2023).

### 1.3 Υποθαλάσσιες πηγές και η δυνατότητα αξιοποίησής τους

Ένα από τα λιγότερο μελετημένα φαινόμενα στον τομέα των υπόγειων υδάτων αφορά τις υποθαλάσσιες πηγές γλυκού νερού (Εικόνα 3), οι οποίες εκρέουν σε θάλασσα περιβάλλοντα (Alfaro & Wallace, 1994). Οι πηγές αυτές σχηματίζονται όταν το υπόγειο νερό, κινούμενο μέσα από καρστικά πετρώματα ή άλλες γεωλογικές δομές, καταλήγει στον πυθμένα της θάλασσας λόγω της πίεσης και των διαφορών στο υδραυλικό φορτίο (Nisa & Umar, 2024).



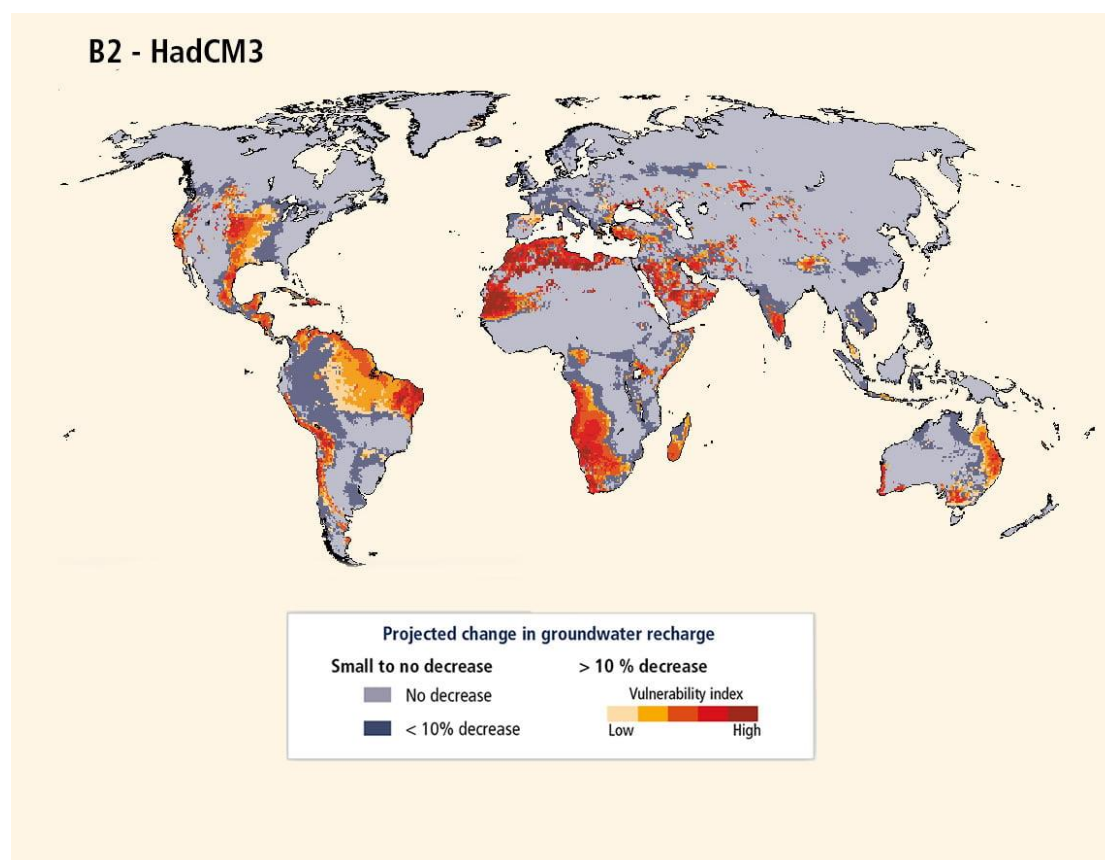
Εικόνα 333 Υποθαλάσσια καρστική πηγή ("Vrulja") στα παράλια της Κροατίας, βόρεια του Brela. Η ισχυρή υδραυλική πίεση καθιστά ορατή την άνοδο του γλυκού νερού μέσω του καρστικού αγωγού (Πηγή: <https://commons.wikimedia.org/>).

Η αξιοποίηση των υποθαλάσσιων πηγών μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην αντιμετώπιση της λειψυδρίας, ιδίως σε νησιωτικές και παράκτιες περιοχές που παρουσιάζουν ελλείψεις υδάτινων πόρων (Kresic, 2010). Παρότι η άντληση γλυκού νερού από αυτές τις πηγές παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες, η πρόοδος στην τεχνολογία, όπως η χρήση υποβρύχιων γεωτρήσεων και κατασκευής φραγμάτων ανάσχεσης, μπορεί να επιτρέψει τη βιώσιμη αξιοποίησή τους (Mace, 2023). Για παράδειγμα, στο Port-Miou, κοντά στο Cassis της Γαλλίας (στην περιοχή της Προβηγκίας) κατασκευάστηκε ένα φράγμα για τη συλλογή γλυκού νερού από υποθαλάσσιο ποταμό (Tardieu & Potié, 2014). Σκοπός της κατασκευής του φράγματος αυτού ήταν η συλλογή του γλυκού νερού που υπάρχει στον υδροφορέα, προτού αυτό αναμειχθεί με θαλασσίνο. Η πρώτη φάση κατασκευής ξεκίνησε το 1971, όπου δημιουργήθηκε ένα φράγμα τύπου “chicane” που επέτρεπε στα υπόγεια νερά να πλημμυρίζουν χωρίς να αλλάζει η πίεση στο σύστημα ενώ ταυτόχρονα απέκλειε το θαλασσίνο νερό από το να εισχωρεί. Στη δεύτερη φάση κατασκευής, (το 1976-1977) το φράγμα κατασκευάστηκε πλήρως, με υπερχειλιστή στα 3 μέτρα, που μπορούσε να διαχειριστεί πλημμύρες έως και  $100 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Η περίπτωση του Port-Miou αποτελεί μοναδικό παράδειγμα διεθνώς όπου εφαρμόστηκε τεχνική συλλογής γλυκού νερού

από υποθαλάσσιο καρστικό σύστημα, με συνεχείς μετρήσεις παροχής και αλατότητας για πάνω από 40 χρόνια. Παράλληλα, έγιναν και υποθαλάσσιες εξερευνήσεις του συστήματος, φτάνοντας σε βάθη άνω των 200 μέτρων κάτω από τη στάθμη της θάλασσας (Tardieu & Potié, 2014). Οι τεχνολογικές καινοτομίες που εφαρμόστηκαν στο συγκεκριμένο καρστικό σύστημα μπορούν να αξιοποιηθούν σε αντίστοιχα έργα σε άλλες περιοχές της Μεσογείου ή του κόσμου, ιδίως σε περιβάλλοντα όπου παρατηρείται λειψυδρία. Η άντληση χαμηλής αλατότητας νερού από υποθαλάσσιες πηγές μπορεί να αποτελέσει πολύτιμη εναλλακτική είτε για άμεση χρήση είτε για επεξεργασία με τεχνολογίες αφαλάτωσης όπως η αντίστροφη ώσμωση. Αντίστοιχη τεχνολογική λύση έχει εφαρμοστεί και στον Ανάβαλο Κιβερίου (Πελοπόννησος, Ελλάδα), όπου κατασκευάστηκε φράγμα στη θάλασσα με σκοπό την απομόνωση του θαλασσινού νερού από τις υποθαλάσσιες πηγές (Fleury, Bakalowicz & De Marsily, 2007). Το γλυκό νερό, με αλατότητα μικρότερη από 0.3 g/l στις παράκτιες και από 0.3 έως 2.5 g/l στις υποθαλάσσιες πηγές, αντλείται απευθείας από το εσωτερικό του φράγματος. Η συνολική παροχή υπερβαίνει τα 10 m<sup>3</sup>/s, γεγονός που καταδεικνύει την ύπαρξη καλά αναπτυγμένου καρστικού συστήματος. Παρά το γεγονός ότι η πηγή του Αναβάλου αποτελεί εναλλακτικό υδατικό πόρο για την περιοχή του Ναυπλίου, αντιμετωπίζει ζητήματα ποιότητας λόγω αυξημένης αγωγιμότητας (περίπου 1650 μS/cm), πιθανόν εξαιτίας διείσδυσης θαλασσινού νερού στο φράγμα (Τσίγκος, 2023). Η απουσία συστήματος συνεχούς παρακολούθησης καθιστά δύσκολο τον εντοπισμό πιθανών απωλειών, ενώ παραμένει κρίσιμη ως εφεδρική πηγή σε περιόδους λειψυδρίας. Το φράγμα του Αναβάλου έχει μήκος 160 m, πλάτος 8 m και ύψος 12 m, ενώ το μέγιστο βάθος της θάλασσας στο σημείο φτάνει τα 9 m. Η αξιοποίηση των πηγών του Αναβάλου υποστηρίζεται από ένα εκτεταμένο δίκτυο υποδομών, που περιλαμβάνει παράκτιο φράγμα και αντλιοστάσιο, με σκοπό την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του Αργολικού πεδίου. Το ετήσιο κόστος λειτουργίας του αντλιοστασίου ανέρχεται στις 730.000 €, ενώ η ενεργειακή κατανάλωση αποτελεί σημαντικό πρόβλημα για τους τοπικούς οργανισμούς διαχείρισης (ΤΟΕΒ και ΓΟΕΒ). Πρόσφατες μελέτες κατέδειξαν ότι μια επένδυση στην αναβάθμιση του εξοπλισμού θα μπορούσε να μειώσει το ετήσιο κόστος λειτουργίας στις 500.000 €, επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση ενέργειας κατά 30 % και απόσβεση της επένδυσης εντός τετραετίας. Παράλληλα, η επαναλειτουργία των δύο επιπλέον αντλιών θα επιτρέψει την παύση λειτουργίας ενεργοβόρων γεωτρήσεων, συμβάλλοντας σε μια πιο βιώσιμη και οικονομικά αποδοτική διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής.

## 1.4 Κλιματική αλλαγή και επιπτώσεις στα υπόγεια νερά

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής επηρεάζουν τόσο τη διαθεσιμότητα όσο και την ποιότητα των υπόγειων νερών (Jiménez Cisneros et al., 2014). Ακραία καιρικά φαινόμενα, όπως παρατεταμένες ξηρασίες και έντονες βροχοπτώσεις, διαταράσσουν τον υδρολογικό κύκλο, επηρεάζοντας την αναπλήρωση των υδροφορέων (Nisa & Umar, 2024) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4. Επιπλέον, η αύξηση της θερμοκρασίας συμβάλλει στην εξάτμιση, μειώνοντας την ανανέωση των αποθεμάτων και εντείνοντας την υφαλμύρωση στις παράκτιες περιοχές (Voudouris & Kazakis, 2021).



Εικόνα 444 Εκτιμώμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους ανανεώσιμους υπόγειους υδατικούς πόρους έως τα μέσα του 21ου αιώνα, βάσει σεναρίου χαμηλών εκπομπών. Με κόκκινο συμβολίζονται οι περιοχές με τη μεγαλύτερη ευαλωτότητα. Προσαρμοσμένο από Royal Meteorological Society (<https://www.metlink.org/>).

## 1.5 Νομοθετικό και θεσμικό πλαίσιο διαχείρισης των υπόγειων Νερών

Η ορθολογική διαχείριση των υπόγειων υδάτων προϋποθέτει την ύπαρξη ενός ξεκάθਾਰου και αυστηρού νομικού πλαισίου (Chachami-Chalioti et al., 2017). Στην Ελλάδα, η νομοθεσία περί υδάτων ακολουθεί την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/EK, η

οποία εισάγει την έννοια της ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδάτινων πόρων (Voudouris & Kazakis, 2021).

Παρά τις ρυθμίσεις αυτές, η εφαρμογή τους αντιμετωπίζει σημαντικά εμπόδια, καθώς η έλλειψη κατάλληλων μηχανισμών ελέγχου και η ανεπαρκής συνεργασία μεταξύ των αρμόδιων φορέων δυσχεραίνουν την αποτελεσματική υλοποίησή τους (Chachami-Chalioiti et al., 2017). Επιπλέον, η απουσία σαφών κατευθυντήριων γραμμών σχετικά με την αξιοποίηση των υποθαλάσσιων πηγών δημιουργεί αβεβαιότητα όσον αφορά τη βιώσιμη χρήση τους (Mace, 2022).

## 2. Σκοπός της Έρευνας

Η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώνεται στη διερεύνηση της διαχείρισης των υπόγειων υδάτων που εκρέουν σε θαλάσσια περιβάλλοντα, με έμφαση στις υποθαλάσσιες πηγές και τις δυνατότητες αειφόρου εκμετάλλευσής τους. Οι βασικοί στόχοι της έρευνας είναι οι εξής:

- Διερεύνηση των γεωλογικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών των υπόγειων υδάτων στην Ελλάδα και σε άλλες περιοχές με ανάλογα καρστικά υδρολογικά συστήματα.
- Ανάλυση της σημασίας των υποθαλάσσιων πηγών γλυκού νερού και των δυνατοτήτων αξιοποίησής τους για την υδροδότηση νησιωτικών και παράκτιων περιοχών
- Εκτίμηση των περιβαλλοντικών κινδύνων και επιπτώσεων που προκύπτουν από την υπερβολική εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων, όπως η υφαλμύρωση και η ρύπανση.
- Ανάλυση της επιρροής της κλιματικής αλλαγής στη διαθεσιμότητα και ποιότητα των υπόγειων αποθεμάτων, καθώς και των επιπτώσεών της στην ανανέωση των υδατικών πόρων.
- Καταγραφή του θεσμικού και νομοθετικού πλαισίου που ρυθμίζει τη διαχείριση των υδάτινων πόρων τόσο σε εθνικό όσο και σε διεθνές επίπεδο, με σκοπό την ανάδειξη βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης.
- Διαμόρφωση προτάσεων για βιώσιμες στρατηγικές διαχείρισης των υπόγειων υδάτων και ειδικότερα των υποθαλάσσιων πηγών, με στόχο την αποτροπή της

υπερεκμετάλλευσης και την προστασία των υδατικών αποθεμάτων από την περιβαλλοντική επιβάρυνση.

### 3. Μεθοδολογία έρευνας

Η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη διερεύνηση της διαχείρισης των υπόγειων νερών που εκβάλλουν σε θαλάσσιες περιοχές, με ιδιαίτερη έμφαση στις υποθαλάσσιες πηγές και τις δυνατότητες βιώσιμης αξιοποίησής τους. Για την επίτευξη των ερευνητικών στόχων, εφαρμόζεται μια πολυδιάστατη μεθοδολογική προσέγγιση που συνδυάζει βιβλιογραφική επισκόπηση, γεωλογική και υδρογεωλογική ανάλυση, μελέτη περιβαλλοντικών και κλιματικών παραμέτρων, αξιολόγηση του θεσμικού και νομικού πλαισίου, καθώς και ανάπτυξη στρατηγικών βιώσιμης διαχείρισης.

#### 3.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η βιβλιογραφική έρευνα αποτελεί το αρχικό και θεμελιώδες στάδιο της μελέτης, καθώς επιτρέπει τη συλλογή, ανάλυση και αξιολόγηση των υφιστάμενων επιστημονικών δεδομένων σχετικά με τα υπόγεια ύδατα και τις υποθαλάσσιες πηγές.

#### 3.2 Πηγές πληροφόρησης

Για την απόκτηση σχετικών πληροφοριών, αξιοποιούνται:

- Επιστημονικές δημοσιεύσεις από αναγνωρισμένα περιοδικά, όπως το Environmental Geology, το Hydrogeology Journal και το Water Resources Research.
- Έρευνες και εκθέσεις διεθνών οργανισμών, όπως η UNESCO, η Διεθνής Ένωση Υδρογεωλόγων (IAH) και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (EU Water Framework Directive).
- Βιβλία και τεχνικά εγχειρίδια σχετικά με την υδρογεωλογία, τα καρστικά υδροσυστήματα και τη διαχείριση των υδάτινων πόρων.
- Ερευνητικά έργα και μελέτες περίπτωσης από πανεπιστημιακά και ερευνητικά ιδρύματα, καθώς και από κρατικούς φορείς.

#### 3.3 Θεματικοί άξονες βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Η ανάλυση της βιβλιογραφίας εστιάζει στις εξής θεματικές ενότητες:

- Γεωλογικές και υδρογεωλογικές ιδιότητες των υπόγειων υδάτων και των καρστικών υδροφορέων.

- Μηχανισμοί που επηρεάζουν την εκφόρτιση των υπόγειων υδάτων σε θαλάσσιες περιοχές.
- Τεχνικές ανίχνευσης και διαχείρισης των υποθαλάσσιων πηγών.
- Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων και προτάσεις για βιώσιμη ανάπτυξη.
- Μέσω της βιβλιογραφικής ανασκόπησης, επιδιώκεται η αποτύπωση των υφιστάμενων προκλήσεων και η αξιολόγηση προτεινόμενων λύσεων από προηγούμενες μελέτες.

### 3.3.1 Γεωλογική και υδρογεωλογική ανάλυση

Η διερεύνηση των γεωλογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών είναι κρίσιμη για την εκτίμηση των δυνατοτήτων αξιοποίησης των υποθαλάσσιων πηγών.

### 3.3.2 Δομή και χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων

Η μελέτη επικεντρώνεται στα καρστικά υδροφόρα συστήματα, τα οποία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην υπόγεια αποθήκευση και εκροή των υδάτων προς τη θάλασσα. Αναλύονται:

- Οι τύποι και η μορφολογία των καρστικών σχηματισμών, όπως καταβόθρες, σπηλαιώδεις αγωγοί και υπόγεια ποτάμια.
- Η υδραυλική συμπεριφορά και διαπερατότητα των υδροφορέων.
- Οι ρυθμοί ανανέωσης των αποθεμάτων και οι μηχανισμοί εμπλουτισμού των υδροφορέων.

### 3.3.3 Ιδιαιτερότητες των υποθαλάσσιων πηγών

Εξετάζονται οι υποθαλάσσιες πηγές στην Ελλάδα και σε διεθνές επίπεδο, εστιάζοντας στα εξής:

- Στη γεωγραφική τους κατανομή.
- Στη χημική σύνθεση του νερού τους.
- Στους μηχανισμούς εκφόρτισης του νερού στον πυθμένα της θάλασσας.

Η συλλογή των παραπάνω δεδομένων βασίζεται σε γεωλογικούς και υδρογεωλογικούς χάρτες, καθώς και σε υφιστάμενες μελέτες και υποθαλάσσιες παρατηρήσεις.

### 3.3.4 Ανάλυση περιβαλλοντικών και κλιματικών παραμέτρων

Η μελέτη περιβαλλοντικών και κλιματικών παραγόντων επιτρέπει την εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και της ανθρώπινης δραστηριότητας στα υπόγεια ύδατα. Εξετάζονται:

- Η μεταβολή της στάθμης των υπόγειων υδάτων λόγω κλιματικών αλλαγών.
- Οι αλλαγές στη χημική σύσταση του νερού λόγω διαφοροποιήσεων στη θερμοκρασία και τις βροχοπτώσεις.
- Η επιδείνωση της υφαλμύρωσης εξαιτίας της ανόδου της στάθμης της θάλασσας.

### 3.3.5 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της αξιοποίησης των υποθαλάσσιων πηγών

Αξιολογούνται οι περιβαλλοντικοί κίνδυνοι που συνδέονται με την άντληση των υποθαλάσσιων νερών, συμπεριλαμβανομένων:

- Της αποσταθεροποίησης των καρστικών υδροφορέων.
- Των επιπτώσεων στη θαλάσσια βιοποικιλότητα.
- Των μεταβολών στην υδραυλική ισορροπία των παράκτιων περιοχών.

## 3.4 Νομοθετικό και θεσμικό πλαίσιο

Η διαχείριση των υπόγειων νερών διέπεται από εθνικές και διεθνείς ρυθμίσεις. Στο πλαίσιο της έρευνας εξετάζονται:

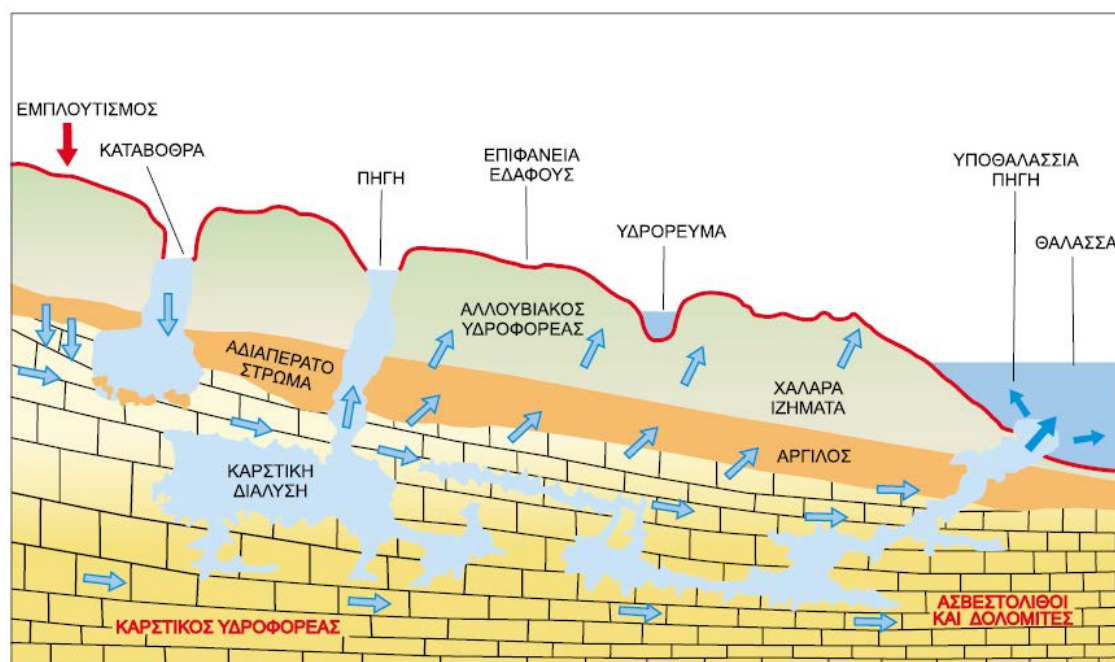
- Η ελληνική νομοθεσία και οι κανόνες διαχείρισης των υδάτινων πόρων.
- Η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/EK και ο αντίκτυπός της στην πολιτική διαχείρισης των υπόγειων νερών.
- Διεθνείς πρακτικές και στρατηγικές άλλων χωρών.
- Το τελευταίο στάδιο της μελέτης αφορά τη διαμόρφωση στρατηγικών για την αειφόρο αξιοποίηση των υποθαλάσσιων πηγών.

## 4. Υπόγειες πηγές και υδροφορείς

### 4.1 Δομή και χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων

Οι καρστικοί υδροφορείς αποτελούν ένα σημαντικό σύστημα υπόγειων υδάτων, καθώς συγκεντρώνουν μεγάλες ποσότητες νερού και χρησιμοποιούνται ευρέως για ύδρευση, άρδευση και βιομηχανικές ανάγκες (Παρπόδης, 2020). Η δομή τους διαμορφώνεται κυρίως μέσω της διάλυσης ανθρακικών πετρωμάτων, όπως ασβεστόλιθων και δολομιτών (Εικόνα 5), εξαιτίας της αλληλεπίδρασής τους με διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα στο νερό (Μαρκοζάννης, 2013).

Η λειτουργικότητα αυτών των υδροφορέων επηρεάζεται από παράγοντες όπως η πορώδης και ρωγμώδης φύση τους, η υδραυλική αγωγιμότητα, οι υδρολογικές συνθήκες και η ανθρώπινη παρέμβαση. Οι καρστικοί υδροφορείς παρουσιάζουν πολύπλοκη και εξελισσόμενη δομή, η οποία επηρεάζεται από γεωλογικές και υδρογεωλογικές διαδικασίες που οδηγούν στη δημιουργία υπόγειων κοιλοτήτων και αγωγών (Παρπόδης, 2020).



Εικόνα 555 Δομή και σχηματισμός καρστικών υδροφορέων (Προσαρμογή από Λυμπεροπούλου, 2019).

#### 4.1.1 Πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες

Το αρχικό πορώδες των ανθρακικών πετρωμάτων είναι χαμηλό, λόγω της φύσης των ιζηματογενών διαδικασιών που τα σχηματίζουν (Μπαμπάτσος, 2021). Ωστόσο, το δευτερογενές πορώδες αναπτύσσεται μέσα από διαλυτικές και τεκτονικές

διεργασίες, οδηγώντας στη δημιουργία αγωγών που διευκολύνουν τη ροή του νερού (Μαρκοζάννης, 2013).

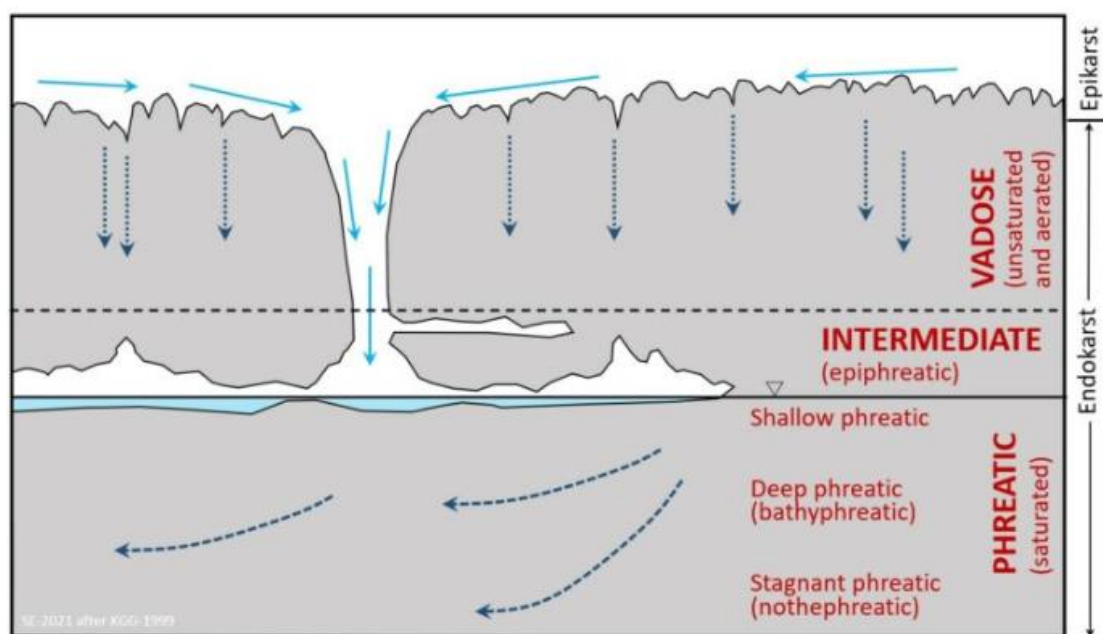
#### 4.1.2 Σχισμές και ρήγματα

Οι καρστικοί υδροφορείς διαπερνώνται από δίκτυα ρωγμών, διακλάσεων και τεκτονικών ασυνεχειών, τα οποία επιτρέπουν την ταχεία κίνηση του νερού στο υπέδαφος (Παρπόδης, 2020). Αυτές οι δομές συντελούν στη διαμόρφωση υπόγειων αγωγών και κοιλοτήτων (Μπαμπάτσος, 2021).

#### 4.1.3 Ζώνες καρστικού υδροφορέα

Οι καρστικοί υδροφορείς διακρίνονται σε τρεις βασικές ζώνες (Παρπόδης, 2020) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6:

- Ζώνη αερισμού: Περιλαμβάνει κυρίως αέρα και περιορισμένες ποσότητες κατελιμμένου νερού που μετακινείται λόγω της βαρύτητας.
- Ζώνη κορεσμού: Περιέχει το κύριο υδατικό δυναμικό του υδροφορέα, με το νερό να κινείται ελεύθερα μέσω αγωγών και κοιλοτήτων.
- Ζώνη εκφόρτισης: Σημείο εξόδου του νερού από τον υδροφορέα μέσω πηγών, ποταμών ή υπόγειων εκροών.



Εικόνα 666 Σχηματική απεικόνιση των τριών βασικών ζωνών ενός καρστικού υδροφορέα (Πηγή: Thompson Rivers University, <https://environmental-geol.pressbooks.tru.ca/>).

## 4.2 Χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφορέων

### 4.2.1 Υψηλή διαπερατότητα και ταχεία ροή

Η ύπαρξη εκτεταμένων αγωγών και κοιλοτήτων επιτρέπει στο νερό να κινείται με υψηλές ταχύτητες, ενίοτε με μη-Νευτωνική ροή (Παρπόδης, 2020).

### 4.2.2 Χαμηλή ρυθμιστική ικανότητα

Λόγω της ταχείας κίνησης του νερού και της περιορισμένης ικανότητας αποθήκευσης, οι καρστικοί υδροφορείς έχουν μικρή ικανότητα ρύθμισης της παροχής, καθιστώντας τους ευάλωτους σε κλιματικές διακυμάνσεις (Παρπόδης, 2020).

### 4.2.3 Ευαισθησία στη ρύπανση

Η ταχεία μετακίνηση του νερού σε αυτά τα συστήματα σημαίνει ότι οι ρυπογόνες ουσίες μπορούν να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις, καθιστώντας δύσκολο τον έλεγχο της ποιότητας του νερού (Παρπόδης, 2020). Βιομηχανικά και γεωργικά απόβλητα μπορεί να εισέλθουν στο σύστημα και να επηρεάσουν σημαντικά την υδροχημεία του (Παρπόδης, 2020).

## 4.3 Διαχείριση και προστασία των καρστικών υδροφορέων

### 4.3.1 Σημασία για την ύδρευση και την άρδευση

Οι καρστικοί υδροφορείς αποτελούν κρίσιμες πηγές νερού για πολλές περιοχές του κόσμου (Παρπόδης, 2020). Στην Ελλάδα, υδροφορείς όπως αυτοί της Πελοποννήσου (Εικόνα 7) και της Κρήτης παίζουν σημαντικό ρόλο στην τροφοδοσία υδροδοτικών δικτύων (Παρπόδης, 2020).



Εικόνα [777](https://commons.wikimedia.org/) Καρστική πηγή στην Άνω Αρκαδία Πελοποννήσου. Πηγή: Wikipedia Commons (<https://commons.wikimedia.org/>)

#### 4.3.2 Προκλήσεις στη διαχείριση

Η προστασία και αειφόρος εκμετάλλευση των καρστικών υδροφορέων απαιτούν τη λήψη συγκεκριμένων διαχειριστικών μέτρων (Μπαμπάτσος, 2021).), όπως:

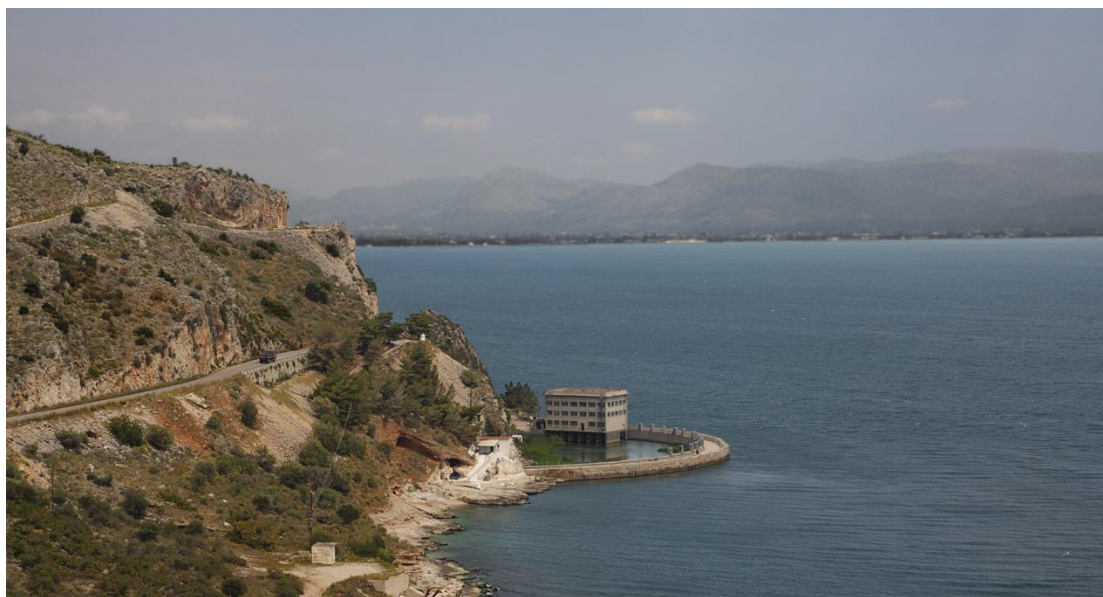
- Περιορισμός των ρυπαντικών φορτίων και προστασία των περιοχών τροφοδοσίας.
- Έλεγχος των υπεραντλήσεων και διατήρηση της στάθμης του υδροφορέα σε βιώσιμα επίπεδα.
- Παρακολούθηση της ποιότητας του νερού μέσω συστημάτων μέτρησης και εφαρμογής στρατηγικών διαχείρισης.

#### 4.4 Συμπεράσματα

Οι καρστικοί υδροφορείς αποτελούν ζωτικούς υδατικούς πόρους, αλλά η δομή τους τους καθιστά ευάλωτους σε περιβαλλοντικές και ανθρωπογενείς πιέσεις. Η υιοθέτηση ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ποιότητας και της διαθεσιμότητας των υδάτινων αποθεμάτων.

#### 4.5 Υποθαλάσσιες πηγές νερού: δομή, χαρακτηριστικά και διαχείριση

Οι υποθαλάσσιες πηγές νερού (πχ. η υποθαλάσσια πηγή στο Κιβέρι Αργολίδας, Εικόνα 8) αποτελούν φυσικές εκροές γλυκού νερού στον θαλάσσιο πυθμένα, οι οποίες προέρχονται από υπόγεια υδροφορεία που εκτείνονται κάτω από τις θαλάσσιες περιοχές (Μπαμπάτσος, 2021). Αυτές οι πηγές μπορεί να είναι είτε μόνιμες είτε εποχιακές, ανάλογα με τη γεωλογική δομή, τη δυναμική των υπόγειων υδάτων και τις κλιματολογικές συνθήκες (Παρπόδης, 2020). Η σημασία τους είναι διττή: αφενός, αποτελούν πολύτιμο απόθεμα γλυκού νερού, αφετέρου, επηρεάζουν τη θαλάσσια οικολογία, καθώς τροποποιούν τη χημική σύνθεση του νερού και δημιουργούν εξειδικευμένα θαλάσσια οικοσυστήματα.



Εικόνα 888 Υποθαλάσσια καρστική πηγή νερού στο Κιβέρι του Αργολικού Κόλπου, Πελοπόννησος, Ελλάδα (πηγή Wikimedia Commons <https://commons.wikimedia.org/>).

#### 4.6 Δομή και σχηματισμός των υποθαλάσσιων πηγών

Οι υποθαλάσσιες πηγές νερού σχηματίζονται μέσω γεωλογικών και υδρογεωλογικών διεργασιών, σχετιζόμενες με την ύπαρξη υπόγειων υδροφορέων που εκτείνονται κάτω από τον θαλάσσιο πυθμένα (Παρπόδης, 2020).

##### 4.6.1 Υδρογεωλογικοί Μηχανισμοί Σχηματισμού

Διαφορετικοί μηχανισμοί οδηγούν στη δημιουργία υποθαλάσσιων πηγών:

- Ρήγματα και τεκτονικές δομές: Τα ρήγματα που διαπερνούν τον θαλάσσιο πυθμένα επιτρέπουν την εκροή υπόγειου γλυκού νερού.

- Υδροστατική πίεση και ροή: Η υψηλή πίεση του υπόγειου νερού το ωθεί να εξέλθει μέσω φυσικών ανοιγμάτων.
- Παράκτιοι υδροφορείς: Σε παράκτιες περιοχές, οι υδροφορείς μπορεί να εκφορτίζονται στη θάλασσα μέσω φυσικών διόδων.

#### 4.6.2 Τύποι υποθαλάσσιων πηγών

Οι υποθαλάσσιες πηγές διακρίνονται σε (Mace, 2020):

- Συνεχείς πηγές: Παρέχουν σταθερή εκφόρτιση νερού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους.
- Εποχικές πηγές: Εμφανίζουν εκφόρτιση κυρίως κατά την υγρή περίοδο.
- Περιοδικές πηγές: Λειτουργούν υπό την επίδραση σεισμικών ή ηφαιστειακών δραστηριοτήτων.

### 4.7 Χαρακτηριστικά των υποθαλάσσιων πηγών

#### 4.7.1 Σχέση με το θαλασσινό νερό

Η μείξη του γλυκού νερού με το θαλασσινό δημιουργεί ζώνες υφάλμυρου νερού και επηρεάζει τις τοπικές οικολογικές συνθήκες.

#### 4.7.2 Ρυπαντικές επιδράσεις

Οι υποθαλάσσιες πηγές είναι ευάλωτες στη ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων, καθώς ρυπαντές από γεωργικές και βιομηχανικές δραστηριότητες μπορούν να μεταφερθούν στη θάλασσα μέσω αυτών (Stamatis et al., 2011).

#### 4.7.3 Οικολογικός ρόλος

Οι υποθαλάσσιες εκφορτίσεις συμβάλλουν στη δημιουργία μοναδικών οικοσυστημάτων, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη ειδικών θαλάσσιων οργανισμών (Mace, 2020).

### 4.8 Διαχείριση και Προστασία των Υποθαλάσσιων Πηγών

#### 4.8.1 Ανάγκη προστασίας

Η διατήρηση της ποιότητας και ποσότητας των υποθαλάσσιων πηγών είναι κρίσιμη για τη βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων και την παροχή υδατικών πόρων.

#### 4.8.2 Μέτρα διαχείρισης

- Καθορισμός ζωνών προστασίας: Η οριοθέτηση προστατευόμενων περιοχών μπορεί να περιορίσει την περιβαλλοντική υποβάθμιση.
- Παρακολούθηση ποιότητας νερού: Αισθητήρες και απομακρυσμένες μετρήσεις συμβάλλουν στον έλεγχο της σύστασης του νερού.
- Έλεγχος υπεραντλήσεων: Η διατήρηση βιώσιμων επιπέδων άντλησης συμβάλλει στη διατήρηση της φυσικής λειτουργίας των πηγών (Stamatis et al., 2011).

#### 4.9 Συμπεράσματα

Οι υποθαλάσσιες πηγές νερού παίζουν σημαντικό ρόλο στη διατήρηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος και στην παροχή υδατικών πόρων. Η προστασία και η αιεφόρος διαχείρισή τους είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της οικολογικής ισορροπίας και της ποιότητας του νερού (Serelis et al., 2010). Η συνεχιζόμενη έρευνα συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση και αξιοποίηση αυτών των φυσικών φαινομένων.

#### 4.10 Νομοθεσία για τη διαχείριση των υπόγειων και υποθαλάσσιων υδροφορέων στην Ελλάδα

Η διαχείριση των υδάτινων πόρων στην Ελλάδα βασίζεται σε ένα πλέγμα νομοθετικών ρυθμίσεων που εναρμονίζονται με το ευρωπαϊκό δίκαιο (Chifos, Doxastakis & Romanos, 2019). Το νομοθετικό πλαίσιο αποσκοπεί στην προστασία, αξιοποίηση και βιώσιμη χρήση των υπόγειων και υποθαλάσσιων υδροφορέων, περιλαμβάνοντας εθνικούς νόμους, προεδρικά διατάγματα και κοινοτικές οδηγίες (Ν. 3199/2003, ΦΕΚ 280/Α').

#### 4.11 Γενικό νομικό πλαίσιο για τη διαχείριση των υδάτων

Η ελληνική νομοθεσία περιλαμβάνει τους ακόλουθους βασικούς νόμους για τη διαχείριση των υδάτων:

- Νόμος 3199/2003: Εναρμονίζεται με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2000/60/EK, καθορίζοντας τη διαχείριση και προστασία των υδάτων (Π.Δ. 51/2007, ΦΕΚ 54/Α').

- Νόμος 1650/1986: Θέτει τις γενικές αρχές περιβαλλοντικής προστασίας, συμπεριλαμβάνοντας τη διαχείριση των υδάτινων πόρων.
- Νόμος 4014/2011: Αναφέρεται στις διαδικασίες περιβαλλοντικής αδειοδότησης έργων που σχετίζονται με την εκμετάλλευση των υδάτινων πόρων.

Η υλοποίηση αυτών των νόμων γίνεται μέσω διαχειριστικών σχεδίων για τις λεκάνες απορροής ποταμών, τα οποία προσαρμόζονται ανάλογα με τις ανάγκες κάθε περιοχής (Chifos, Doxastakis & Romanos, 2019).

#### 4.12 Νομοθεσία για τους υπόγειους υδροφορείς

Οι υπόγειοι υδροφορείς είναι ζωτικής σημασίας για την ύδρευση και την άρδευση, με το νομικό πλαίσιο να περιλαμβάνει:

- Ν. 3199/2003 & Π.Δ. 51/2007: Ρυθμίζει την προστασία των υπόγειων νερών από ρύπανση και υπερεκμετάλλευση.
- Κοινή Υπουργική Απόφαση 39626/2208/2009: Προβλέπει μέτρα για την προστασία των υπόγειων υδάτων από ρύπανση.
- Ν. 3199/2003 (άρθρα 11, 13, 14): Καθορίζει διαδικασίες ελέγχου και παρακολούθησης της ποιότητας των υπόγειων νερών.

#### 4.13 Νομοθεσία για τις υποθαλάσσιες υδροπηγές

Οι υποθαλάσσιες υδροπηγές εκβάλλουν γλυκό νερό στη θάλασσα και ρυθμίζονται μέσω:

- Ν. 2932/2001: Προβλέπει τη διαχείριση υδάτων σε θαλάσσιες περιοχές και λιμάνια.
- Ν. 3429/2005: Ρυθμίζει τη λειτουργία των δημόσιων επιχειρήσεων ύδρευσης και αποχέτευσης.
- Π.Δ. 111/2014: Καθορίζει τις υποχρεώσεις δημόσιων και ιδιωτικών φορέων στη διαχείριση των θαλάσσιων υδάτινων πόρων

#### 4.14 Ρυθμιστικές αρχές και διαχειριστικά σχέδια

Η εφαρμογή της νομοθεσίας για τους υδάτινους πόρους επιβλέπεται από:

- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας

- Ειδική Γραμματεία Υδάτων
- Διευθύνσεις Υδάτων στις Αποκεντρωμένες Διοικήσεις
- Δημοτικές και Περιφερειακές Επιχειρήσεις Ύδρευσης και Αποχέτευσης (Δ.Ε.Υ.Α.)

#### 4.15 Διεθνείς και ευρωπαϊκές επιρροές στη νομοθεσία

Η Ελλάδα έχει ενσωματώσει στο εθνικό της δίκαιο αρκετές ευρωπαϊκές οδηγίες, όπως:

- Οδηγία 2000/60/EK: Καθορίζει κοινό πλαίσιο για τη διαχείριση των υδάτων εντός της ΕΕ.
- Οδηγία 91/271/ΕΟΚ: Ρυθμίζει την επεξεργασία των αστικών λυμάτων και την προστασία των υπόγειων νερών.
- Οδηγία 2006/118/EK: Στοχεύει στην πρόληψη και περιορισμό της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων.

#### 4.16 Προκλήσεις και μελλοντικές τάσεις

Παρά την ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου νομικού πλαισίου, η διαχείριση των υδάτων αντιμετωπίζει προκλήσεις, όπως:

- Υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων, ιδιαίτερα σε αγροτικές περιοχές.
- Ρύπανση από γεωργικές και βιομηχανικές δραστηριότητες, παρά τις αυστηρές ρυθμίσεις.
- Κλιματική αλλαγή, που επηρεάζει την αναπλήρωση των υδροφορέων.
- Ανάγκη βελτίωσης των ελέγχων και παρακολούθησης, κυρίως σε απομακρυσμένες περιοχές.

#### 4.17 Συμπεράσματα

Η ελληνική νομοθεσία για τη διαχείριση των υπόγειων και υποθαλάσσιων υδάτων είναι πλήρης και εναρμονισμένη με την ευρωπαϊκή πολιτική. Ωστόσο, απαιτούνται περαιτέρω βελτιώσεις στην εφαρμογή των νόμων, με τη συνεργασία των αρμόδιων αρχών, της τοπικής αυτοδιοίκησης και του ιδιωτικού τομέα, για την αειφόρο διαχείριση των υδάτινων πόρων (Villholth et al., 2017).

## 5. Θερμές πηγές που εκβάλλουν στη θάλασσα στην Ελλάδα

Η Ελλάδα διαθέτει πολλές ιαματικές πηγές με θερμά νερά, κάποιες από τις οποίες εκβάλλουν απευθείας στη θάλασσα (Lambrakis & Kallergis, 2005). Οι πηγές αυτές έχουν ιδιαίτερη γεωλογική σημασία και προσφέρουν φυσικές θεραπείες, γεγονός που τις καθιστά δημοφιλείς τουριστικούς προορισμούς (Minissale et al., 1989). Στο παρόν κείμενο παρουσιάζονται πέντε θερμές πηγές που καταλήγουν στη θάλασσα, με ανάλυση των χαρακτηριστικών τους.

### 5.1 Θερμές πηγές Λουτρακίου, Κορινθία

#### Γενικά Χαρακτηριστικά

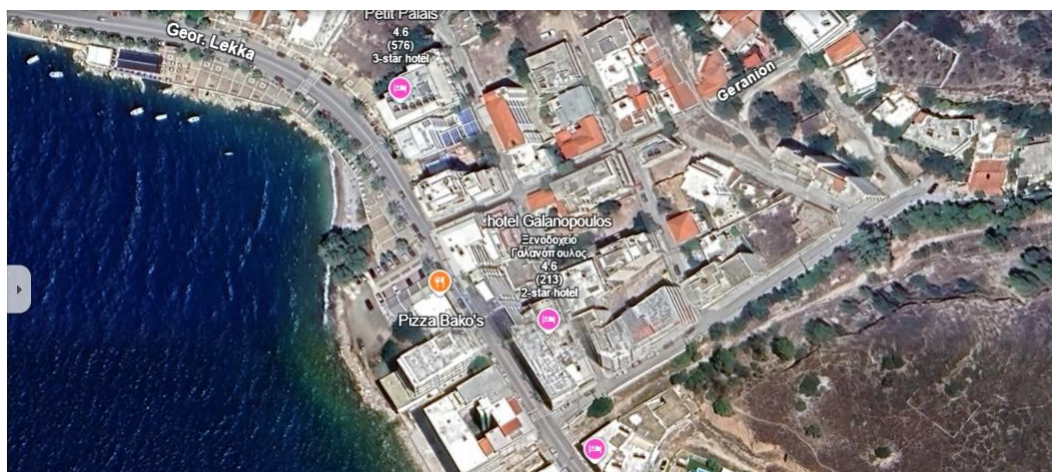
Η περιοχή του Λουτρακίου (Εικόνα 9) είναι γνωστή για τη γεωθερμική της δραστηριότητα, με θερμές πηγές που εκβάλλουν στην ακτογραμμή (Xynogala, 2021). Οι πηγές αυτές χρησιμοποιούνται για λουτροθεραπεία εδώ και αιώνες.

- Θερμοκρασία νερού: 30-32 °C
- Χημική σύσταση: Νάτριο (Na), Χλώριο (Cl), Όξινο ανθρακικό ( $\text{HCO}^{-3}$ )
- Θεραπευτικές ιδιότητες: Καταπραϋντικές επιδράσεις σε μυοσκελετικές και ρευματικές παθήσεις
- Ιστορική χρήση: Αξιοποιούνταν από την αρχαιότητα, με καταγραφές από τη ρωμαϊκή περίοδο.

#### Γεωλογικός Σχηματισμός

Οι πηγές προέρχονται από γεωθερμικούς ταμιευτήρες που σχετίζονται με τεκτονικές διεργασίες στην περιοχή (Dotsika, Routoukis & Raco, 2010). Η γεωθερμική δραστηριότητα στο Λουτράκι σχετίζεται με την παρουσία τεκτονικών ζωνών και ρηγμάτων κατά μήκος του Ισθμού της Κορίνθου. Οι θερμοπηγές φιλοξενούνται σε ασβεστολιθικά πετρώματα της Τρίπολης, τα οποία λειτουργούν ως καρστικοί ταμιευτήρες (Dotsika, Routoukis & Raco, 2010). Η κυκλοφορία του νερού σε μεγάλο βάθος και η ανύψωσή του μέσω ρηγμάτων επιτρέπει τη θέρμανση και την εμπλουτισμένη μεταλλική σύσταση των πηγών. Η περιοχή του Λουτρακίου παρουσιάζει σύνθετη γεωτεκτονική δομή, που αποτελείται κυρίως από οφιολιθικά πετρώματα, ψαμμίτες και ασβεστόλιθους Τριαδικής ηλικίας, ενώ εντοπίζονται επίσης δολομιτικοί ασβεστόλιθοι της ίδιας περιόδου καθώς και κροκαλοπαγή πετρώματα Πλειστοκαινικής ηλικίας. Η παρουσία αυτών των καρστικοποιημένων ανθρακικών

σχηματισμών σε συνδυασμό με τη διάρρηξη της περιοχής από σημαντικά ρηγματικά συστήματα ευνοεί την κυκλοφορία και τη συγκράτηση θερμών υπόγειων ρευστών, καθιστώντας τα πετρώματα αυτά αποδοτικούς ταμιευτήρες γεωθερμικού νερού (Dotsika, Poutoukis & Raco, 2010).



Εικόνα 999 Θερμές πηγές Λουτρακίου, Κορινθία.

## 5.2 Θερμές πηγές Καμένων Βούρλων, Φθιώτιδα

### Γενικά Χαρακτηριστικά

Τα Καμένα Βούρλα (Εικόνα 10) αποτελούν γνωστή λουτρόπολη, με θερμές πηγές που αναμειγνύονται με το θαλασσινό νερό (Katsambas & Antoniou, 1996).

- Θερμοκρασία νερού: 32-42 °C
- Χημική σύσταση: Θείο (S), Νάτριο (Na), Ράδιο (Ra)
- Θεραπευτικές ιδιότητες: Χρήσιμες στη διαχείριση ρευματικών και δερματικών παθήσεων
- Ιστορική χρήση: Αναγνωρισμένες για τις θεραπευτικές τους ιδιότητες από τον 19ο αιώνα.

### Γεωλογικός Σχηματισμός

Οι πηγές προκύπτουν από γεωθερμικά φαινόμενα σε βάθος, επιτρέποντας στο θερμό νερό να ανέλθει στην επιφάνεια μέσω ρηγμάτων (Ziouzias, Seymour & Papaioannou, 2007). Οι πηγές στα Καμένα Βούρλα προέρχονται από καρστικά συστήματα εντός τριαδικών δολομιτών και ασβεστόλιθων, οι οποίοι διαρρηγνύονται από ρήγματα που επιτρέπουν την κυκλοφορία και θερμική θέρμανση των υπόγειων νερών. Η γεωθερμική δραστηριότητα σχετίζεται με την τεκτονική αστάθεια της περιοχής και με την

παρουσία βαθιών γεωλογικών ασυνεχειών. Συγκεκριμένα, στην περιοχή των Καμένων Βούρλων, και ειδικότερα στον Άγιο Ιωάννη, εντοπίζονται ηφαιστειακά πετρώματα υψηλού-Κ ασβεστοαλκαλικής σειράς, κυρίως τραχιανδεσίτες, τα οποία αποτελούν μέρος του Πλειο-Πλειστοκαινικού ηφαιστειακού κέντρου των Λιχάδων. Η κύρια μάζα των πετρωμάτων χαρακτηρίζεται από υαλοφυρική δομή, με κυρίαρχα ορυκτά τους αστρίους (σανίδινο, πλαγιόκλαστο), κλινοπυρόξενους, αμφίβολουσ και ολιβίνη, ενώ σε μικρότερο ποσοστό εμφανίζονται χαλαζίας και τιτανίτης. Τα πλαγιόκλαστα εμφανίζουν ζώνωση, από βυτοβνήτη έως ανδεσίνη, ενώ οι ολιβίνες παρουσιάζουν ζώνωση στη σύστασή τους σε Mg και Fe, υποδεικνύοντας μαγματική εξέλιξη. Οι κλινοπυρόξενοι (διοψίδιος-αυγίτης) και οι αμφίβολοι (κεροσίλβη) υποδηλώνουν ενδιάμεσο έως εξελιγμένο σχηματισμό, αντίστοιχο με εκείνον του ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου. Τα παραπάνω πετρώματα λειτουργούν ως αποκλειστικά ή δευτερεύοντα ταμιευτήρια θερμού νερού, σε συνδυασμό με καρστικοποιημένους ασβεστολίθους της ευρύτερης περιοχής (Kanelopoulos et al., 2019).



Εικόνα ~~101010~~ Η τοποθεσία των θερμών πηγών «Καμένων Βούρλων», Φθιώτιδα.

### 5.3 Θερμές πηγές Θερμοπυλών, Φθιώτιδα

#### Γενικά Χαρακτηριστικά

Οι Θερμοπόλεις φιλοξενούν ιαματικές πηγές που δημιουργούν θερμούς ποταμούς (Εικόνα 11), οι οποίοι εκβάλλουν στον Μαλιακό Κόλπο (Meziti et al., 2021).

Θερμοκρασία νερού: 37-40°C

Χημική σύσταση: Θείο (S), Όξινο ανθρακικό ( $\text{HCO}^{-3}$ ), Ασβέστιο (Ca)

Θεραπευτικές ιδιότητες: Καταλληλότητα για ρευματοπάθειες και δερματολογικές παθήσεις

Ιστορική χρήση: Αναφορές στον Ηρόδοτο επιβεβαιώνουν την αρχαία χρήση τους (Lambrakis, Katsanou & Siavalas, 2014).

Γεωλογία: Η περιοχή των Θερμοπυλών βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της λεκάνης του Σπερχειού, η οποία είναι ένα εφελκυστικό γραβενικό σύστημα με διεύθυνση Α–Δ, που δημιουργήθηκε λόγω της ενεργού τεκτονικής διαστολής στον Ελλαδικό χώρο. Η γεωλογική δομή της λεκάνης καθορίζεται κυρίως από σύστημα κανονικών ρηγμάτων που οριοθετεί το νότιο περιθώριο της κοιλάδας, κατά μήκος των οποίων εμφανίζονται οι θερμές πηγές (Duriez et al., 2008). Στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα της λεκάνης, το γεωλογικό υπόβαθρο ανήκει στην Υποπελαγονική ζώνη και αποτελείται κυρίως από δολομίτες και ασβεστόλιθους Μεσοζωικής ηλικίας, με παρεμβολή οφιολιθικής καλύπτρας που αποτελεί υπόλειμμα του ωκεάνιου φλοιού της Τηθύος. Οι θερμοπηγές, όπως αυτή των Θερμοπυλών, σχετίζονται με τις τεκτονικές θραύσεις που δημιουργούνται από τη διάβρωση κατά μήκος των ρηγμάτων. Η συγκεκριμένη τεκτονική και λιθολογική δομή καθιστά τα ασβεστολιθικά πετρώματα ταμιευτήρες θερμού νερού και δημιουργεί τις κατάλληλες συνθήκες για τη γεωθερμική εκδήλωση των πηγών των Θερμοπυλών (Duriez et al., 2008).



Εικόνα 111144 Φωτογραφία από τις θερμές πηγές των Θερμοπυλών (πηγή: Hellenic Republic Asset Development Fund, <https://hradf.com/>).

## 5.4 Θερμές πηγές Πολιχνίτου, Λέσβος

### Γενικά Χαρακτηριστικά

Οι θερμές πηγές του Πολιχνίτου (Εικόνα 12) συγκαταλέγονται στις θερμότερες φυσικές πηγές της Ευρώπης (Lambrakis & Stamatis, 2008).

Θερμοκρασία νερού: 62-92 °C

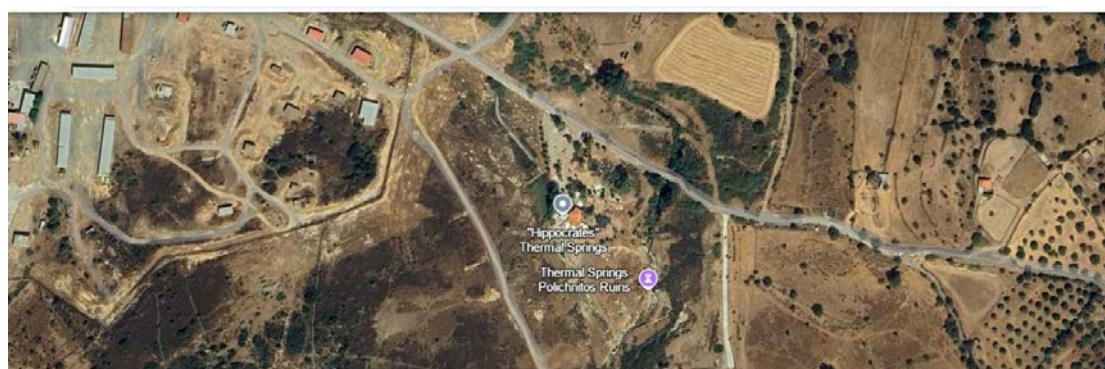
Χημική σύσταση: Χλωριούχα (Cl), Νατριούχα (Na), Θειικά (SO<sup>2-</sup>)

Θεραπευτικές ιδιότητες: Ευεργετικές για μυοσκελετικές παθήσεις και την κυκλοφορία του αίματος.

Ιστορική χρήση: Οι πηγές ήταν γνωστές και χρησιμοποιούνταν από την αρχαιότητα.

Γεωλογία: Στον Πολυχνίτο της Λέσβου, οι θερμοπηγές σχετίζονται με ηφαιστειογενή πετρώματα (κυρίως ρυολίτες και ανδεσίτες) και ρηγματογενή δίκτυα, τα οποία επιτρέπουν την κίνηση των νερών μέσα στο ηφαιστειακό υπόβαθρο, εμπλουτίζοντάς τα σε θερμότητα και μεταλλικά στοιχεία (Fytikas et al., 1989). Η περιοχή του Πολιχνίτου στη νότια Λέσβο φιλοξενεί σημαντικά γεωθερμικά χαρακτηριστικά, οι οποίες σχετίζονται άμεσα με τα γεωλογικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά του νησιού. Το γεωτεκτονικό υπόβαθρο της Λέσβου αποτελείται από κρυσταλλικά πετρώματα, τα οποία απαντώνται στην περιοχή του Πολιχνίτου και περιλαμβάνουν κυρίως φυλλίτες, με παρεμβολές παχέων μαρμάρων (έως 200 m.). Τα μάρμαρα εμφανίζουν ικανοποιητική υδροπερατότητα, η οποία ενισχύεται σε περιοχές έντονης τεκτονικής καταπόνησης και ρηγμάτωσης. Τοπικά, οι ενότητες αυτές συνδέονται τεκτονικά με περιδοτίτες, οι οποίοι έχουν υποστεί σε μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό σερπεντινιτοποίηση – παράγοντας που επηρεάζει καθοριστικά τη διαπερατότητά τους. Στην ευρύτερη περιοχή αναπτύσσονται δύο ηφαιστειακές σειρές: οι Παλαιότερες Ηφαιστειακές Σειρές (19–15 εκ. έτη) και οι Νεότερες. Οι πρώτες, που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του ηφαιστειακού όγκου της Λέσβου, περιλαμβάνουν κυρίως ροές λάβας και πυροκλαστικά προϊόντα ενδιάμεσης έως όξινης σύστασης (ανδεσιτικής έως ρυολιθικής). Οι λάβες και οι ηφαιστειακοί θόλοι χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό ρηγμάτωσης, γεγονός που τους καθιστά διαπερατούς και ευνοεί την κυκλοφορία θερμών ρευστών σε ασυνεχή αλλά ευρεία κλίμακα. Παρόμοια διαπερατότητα παρατηρείται και στους ιγνιμβρίτες, οι οποίοι παρουσιάζουν κατακόρυφα ψύξης και επιτρέπουν τη δευτερογενή κυκλοφορία νερού. Ωστόσο, κατά τόπους αναπτύσσονται αδιαπέρατοι ορίζοντες λόγω αργιλικής εξαλλοίωσης. Οι Νεότερες Ηφαιστειακές Σειρές περιλαμβάνουν μικρές εκροές βασικής σύστασης (σόσονιτες), οι οποίες τοποθετούνται χρονικά μετά την απόθεση των κατώτερων Πλειοκαινικών ιζημάτων. Τα ηφαιστειακά αυτά προϊόντα φαίνεται να ανέβηκαν μέσω βαθιών ρηγμάτων, χωρίς ενδιάμεση αποθήκευση σε ρηχότερα

επίπεδα, γεγονός που διατήρησε την πρωτογενή τους βασική χημική σύσταση. Τέλος, οι νεογενείς αποθέσεις, αποτελούμενες από μάργες, ηφαιστειοϊζηματογενή πετρώματα και κλαστικά ιζήματα, λειτουργούν ως αδιαπέρατο κάλυμμα των υποκείμενων υδροφόρων. Οι υδροφόροι αυτοί αναπτύσσονται κυρίως εντός των ρωών λάβας και σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως στην περιοχή της Καλλονής, εμφανίζουν αρτεσιανή συμπεριφορά. Το γεωλογικό αυτό πλαίσιο, σε συνδυασμό με τα ενεργά τεκτονικά ρήγματα (διευθύνσεων Α–Δ, ΒΑ–ΝΔ και ΒΔ–ΝΑ), δημιουργεί ευνοϊκές συνθήκες για την κυκλοφορία και τη θερμική ανύψωση των γεωθερμικών ρευστών στην επιφάνεια στην περιοχή του Πολιχνίτου (Lambrakis & Stamatis, 2008).



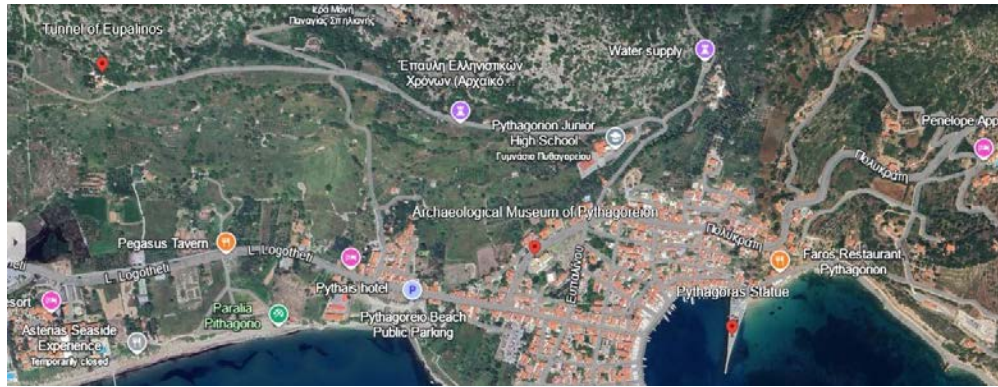
Εικόνα [121212](#) Τοποθεσία θερμών πηγών Πολιχνίτου, Λέσβος.

## 5.5 Θερμές πηγές Καρλοβάσσου, Σάμος

### Γενικά Χαρακτηριστικά

Οι θερμές πηγές του Καρλοβάσσου (Εικόνα 13) σχηματίζουν φυσικές λεκάνες θερμού νερού που καταλήγει στο Αιγαίο (Stamatakis, Tziritis & Evelpidou, 2009).

- Θερμοκρασία νερού: 50-55°C
- Χημική σύσταση: Νάτριο (Na), Θειικά ( $\text{SO}_2^-$ ), Χλώριο (Cl)
- Θεραπευτικές ιδιότητες: Ανακούφιση από αρθρικά προβλήματα και βελτίωση της δερματικής υγείας
- Ιστορική χρήση: Χρησιμοποιούνταν από τους αρχαίους κατοίκους της Σάμου σε τελετουργίες καθάρσης.



Εικόνα ~~131343~~ Οι θερμές πηγές Καρλοβάσσου στη Σάμου ως περιοχή μελέτης.

## 5.6 Συμπεράσματα

Οι θερμές πηγές που εκβάλλουν στη θάλασσα αποτελούν σημαντικά γεωλογικά και υδρολογικά φαινόμενα με ιαματικές, πολιτιστικές και τουριστικές εφαρμογές. Η διατήρησή τους συμβάλλει στην ανάπτυξη του ιαματικού τουρισμού και στην αιεφόρο διαχείριση των φυσικών πόρων της Ελλάδας (Tzedopoulos et al., 2018).

## Κεφάλαιο 6. Υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες με ψυχρό νερό που εκβάλλουν στη Θάλασσα στην Ελλάδα

Οι υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες αποτελούν βασικούς αποθηκευτικούς χώρους γλυκού νερού που σχηματίζονται από τη συγκέντρωση υδάτων σε πορώδη ή ρωγμώδη γεωλογικά στρώματα (Daskalaki & Voudouris, 2008). Σε αρκετές περιοχές της Ελλάδας, αυτοί οι υδροφορείς εκφορτίζονται φυσικά στη θάλασσα, δημιουργώντας υποθαλάσσιες ή παράκτιες πηγές γλυκού νερού (Kirlas et al., 2022). Παρακάτω παρουσιάζονται οχτώ σημαντικοί υδροφόροι ορίζοντες με ψυχρό νερό που καταλήγουν στη θάλασσα, περιγράφοντας τη γεωλογία τους, τη δυναμική τους και τη σημασία τους για την τοπική υδρογεωλογία.

### 6.1 Υδροφόρος ορίζοντας Καλυβίων, Αττική

Ο υδροφόρος ορίζοντας των Καλυβίων στην Αττική (Εικόνα 14) αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους υπόγειους ταμιευτήρες νερού που καταλήγουν στη θάλασσα μέσω φυσικών εκφορτίσεων (Koutsomichou et al., 2009). Η περιοχή χαρακτηρίζεται από ασβεστολιθικά πετρώματα που επιτρέπουν την αποθήκευση και μεταφορά του νερού.



Εικόνα [141444](#) Η περιοχή μελέτης: ο υδροφόρος ορίζοντας των Καλυβίων, Αττικής.

#### Γεωλογικά χαρακτηριστικά

- Πετρώματα: Καρστικοί ασβεστόλιθοι και δολομίτες
- Τύπος υδροφορέα: Ελεύθερος και υπό πίεση υδροφόρος ορίζοντας
- Βαθμός υδροπερατότητας: Υψηλός λόγω της εκτεταμένης δικτύωσης ρωγμών.

#### Υδρολογικές συνθήκες

Το νερό προέρχεται από κατεισδύσεις βροχοπτώσεων και τροφοδοτείται από τις γύρω ορεινές περιοχές. Εκφορτίζεται στη θάλασσα μέσω παράκτιων πηγών και

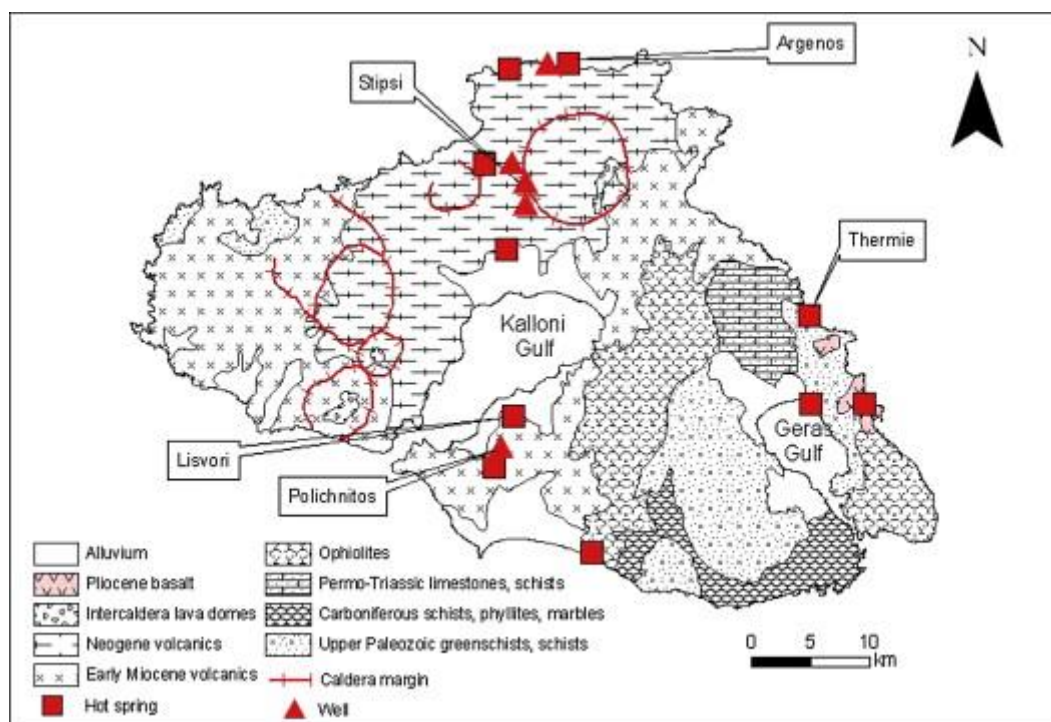
υποθαλάσσιων αναβλύσεων (Alexakis, 2008). Η ποιότητα του νερού είναι εξαιρετική, με χαμηλή περιεκτικότητα σε διαλυμένα άλατα.

Περιβαλλοντική και υδρο-οικονομική σημασία

Ο υδροφόρος ορίζοντας εξυπηρετεί σημαντικές αρδευτικές ανάγκες στην περιοχή. Παρουσιάζει κίνδυνο υφαλμύρωσης λόγω υπεράντλησης και ανόδου του θαλάσσιου μετώπου (Alexakis, 2011).

## 6.2 Υδροφόρος ορίζοντας Πολυχνίτου, Λέσβος

Η περιοχή του Πολυχνίτου στη Λέσβο χαρακτηρίζεται από πλούσια υδροφορία (Εικόνα 15), με πηγές ψυχρού και θερμού νερού που εκφορτίζονται στη θάλασσα (Αιουρί et al., 2009).



Εικόνα 15 | Ο γεωλογικός χάρτης της Λέσβου όπου απεικονίζονται οι τοποθεσίες των θερμών πηγών ( συμπεριλαμβανομένης της περιοχής Πολυχνίτου) και πηγαδιών (Mendrinou et al., 2010) .

Γεωλογικά χαρακτηριστικά

- Πετρώματα: Ηφαιστειακά ιζήματα, ψαμμίτες και σχιστόλιθοι
- Υδροφορέας: Ελεύθερος καρστικός υδροφόρος ορίζοντας
- Τροφοδοσία: Κατεισδύσεις βροχοπτώσεων από τα γύρω βουνά.

Υδρολογικές συνθήκες

Το νερό του υδροφορέα εκφορτίζεται μέσω παράκτιων πηγών και μικρών ποταμών. Υπάρχουν ενδείξεις μικρής υφαλμύρωσης λόγω γεωλογικών διεργασιών (Mendrinou et al., 2010). Έχει χαμηλή θερμοκρασία νερού (12-16°C) η οποία παραμένει σταθερή όλο το έτος.

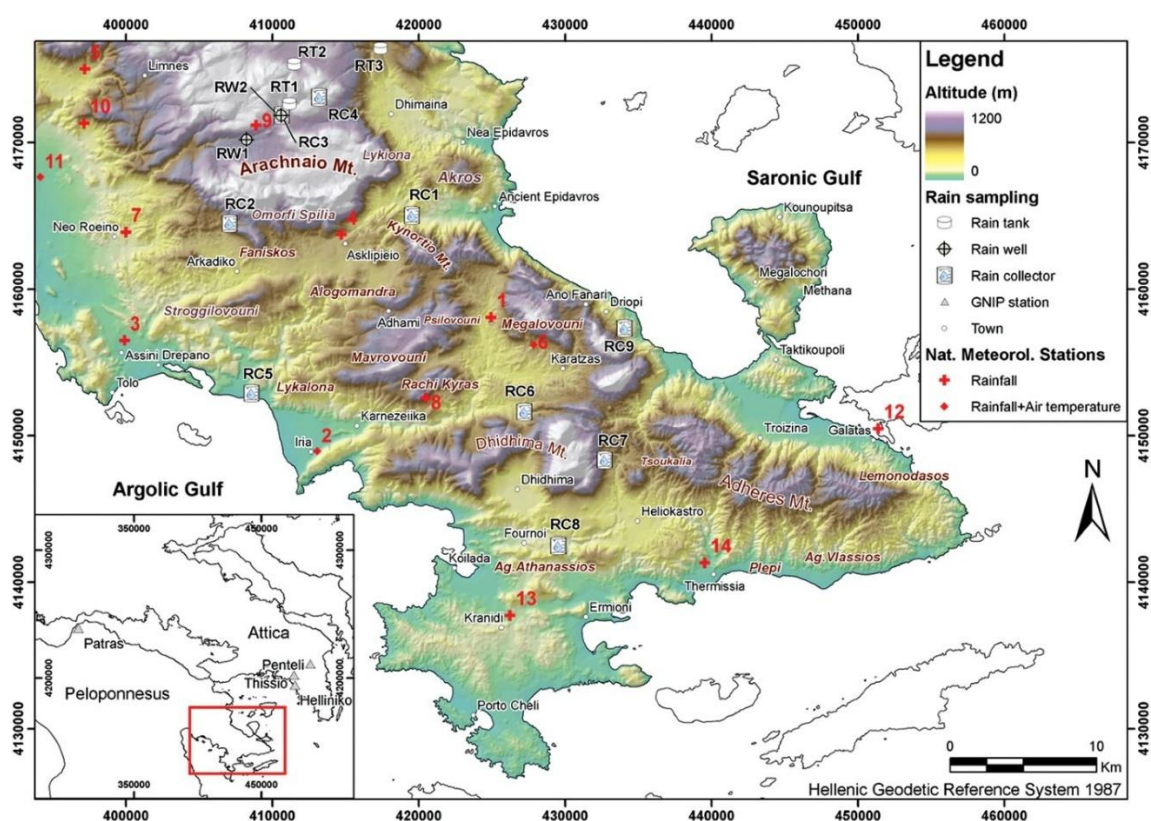
#### Περιβαλλοντική και υδρο-οικονομική σημασία

Το γλυκό νερό συμβάλλει στη διατήρηση του οικοσυστήματος των παράκτιων περιοχών (Fytikas et al., 1989) . Χρησιμοποιείται κυρίως για άρδευση και ύδρευση αγροτικών κοινοτήτων.

### 6.3 Υδροφόρος ορίζοντας Αργολικού κόλπου, Πελοπόννησος

Η αργολική χερσόνησος βρίσκεται στη νότια Ελλάδα ανάμεσα από τον Σαρωνικό και τον Αργολικό κόλπο ενώ Βόρεια οροθετείται από την οροσειρά του Αραχναίου (Εικόνα 16). Αποτελείται από επίπεδες και ημι-ορεινές εκτάσεις ενώ το μέσο υψόμετρο της περιοχής είναι περίπου τα 349 μ. πάνω από τη θάλασσα. Οι Matiatos & Alexopoulos (2011) μελέτησαν τα υδροφόρα συστήματα της περιοχής συνδυάζοντας υδροχημικά και ισοτοπικά ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) δεδομένα, προκειμένου να εξάγουν συμπεράσματα για την ποιότητα του νερού και τις υδροχημικές ιδιότητες των υδροφορέων. Τα δεδομένα σταθερών ισοτόπων χρησιμοποιήθηκαν επίσης για την κατανόηση των υψομέτρων ανατροφοδότησης και της προέλευσης των υπόγειων υδάτων. Ο Αργολικός Κόλπος δέχεται εκφορτίσεις από μεγάλους υπόγειους υδροφορείς της Πελοποννήσου, οι οποίοι προέρχονται από τον ορεινό όγκο του

## Πάρνωνα.



Εικόνα 16 Η Αργολική χερσόνησος. Προσαρμογή από Matiatos & Alexopoulos (2011).

## Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Πετρώματα: Η γεωλογική δομή της περιοχής με βάση μιας προηγούμενης μελέτης των ίδιων ερευνητών (Matiatos & Alexopoulos, 2007) αποτελείται από:

- Νηριτικά ασβεστολιθικά πετρώματα, Τριαδικής-Ιουρασικής και Κρητιδικής περιόδου
- Ένα οφιολιθικό μείγμα που περιλαμβάνει δολομίτες και πυριτόλιθους
- Ένα τεκτονικό μείγμα που αποτελείται από ψαμμίτες και ιλύς. Μέσα στο μείγμα εντοπίζονται επίσης ηφαιστειακά πετρώματα, ασβεστόλιθοι, δολομίτες, βασάλτες κ.ά.
- Εναλλαγές ασβεστολιθικών σχιστόλιθων, μαργών, ψαμμιτών και ασβεστολίθων
- Νεογενείς αποθέσεις, ηλικίας Μειοκαίνου-Πλειοκαίνου
- Προσχωσιγενείς ηφαιστειακοί σχηματισμοί
- Πρόσφατες αποθέσεις που αποτελούνται από αλλουβιακούς κώνους, κώνους αποσάθρωσης, άμμο και βότσαλα.

Υδροφορέας: Υπό πίεση υδροφόρος ορίζοντας

Βαθμός διαπερατότητας: Πολύ υψηλός λόγω του έντονου καρστικού συστήματος.

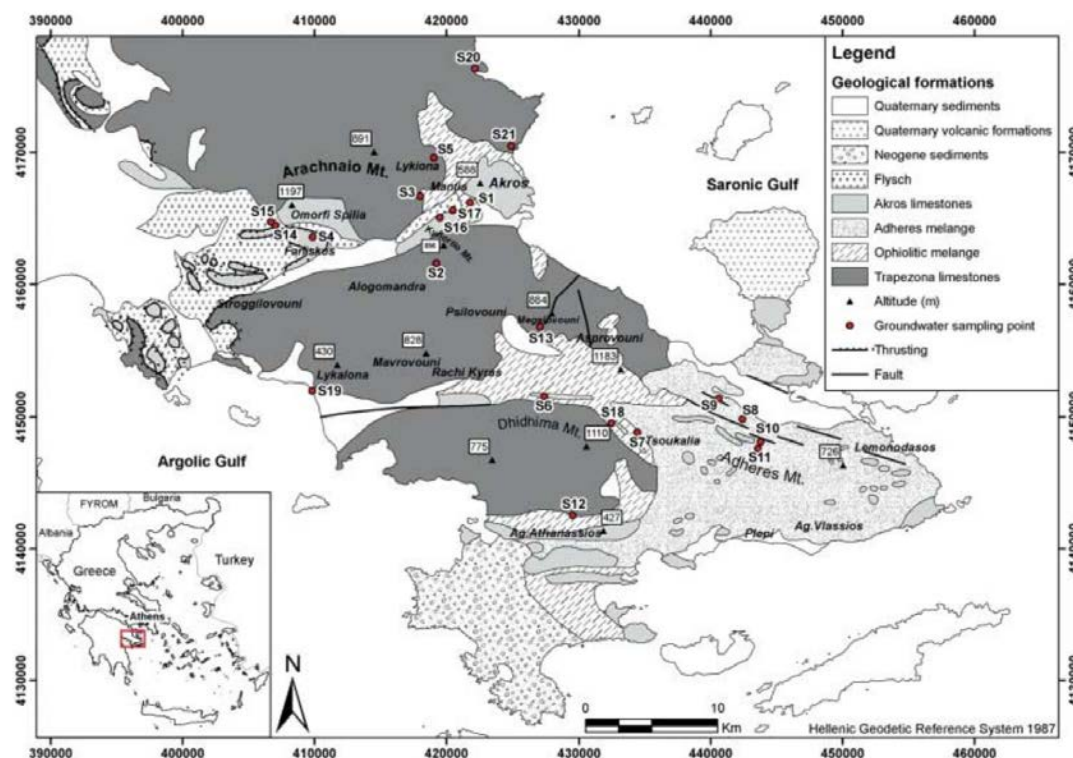
Πηγές: Η σημαντική λιθολογική ετερογένεια της Αργολικής χερσονήσου οδήγησε στην εμφάνιση μεμονωμένων πηγών. Οι πηγές αναβλύζουν κυρίως από ανθρακικούς σχηματισμούς, αλλά και από λιθολογίες με χαμηλότερη διαπερατότητα, όπως το οφιολιθικό σύμπλοκο και τα ιζήματα του φλύσχη. Οι πηγές χαρακτηρίζονται γενικά από μικρή εκφόρτιση, εκτός από τις παράκτιες που τροφοδοτούνται από τα Τριαδικά-Ιουρασικά πετρώματα που καλύπτουν σε μεγάλο βαθμό τη χερσόνησο. Για παράδειγμα οι μέσες ετήσιες εκφορτίσεις παράκτιων πηγών για την πηγή Κάντια είναι 2900 m<sup>3</sup>/h, για την πηγή Σελώντα 2000 m<sup>3</sup>/h ενώ για την πηγή του Αγίου Νικολάου (Νέα Επίδαυρος) είναι 400 m<sup>3</sup>/h. Ωστόσο οι συγκεκριμένες πηγές συγκαταλέγονται εν μέρη στις υφάλμυρες λόγω της απευθείας εκφόρτισής τους στη θάλασσα. Οι κυριότερες πηγές της περιοχής απεικονίζονται στον παρακάτω πίνακα όπως καταγράφηκαν από τους Matiatos & Alexopoulos σε μελέτη που πραγματοποίησαν στην περιοχή κατά την περίοδο Οκτωβρίου 2005 – Ιανουαρίου 2007:

Πίνακας 1. Σημαντικές πηγές του Αργολικού υδροφόρου ορίζοντα.

| A/α | Περιοχή       | Τύπος    | Υψόμετρο (m) |
|-----|---------------|----------|--------------|
| 1   | Αγ. Μαρίνα    | Πηγή     | 104          |
| 2   | Αγ. Ανδρέας   | Πηγή     | 130          |
| 3   | Αγ. Άννα      | Πηγή     | 403          |
| 4   | Αγ. Παρασκευή | Πηγή     | 269          |
| 5   | Επίδαυρος     | Πηγή     | 110          |
| 6   | Κάντια        | Γεώτρηση | 7            |
| 7   | Πελέι         | Πηγή     | 309          |
| 8   | Λουκαίτη      | Πηγάδι   | 213          |
| 9   | Τσουκάλια     | Πηγή     | 379          |
| 10  | Μοναστήρι     | Πηγή     | 343          |
| 11  | Φούρνοι       | Πηγή     | 124          |
| 12  | Κιάφα         | Πηγή     | 430          |
| 13  | Αραχναίο 1    | Πηγάδι   | 712          |

|    |            |                         |     |
|----|------------|-------------------------|-----|
| 14 | Αραχναίο 2 | Δεξαμενή βρόχινου νερού | 745 |
| 15 | Αραχναίο 3 | Δεξαμενή βρόχινου νερού | 741 |

Σε μεταγενέστερη τους μελέτη, οι Matiatos & Alexopoulos (2011) εξέτασαν τα ισοτοπικά και υδροχημικά χαρακτηριστικά 21 πηγών στη Χερσόνησο της Αργολίδας (Εικόνα 17) δημιουργώντας μια βάση δεδομένων που περιλαμβάνει τιμές ισοτόπων οξυγόνου και υδρογόνου με κύριο στόχο την εκτίμηση του μέσου υψομέτρου τροφοδοσίας των πηγών, από τις οποίες έγιναν οι δειγματοληψίες. Οι δειγματοληψίες από τις δεξαμενές, τα πηγάδια και τις πηγές έγιναν σε μηνιαία βάση κατά τα έτη 2005-2008. Τα δείγματα από όλες τις πηγές, συμπεριλαμβανομένων των παράκτιων, συλλέχθηκαν στην εκβολή τους για να ελαχιστοποιηθεί η έκθεση του υπόγειου νερού στον ατμοσφαιρικό αέρα ή την εξάτμιση. Για τη συμπληρωματική απόκτηση πληροφοριών σχετικά με το αποτύπωμα των ισοτόπων του νερού της βροχής στην περιοχή, κατασκευάστηκαν εννέα συλλέκτες βροχής. Η αναλογία των σταθερών ισοτόπων οξυγόνου προσδιορίστηκε με φασματομετρία μάζας σε συνεργασία με εξειδικευμένα εργαστήρια στην Ελλάδα και την Αμερική. Ταυτόχρονα, στα σημεία δειγματοληψίας οι ερευνητές προσδιόρισαν και άλλες παραμέτρους ποιότητας όπως η θερμοκρασία του νερού, το pH και η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC).



Εικόνα 171747 Απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης στον οποίο απεικονίζονται οι περιοχές δειγματοληψίας των υπόγειων υδάτων (Matiatos & Alexopoulos, 2011).

### Υδρολογικές συνθήκες

Ο υδροφορέας εκφορτίζει μεγάλες ποσότητες νερού μέσω παράκτιων και υποθαλάσσιων πηγών (Zagana et al., 2024). Η θερμοκρασία του νερού κυμαίνεται από 14-18°C. Η ποιότητα του νερού είναι υψηλή, με χαμηλές συγκεντρώσεις αλάτων.

### Περιβαλλοντική και υδρο-οικονομική σημασία

Οι εκφορτίσεις του συμβάλλουν στη διατήρηση των θαλάσσιων οικοσυστημάτων (Mitropapas et al., 2016). Το νερό χρησιμοποιείται για ύδρευση και άρδευση σε καλλιέργειες εσπεριδοειδών.

### Συμπεράσματα

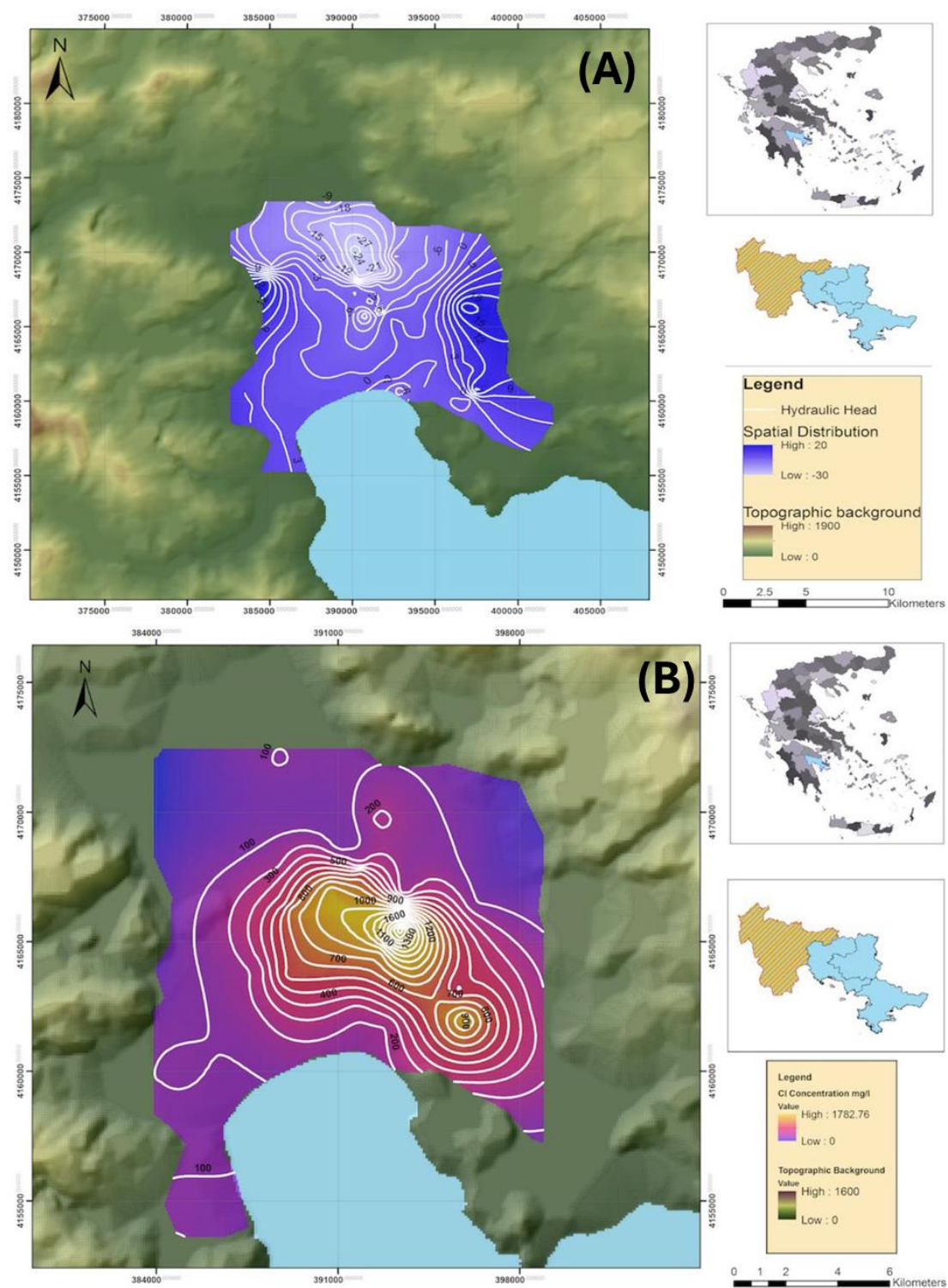
Από την μελέτη των Matiatis & Alexopoulos (2011) διεξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι τιμές των σταθερών ισοτόπων των υπόγειων υδάτων βασίζονται στις αλλαγές της σύστασης των ατμοσφαιρικών υδάτων. Έτσι, τα υπόγεια ύδατα κληρονομούν τα ισοτοπικά χαρακτηριστικά των βροχοπτώσεων, εκτός από την περίπτωση ανάμειξης με ύδατα διαφορετικής προέλευσης και σύνθεσης.

- Οι μετρήσεις των τιμών δΟ18 στα νερά των πηγών αντανακλούν εποχιακές διακυμάνσεις με τις ελάχιστες να καταγράφονται κατά τη διάρκεια του χειμώνα και τις μέγιστες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Ωστόσο είναι πολύ μικρότερες από αυτές του βρόχινου νερού, υποδεικνύοντας την καλή ανάμειξη τους με τα υπόγεια ύδατα.
- Τα υπόγεια νερά εμπλουτίζονται κυρίως μέσω των βροχοπτώσεων, διεισδύουν στο έδαφος και τροφοδοτούν τα υπόγεια αποθέματα, αποκλείοντας την εξάτμιση πριν από την τροφοδοσία.
- Μερικές από τις παράκτιες καρστικές πηγές της περιοχής εντοπίζονται κατά μήκος της γραμμής ανάμειξης βρόχινου και θαλασσινού νερού, αποδεικνύοντας την εισχώρηση θαλασσινού νερού.
- Το υψόμετρο επηρεάζει τη σύνθεση των ισοτόπων στα ατμοσφαιρικά νερά και συνεπώς και στα υπόγεια ύδατα. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως επίδραση υψομέτρου και επιτρέπει τη διάκριση των υπόγειων υδάτων που προέρχονται από διαφορετικά υψόμετρα επιτρέποντας και τον υπολογισμό του μέσου υψομέτρου τροφοδοσίας.
- Το τοπικό ανάγλυφο επηρεάζει επίσης τη σχέση μεταξύ ισοτοπικής σύνθεσης και υψομέτρου. Οι περισσότερες πηγές επίσης διαθέτουν μέσο υψόμετρο τροφοδοσίας υψηλότερο από το σημείο δειγματοληψίας, γεγονός που υπογραμμίζει την ανάγκη για πιο εκτενείς υδρογεωλογικές μελέτες στην περιοχή της χερσονήσου.
- Ανάλογα με τις τιμές των ισοτόπων δ18O και των τιμών χλωρίου οι πηγές της περιοχής δειγματοληψίας διακρίθηκαν σε 3 ομάδες: (α) αυτές που παρουσιάζουν χαμηλές τιμές σε δ18O και χλωρίου υποδηλώνοντας την τροφοδοσία τους από υψόμετρα άνω των 500 m, (β) αυτές που παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές δ18O αλλά χαμηλά επίπεδα χλωρίου, υποδεικνύοντας την τροφοδοσία τους από υψόμετρα μικρότερα των 500 m και (γ) παράκτιες, όπου εμφανίζουν μεγάλες τιμές χλωρίου λόγω της ανάμειξής τους με το θαλασσινό νερό. Πολλές από αυτές τροφοδοτούνται από το όρος Μαυροβούνι και άλλες από το όρος Αραχναίο.
- Η ποιότητα του νερού ορισμένων πηγών της περιοχής έχει επηρεαστεί από ανθρώπινες δραστηριότητες, όπως η γεωργία και η κτηνοτροφία, με τη συγκέντρωση νιτρικών να εμφανίζει υψηλές τιμές λόγω της χρήσης

λιπασμάτων και της συγκέντρωσης αποβλήτων. Συνεπώς τα υπόγεια αυτά νερά είναι χαμηλής μεταλλοποίησης.

- Ακόμη, η σύσταση των υπόγειων υδάτων της περιοχής δίνουν πληροφορίες και για την γεωλογική σύσταση των υδροφορέων από τους οποίους προέρχονται. Για παράδειγμα τα ύδατα με υψηλή περιεκτικότητα σε  $\text{Ca-HCO}_3$ , κυριαρχούν στην περιοχή και χαρακτηρίζουν υπόγεια νερά που προέρχονται από υδροφορείς σε ανθρακικούς σχηματισμούς, αμμώδη και συγκολλώμενα πετρώματα. Άλλη κατηγορία αποτελούν τα ύδατα που περιέχουν  $\text{Mg-HCO}_3$  και προέρχονται από οφιολιτικά μείγματα, πλούσια σε μαγνήσιο. Τέλος, τα υπόγεια ύδατα με υψηλές συγκεντρώσεις  $\text{Na-Cl}$  συνδέονται με παράκτιες καρστικές πηγές. Τα παραπάνω σημεία παρέχουν μια καθαρή εικόνα της υδροχημικής διαφοροποίησης στην περιοχή ενισχύοντας την κατανόηση των χαρακτηριστικών των υπόγειων υδάτων και των γεωλογικών συνθηκών που τα επηρεάζουν.



Εικόνα 181818 (A) Πιεζομετρικός χάρτης και (B) χωρική κατανομή ιόντων χλωρίου (Cl<sup>-</sup>) του Αργολικού υδροφορέα. Προσαρμογή από Mitroparas et al., (2016).

## 6.4 Υδροφόρος ορίζοντας Θήρας, Κυκλάδες

Η Θήρα διαθέτει καρστικούς υδροφορείς, οι οποίοι εκφορτίζονται στη θάλασσα μέσω φυσικών υπόγειων αγωγών (Kopsiaftis, Mantoglou & Giannouloupoulos, 2009).

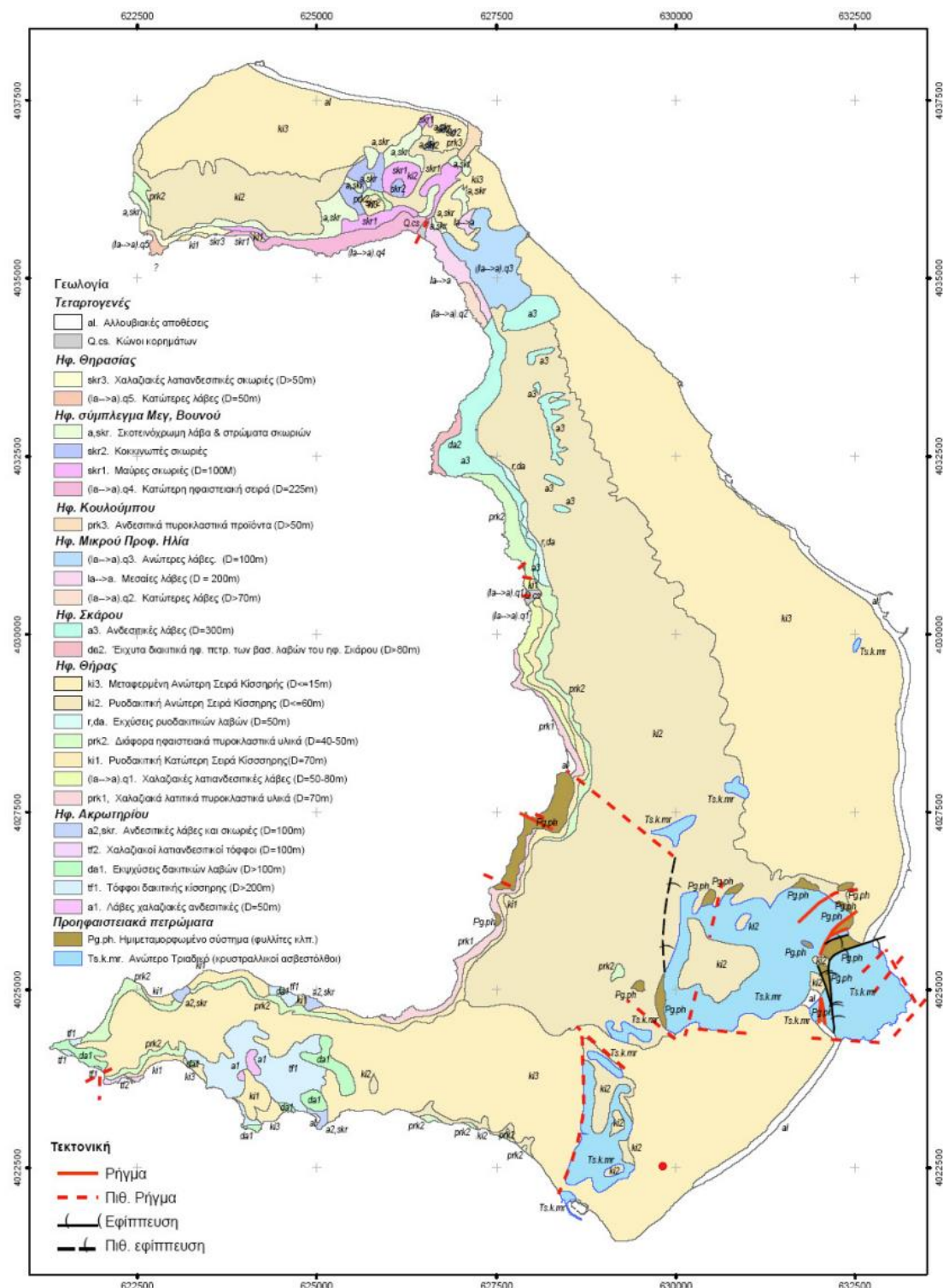
Γεωλογικά χαρακτηριστικά (Εικόνα 19).

- Πετρώματα: Ηφαιστειακά πετρώματα και βασάλτες
- Υδροφορέας: Καρστικός και ρωγμώδης υδροφόρος ορίζοντας
- Δυναμική: Καρστικός και ρωγμώδης υδροφόρος ορίζοντας

Υδρολογικές συνθήκες

Τα υπόγεια νερά εκφορτίζονται μέσω υποθαλάσσιων αναβλύσεων (Papachristou et al., 2016). Διαθέτουν υψηλή περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα λόγω ηφαιστειακής δραστηριότητας. Η θερμοκρασία του νερού κυμαίνεται μεταξύ 15-19°C.

Περιβαλλοντική και υδρο-οικονομική σημασία Το νερό του υδροφορέα αυτού είναι βασική πηγή υδροδότησης της Θήρας. Η υπεράντληση έχει προκαλέσει εισροή θαλασσινού νερού (Kopsiaftis et al., 2017).



Εικόνα 191949 Γεωλογικός χάρτης Θήρας έκδοσης ΙΓΜΕ κλ. 1:50.000 (Στράντζαλης, 2008).

## 6.5 Υδροφόρος ορίζοντας Ρόδου, Δωδεκάνησα

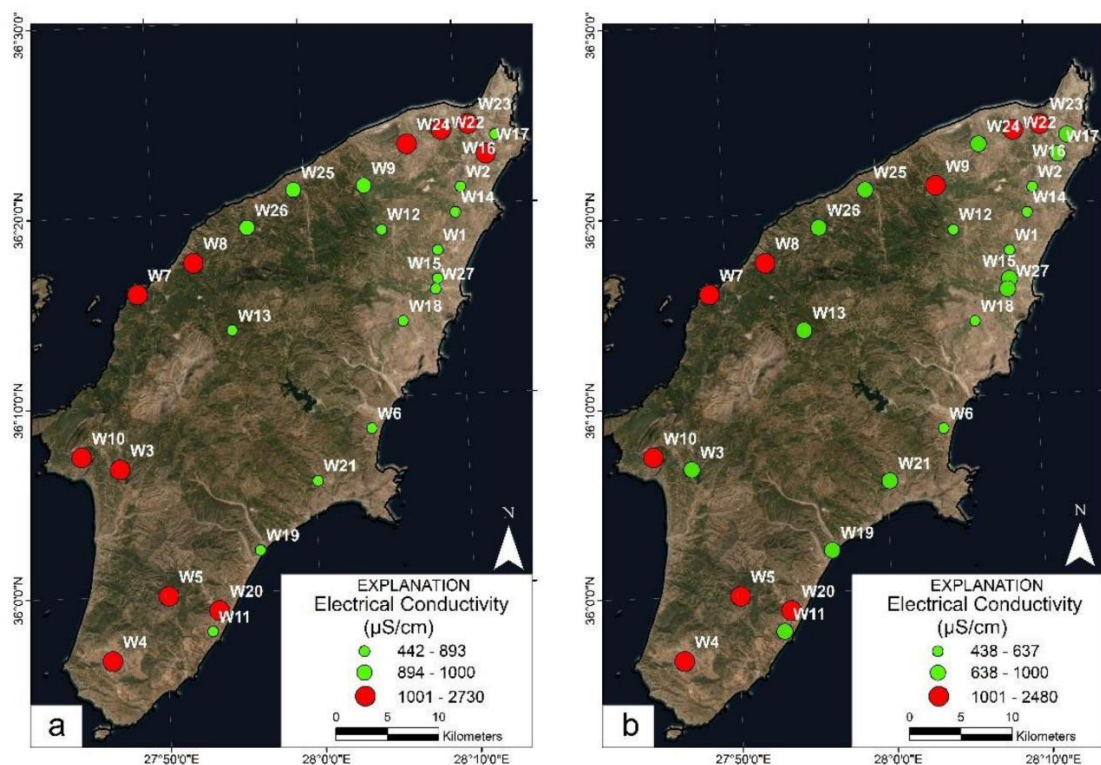
Ο υδροφόρος ορίζοντας της Ρόδου είναι από τους μεγαλύτερους των Δωδεκανήσων και εκφορτίζεται στη θάλασσα μέσω υπόγειων καρστικών αγωγών (Vangelis et al., 2017).

#### Γεωλογικά χαρακτηριστικά

- Πετρώματα: Ασβεστόλιθοι και δολομίτες
- Υδροφορέας: Καρστικός και φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας
- Διαπερατότητα: Υψηλή

#### Περιβαλλοντική και υδρο-οικονομική σημασία

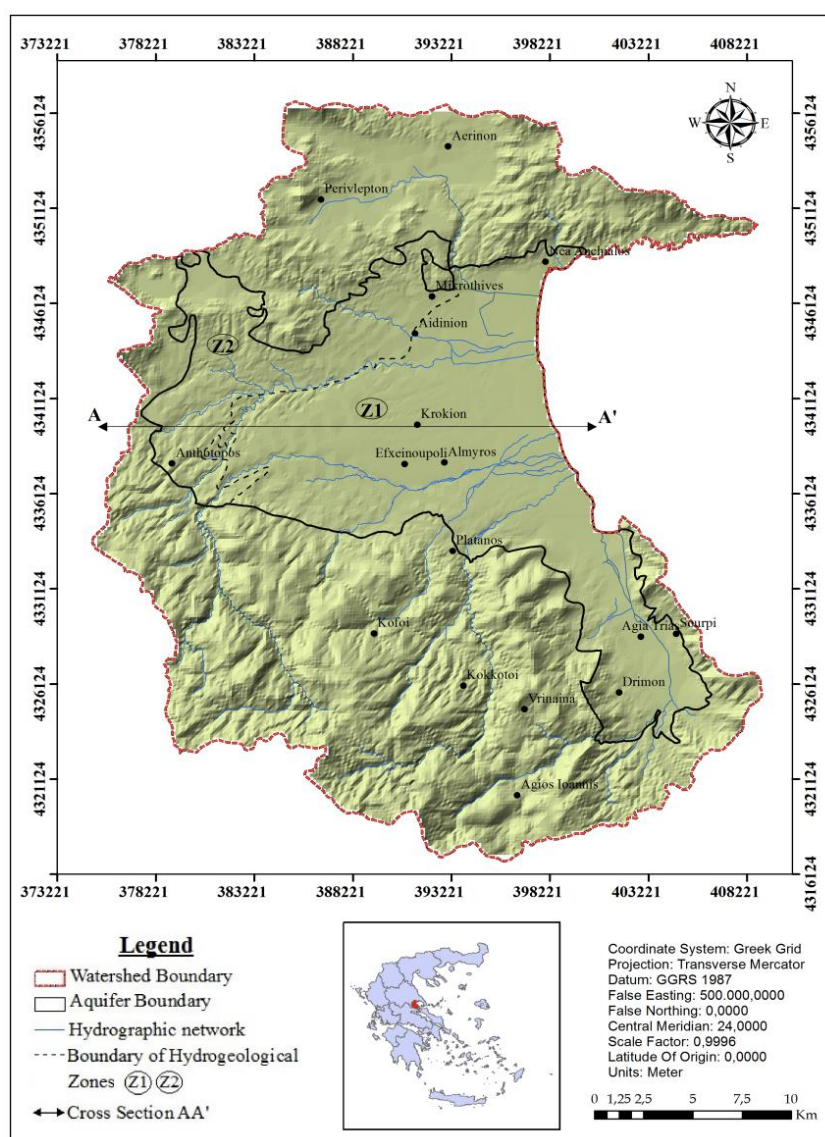
Ο υδροφόρος ορίζοντας αυτός αποτελεί την κύρια πηγή ύδρευσης της Ρόδου (Alexakis, 2022). Είναι επίσης πολύ σημαντικός για την αγροτική παραγωγή και την τουριστική ανάπτυξη (Μανριου, Kazakis & Pliakas, 2019).



Εικόνα 202020 Χάρτης που δείχνει τις τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σταθμούς παρακολούθησης υδροφορέων στο νησί της Ρόδου για: (α) 2019 και (β) 2020 (Alexakis, 2022).

## 6.6 Υδροφόρος ορίζοντας του Αλμυρού, Μαγνησία

Ο υδροφόρος ορίζοντας του Αλμυρού (Εικόνα 21) είναι ένας από τους σημαντικότερους υπόγειους υδροφορείς στην Ελλάδα, με ιδιαίτερη σημασία λόγω της ευπάθειάς του σε φαινόμενα υφαλμύρωσης και ανθρωπογενούς επιβάρυνσης (Lyra et al., 2021). Οι παράκτιες περιοχές του Αλμυρού χαρακτηρίζονται από έντονη αλληλεπίδραση μεταξύ γλυκού και θαλάσσιου νερού, γεγονός που καθιστά την προστασία και διαχείρισή τους κρίσιμη για τη βιωσιμότητα των υδατικών αποθεμάτων και την περιβαλλοντική ισορροπία της περιοχής (Lepuri, Loukas & Lyra, 2023).



Εικόνα 21 Χάρτης της λεκάνης του Αλμυρού Μαγνησίας στον οποίο απεικονίζονται επίσης τα υδρογραφικά δίκτυα (Sidiropoulos, 2016).

Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Ο υδροφόρος ορίζοντας του Αλμυρού αναπτύσσεται κυρίως σε καρστικούς ασβεστόλιθους και κερδονολιθικά πετρώματα με υψηλή υδροπερατότητα (Lyra, Loukas & Sidiropoulos, 2021). Αποτελείται από δύο κύριες υδροφορείς ζώνες:

- Επιφανειακός υδροφόρος: Περιέχει γλυκό νερό που τροφοδοτείται από κατείσδυση της βροχής.
- Βαθύτερος υδροφόρος: Εκτείνεται σε μεγαλύτερα βάθη και περιέχει υψηλότερες συγκεντρώσεις διαλυμένων αλάτων λόγω μακροχρόνιας επαφής με θαλάσσιο νερό.

Η παρουσία διαρρήξεων και ρηγμάτων στο γεωλογικό υπόβαθρο επιτρέπει τη γρήγορη μετακίνηση των υπόγειων υδάτων, αυξάνοντας τον κίνδυνο θαλάσσιας διείσδυσης και υφαλμύρωσης (Sidiropoulos, Loukas & Georgiadou, 2016).

Τροφοδοσία του υδροφόρου Ορίζοντα

Η τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα του Αλμυρού προέρχεται κυρίως από:

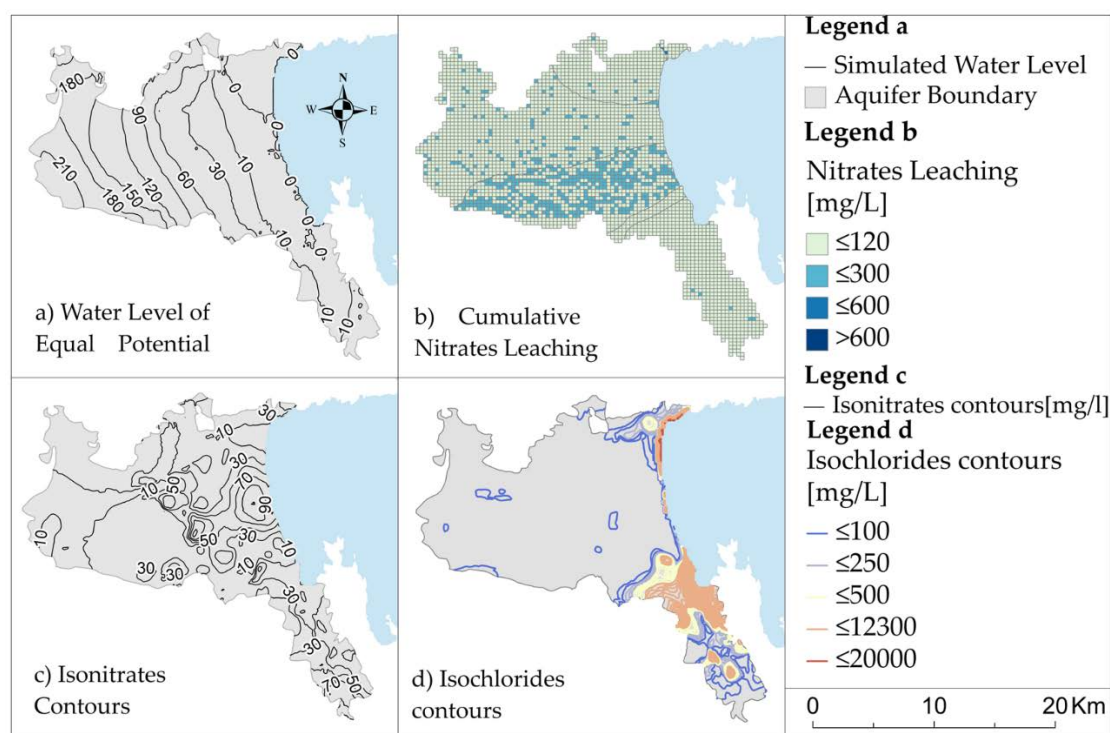
- Βροχοπτώσεις και κατείσδυση των υδάτων.
- Ροή από παρακείμενους υδροφόρους ορίζοντες μέσω υπόγειων ρευμάτων.
- Διείσδυση του θαλασσινού νερού λόγω υπεραντλήσεων.

Η στάθμη του γλυκού νερού παρουσιάζει εποχιακές διακυμάνσεις, με σημαντική μείωση κατά τους θερινούς μήνες λόγω αυξημένων αναγκών άρδευσης (Lyra et al., 2022).

Κίνδυνοι και προκλήσεις

Ο κύριος κίνδυνος που αντιμετωπίζει ο υδροφόρος ορίζοντας του Αλμυρού είναι η υφαλμύρωση, η οποία συμβαίνει λόγω υπεραντλήσεων, που μειώνουν τη στάθμη του γλυκού νερού και επιτρέπουν στο θαλασσινό νερό να διεισδύσει. Με βάση τους Leruri, Loukas & Lyra, (2023), στην περιοχή του Αλμυρού Βόλου, κατά τις περιόδους μελέτης 1992–1997, 2004–2009 και 2010–2015 παρατηρήθηκε σταδιακή αύξηση των τιμών υψηλής και μέσης ευπάθειας στην υφαλμύρωση (0,5–2%). Αυτή η αύξηση αποδίδεται σε μεταβολές παραμέτρων όπως το υδραυλικό φορτίο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, οι υπάρχουσες συνθήκες αλατότητας και το πάχος του υδροφορέα, οι οποίες μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου. Η αξιολόγηση της ευπάθειας μέσω του δείκτη GALDIT, χρησιμοποιώντας τόσο τα τυπικά βάρη όσο και

τα βάρη που προέκυψαν από τη στατιστική μέθοδο AHP (Median και Average), έδειξε παρόμοια συνολική κατανομή υψηλής ευπάθειας σε όλες τις περιόδους μελέτης. Αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την ευάλωτη κατάσταση του υδροφορέα στον Αλμυρό Βόλου και τη σημασία της παρακολούθησης και διαχείρισης για την αντιμετώπιση της υφαλμύρωσης. Επίσης, η κλιματική αλλαγή, μειώνει τα επίπεδα των βροχοπτώσεων και τη φυσική αναπλήρωση του υδροφορέα (Gounari et al., 2014). Ένας ακόμη κίνδυνος είναι η αστική ανάπτυξη, που μειώνει την κατείσδυση του νερού λόγω αύξησης των αδιαπέρατων επιφανειών. Τέλος, η ρύπανση από γεωργικές και βιομηχανικές δραστηριότητες επιβαρύνει την ποιότητα των υπόγειων υδάτων, αυξάνοντας τις συγκεντρώσεις νιτρικών και φωσφορικών ιόντων (Εικόνα 22). Η διαχείριση του υδροφόρου ορίζοντα του Αλμυρού απαιτεί ολοκληρωμένες στρατηγικές για την προστασία των αποθεμάτων και τη διασφάλιση της ποιότητας του νερού (Myriounis, Dimopoulos & Manakos 2011).



Εικόνα 22. Αποτελέσματα προσομοίωσης υπόγειων υδάτων για τις υπάρχουσες γεωργικές και διαχειριστικές συνθήκες υδάτων και για το νερό που παρέχεται μέσω άντλησης υπόγειων υδάτων: (α) υδραυλικές ποσότητες, (β) έκπλυση νιτρικών, (γ) συγκεντρώσεις χλωριούχων ιόντων και (δ) συγκεντρώση νιτρικών ιόντων τον Σεπτέμβριο του 2018 (Lyra et al., 2022).

#### Τεχνητή αναπλήρωση υδροφορέων

Η τεχνητή αναπλήρωση των υδροφορέων αποτελεί μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους για τη διατήρηση της υδραυλικής ισορροπίας και την αποτροπή της

θαλάσσιας διείσδυσης (Sidiropoulos, Loukas & Georgiadou, 2016). Αυτή μπορεί να επιτευχθεί μέσω:

- Χρήσης δεξαμενών συλλογής βρόχινου νερού.
- Επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων λυμάτων για εμπλουτισμό των υδροφορέων.

Μείωση της υπεράντλησης

Η μείωση της υπεράντλησης μπορεί να επιτευχθεί με:

- Περιορισμούς στην άντληση κατά τη θερινή περίοδο.
- Διανομή των αντλήσεων σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές (Lyra, Loukas & Sidiropoulos, 2021).

Νομοθεσία και κανονισμοί

Στην Ελλάδα, η διαχείριση των υδάτων διέπεται από την Κοινοτική Οδηγία 2000/60/EK, η οποία απαιτεί την εφαρμογή διαχειριστικών σχεδίων ανά υδατικό διαμέρισμα.

Συμπεράσματα

Ο υδροφόρος ορίζοντας του Αλμυρού αποτελεί έναν ζωτικής σημασίας φυσικό πόρο που αντιμετωπίζει σοβαρές προκλήσεις λόγω της υφαλμύρωσης, της κλιματικής αλλαγής και της ανθρωπογενούς παρέμβασης (Sidiropoulos, Loukas & Georgiadou, 2016). Για να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα των υδατικών αποθεμάτων, είναι απαραίτητη η εφαρμογή σύγχρονων στρατηγικών διαχείρισης που περιλαμβάνουν:

- Μείωση των υπεραντλήσεων και αυστηρό έλεγχο στη χρήση των γεωτρήσεων.
- Αξιοποίηση τεχνικών τεχνητού εμπλουτισμού για τη διατήρηση της στάθμης των υδροφορέων.
- Υιοθέτηση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών για τον περιορισμό της ρύπανσης.
- Εφαρμογή αυστηρότερων νομοθετικών πλαισίων για την προστασία των υπόγειων υδάτων.

Η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών θα συμβάλει στη διατήρηση ενός ισορροπημένου υδατικού ισολογισμού, εξασφαλίζοντας την επάρκεια και την ποιότητα του νερού για τις επόμενες γενιές (Lyra et al., 2022).

## 6.7 Υδροφόρος ορίζοντας του Ζάρακα, Πελοπόννησος

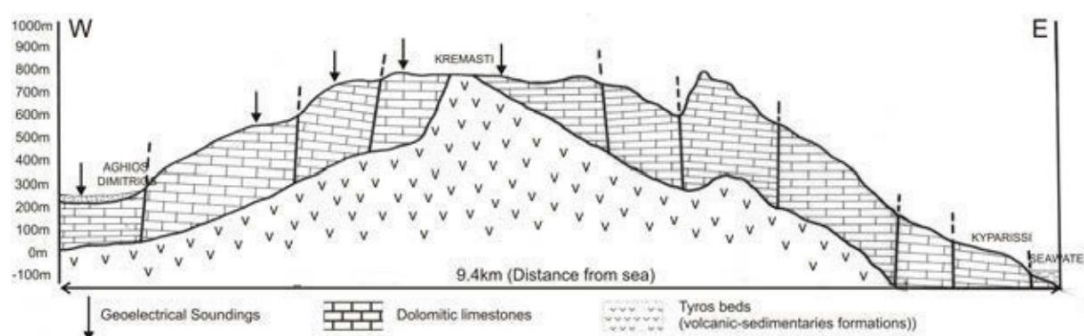
Το καρστικό υδροφόρο σύστημα του Ζάρακα βρίσκεται στη νοτιοανατολική Πελοπόννησο. Ο Ζάρακας βρίσκεται στο βορειοανατολικό άκρο του νομού Λακωνίας, στις νότιες απολήξεις του Πάρωνα. Η περιοχή αντιμετωπίζει χρόνια λειψυδρία, ενώ έχουν σημειωθεί αρκετές προσπάθειες γεωτρήσεων για την υδροδότησή της. Εμφανίζει μεγάλη υδρογεωλογική σημασία καθώς αποτελείται από ένα εκτεταμένο ανθρακικό στρώμα που εξασφαλίζει άμεση διήθηση του νερού. Διαθέτει πολλές παράκτιες πηγές και λίγες εσωτερικές, με σημαντικές τις πηγές Κρεμαστής. Σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της Ελλάδας από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε) στην περιοχή του Ζάρακα εμφανίζονται διάφοροι τύποι ασβεστολίθων όπως οργανογενείς (Παλαιόκαινο-Μέσο Ηώκαινο), ζαχαρώδους όψης, δολομιτικοί και λατυποπαγή πετρώματα (Γκίκα, 2017). Στην περιοχή του Λιμανιού του Γέρακα (Αρχαίος Ζάρακας) εμφανίζονται ασβεστολιθικοί λόφοι, οι οποίοι είναι καλυμμένοι με βλάστηση και δεν υπάρχει ανεπτυγμένο υδροφόρο δίκτυο. Εξαιτίας της ασβεστολιθικής φύσης του υποβάθρου, δημιουργείται ελάχιστη επιφανειακή απορροή. Η συσσώρευση κοκκινωπού αργιλικού υλικού στο εσωτερικό του κόλπου, προέρχεται κυρίως από τη χημική διάλυση του υποβάθρου, οδηγώντας στη δημιουργία προσχώσεων με αργιλικά υλικά (Γκίκα, 2017).

### Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Ο υδροφορέας του Ζάρακα χαρακτηρίζεται από έντονη τεκτονική δραστηριότητα και απότομα βραχώδη βουνά με υψόμετρα που φτάνουν έως και τα 1200 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Οι κύριες τεκτονικές ασυνέχειες στην περιοχή έχουν την ίδια κατεύθυνση με αυτή των ακτογραμμών και των ανθρακικών σχηματισμών. Αυτή η κατεύθυνση διακόπτεται από ρήγματα τα οποία συμπίπτουν με τις ακτογραμμές.

Πετρώματα: Υπάρχουν χαρακτηριστικά καρστικά στοιχεία, όπως καταβόθρες, ουβάλες και δολίνες ειδικότερα πλησίον της περιοχής Κουπιά. Η ύπαρξη πρόσφατης τεκτονικής δραστηριότητας στην περιοχή επιβεβαιώνεται επιπλέον από την απουσία Ολόκαινων αποθέσεων κατά μήκος της ακτογραμμής. Τα ηφαιστειακά—ιζηματογενή στρώματα του Τυρού, τοποθετούνται κάτω από τις ανθρακικές εναποθέσεις (Εικόνα 23). Το βάθος του εκτιμάται στα 530 m με βάση τις αναλύσεις από γεωτρήσεις των

Αγγελόπουλου & Κωνσταντινίδη (1988). Ο σχηματισμός αυτός εμφανίζεται στο βορειοδυτικό όριο της περιοχής μελέτης και στην περιοχή της Κρεμαστής. Με βάση τις γεωφυσικές μελέτες που είναι διαθέσιμες αναφέρεται ότι οι σχηματισμοί του Τυρού βρίσκονται σε υψόμετρο πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας ακόμη και σε περιοχές με χαμηλό υψόμετρο. Συγκεκριμένα, στην περιοχή Άγιος Δημήτριος, τα ανώτερα επίπεδα των στρωμάτων του Τυρού βρίσκονται σε υψόμετρο 60 m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας ωστόσο στην περιοχή Νιάτα, οι σχηματισμοί του Τυρού βρίσκονται πιο βαθιά από την επιφάνεια της θάλασσας, γύρω στα 420 m κάτω από αυτή (Lappas, Sabatakakis & Stefouli, 2011).



Εικόνα [232323](#) Γεωλογική τομή σε κατεύθυνση Δ – Α που δείχνει την ανύψωση των κοιτασμάτων του Τυρού. Τα μαύρα βέλη υποδεικνύουν τις θέσεις όπου πραγματοποιήθηκαν γεωηλεκτρικές βυθομετρήσεις προκειμένου να προσδιοριστεί το απόλυτο υψόμετρο των κοιτασμάτων του Τυρού. Στην ανατολική πλευρά της περιοχής της Κρεμαστής, το βάθος των κοιτασμάτων του Τυρού έχει προσδιοριστεί με βάση στρωματογραφικά, τεκτονικά και υδρογεωλογικά δεδομένα (Lappas, Sabatakakis & Stefouli, 2011)

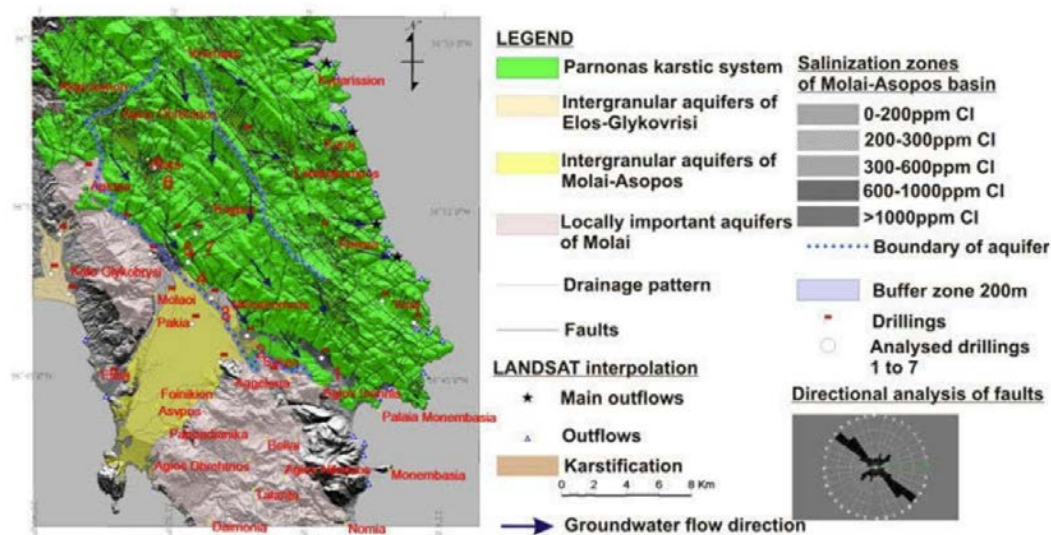
**Υδροφορέας:** Συνδυάζοντας δεδομένα από διάφορες πηγές, όπως γεωφυσικές μετρήσεις γεωτρήσεις και ισοτοπικές αναλύσεις οι Lappas, Sabatakakis & Stefouli (2011) επιχείρησαν την ακριβή οριοθέτηση των περιοχών ανατροφοδότησης και αποφόρτισης υπόγειων υδάτων στο υδροφόρο σύστημα του Ζάρακα, με στόχο τον εντοπισμό της θέσης των υπόγειων λεκανών αλλά και επιφανειακών υδάτων που τροφοδοτούν το σύστημα. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποίησαν δεδομένα από γεωφυσικές διασκοπήσεις (εκτίμηση της θερμοκρασίας του νερού μέσω της τεχνικής Landsat και από χάρτες ροής – αλατότητας όπως αυτός των Sabatakakis & Makris (1993) που επισήμανε ροή του συστήματος μελέτης κατά μήκος των δυτικών του ορίων, που καλύπτεται από ανθρακικά πετρώματα και κοκκώδη ιζήματα. Υπάρχουν επίσης διαθέσιμα δεδομένα γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων από το Ι.Γ.Μ.Ε στο πλαίσιο του Υδρογεωλογικού Ερευνητικού Προγράμματος που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση το 1996, με στόχο τον εντοπισμό του βάθους των στρωμάτων

του Τυρού κάτω από τα ανθρακικά πετρώματα. Στην περιοχή, λόγω της παράκτιας της φύσης, πραγματοποιείται διείσδυση θαλασσινού νερού, όπως διαπιστώθηκε από μελέτη γεωτρήσεων και ανάλυση στρωματογραφίας στις περιοχές Εικονοστάσι (Μουτζούρι) και Νιάτα με απόλυτο υψόμετρο τα 410 m και τα 325 m αντίστοιχα, όπως αναφέρεται από το Ι.Γ.Μ.Ε. Τέλος, στο υδροφόρο σύστημα του Ζάρακα έχουν επίσης πραγματοποιηθεί ισοτοπικές αναλύσεις Οξυγόνου-18 (18O) και Τριτίου (T) από το Εργαστήριο Ισοτοπικής Υδρολογίας του Εθνικού Κέντρου Φυσικών Επιστημών (Ε.ΚΕ.Φ.Ε) 'Δημόκριτος' (Ghikas κ. ά., 1983) εξετάζοντας την επίδραση του θαλασσινού νερού που εισχωρεί στον υδροφόρο ορίζοντα της περιοχής, με στόχο τον προσδιορισμό της προέλευσης και της ανάμειξης των υδάτων.

**Μηχανισμοί ανατροφοδότησης:** Οι πιθανοί μηχανισμοί ανανέωσης των υδάτων στην περιοχή του Ζάρακα πιθανώς περιλαμβάνουν:

1. Την άμεση ανανέωση στις ανθρακικές ορεινές περιοχές
2. Την περιορισμένη ανανέωση λόγω της απορροής στις πλαγιές των βουνών σε ασβεστοποιημένους αλλούβιους κώνους
3. Την ανανέωση στα υποστρώματα των κοιλάδων
4. Την ροή του νερού μεταξύ των λεκανών.

Οι θέσεις των εκροών νερού σχετίζονται με το σύστημα ρηγμάτων και τις τεκτονικές ασυνέχειες που επικρατούν στις κύριες τεκτονικές πλάκες (Εικόνα 24). Αυτές οι ασυνέχειες πιθανών να αποτελούν οδοί για την υπόγεια μετακίνηση του νερού. Στην περιοχή του Πάρωνα, η επιφάνεια των καρστικοποιημένων ασβεστολίθων είναι περίπου 385 km<sup>2</sup> ενώ τα καρστικά χαρακτηριστικά φαίνεται να αποτυπώνονται σε συμφωνία με τις ρηγματικές γραμμές (Lappas, Sabatakakis & Stefouli, 2011). Τα δυτικά όρια του υδροφορέα του Ζάρακα ορίζονται από τη Νεογονική λεκάνη Μολαί-Αισωπού που είναι διαμορφωμένη τόσο από ανθρακικούς όσο και από σχηματισμούς Τυρού οι οποίοι καλύπτονται από ιζηματογενή υλικά Πλειόκαινου-Πλειστόκαινου-Ολόκαινου. Το βόρειο υδρογεωλογικό όριο καθορίζεται από τα στρώματα Τυρού κατά μήκος της γραμμής Αγίου Δημητρίου-Κρεμαστής ενώ το ανατολικό τμήμα του υδροφορέα ορίζεται από τα βουνά Γαϊδουροβούνι-Τούρλα-Καλογεροβούνι-Κουλοχέρα με τα στρώματα του Τυρού να εντοπίζονται σημαντικά πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Με βάση τα παραπάνω όρια καθορίστηκε το συνολικό εμβαδόν της έκτασης του υδροφορέα.



Εικόνα 242424 Συνδυαστικός χάρτης υδρογεωλογικών πληροφοριών. Το έδαφος με την επιφανειακή καρστικοποίηση και οι εκροές έχουν εξαχθεί από την δορυφορική εικόνα. Τα σκούρα μπλε βέλη υποδεικνύουν την κατεύθυνση ροής των υπόγειων υδάτων εντός του καρστικού υδροφορέα. Το διάγραμμα με ροζέτα δείχνει τις κύριες τεκτονικές κατευθύνσεις στους γεωλογικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000, στην περιοχή του πιλοτικού έργου (Lappas, Sabatakakis & Stefouli, 2011).

**Σύσταση υδάτων:** Στην ανατολική περιοχή του έχει σχηματιστεί μια σειρά παράκτιων αλμυρών πηγών (με περιεκτικότητα ιόντων Cl μεγαλύτερη από 3500 ppm) στις οποίες και απορρέει ενώ γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν απέδωσαν ύδατα υψηλής αλατότητας (περιεκτικότητας σε ιόντα Cl περίπου 2500 ppm). Το γεγονός αυτό συνδέεται με τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στα υπόγεια ύδατα λόγω της ασθενούς υδραυλικής πίεσης των γλυκών νερών. Πολλές από αυτές τις παράκτιες πηγές εκβάλλουν στο εσωτερικό κόλπων με τεκτονική προέλευση, όπως έχει αναφερθεί στο παρελθόν (Ταβιτιάν, 1991). Οι Lappas, Sabatakakis & Stefouli, (2011) ύστερα από κλιμακωτές αντλητικές δοκιμές (step drawdown tests) και βαθιές ερευνητικές γεωτρήσεις παρουσιάζουν κάποια δεδομένα περιεκτικότητας σε ανιόντα Cl από γεωτρήσεις στις περιοχές Νιάτα, Εικονοστάσι, Γκαγκανιάς, Μεταμόρφωση και Μονόπορο, με τις δυο τελευταίες να παρουσιάζουν τα μεγαλύτερα επίπεδα (420 και 940 ppm αντίστοιχα) σε σχέση με τις υπόλοιπες, σε βάθος γεώτρησης 137 και 110 m. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών καταβύθισης παρουσιάστηκε ελαφριά αύξηση στην αλμυρότητα των υδάτων η οποία σύντομα σταθεροποιήθηκε. Το γεγονός αυτό ενδέχεται να σχετίζεται με τη μεγάλη χωρητικότητα του υδροφορέα του Ζάρακα και συνεπώς να χρειάζεται διαρκή παρακολούθηση. Για παράδειγμα στην περιοχή Σμυρτίζα, η αλατότητα παρουσιάζει σταθερά επίπεδα ανά τα έτη, σημειώνοντας περιεκτικότητα σε ιόντα Cl γύρω στα 75 ppm. Η περιοχή του Εικονοστασίου

εμφανίζει περιορισμένες αποδόσεις ίσως επειδή βρίσκεται κοντά σε τεκτονικές πλάκες γεγονός που οδηγεί σε χαμηλή κυκλοφορία υπόγειων υδάτων.

### Συμπεράσματα

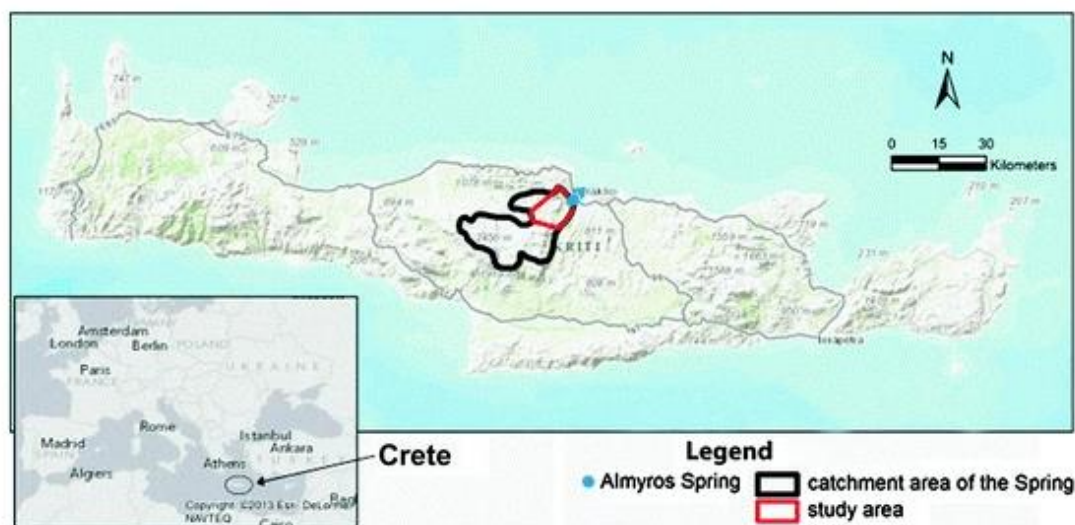
Τα κυριότερα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το υδροφόρο σύστημα του Ζάρακα είναι τα εξής:

- Η ροή των υπόγειων υδάτων στη δυτική περιφέρεια προς τη νοτιο-ανατολική ακτή αντιπροσωπεύει την κύρια ζώνη του υδροφορέα που τροφοδοτείται από ύδατα που προέρχονται από υψόμετρα άνω των 500 μέτρων, με σημαντική υδραυλική αγωγιμότητα.
- Στα μεγαλύτερα υψόμετρα, η καρστικοποίηση των ανθρακικών σχηματισμών δεν υπερβαίνει τα 320 m κάτω από την επιφάνεια με αποτέλεσμα η συγκεκριμένη περιοχή να λειτουργεί ως αποστραγγιστική ζώνη για τα υπόγεια ύδατα.
- Τα σύνορα της ανταλλαγής αλμυρού και γλυκού νερού βρίσκονται στην περιοχή Σμιρτίζα με βάση τους χάρτες αλατότητας και ροής υπόγειων υδάτων επομένως οι ιδανικές θέσεις για γεωτρήσεις εκμετάλλευσης θα πρέπει να βρίσκονται κατά μήκος του άξονα του ρέματος Σμιρτίζας.
- Οι συνολικές αποδόσεις των υφιστάμενων γεωτρήσεων στην περιοχή εκτιμώνται σε 450 m<sup>3</sup>/h, και παραμένουν σταθερές για περισσότερα από 15 χρόνια (Lappas, Sabatakakis & Stefouli, 2011). Το γεγονός ότι σύνορο ανταλλαγής γλυκού-αλμυρού νερού δεν έχει μετακινηθεί κατά την ίδια περίοδο υποδεικνύει ότι η χωρητικότητα του υδροφορέα δεν έχει φτάσει ακόμα στον κορεσμό της.

### 6.8 Υδροφόρος ορίζοντας Αλμυρού, Κρήτη

Η πηγή του Αλμυρού αποτελεί υφάλμυρη καρστική πηγή που βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την πόλη του Ηρακλείου, στην Κρήτη. Συγκεκριμένα, αναβλύζει στις βορειοδυτικές παρυφές της Νεογενικής λεκάνης Ηρακλείου-Φαιστού, σε απόσταση περίπου 8 χιλιομέτρων δυτικά από το κέντρο της πόλης του Ηρακλείου (Γιάνναρου, 2009). Η πηγή βρίσκεται στα όρια του Δήμου Γαζίου, πλησίον της κοινότητας Ρογδιάς, και σε απόσταση περίπου 1.100 μέτρων από την ακτή του δυτικού τμήματος του κόλπου του Ηρακλείου (Γιάνναρου, 2009).

Η πηγή Αλμυρού (Εικόνα 25) βρίσκεται περίπου 1 χλμ από την βόρεια ακτή της Κρήτης, προς το εσωτερικό, και είναι γνωστή για την υφάλμυρη φύση του νερού της, η οποία έχει καταγραφεί από τον 14ο αιώνα, με ιστορικές αναφορές που περιγράφουν τις μεταβολές στην αλατότητα ανάλογα με τις βροχοπτώσεις. Αναβλύζει στη βάση του όρους Κέρι, που αποτελείται κυρίως από ασβεστολιθικά πετρώματα της Τριπόλεως, σε υψόμετρο 2 έως 3 μέτρων πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας (Archontelis & Ganoulis, 2014).



Εικόνα 25. Η τοποθεσία της πηγής Αλμυρού, στην περιοχή Ηρακλείου στην Κρήτη (Archontelis & Ganoulis, 2014).

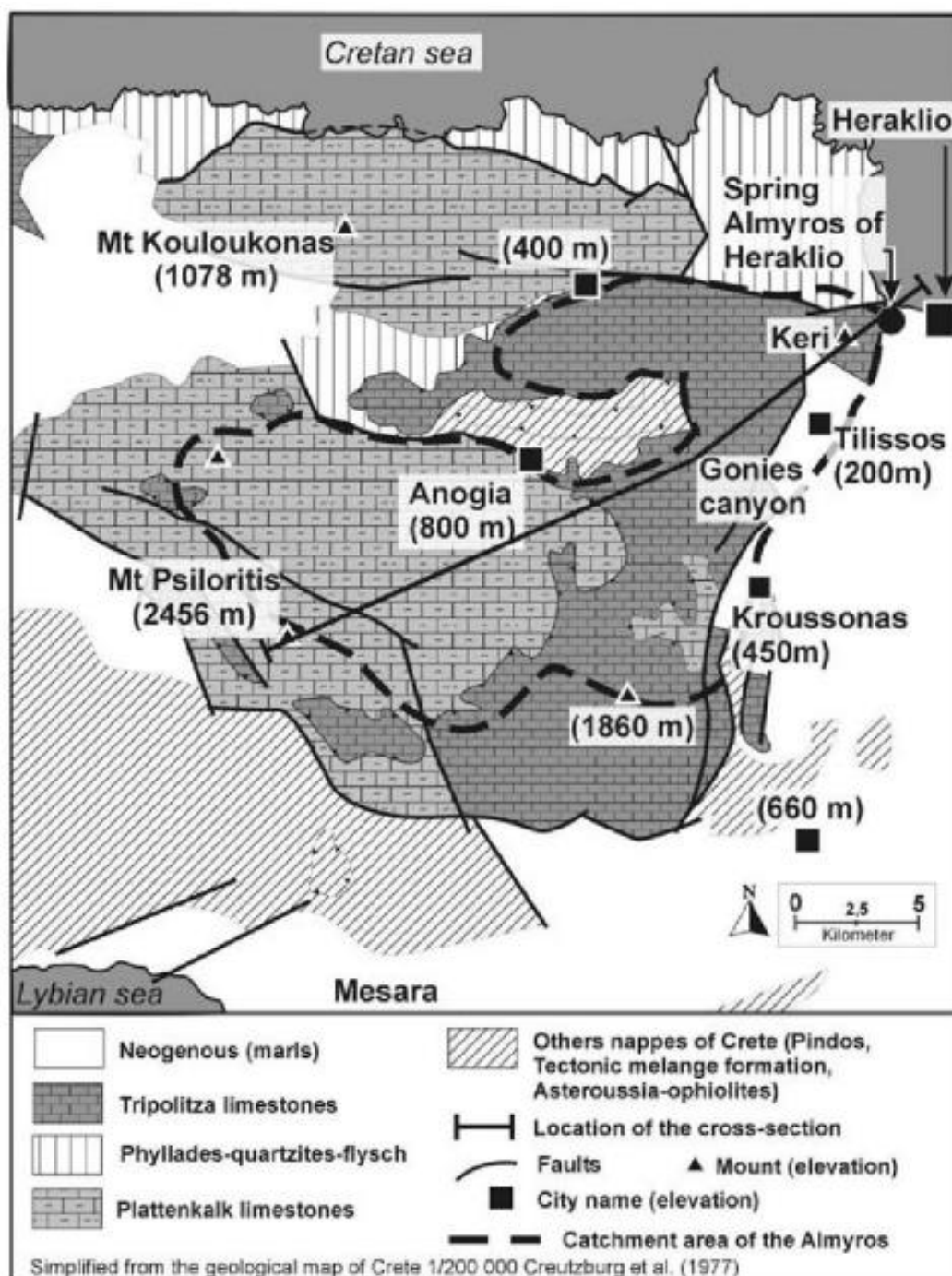
Στην περιοχή της πηγής σχηματίζεται ένα μεγάλο χωνί διαμέτρου 50 έως 80 μέτρων. Αρχικά, το χωνί αυτό ήταν κλειστό με ένα μικρό φράγμα που καναλοποιούσε το νερό και χρησιμοποιούνταν για τη λειτουργία νερόμυλων. Σήμερα, υπάρχει μια διώρυγα ύψους έως 10 μέτρων που κατασκευάστηκε το 1977 με σκοπό την αύξηση της υδροστατικής πίεσης του υδροφορέα και την παραγωγή γλυκού νερού, χωρίς όμως να επιτευχθούν σημαντικά αποτελέσματα (Archontelis & Ganoulis, 2014).

Υδρογεωλογικά, η πηγή Αλμυρού αποτελεί την έξοδο ενός εκτεταμένου δικτύου υπόγειων καρστικών διαύλων, που έχουν εξερευνηθεί με καταδύσεις έως βάθος 90 μέτρων. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει έναν κεκλιμένο θάλαμο μήκους περίπου 300 μέτρων και μια ευρύχωρη καρστική γκαλερί διατομής 20 τ.μ. που κατέρχεται προς νότο ακολουθώντας ένα σύστημα κανονικών ρηγμάτων με διεύθυνση βόρειο-νότιο. Αυτά τα ρήγματα διασχίζουν το ασβεστολιθικό μάζωμα του όρους Κέρι και επεκτείνονται προς την περιοχή Κρουσσώνας, επηρεάζοντας σημαντικά τη ροή των υπόγειων υδάτων προς την πηγή.

Η περιοχή έχει ιδιαίτερη σημασία λόγω της γεωγραφικής της θέσης και της σταθερής παροχής υφάλμυρου νερού καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η πηγή καλύπτει σημαντικές ανάγκες ύδρευσης του πολεοδομικού συγκροτήματος Ηρακλείου και Γαζίου, καθώς και του ευρύτερου βόρειου άξονα, ενώ υποστηρίζει την βιομηχανική, γεωργική και τουριστική ανάπτυξη μιας περιοχής που αντιμετωπίζει σοβαρή υδατική ανεπάρκεια.

#### Γεωλογικά χαρακτηριστικά

Η υδρολογική λεκάνη του Αλμυρού καλύπτεται από γεωλογικές ενότητες προ-Νεογενικές και Νεογενικές. Το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελείται από την ημι-διαπερατή μονάδα “Πλατενοκάγκ” (Τριασικό – Ηώκαινο), που αποτελείται από ανθρακικά πετρώματα και κυριαρχεί στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης, εκτείνοντας προς το νότιο τμήμα της περιοχής (Panagopoulos & Lambrakis, 2006). Πάνω σε αυτή την ενότητα επικαλύπτεται από θραυσμένο και αδιαπέραστο φλύσχη ζώνη φιλλιτικού-χαλαζιακού χαρακτήρα, η οποία εκτείνεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής. Επάνω από αυτή τη ζώνη επικαλύπτεται η γεωτεκτονική ζώνη της Τριπόλεως, που αποτελείται από ρηγματωμένα και καρστικοποιημένα παχιά ανθρακικά στρώματα. Όλες αυτές οι γεωλογικές σειρές σχηματίζουν τα όρη δυτικά του Ηρακλείου και χωρίζονται από την πεδιάδα από μεγάλο ρήγμα βόρειο-νότιο, το οποίο επηρεάζει σημαντικά τη φυσιογραφία της περιοχής (Panagopoulos & Lambrakis, 2006). Το ρήγμα αυτό καλύπτεται μερικώς από Νεογενείς αδιαπέραστες αποθέσεις, κυρίως Πλειστοκαινικής ηλικίας, που αποτελούνται από οριζόντια ή σχεδόν οριζόντια στρώματα κιτρινωπών μαργών (Εικόνα 26).



Εικόνα 262626 Γενικός χάρτης της περιοχής τροφοδοσίας: γεωλογική δομή, υψόμετρα, βουνοκορφές και πόλεις (Γιάνναρου, 2009).

Η πηγή βρίσκεται στη ζώνη των ρηγμάτων, στο όριο μεταξύ των προ-Νεογενών και Νεογενών πετρωμάτων. Ο παράκτιος υδροφορέας του Αλμυρού αναπτύσσεται στα καρστικοποιημένα και πτυχωμένα προ-Νεογενή ανθρακικά πετρώματα, και η ομώνυμη υφάλμυρη πηγή αποτελεί ένα από τα κύρια σημεία εκφόρτισης του συστήματος. Η αλατότητα του νερού οφείλεται στη μίξη γλυκού και θαλασσινού νερού που πραγματοποιείται στους καρστικούς αγωγούς. Οι βροχοπτώσεις στην

περιοχή απορροής, που ανέρχονται περίπου σε 800 mm/έτος, παίζουν καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση της παροχής και της ποιότητας του νερού της πηγής.

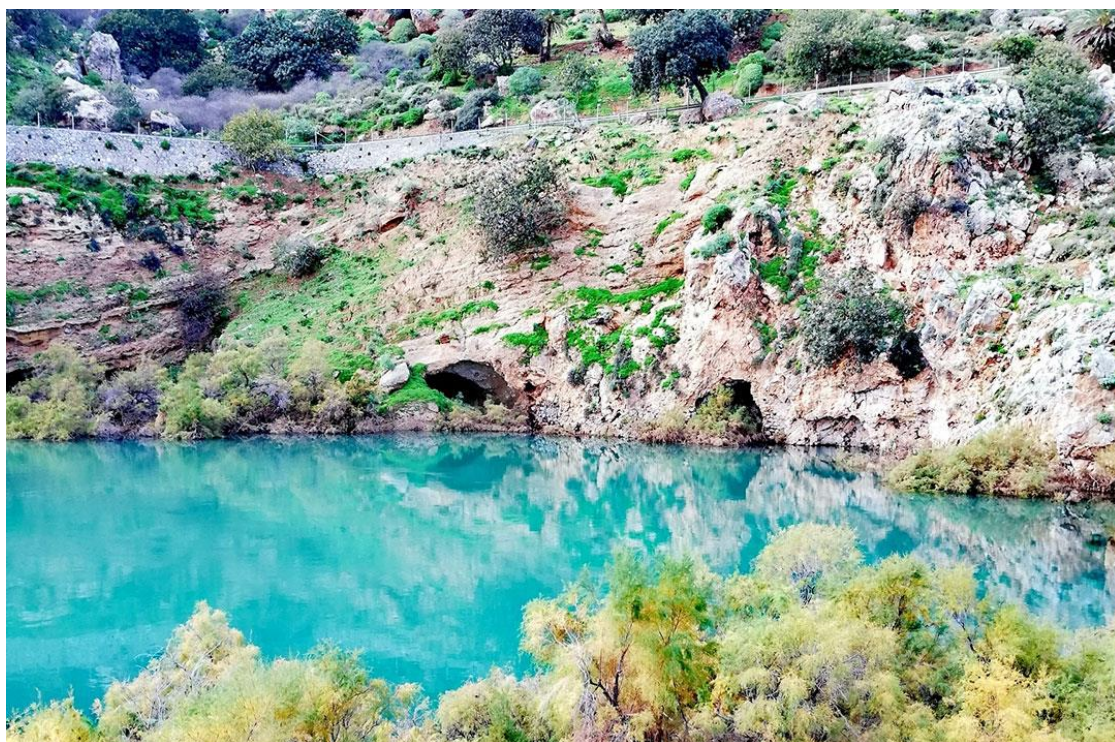
#### Υδρολογικά και υδροχημικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από σύνθετη γεωλογία και γι' αυτό ο προσδιορισμός της περιοχής τροφοδοσίας του Αλμυρού έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές. Η ακριβής έκταση της λεκάνης απορροής της πηγής παραμένει αβέβαιη λόγω της πολύπλοκης γεωλογίας και υδρογεωλογίας της περιοχής, με εκτιμήσεις που κυμαίνονται από 300 έως 500 km<sup>2</sup> (Bonacci et al., 2006). Σύμφωνα με εφαρμογή της εξίσωσης Turc, η λεκάνη εκτιμάται γύρω στα 300 km<sup>2</sup>.

Υδροχημικές μετρήσεις θερμοκρασίας και συγκέντρωσης χλωριόντων που έχουν πραγματοποιηθεί στην πηγή και στις γεωτρήσεις της λεκάνης έδειξαν ότι ο υδροφορέας αποτελείται από δύο υποσυστήματα (Bonacci et al., 2006). Το μικρότερο υποσύστημα Α βρίσκεται σε απόσταση έως 5 χλμ από την πηγή και περιέχει υπόγεια ύδατα με υψηλότερη θερμοκρασία (~20 °C) από αυτή της πηγής (~16 °C). Η αλατότητα στο υποσύστημα αυτό παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, υποδηλώνοντας την έλλειψη άμεσης σύνδεσης με την πηγή μέσω μεγάλων καρστικών αγωγών. Το κύριο υποσύστημα Β περιλαμβάνει υπόγεια ύδατα χαμηλής και σταθερής θερμοκρασίας (περίπου 16 °C), προερχόμενα από λιωμένο χιόνι και βροχές σε υψόμετρα έως 2456 μέτρα. Η σταθερή θερμοκρασία του νερού στην πηγή, ακόμα και σε περιόδους υψηλών ατμοσφαιρικών θερμοκρασιών, υποδεικνύει ότι η κύρια τροφοδοσία της πηγής προέρχεται από το υποσύστημα Β, μέσω ταχέων και έντονων ρευμάτων σε βαθιά καρστικά κανάλια.

Οι μέσες ετήσιες βροχοπτώσεις στη λεκάνη ανέρχονται στα 1370 mm, με αύξηση της βροχόπτωσης κατά 74 mm ανά 100 μέτρα υψομετρικής διαφοράς. Η μέση ετήσια θερμοκρασία της ατμόσφαιρας στην περιοχή είναι περίπου 13,7 °C, με πτώση 0,51 °C ανά 100 μέτρα υψομετρικής αύξησης. Η εκροή της πηγής μεταβάλλεται σημαντικά, κυμαινόμενη από 3,5 m<sup>3</sup>/s έως 80 m<sup>3</sup>/s, και εξαρτάται άμεσα από τις βροχοπτώσεις (Bonacci et al., 2006). Η συγκέντρωση ιόντων χλωρίου παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, από 30 έως 6000 mg/l, με μέσο όρο 3500 mg/l, και αυξάνεται κατά τις περιόδους χαμηλής εκροής. Αυτό οφείλεται στην εισβολή θαλασσινού νερού, η οποία σχετίζεται με τις μεταβολές στην παροχή και τη ροή του υπόγειου νερού από τα υποσυστήματα προς την πηγή (Bonacci et al., 2006).

Η πηγή Αλμυρού (Εικόνα 27) ανήκει στην κατηγορία των καρστικών πηγών με περιορισμένη δυναμικότητα εκροής (Panagopoulos & Lambrakis, 2006). Ο μέσος ετήσιος όγκος νερού που εκφορτίζεται στην περίοδο 1971–1993 ήταν 231 εκατομμύρια  $m^3$  ( $7,3 m^3/s$ ). Μετά από έντονες βροχοπτώσεις, η παροχή της πηγής αυξάνεται άμεσα, καθώς το υδρογραφικό της ανταποκρίνεται γρήγορα λόγω της υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας του καρστικού δικτύου και της παρουσίας μεγάλων ρωγμών και διαύλων στην περιοχή απορροής (Panagopoulos & Lambrakis, 2006).



Εικόνα 27 Η πηγή Αλμυρού, στη βορειοανατολική άκρη του Ψηλορείτη (Πηγή: UNESCO sites in Crete, <https://www.unescositesincrete.gr/>).

Προσπάθειες υφαλμύρωσης: Η καρστική πηγή του Αλμυρού στο Ηράκλειο, με μέση δυναμικότητα εκφόρτισης περίπου  $620.000 m^3/ημέρα$ , χαρακτηρίζεται ως υφάλμυρη, γεγονός που υποδηλώνει την παρουσία φαινομένων υφαλμύρωσης, πιθανώς λόγω της εγγύτητάς της με τη θάλασσα και της υδραυλικής επικοινωνίας με θαλάσσιο νερό (Zotalis et al., 2014). Η υφαλμύρωση του νερού της πηγής καθιστά απαραίτητη την επεξεργασία του, όπως αποδεικνύεται από τη λειτουργία μονάδας αφαλάτωσης στην περιοχή από το 2014, με δυναμικότητα  $2.400 m^3/ημέρα$  και πρόβλεψη για μελλοντική επέκταση μέχρι και  $20.000 m^3/ημέρα$ . Σύμφωνα με τον Alexakis (2016):

- Η απόσταση μεταξύ της πηγής και της ζώνης εισχώρησης θαλάσσιου νερού υπολογίστηκε μέσω μεταβολών αλατότητας, που λειτουργούν ως ιχνηθέτες.
- Ο όγκος του καρστικού αγωγού μεταξύ πηγής και ζώνης ανάμιξης θεωρείται σταθερός, άρα υπάρχει μόνιμος μηχανισμός ανάμιξης με θαλασσινό νερό.
- Η ανάλυση ποιοτικών παραμέτρων δείχνει αύξηση της συγκέντρωσης χλωριούχων ( $\text{Cl}^-$ ), που αποτελεί βασικό δείκτη υφαλμύρωσης.
- Η κλιματική αλλαγή (λόγω μείωσης του υδραυλικού φορτίου του γλυκού νερού) πιθανότατα θα επιδεινώσει το φαινόμενο της υφαλμύρωσης στο μέλλον.

Παρά τις τεχνικές προσπάθειες, η αφαλάτωση εξακολουθεί να θεωρείται ακριβή λύση, κυρίως λόγω του μεγάλου όγκου του υφάλμυρου νερού και της ανάγκης επεξεργασίας για πόσιμο ή αρδευτικό νερό.

#### Συμπεράσματα

Ο υγρότοπος Αλμυρού παρουσιάζει σημαντικές εποχικές μεταβολές στην ποιότητα και τις φυσικοχημικές του παραμέτρους, οι οποίες σχετίζονται με τις καιρικές συνθήκες και τη ροή του νερού. Τα κυριότερα συμπεράσματα που μπορούν να διεξαχθούν για το υδροφόρο σύστημα του Ζάρακα είναι τα εξής:

- Υπάρχει έντονη παρουσία θρεπτικών στοιχείων, γεγονός που δείχνει ότι ο υγρότοπος είναι ευτροφικός και υπάρχει κίνδυνος υπερευτροφισμού.
- Η συνδυαστική χρήση χημικών και γεωφυσικών μεθόδων αποτελεί αποτελεσματικό εργαλείο για την παρακολούθηση και διαχείριση του υγροτόπου.
- Παρά την ύπαρξη σημείων πιθανής ρύπανσης, γενικά ο υγρότοπος δεν φαίνεται να υποφέρει από εκτεταμένη μόλυνση, ωστόσο η παρακολούθηση πρέπει να συνεχιστεί.

Τέλος, στο φως της επικείμενης κλιματικής αλλαγής οι Maramathas & Gialamas (2011) αναφέρουν κάποιες από τις επιπτώσεις αυτής προκειμένου να εφαρμοστούν μέτρα διαχείρισης:

- Η πηγή επηρεάζεται κυρίως από το ετήσιο ύψος βροχής και λιγότερο από την ένταση βροχής, τον αριθμό βροχερών ημερών και την άνοδο της μέσης στάθμης της θάλασσας.

- Προβλέπεται ότι η πηγή δεν θα παρέχει γλυκό νερό όλο τον χρόνο και ενδέχεται να στερεύει το καλοκαίρι λόγω των αλλαγών στο κλίμα.
- Η αλατότητα του νερού μειώνεται όταν η παροχή πέφτει κάτω από  $2.8 \text{ m}^3/\text{s}$ , λόγω της δομής του ασβεστόλιθου, ακόμα και αν δεν υπάρχει βροχόπτωση.
- Η κατασκευή αναβαθμού (φράγματος) που ανεβάζει το σημείο εκροής της πηγής κατά 18 μέτρα μπορεί να εμποδίσει την εισροή θαλασσινού νερού (αλάτωση).
- Με τις μελλοντικές κλιματικές αλλαγές το φράγμα πρέπει να είναι 2 μέτρα ψηλότερο (20 μέτρα) για να πετύχει τον ίδιο στόχο.

Συμπερασματικά, ο υδροφόρος ορίζοντας του Αλμυρού αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράκτιους καρστικούς υδροφορείς της Κρήτης, με καθοριστικό ρόλο στην υδροδότηση της ευρύτερης περιοχής του Ηρακλείου. Η γεωλογική πολυπλοκότητα της περιοχής, η αλληλεπίδραση με τη θάλασσα και η εποχική διακύμανση της παροχής και ποιότητας του νερού καθιστούν τη διαχείρισή της ιδιαίτερα απαιτητική. Η συνδυασμένη χρήση υδρογεωλογικών, γεωφυσικών και χημικών εργαλείων αποδεικνύεται κρίσιμη για την ολιστική κατανόηση και παρακολούθηση του υδροσυστήματος. Ταυτόχρονα, τα μοντέλα προσομοίωσης δείχνουν ότι η κλιματική αλλαγή αναμένεται να επιδεινώσει τις πιέσεις στο σύστημα, οδηγώντας ενδεχομένως σε μείωση της παροχής και ενίσχυση της υφαλμύρινσης. Η ανάγκη για προσαρμοσμένα έργα υποδομής και στρατηγικό σχεδιασμό είναι επιτακτική, ώστε να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα του υδατικού αυτού πόρου στο μέλλον.

## Κεφάλαιο 7. Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων

Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι αποτελούν θεμελιώδες φυσικό αγαθό, καλύπτοντας σημαντικές ανάγκες του ανθρώπου, της βιομηχανίας και της γεωργίας. Η διαχείρισή τους απαιτεί την εφαρμογή επιστημονικών προσεγγίσεων και τη χρήση τεχνολογικά προηγμένων εργαλείων, προκειμένου να διασφαλιστεί η βιώσιμη αξιοποίησή τους και η προστασία τους από επιβαρύνσεις (Θεοδοσίου, 1994). Στο πλαίσιο του υδρολογικού κύκλου, τα υπόγεια ύδατα αποθηκεύονται σε υδροφορείς και κινούνται μέσω γεωλογικών σχηματισμών με πορώδη δομή. Οι υδροφορείς διακρίνονται σε ελεύθερους και υπό πίεση, ανάλογα με τις συνθήκες ροής και την ανανέωσή τους (Λατινόπουλος, 2006).

Η τεχνολογική πρόοδος έχει καταστήσει δυνατή την παρακολούθηση των υπόγειων υδάτων μέσω γεωτρήσεων, αισθητήρων στάθμης και ποιότητας νερού, καθώς και υδρογεωλογικών μελετών. Παράλληλα, τα υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης επιτρέπουν την πρόβλεψη της ροής και της μεταφοράς ρύπων στους υδροφορείς, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την καλύτερη διαχείριση των υδατικών αποθεμάτων (Θεοδοσίου, 1994). Όσον αφορά την αξιοποίηση των υπόγειων υδάτων, χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές άντλησης, όπως οι κατακόρυφες και οριζόντιες γεωτρήσεις, καθώς και οι αρτεσιανές γεωτρήσεις (Λατινόπουλος, 2006).

Η θέσπιση ζωνών προστασίας των γεωτρήσεων είναι κρίσιμη για την αποτροπή της ρύπανσης των υπόγειων υδάτων. Αυτές διακρίνονται σε ζώνες επιρροής, σύλληψης και προστασίας, οι οποίες καθορίζονται με βάση υδρογεωλογικές παραμέτρους. Η ύπαρξή τους περιορίζει την επιβάρυνση των υδατικών αποθεμάτων από δραστηριότητες όπως η γεωργική και βιομηχανική παραγωγή (Θεοδοσίου, 1994). Η ρύπανση των υπόγειων υδάτων μπορεί να προκληθεί από τη χρήση λιπασμάτων, τα βιομηχανικά απόβλητα και τις διαρροές αποθηκευμένων χημικών ουσιών. Για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές εξυγίανσης, όπως η χρήση φίλτρων ενεργού άνθρακα, η ανάστροφη ώσμωση και οι βιολογικές μέθοδοι αποικοδόμησης των ρύπων (Λατινόπουλος, 2006).

Η μοντελοποίηση της ροής και της μεταφοράς ρύπων στους υδροφορείς πραγματοποιείται μέσω μαθηματικών μοντέλων, τα οποία συμβάλλουν στην κατανόηση της δυναμικής των υπόγειων υδάτων. Τεχνικές αριθμητικής

προσομοίωσης, όπως τα μοντέλα MODFLOW και FEFLOW, χρησιμοποιούνται ευρέως για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των υδροφορέων (Λατινόπουλος, 2006). Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει σημαντικά την ανανέωση των υπόγειων υδάτων, καθώς οι μεταβολές στις βροχοπτώσεις και η αύξηση της εξάτμισης επιδρούν στη διαθεσιμότητα των αποθεμάτων. Επιπλέον, τα ακραία καιρικά φαινόμενα ενισχύουν τα φαινόμενα λειψυδρίας, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων (Θεοδοσίου, 1994).

Το νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων ρυθμίζεται από την Οδηγία 2000/60/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η οποία επιδιώκει τη διατήρηση της οικολογικής και χημικής ισορροπίας των υδάτων. Στην Ελλάδα, ο Νόμος 3199/2003 υιοθετεί τις αρχές της οδηγίας, εισάγοντας μέτρα για την προστασία και τη βιώσιμη χρήση των υπόγειων υδάτων (Λατινόπουλος, 2006).

Για τον εντοπισμό των πηγών ρύπανσης και την κατανόηση της μετακίνησης των ρύπων, εφαρμόζονται μέθοδοι ιχνηλάτησης που περιλαμβάνουν τη χρήση φυσικών και τεχνητών ιχνηθετών. Τεχνικές όπως η χρήση ισοτόπων και φθορίζουσών ουσιών συμβάλλουν στην ακριβέστερη χαρτογράφηση των ρυπογόνων ουσιών μέσα στους υδροφορείς (Θεοδοσίου, 1994).

Η βιώσιμη διαχείριση των υπόγειων υδάτων απαιτεί την εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογικών εργαλείων, την ενίσχυση του νομοθετικού πλαισίου και την ανάπτυξη πολιτικών προστασίας. Η συνεργασία μεταξύ επιστημονικής κοινότητας, πολιτείας και φορέων διαχείρισης μπορεί να συμβάλει στην αποτελεσματική προστασία των υδατικών πόρων, διασφαλίζοντας τη διαθεσιμότητα τους για τις μελλοντικές γενιές (Λατινόπουλος, 2006).

Η διαχείριση των υδάτινων πόρων αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την Ελλάδα, λόγω της γεωγραφικής της ποικιλομορφίας και των διαφοροποιήσεων στο κλίμα, που επηρεάζουν τόσο τη διαθεσιμότητα όσο και την ποιότητα του νερού. Το παρόν κεφάλαιο αναλύει τα αποτελέσματα της μελέτης αναφορικά με τη βιώσιμη διαχείριση των υπόγειων υδάτινων πόρων, την αλληλεπίδραση των πολιτικών διαχείρισης με τις περιβαλλοντικές συνθήκες, καθώς και τις προκλήσεις και προοπτικές που αναδύονται από τα ευρήματα της έρευνας.

## 7.1 Διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων στην Ελλάδα και αξιοποίησή τους με όραμα τη βιώσιμη ανάπτυξη

Η διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων στην Ελλάδα αποτελεί ένα από τα βασικά ζητήματα περιβαλλοντικής πολιτικής, καθώς το κλίμα και η γεωμορφολογία της χώρας επηρεάζουν σημαντικά τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των υδάτων (Perdikaki, Makropoulos & Kallioras, 2022). Η διαχείριση των υπόγειων υδάτων επηρεάζεται από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά κάθε περιοχής. Στην Ελλάδα, οι βασικοί υδροφορείς περιλαμβάνουν καρστικά, πορώδη και ρωγμώδη πετρώματα, των οποίων η μορφολογία καθορίζει την ανανέωση και τη διαθεσιμότητα των υδατικών αποθεμάτων. Για τη βιώσιμη ανάπτυξη απαιτείται προσεκτική διαχείριση των υδάτινων αποθεμάτων, μέτρα προστασίας από τη ρύπανση και την υπερεκμετάλλευση, καθώς και διατήρηση της φυσικής ισορροπίας των οικοσυστημάτων (Karakatsanis et al., 2023).

Στην Ελλάδα, οι υδροφορείς διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τη γεωλογική τους σύσταση και τη δυναμική τους (Daskalaki & Voudouris, 2008):

- Καρστικοί υδροφορείς, οι οποίοι αναπτύσσονται σε ασβεστόλιθους και έχουν υψηλή διαπερατότητα. Χαρακτηρίζονται από υψηλή ικανότητα αποθήκευσης και γρήγορη αναπλήρωση, αλλά είναι ευάλωτοι σε ρύπανση και υπεράντληση λόγω της αυξημένης διαπερατότητάς τους.
- Πορώδεις υδροφορείς, που συναντώνται σε ιζηματογενή στρώματα όπως άμμοι και κροκαλοπαγή. Αποθηκεύουν σημαντικές ποσότητες νερού, αλλά αναπληρώνονται με πιο αργό ρυθμό, καθιστώντας τους σταθερούς, αλλά λιγότερο άμεσα διαθέσιμους για εκμετάλλευση.
- Ρωγμώδεις υδροφορείς, οι οποίοι βρίσκονται σε συμπαγή πετρώματα και διαθέτουν χαμηλή υδραγωγιμότητα. Έχουν μικρότερη αποθηκευτική ικανότητα, όμως διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη στήριξη μικρών οικοσυστημάτων και τοπικών παροχών νερού.

Η ισορροπία των υπόγειων υδάτων επηρεάζεται από φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες (Εικόνα 28). Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη διατήρηση αυτής της ισορροπίας περιλαμβάνουν τη βροχοπτώση, την κατείσδυση, την εκροή και την άντληση (Kallioras et al., 2010). Επιπλέον, η ανεξέλεγκτη άντληση μπορεί να οδηγήσει σε διαταραχές όπως η υφαλμύρωση, ιδιαίτερα στις παράκτιες περιοχές.



Εικόνα 282828 Πιθανές πηγές ρύπανσης των υπόγειων όγκων από ανθρώπινες δραστηριότητες. Πηγή: International Atomic Energy Agency (<https://www.iaea.org/>).

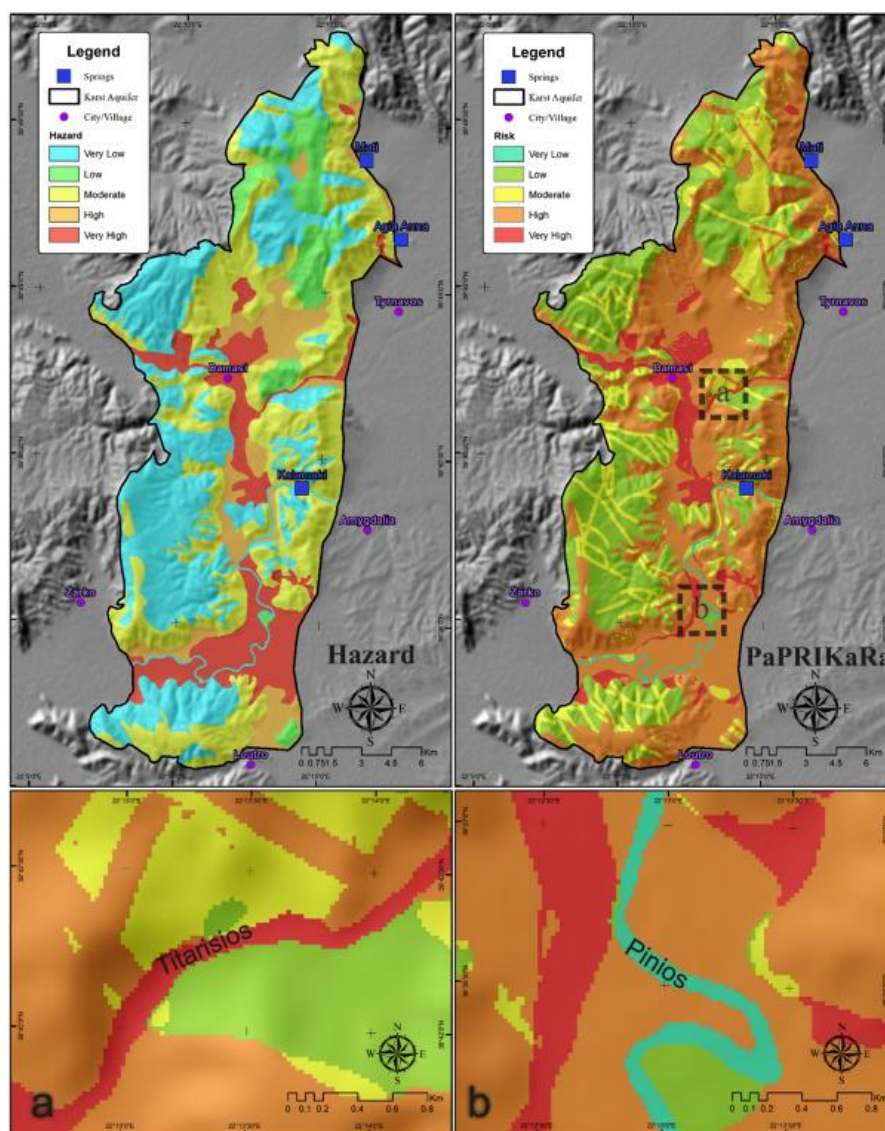
## 7.2 Νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων

Η Οδηγία 2000/60/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης αποτελεί τη θεμελιώδη νομοθεσία για τη διαχείριση των υδατικών πόρων, προωθώντας την αειφόρο χρήση τους (Sofios, Arabatzis & Baltas, 2008). Στην Ελλάδα, η ενσωμάτωση αυτής της οδηγίας πραγματοποιήθηκε μέσω του Νόμου 3199/2003, ο οποίος καθορίζει τις αρχές διαχείρισης των υδάτων σε περιφερειακό επίπεδο (Sofios, Arabatzis & Baltas, 2008). Η διαχείριση των υδάτων οργανώνεται μέσω θεσμικών φορέων, με κύριο συντονιστή την Εθνική Επιτροπή Υδάτων, ενώ σε περιφερειακό επίπεδο την ευθύνη φέρουν οι Περιφερειακές Διευθύνσεις Υδάτων, που εφαρμόζουν τις πολιτικές διαχείρισης. Η εφαρμογή της Οδηγίας 2000/60/EK της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που απαιτεί την ορθολογική διαχείριση των υδάτων, συναντά δυσκολίες στην Ελλάδα λόγω θεσμικών και χρηματοδοτικών περιορισμών. Βασικά μέτρα που απαιτούνται είναι ο αυστηρότερος έλεγχος των γεωτρήσεων και αδειοδότηση της χρήσης των υπόγειων υδάτων. Τέλος προτείνεται η ενίσχυση βιώσιμων γεωργικών πρακτικών που περιορίζουν τη σπατάλη νερού καθώς και η δημιουργία ενός εθνικού συστήματος παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων (Derkas et al., 2020).

### 7.3 Προβλήματα και απειλές για τα υπόγεια νερά

Η γεωργία είναι ο κυριότερος καταναλωτής υδάτων στην Ελλάδα, με την άρδευση να απορροφά το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής χρήσης (Derkas et al., 202). Η εκτεταμένη εξάρτηση από τα υπόγεια ύδατα έχει προκαλέσει περιβαλλοντικά ζητήματα, όπως:

1. Υφαλμύρωση και θαλάσσια διείσδυση: Η υπερεκμετάλλευση των υδάτινων αποθεμάτων σε παράκτιες περιοχές μπορεί να προκαλέσει διείσδυση θαλασσινού νερού στους υδροφορείς, με συνέπεια την υφαλμύρωση και τη μείωση της ποιότητας των υδάτων (Daskalaki & Voudouris, 2008).
2. Ρύπανση από ανθρωπογενείς δραστηριότητες: Η ανθρώπινη δραστηριότητα συνιστά σημαντικό παράγοντα ρύπανσης των υπόγειων υδάτων (Εικόνα 28). Βασικές πηγές περιλαμβάνουν τα γεωργικά απόβλητα και η νιτρορύπανση που προέρχονται από λιπάσματα και φυτοφάρμακα (Voudouris, Mandrali & Kazakis, 2018) καθώς και τα βιομηχανικά λύματα και ανεξέλεγκτη απόρριψη αποβλήτων, που συμβάλλουν στην επιβάρυνση των υδροφόρων στρωμάτων (Εικόνα 29).



Εικόνα 292929 Χάρτες Κινδύνου και Ρύπανσης του καρστικού υδροφορέα Δαμάσι-Τιτάνου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο PaPRIKaRa. Εστιασμένες περιοχές στον ποταμό Τιταρήσιο (α) και τον ποταμό Πηνειό (β) (Kazakis et al., 2018).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, είναι αναγκαία η αναπροσαρμογή των γεωργικών πρακτικών μέσω της χρήσης έξυπνων αρδευτικών μεθόδων και της αξιοποίησης ανακυκλωμένου νερού. Η προστασία των υδροφορέων μπορεί να επιτευχθεί μέσω τεχνικών εμπλουτισμού, όπως:

- Κατασκευή φραγμάτων και δεξαμενών κατείσδυσης για την ενίσχυση των υπόγειων αποθεμάτων. Η διείσδυση θαλασσινού νερού αποτελεί σοβαρό πρόβλημα στις παράκτιες και νησιωτικές περιοχές, καθιστώντας τα υπόγεια ύδατα μη πόσιμα και ακατάλληλα για γεωργική χρήση. Για την αντιμετώπισή του, προτείνεται ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφορέων

με βρόχινο νερό, καθώς και η δημιουργία φραγμάτων ανάσχεσης στις παράκτιες ζώνες.

- Επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υδάτων, συμβάλλοντας στην εξοικονόμηση νερού.

Για την αποτελεσματική προστασία των υδάτινων πόρων, απαιτείται ενίσχυση του θεσμικού πλαισίου, με έμφαση σε αυστηρότερους ελέγχους και ποιοτική παρακολούθηση των υδάτων καθώς και προώθηση σύγχρονων τεχνολογιών εξοικονόμησης νερού, ιδίως στον αγροτικό τομέα.

## 7.4 Συμπεράσματα

Η ορθολογική διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων στην Ελλάδα απαιτεί ολοκληρωμένες πολιτικές που συνδυάζουν επιστημονική γνώση, τεχνολογικές λύσεις και διοικητικά μέτρα (Perdikaki, Makropoulos & Kallioras, 2022). Οι κύριες προτεραιότητες περιλαμβάνουν:

1. Περιορισμό της υπεράντλησης και αντιμετώπιση της υφαλμύρωσης.
2. Ανάπτυξη πρακτικών ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης νερού.
3. Ενίσχυση της νομοθεσίας και της περιβαλλοντικής επιτήρησης.
4. Υποστήριξη της έρευνας και της καινοτομίας στον τομέα της υδρολογίας.

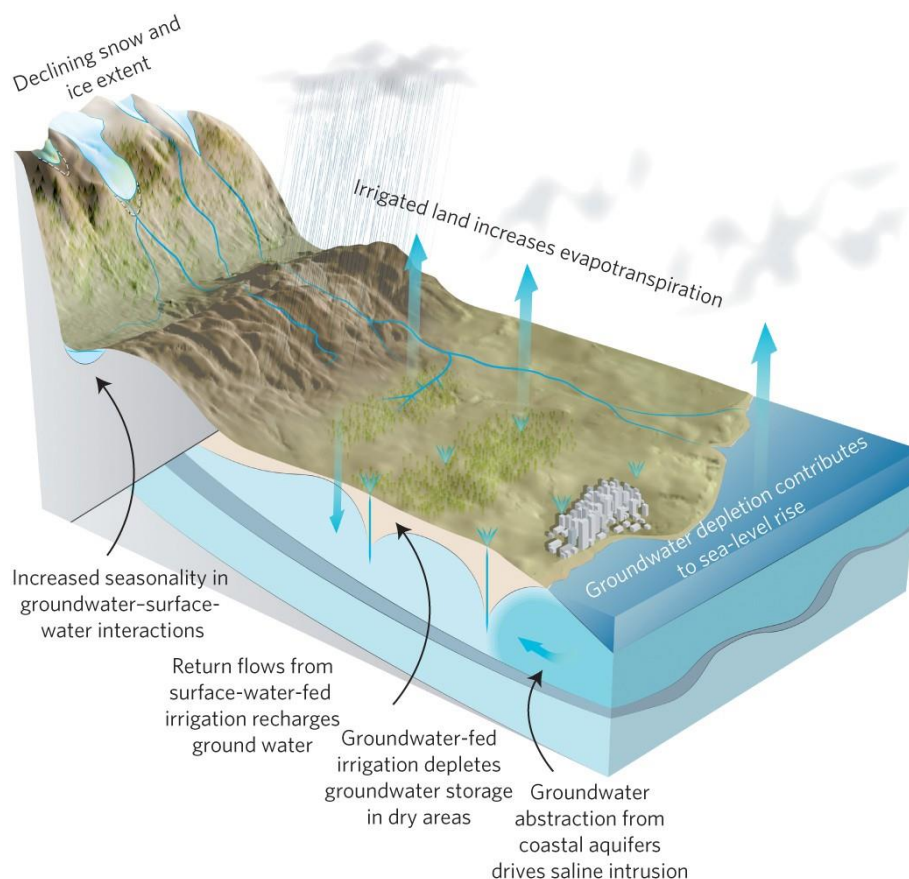
Η εφαρμογή αυτών των μέτρων θα συμβάλει στη διατήρηση της ποιότητας και της διαθεσιμότητας των υπόγειων υδάτων, διασφαλίζοντας τη βιώσιμη ανάπτυξη και την περιβαλλοντική ισορροπία της.

Για τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων, προτείνονται οι εξής στρατηγικές:

- Τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέων μέσω συλλογής βρόχινου νερού και επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υδάτων (Tzanakakis et al., 2020).
- Εφαρμογή προηγμένων αρδευτικών τεχνολογιών που μειώνουν την κατανάλωση νερού (Γεωργία ακριβείας).
- Περιορισμός των παράνομων γεωτρήσεων και ενίσχυση των θεσμικών ελέγχων.
- Συνεργασία φορέων (τοπικών αρχών, επιστημόνων και ιδιωτικού τομέα) για την καλύτερη διαχείριση των υδάτινων πόρων (Zaimes & Emmanouloudis, 2012).

## Κεφάλαιο 8. Κλιματική αλλαγή και υπόγεια νερά

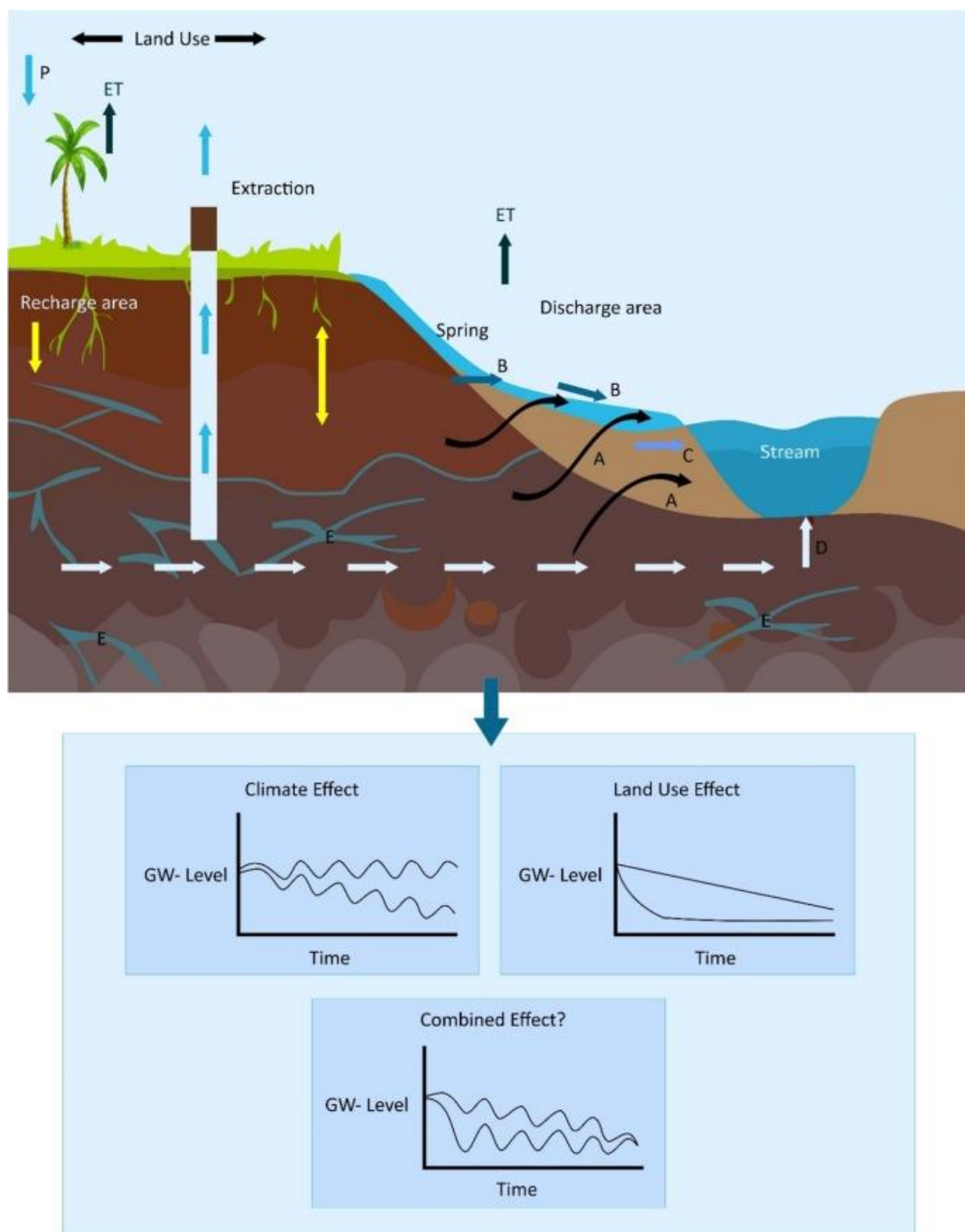
Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις του 21<sup>ου</sup> αιώνα, επηρεάζοντας πολυεπίπεδα τα υδρολογικά συστήματα και ιδίως τους υπόγειους υδροφορείς, που αποτελούν βασική πηγή γλυκού νερού για την ανθρώπινη κατανάλωση, τη γεωργία, τη βιομηχανία και τα οικοσυστήματα (Green et al., 2011). Οι υπόγειοι υδροφορείς περιέχουν το μεγαλύτερο μέρος του υγρού γλυκού νερού στη Γη, λειτουργώντας ως ρυθμιστές του υδρολογικού κύκλου και προσφέροντας σταθερότητα σε περιόδους ξηρασίας ή ακραίων καιρικών φαινομένων (Earman & Dettinger, 2011). Ωστόσο, η κλιματική αλλαγή, μέσω της αύξησης της θερμοκρασίας, των μεταβολών στην κατανομή και ένταση των βροχοπτώσεων και της αύξησης της εξατμισοδιαπνοής, μεταβάλλει τη δυναμική επαναφόρτισης, την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των υπόγειων υδάτων (Dragoni & Sukhija, 2008). Επιπλέον, οι μεταβολές στον υδρολογικό κύκλο έχουν επιπτώσεις και στα εξαρτώμενα από τα υπόγεια νερά οικοσυστήματα (GDEs), τα οποία διατηρούν υψηλή βιοποικιλότητα και είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε μειώσεις στάθμης ή ρύπανση (Klove et al., 2014; Εικόνα 30).



Εικόνα 303034 Σχηματικό μοντέλο των κύριων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υπόγειους υδροφορείς (Taylor et al., 2013)

Η πολυπλοκότητα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ υπόγειων υδάτων και κλιματικών μεταβλητών απαιτεί ενσωμάτωση πολυδιάστατων μεθοδολογιών, όπως αριθμητική μοντελοποίηση, στατιστική ανάλυση και συστήματα προσομοίωσης σε διάφορες χωρικές και χρονικές κλίμακες (Meixner et al., 2016). Τα κλιματικά μοντέλα προβλέπουν αυξημένη μεταβλητότητα και ακραία φαινόμενα στις περισσότερες περιοχές του πλανήτη, γεγονός που συνεπάγεται μη γραμμικές και ενδεχομένως μη αντιστρέψιμες επιπτώσεις στους υπόγειους υδροφορείς (Smerdon, 2017). Σημαντικές είναι επίσης οι διαφοροποιήσεις ανά γεωγραφική περιοχή, καθώς σε άνυδρες και ημιάνυδρες περιοχές, όπως η Μεσόγειος, η Νότια Ασία και η Υποσαχάρια Αφρική, αναμένονται σημαντικές μειώσεις στην επαναφόρτιση των υδροφορέων και ενίσχυση της υδατικής ανασφάλειας (Kundzewicz & Döll, 2009). Παράλληλα, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και η διείσδυση αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς θέτει σε κίνδυνο τη βιωσιμότητα αγροτικών οικονομιών και την ποιότητα πόσιμου νερού σε νησιωτικά και χαμηλού υψομέτρου παράκτια οικοσυστήματα (Earman & Dettinger, 2011). Η συσχέτιση των μελλοντικών κλιματικών προβολών με την επαναφόρτιση των υδροφορέων δεν είναι γραμμική και

περιλαμβάνει μεγάλη αβεβαιότητα λόγω διαφορών στις υδρογεωλογικές συνθήκες (Εικόνα 31, στη χρήση γης και στην τοπική διαχείριση υδάτων (Green et al., 2011). Για την κατανόηση των επιπτώσεων αυτών απαιτείται λεπτομερής εκτίμηση των μηχανισμών επαναφόρτισης, οι οποίοι περιλαμβάνουν τη διάχυτη διήθηση από κατακρημνίσματα, τη συγκεντρωμένη διείσδυση μέσω ρεμάτων και χαραδρών, την επαναφόρτιση από άρδευση και την είσοδο από ορεινά υδροσυστήματα (Meixner et al., 2016). Οι περιοχές με υψηλή εξάρτηση από υπόγεια ύδατα για αγροτική χρήση ενδέχεται να αντιμετωπίσουν αύξηση στο κόστος άρδευσης λόγω της μείωσης διαθέσιμων ποσοτήτων και της αύξησης των αναγκών άντλησης (Kundzewicz & Döll, 2009). Ταυτόχρονα, η κλιματική αλλαγή μπορεί να επιδράσει και στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων μέσω αυξημένης συγκέντρωσης νιτρικών, βαρέων μετάλλων ή άλλων ρυπαντών που συνδέονται με τις γεωργικές δραστηριότητες και την αύξηση της θερμοκρασίας (Green et al., 2011). Η ενσωμάτωση των υπόγειων υδάτων στις στρατηγικές προσαρμογής στην κλιματική αλλαγή παραμένει ανεπαρκής σε επίπεδο πολιτικής, καθώς οι περισσότεροι εθνικοί σχεδιασμοί επικεντρώνονται στα επιφανειακά ύδατα ή στη διαχείριση πλημμυρών (Dragoni & Sukhija, 2008). Η διαχείριση των υπόγειων πόρων απαιτεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που συνδυάζει την προστασία της ποσότητας, της ποιότητας και της περιβαλλοντικής κατάστασης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις ανάγκες της κοινωνίας όσο και των οικοσυστημάτων (Klove et al., 2014). Οι αβεβαιότητες των μοντέλων και η έλλειψη μακροχρόνιων δεδομένων παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων περιορίζουν την ικανότητα πρόβλεψης των μελλοντικών επιπτώσεων και υπογραμμίζουν την ανάγκη επενδύσεων σε ερευνητικές υποδομές και δίκτυα παρακολούθησης (Smerdon, 2017). Συμπερασματικά, η κλιματική αλλαγή ενέχει πολλαπλές και συχνά αλληλεξαρτώμενες επιπτώσεις στους υπόγειους υδροφορείς, από την επαναφόρτιση και την ποιότητα, μέχρι την υποστήριξη της βιοποικιλότητας και τη διαθεσιμότητα ύδατος για ανθρωπογενείς χρήσεις, και απαιτείται συστηματική, διεπαγγελματική και προσαρμοστική προσέγγιση για την αειφόρο διαχείρισή τους (Green et al., 2011).

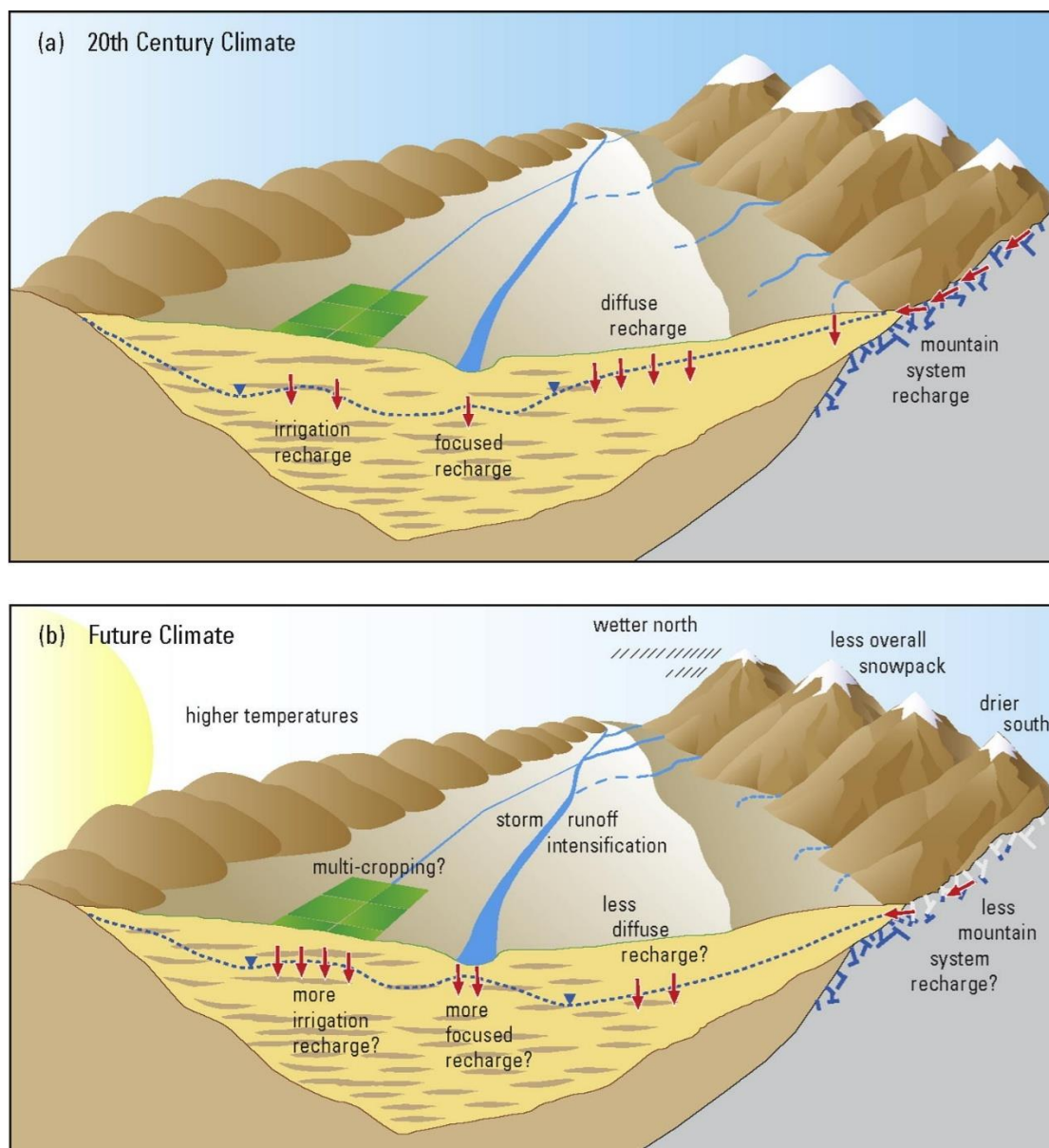


Εικόνα 313134 Απεικόνιση των πιθανών επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής και της αλλαγής χρήσης γης στα υπόγεια ύδατα. Ο συνδυασμένος αντίκτυπος θα επηρεάσει όλες τις διαφορετικές διεργασίες των υπόγειων υδάτων: Α-Διάχυση, Β-Απορρόφηση, Γ-Βασική ροή, Δ-Απόρριψη από τον υδροφορέα και Ε-Αποθήκευση σε ρωγμές και πόρους. Η άντληση υπόγειων υδάτων και η κλιματική αλλαγή μπορούν να επηρεάσουν τόσο τους περιφερειακούς όσο και τους παγκόσμιους υδροφορείς (Amanambu et al., 2020).

Η κατανόηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υπόγειους υδροφορείς προϋποθέτει την ανάλυση πολύπλοκων φυσικών, υδρογεωλογικών και ανθρωπογενών διεργασιών που αλληλεπιδρούν σε διαφορετικές χρονικές και χωρικές κλίμακες, γεγονός που απαιτεί την εφαρμογή ολοκληρωμένων μοντέλων

προσομοίωσης τα οποία συνδυάζουν κλιματικά δεδομένα, χρήσεις γης, γεωλογικά χαρακτηριστικά και κοινωνικοοικονομικές παραμέτρους (Allen et al., 2011). Οι βασικοί μηχανισμοί με τους οποίους επηρεάζεται η επαναφόρτιση των υπόγειων υδροφορέων περιλαμβάνουν τη μεταβολή στην ένταση και στη συχνότητα των βροχοπτώσεων, την αλλαγή στον χρονισμό της χιονόπτωσης και της χιονολιθώσεως, την αύξηση της θερμοκρασίας και της εξατμισοδιαπνοής και την μετατόπιση των εποχιακών μοτίβων κατακρήμνισης (Meixner et al., 2016; Εικόνα 32). Σε πολλές περιπτώσεις, η μείωση του νετού δεν συνοδεύεται απαραίτητα από άμεση μείωση της επαναφόρτισης, καθώς το ποσοστό του κατακρημνίσματος που διεισδύει στο υπέδαφος εξαρτάται από την ένταση της βροχής, τη διάρκεια, τον κορεσμό του εδάφους και τις χρήσεις γης (Smerdon, 2017). Η εξάτμιση και η διαπνοή τείνουν να αυξάνονται με την άνοδο της θερμοκρασίας, οδηγώντας σε μικρότερη ποσότητα διαθέσιμου νερού για επαναφόρτιση, ιδίως σε περιοχές με αραιή ή εποχική βλάστηση (Green et al., 2011). Επιπλέον, οι ακραίες βροχοπτώσεις μπορεί να ενισχύσουν τη ροή επιφανειακού νερού εις βάρος της διείσδυσης στο έδαφος, μειώνοντας την απόδοση της επαναφόρτισης (Dragonì & Sukhija, 2008). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαφοροποίηση της επαναφόρτισης ανά υδρογεωλογική συνθήκη, καθώς οι υδροφορείς σε καρστικά, ηφαιστειογενή ή αμμώδη υποστρώματα αντιδρούν διαφορετικά στις μεταβολές του υδρολογικού ισοζυγίου, λόγω διαφορετικών ιδιοτήτων διαπερατότητας και αποθήκευσης (Klove et al., 2014). Σε παράκτιες περιοχές, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας οδηγεί σε υφαλμύρωση των υπόγειων υδροφορέων, φαινόμενο που επιταχύνεται από την υπεράντληση για άρδευση ή αστική χρήση, καθιστώντας τα αποθέματα υφάλμυρα ή ακατάλληλα για ανθρώπινη κατανάλωση (Earman & Dettinger, 2011). Επιπλέον, η επαναφόρτιση μπορεί να επηρεαστεί από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως αλλαγές στη χρήση γης, αστικοποίηση και εντατική γεωργία, οι οποίες μεταβάλλουν την απορροή, τη συμπύκνωση και τη δυνατότητα διήθησης στο υπέδαφος (Costa et al., 2021). Σε κάποιες περιπτώσεις, η εφαρμογή τεχνητής επαναφόρτισης ή η χρήση αρδευτικού νερού μπορεί να αντισταθμίσει προσωρινά τις απώλειες λόγω κλιματικής αλλαγής, αλλά η βιωσιμότητα αυτών των παρεμβάσεων εξαρτάται από την ποιότητα του χρησιμοποιούμενου νερού και την ενεργειακή τους απόδοση (Meixner et al., 2016). Ιδιαίτερα προβληματική είναι η κατάσταση στις περιοχές με εξαρτώμενα από υπόγεια ύδατα οικοσυστήματα, όπως υγροβιότοποι και πηγές, τα οποία παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία σε ακόμη και μικρές μεταβολές στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα,

γεγονός που απειλεί τη λειτουργικότητα και τη βιοποικιλότητα τους (House et al., 2016). Η ανάλυση των επιπτώσεων απαιτεί χρήση κατάλληλων μοντέλων που να συνδέουν την πρόβλεψη των κλιματικών μεταβλητών με την αντίδραση του υδροφορέα, μέσω μοντέλων υδρογεωλογικών προσομοιώσεων, όπως τα MODFLOW, MIKE SHE και SWAT, τα οποία επιτρέπουν την εκτίμηση της ροής, της επαναφόρτισης και των δυναμικών αλληλεπιδράσεων επιφανειακών και υπόγειων υδάτων (Allen et al., 2011). Ωστόσο, η ακρίβεια αυτών των μοντέλων εξαρτάται άμεσα από τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των δεδομένων εισόδου, τη χωρική ανάλυση και την αξιοπιστία των κλιματικών σεναρίων που χρησιμοποιούνται (Smerdon, 2017). Η πολυπλοκότητα των φυσικών συστημάτων και η αβεβαιότητα των προβολών απαιτούν χρήση ανάλυσης υψηλής ευαισθησίας, μοντέλων πολλαπλών σεναρίων και αξιολόγηση κινδύνου, ώστε να ενισχυθεί η προσαρμοστική ικανότητα των συστημάτων διαχείρισης (Green et al., 2011). Σε τελική ανάλυση, η αποτελεσματική αντιμετώπιση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υπόγειους υδροφορείς απαιτεί διεπιστημονική συνεργασία, ενίσχυση των παρατηρητηρίων, ενσωμάτωση των υπόγειων υδάτων στις πολιτικές νερού και σχεδιασμό στρατηγικών προσαρμογής που να βασίζονται σε επιστημονικά τεκμηριωμένα δεδομένα και κοινωνική συμμετοχή (Costa et al., 2021).

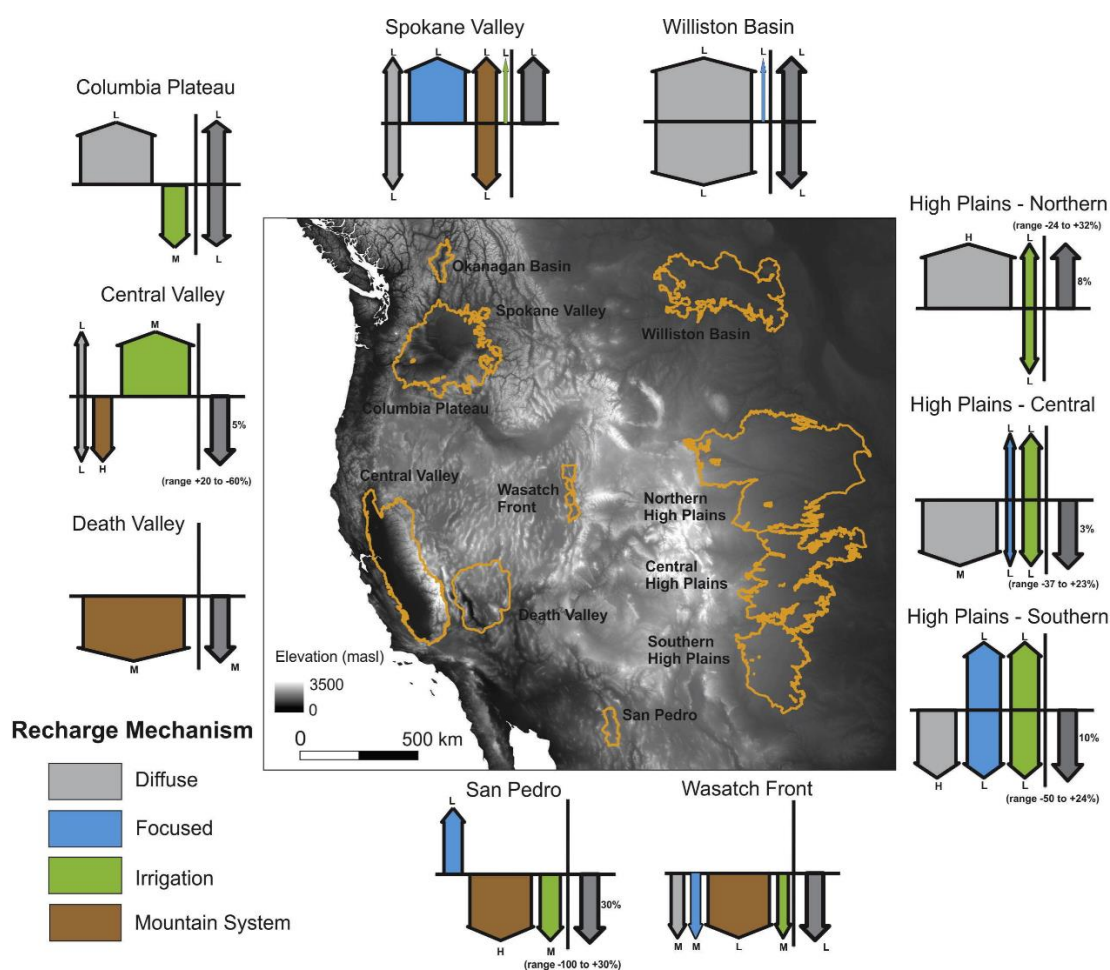


Εικόνα 323232 Εννοιολογική απεικόνιση τεσσάρων διαφορετικών μηχανισμών επαναφόρτισης στο πλαίσιο του κλίματος του 20ού αιώνα (α) και του μελλοντικού κλίματος (β). Ανάκτηση από Meixner et al., (2016).

Η μελέτη των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υπόγειους υδροφορείς έχει αναδείξει την ανάγκη ενίσχυσης της κατανόησης των φυσικών μηχανισμών που καθορίζουν την υδρολογική συμπεριφορά των υδροφορέων και των δυναμικών αλληλεπιδράσεων τους με το κλίμα, τη χρήση γης και τις ανθρώπινες παρεμβάσεις (Green et al., 2011). Ιδιαίτερη σημασία έχουν οι αλλαγές στον χρονισμό των υδρολογικών συμβάντων, όπως η μετατόπιση των βροχοπτώσεων προς περιόδους με χαμηλότερη δυνατότητα επαναφόρτισης, η οποία επηρεάζει αρνητικά τον όγκο των νερών που εισχωρούν στο υπέδαφος και ανανεώνουν τους υδροφορείς (Earman & Dettinger, 2011). Επιπλέον, η αύξηση της συχνότητας ακραίων καιρικών

φαινομένων, όπως οι καταιγίδες και τα παρατεταμένα ξηρά διαστήματα, επιβαρύνουν τη σταθερότητα των υδροφορέων και μειώνουν την προβλεψιμότητα της διαθεσιμότητας υδάτινων πόρων (Allen et al., 2011). Σημαντικές επιπτώσεις έχουν καταγραφεί σε διάφορες περιοχές του κόσμου, όπως στον δυτικό Καναδά, όπου τα μοντέλα προβλέπουν μείωση της επαναφόρτισης λόγω αύξησης της θερμοκρασίας και μείωσης του υετού, και ταυτόχρονα αύξηση της πίεσης στους υδροφορείς λόγω ζήτησης από τον αγροτικό τομέα (Gurdak et al., 2009). Στην Ινδία, οι υπόγειοι υδροφορείς είναι κρίσιμοι για την άρδευση και την επισιτιστική ασφάλεια, ωστόσο η κλιματική αλλαγή έχει ήδη προκαλέσει σοβαρές πιέσεις στους μη ανανεώσιμους φυσικούς πόρους, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας και τη μείωση της ποσότητας διαθέσιμου νερού (Dragoni & Sukhija, 2008). Στην Αυστραλία, η μεταβολή των εποχιακών προτύπων βροχής έχει οδηγήσει σε μείωση της επαναφόρτισης σε πολλές λεκάνες απορροής, με άμεσες επιπτώσεις στις αρδευτικές πρακτικές και στην αγροτική παραγωγικότητα (Green et al., 2011). Αντίστοιχα, στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ, η μείωση των χιονοπτώσεων και η επιτάχυνση της τήξης του χιονιού λόγω θέρμανσης επηρεάζει την εποχιακή διαθεσιμότητα νερού και προκαλεί μετατόπιση των περιόδων επαναφόρτισης, επιβαρύνοντας περαιτέρω τους ήδη καταπονημένους υδροφορείς (Meixner et al., 2016). Στην περιοχή των Μεγάλων Λιμνών στη Βόρεια Αμερική, έχει καταγραφεί σημαντική μεταβλητότητα στις αντιδράσεις των υδροφόρων συστημάτων στην κλιματική μεταβολή, με ορισμένες περιοχές να παρουσιάζουν αύξηση της αποθήκευσης λόγω υψηλών υετών, ενώ άλλες αντιμετωπίζουν κινδύνους υποβάθμισης ποιότητας και απώλειας σύνδεσης με επιφανειακά νερά (Costa et al., 2021). Οι διαφοροποιήσεις αυτές αναδεικνύουν τη σημασία της τοπικής υδρογεωλογικής κατανόησης για την εκτίμηση της ευαλωτότητας κάθε περιοχής (Εικόνα 33), καθώς και την ανάγκη ανάπτυξης προσαρμοσμένων μοντέλων ανά περιοχή και χρήση γης (Smerdon, 2017). Σημαντικός είναι επίσης ο ρόλος των ανθρωπογενών πρακτικών, όπως η υπεράντληση, η ρύπανση και η απώλεια φυσικών περιοχών διήθησης, που ενισχύουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και περιορίζουν την αναγεννητική ικανότητα των υπόγειων υδροφορέων (Allen et al., 2011). Ειδική προσοχή απαιτείται στις αγροτικές περιοχές με υψηλή εξάρτηση από άντληση υπόγειων υδάτων για άρδευση, όπου η αλλαγή στο κόστος ενέργειας και στην κατανομή βροχοπτώσεων επηρεάζει άμεσα τη βιωσιμότητα της γεωργίας και τη δυνατότητα συνεχούς παραγωγής (Meixner et al., 2016). Οι επιστημονικές προσπάθειες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη

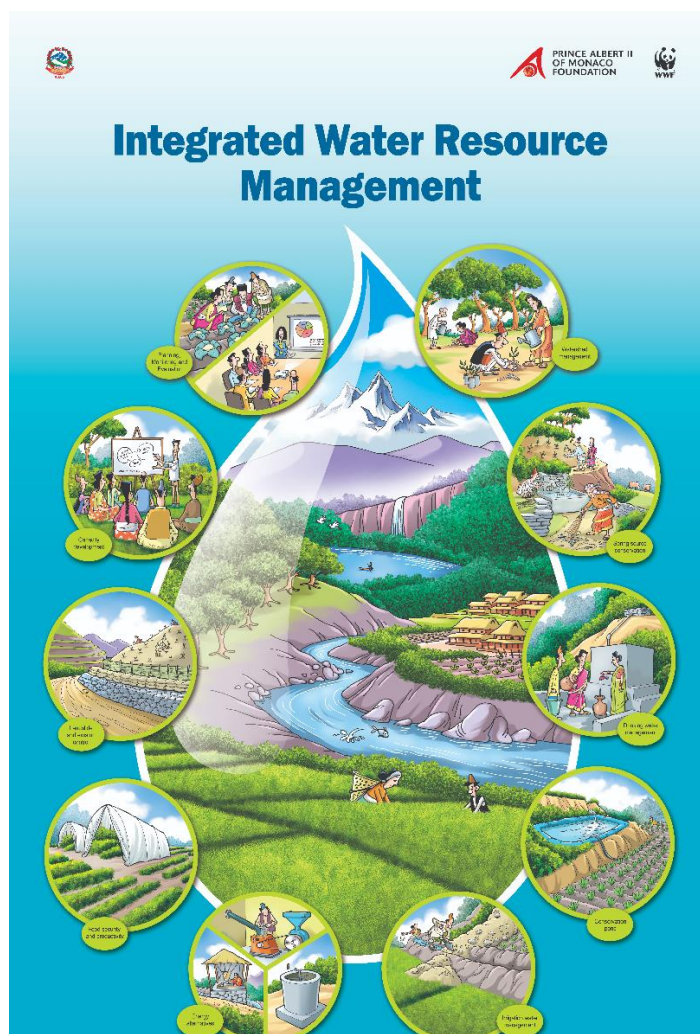
πολυπαραμετρικών δεικτών ευαλωτότητας, που λαμβάνουν υπόψη τη φυσική ανανέωση, τη ζήτηση, τις κοινωνικές πιέσεις και την ικανότητα διαχείρισης, με στόχο τον εντοπισμό περιοχών υψηλής προτεραιότητας για δράσεις προσαρμογής (Green et al., 2011). Η σύνδεση αυτών των αξιολογήσεων με πολιτικές και στρατηγικές νερού σε τοπικό και εθνικό επίπεδο αποτελεί προϋπόθεση για την αποτελεσματική ενσωμάτωση της προστασίας των υπόγειων υδάτων στον σχεδιασμό για την κλιματική ανθεκτικότητα (Earman & Dettinger, 2011). Η πρόκληση έγκειται όχι μόνο στην κατανόηση των φυσικών μηχανισμών, αλλά και στη δημιουργία διακυβερνητικών συνεργασιών και θεσμικού πλαισίου που να προάγει τη διαφάνεια, τη συλλογή δεδομένων και τη μακροπρόθεσμη παρακολούθηση (Costa et al., 2021).



Εικόνα 333333 Μοντέλο παρακολούθησης των προβλεπόμενων αλλαγών στην επαναφόρτιση σημαντικών υδροφόρων στη δυτική ενδοχώρα των ΗΠΑ. Για κάθε υδροφόρα, η αλλαγή σε κάθε μηχανισμό επαναφόρτισης αντιπροσωπεύεται από ένα βέλος με πλάτος ανάλογο με το κλάσμα της συνολικής επαναφόρτισης, με βάση τις τρέχουσες κλιματικές συνθήκες. Η συνολική επαναφόρτιση αντιπροσωπεύεται από το σκούρο γκρι βέλος,. Η κατεύθυνση του βέλους (πάνω, κάτω ή αμφίδρομη) υποδεικνύει την κατεύθυνση της αλλαγής που αναμένεται. Δύο βέλη που δείχνουν αντίθετες κατευθύνσεις υποδεικνύουν ίση πιθανότητα θετικών και αρνητικών αλλαγών. Τα γράμματα L (χαμηλή), M (μέτρια) και H (υψηλή) αναφέρονται στο ποσοστό εμπιστοσύνης εκτίμησης της αλλαγής. Οι ποσοτικές εκτιμήσεις του μεγέθους αλλαγής εμφανίζονται ως ποσοστά. Προσαρμογή από Meixner et al., (2016).

Η προσαρμογή των υπόγειων υδροφορέων στην κλιματική αλλαγή απαιτεί συνδυασμένη εφαρμογή τεχνικών, θεσμικών και κοινωνικών στρατηγικών, με στόχο τη διατήρηση της λειτουργικότητας των οικοσυστημάτων και την εξασφάλιση της υδατικής επάρκειας για τις παρούσες και μελλοντικές γενιές (Allen et al., 2011). Μία από τις πιο κρίσιμες προσεγγίσεις είναι η εφαρμογή ολοκληρωμένης διαχείρισης υδάτινων πόρων (ΟΔΥΠ), η οποία προωθεί τον συντονισμό μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών, συνδέοντας τη χρήση τους με τις ανάγκες της γεωργίας, της βιομηχανίας, των νοικοκυριών και της φύσης (Dragoni & Sukhija, 2008; Εικόνα 34). Η προστασία των ζωνών επαναφόρτισης είναι ουσιώδης, καθώς σε πολλές περιπτώσεις καταλαμβάνονται από αστική ανάπτυξη ή εντατική γεωργική χρήση, περιορίζοντας τη δυνατότητα φυσικής ανανέωσης των αποθεμάτων (Green et al., 2011). Ταυτόχρονα, η αναβάθμιση των συστημάτων παρακολούθησης των στάθμων, των ποιοτικών χαρακτηριστικών και της αντλούμενης ποσότητας είναι απαραίτητη για τη δημιουργία αξιόπιστων βάσεων δεδομένων που να υποστηρίζουν τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη (Costa et al., 2021). Οι τεχνολογίες τηλεμετρίας, οι αισθητήρες βάθους και ποιότητας, καθώς και οι γεωχωρικές βάσεις δεδομένων μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τη διαφάνεια και την ακρίβεια στη λήψη αποφάσεων (Meixner et al., 2016). Παράλληλα, η εφαρμογή τεχνητής επαναφόρτισης, μέσω κατασκευών καθυστέρησης απορροής, δεξαμενών, φρεατίων διείσδυσης και φραγμάτων, προσφέρει μια μέθοδο ενίσχυσης της αποθήκευσης νερού ιδίως σε ημιάνυδρες περιοχές (Earman & Dettinger, 2011). Ωστόσο, τέτοιες τεχνικές πρέπει να συνοδεύονται από μελέτες συμβατότητας με τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες και να ελέγχονται ως προς τις επιπτώσεις στην ποιότητα των υπόγειων υδάτων, καθώς υπάρχει κίνδυνος ρύπανσης μέσω επιφανειακών φορτίων ή ανεπαρκώς επεξεργασμένων λυμάτων (Allen et al., 2011). Η κλιματικά ευφυής γεωργία αποτελεί έναν ακόμη πυλώνα προσαρμογής, με έμφαση στη βελτιστοποίηση της άρδευσης μέσω σταγόνων, της χρήσης ανθεκτικών ποικιλιών φυτών και της διαχείρισης του εδάφους για ενίσχυση της διείσδυσης και μείωση της εξατμισοδιαπνοής (Klove et al., 2014). Οι πολιτικές τιμολόγησης του νερού, που ενσωματώνουν το κόστος άντλησης, τη διαχείριση κινδύνου και την περιβαλλοντική αξία των υπόγειων υδάτων, μπορούν να λειτουργήσουν ως κίνητρο για την εξοικονόμηση και την υπεύθυνη χρήση τους (Smerdon, 2017). Επιπλέον, η συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών, των χρηστών νερού και των εμπλεκόμενων φορέων στη λήψη αποφάσεων είναι καθοριστική για την κοινωνική αποδοχή και τη

βιωσιμότητα των μέτρων, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα των κοινοτήτων απέναντι στην αβεβαιότητα των κλιματικών αλλαγών (Costa et al., 2021). Η ενσωμάτωση της επιστημονικής γνώσης στις δημόσιες πολιτικές και η διασύνδεση των επιπέδων διοίκησης – τοπικό, περιφερειακό, εθνικό – αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη δημιουργία ενός συνεκτικού και αποτελεσματικού πλαισίου δράσης (Green et al., 2011). Η ανάγκη για επενδύσεις στην έρευνα, στη διαχείριση δεδομένων και στις υποδομές είναι επιτακτική, καθώς μόνο μέσω αξιόπιστης πληροφόρησης και τεκμηριωμένων στρατηγικών μπορούμε να ανταποκριθούμε στις σύνθετες προκλήσεις που επιφέρει η μεταβαλλόμενη κλιματική πραγματικότητα στους υπόγειους υδροφορείς (Meixner et al., 2016). Η παρακολούθηση των εξελίξεων και η ευελιξία προσαρμογής αποτελούν κρίσιμες αρχές σε ένα δυναμικό περιβάλλον, όπου η αβεβαιότητα δεν μπορεί να εξαλειφθεί αλλά μόνο να αντιμετωπιστεί μέσω σχεδιασμού βασισμένου σε σενάρια και συνεχούς αξιολόγησης (Smerdon, 2017).

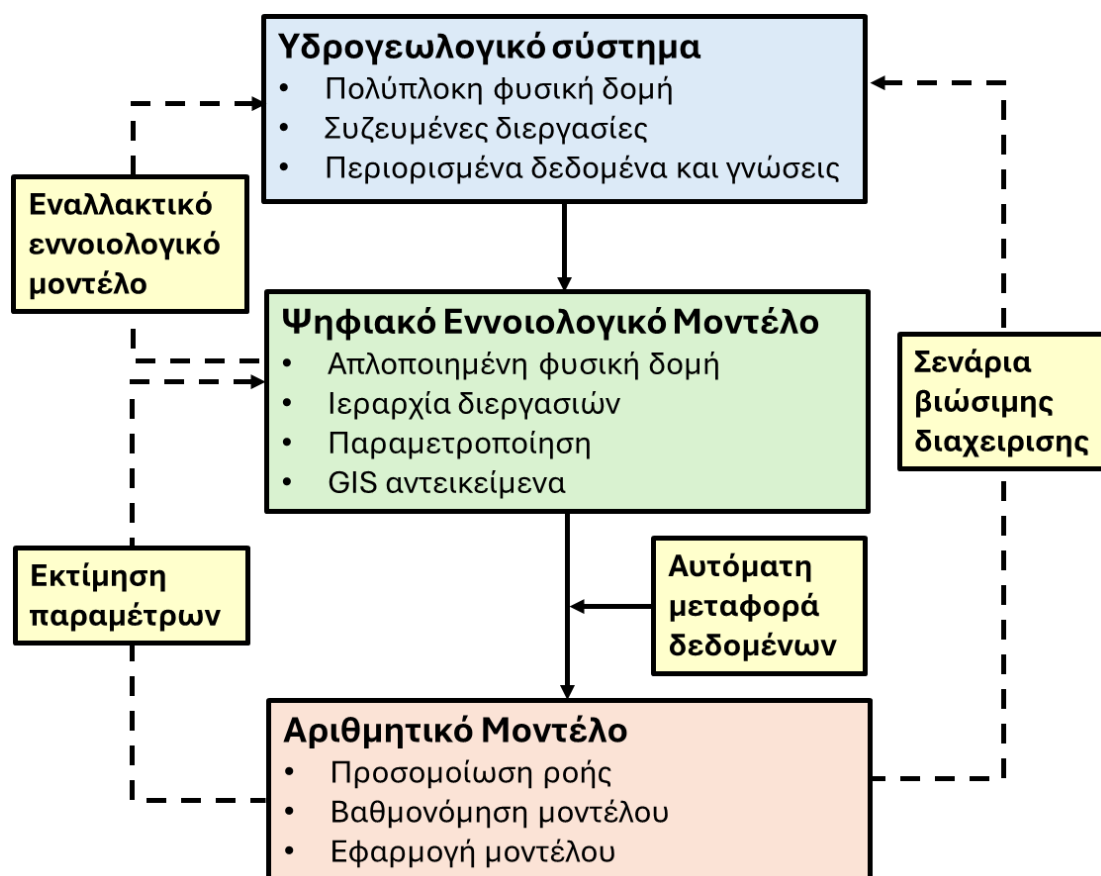


Εικόνα 343434 Η Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων (ΟΔΥΠ) είναι μια προσέγγιση για τη διαχείριση του νερού και των σχετικών φυσικών πόρων σε επίπεδο κοινότητας. Η αφίσα παρουσιάζει

τις καλές πρακτικές για τη βιώσιμη χρήση του νερού. Πηγή: WWF Nepal ανάκτηση μέσω <https://wwf.panda.org/>.

Η επιστημονική κοινότητα έχει αναπτύξει διάφορα μοντέλα αξιολόγησης των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στους υπόγειους υδροφορείς, τα οποία ενσωματώνουν δεδομένα από παγκόσμια κλιματικά μοντέλα (GCMs), υδρολογικά και υδρογεωλογικά συστήματα και παρατηρήσεις πεδίου για τη βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων (Meixner et al., 2016). Η διαδικασία υποβιβασμού (downscaling) είναι κρίσιμη, καθώς επιτρέπει τη μετάβαση από τα χονδροειδή παγκόσμια δεδομένα σε τοπικής κλίμακας πληροφορίες, κατάλληλες για εφαρμογή σε υδρολογικά μοντέλα και διαχείριση φυσικών πόρων (Green et al., 2011). Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι υποβιβασμού: ο στατιστικός και ο δυναμικός υποβιβασμός, καθένας με πλεονεκτήματα και περιορισμούς, ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα, τη χρονική περίοδο πρόβλεψης και την υπολογιστική ισχύ (Allen et al., 2011). Τα στατιστικά μοντέλα βασίζονται στην ανάλυση ιστορικών σχέσεων μεταξύ κλιματικών μεταβλητών και τοπικών παραμέτρων, ενώ τα δυναμικά υποδεικνύουν φυσικές διεργασίες μέσω κλιματικών μοντέλων (RCMs) (Smerdon, 2017). Ένα από τα βασικά προβλήματα είναι η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας στα μοντέλα, η οποία προκύπτει τόσο από τις εσωτερικές παραμέτρους των μοντέλων όσο και από τις μεταβλητές εισόδου, όπως το σενάριο εκπομπών και οι φυσικές ιδιαιτερότητες του κάθε υδροφορέα (Costa et al., 2021). Επιπλέον, πολλά από τα υπάρχοντα μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ επιφανειακού και υπόγειου νερού ή τα οικοσυστήματα που εξαρτώνται από τους υπόγειους υδροφορείς, γεγονός που περιορίζει την αξιοπιστία τους για ολιστική διαχείριση (Klove et al., 2014). Σε απάντηση, έχουν προταθεί πολυεπίπεδα πλαίσια αξιολόγησης που ενσωματώνουν δείκτες οικολογικής κατάστασης, οικονομικής σημασίας, κοινωνικής ευαλωτότητας και φυσικών αποθεμάτων, ώστε να διαμορφώνεται μια ολοκληρωμένη εικόνα κινδύνου και ανθεκτικότητας (Green et al., 2011). Σημαντική είναι και η συμβολή των μοντέλων σεναρίων, τα οποία επιτρέπουν την εκτίμηση εναλλακτικών μελλοντικών καταστάσεων και τον εντοπισμό ορίων κρίσιμων μεταβάσεων ή μη αναστρέψιμων σημείων (Allen et al., 2011). Τα σενάρια αυτά συχνά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με στοχαστικά μοντέλα, αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και μεθόδους λήψης αποφάσεων, ώστε να υποστηρίξουν δυναμικά προσαρμοστικές στρατηγικές (Smerdon, 2017). Η αξιοποίηση των νέων τεχνολογιών, όπως η τηλεπισκόπηση, τα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) και τα

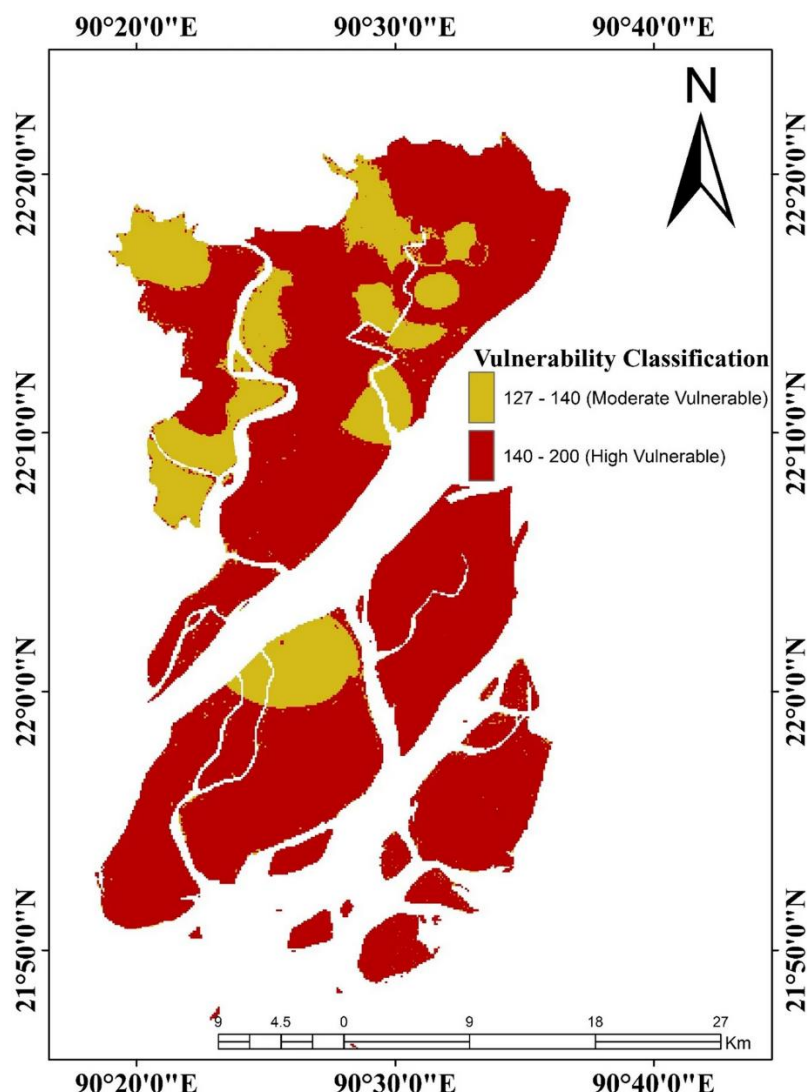
εργαλεία ανοικτών δεδομένων, ενισχύει τη συλλογή, ανάλυση και οπτικοποίηση πολύπλοκων πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο (Costa et al., 2021). Στον τομέα της προσαρμογής, αναπτύσσονται στρατηγικές βασισμένες σε μέτρα τόσο τεχνικά όσο και οικοσυστημικά, όπως η αποκατάσταση υγροτόπων, η ανακατεύθυνση απορροών, η ενίσχυση της φυσικής διήθησης μέσω βιώσιμων αστικών υποδομών και η επαναχρησιμοποίηση γκρίζων υδάτων για μη πόσιμες χρήσεις (Earman & Dettinger, 2011). Η εφαρμογή των μέτρων αυτών απαιτεί διεπιστημονική γνώση, οικονομικούς πόρους και κοινωνική αποδοχή, καθώς και θεσμικές αλλαγές που να προάγουν τη μακροπρόθεσμη διακυβέρνηση των υπόγειων υδάτων με όρους διαγενεακής δικαιοσύνης (Allen et al., 2011). Συνεπώς, τα εργαλεία μοντελοποίησης και σεναρίων (Εικόνα 35) δεν αποτελούν απλώς τεχνικές υποδομές, αλλά κρίσιμα συστατικά του σχεδιασμού πολιτικής και της συλλογικής ικανότητας αντιμετώπισης της αβεβαιότητας που εισάγει η κλιματική αλλαγή στους υπόγειους υδροφορείς (Green et al., 2011).



Εικόνα 353535 Διαδικασία κατασκευής και εφαρμογής ενός προβλεπτικού εννοιολογικού μοντέλου για υδρογεωλογικά συστήματα. Προσαρμογή από Zhou & Li (2011).

## Κεφάλαιο 9. Τεχνολογίες παρακολούθησης των υπόγειων υδάτων

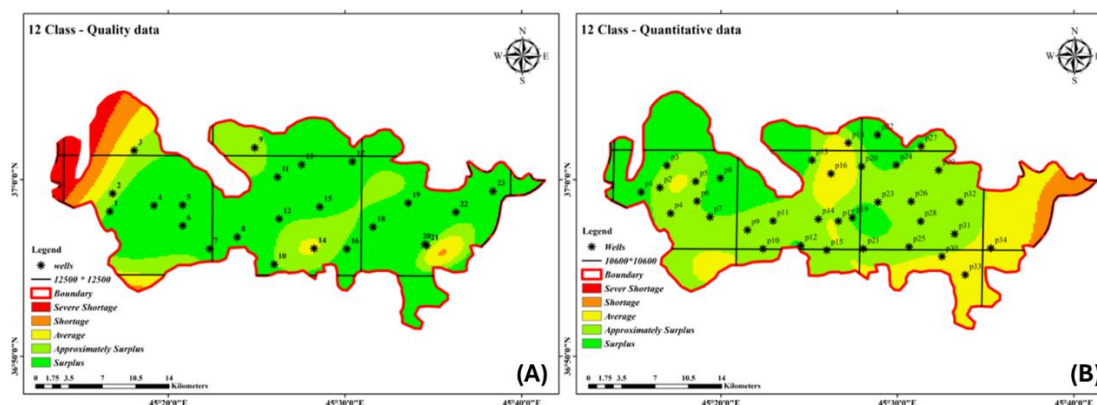
Η παρακολούθηση της ποσότητας και της ποιότητας των υπόγειων υδάτων αποτελεί αναπόσπαστο στοιχείο της βιώσιμης διαχείρισης των υδατικών πόρων και της προσαρμογής στις προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής, καθώς οι υδροφορείς καλύπτουν μεγάλο ποσοστό των αναγκών σε πόσιμο νερό και άρδευση παγκοσμίως (Fallatah, 2018). Οι υδροφόροι ορίζοντες, ιδιαίτερα στις άνυδρες και ημίξηρες περιοχές, προσφέρουν κρίσιμη υποστήριξη στις κοινωνίες και στα οικοσυστήματα και η υποβάθμισή τους επηρεάζει άμεσα την κοινωνική και οικονομική σταθερότητα (Ehteshami et al., 2016). Η ποιότητα του υπόγειου νερού υποβαθμίζεται σταθερά λόγω φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών, με την παρουσία αλάτων, βαρέων μετάλλων και οργανικών ενώσεων να απειλούν την καταλληλότητα για κατανάλωση και γεωργική χρήση (Barbieri et al., 2023). Επιπλέον, η εντατική άντληση, η αστικοποίηση, η αλλαγή χρήσεων γης και η ρύπανση από βιομηχανικά και γεωργικά απόβλητα επιταχύνουν την υποβάθμιση της ποιότητας και την εξάντληση της ποσότητας των υδροφορέων (Carmon et al., 1997). Για την αποτύπωση της κατάστασης απαιτείται η εφαρμογή συνδυασμένων μεθοδολογιών που ενσωματώνουν υδρογεωλογική, γεωχημική και τηλεπισκοπική ανάλυση (Εικόνα 36), όπως δείχνουν εφαρμογές σε περιοχές όπως η λεκάνη του Damghan στο Ιράν και ο υδροφορέας Saq στη Σαουδική Αραβία (Ehteshami et al., 2016) η χρήση χαρτών Piper για την κατηγοριοποίηση των υδροχημικών τύπων, η παρακολούθηση φυσικοχημικών παραμέτρων (pH, EC, TDS,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ) και η σύγκρισή τους με τα πρότυπα του παρέχουν βασικές πληροφορίες για την αξιολόγηση της ποιότητας του νερού (Ehteshami et al., 2016). Ταυτόχρονα, η χρήση δορυφορικών δεδομένων όπως από τον δορυφόρο GRACE και το μοντέλο GLDAS επιτρέπει την εκτίμηση των μεταβολών στη συνολική και υπόγεια αποθήκευση υδάτων σε μεγάλης κλίμακας λεκάνες (Fallatah, 2018).



Εικόνα [363636](#) Αξιολόγηση της ευπάθειας των υπόγειων υδάτων σε διείσδυση θαλασσινού νερού χρησιμοποιώντας το μοντέλο DRASTIC σε παράκτια περιοχή στην περιοχή Patuakhali, Μπαγκλαντές (Hasan et al., 2023).

Σημαντική είναι η συνεισφορά γεωχημικών δεικτών όπως τα ισοτοπικά προφίλ ( $\delta_{18}\text{O}$ ,  $\delta_2\text{H}$ ) που βοηθούν στην κατανόηση της προέλευσης και του μηχανισμού επανατροφοδότησης των υδροφορέων (Fallatah, 2018). Η αύξηση της αδιαπέραστης επιφάνειας λόγω της αστικοποίησης περιορίζει τη φυσική διήθηση και συνεπώς τη φυσική επανατροφοδότηση, οδηγώντας σε φθίνουσα υδροφόρα στάθμη και υποβάθμιση της ποιότητας λόγω συγκέντρωσης διαλυμένων ρύπων (Carmon et al., 1997). Ταυτόχρονα, η αλόγιστη γεωργική χρήση οδηγεί σε αυξημένη συγκέντρωση νιτρικών και αλάτων, όπως αποδείχθηκε σε πολλές περιοχές της Ιταλίας και της Μέσης Ανατολής (Barbieri et al., 2023). Οι κλιματικές μεταβολές, όπως η αύξηση της θερμοκρασίας και η μεταβολή των βροχοπτώσεων, επηρεάζουν άμεσα τόσο την ποσότητα όσο και την ποιότητα του υπόγειου νερού, προκαλώντας

αύξηση της εξάτμισης, μείωση της διήθησης και συγκέντρωση ρύπων λόγω μειωμένης ανανέωσης του όγκου (Barbieri et al., 2023). Η συνεχής αύξηση της ζήτησης, σε συνδυασμό με τη χαμηλή ανανέωση, επιτάσσουν την ανάπτυξη στρατηγικών συνεχούς παρακολούθησης και προσαρμοστικής διαχείρισης, που λαμβάνουν υπόψη τα κοινωνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά δεδομένα (Gleeson et al., 2012). Βασικό στοιχείο για την επίτευξη βιωσιμότητας είναι ο καθορισμός διαγενεακών στόχων διατήρησης της ποσότητας και της ποιότητας των υδροφορέων σε χρονικό ορίζοντα 50 έως 100 ετών, η αναδρομική σχεδίαση πολιτικής (backcasting) και η εφαρμογή προσαρμοστικής διαχείρισης βάσει παρακολούθησης και ανατροφοδότησης (Gleeson et al., 2012). Επίσης, η υποθαλάσσια εκφόρτιση υπόγειων υδάτων αποτελεί σημαντικό μηχανισμό εκκένωσης υπόγειων υδροφορέων προς τις παράκτιες ζώνες, μεταφέροντας θρεπτικά και ρυπογόνα φορτία, και πρέπει να υπολογίζεται μέσω πολυμεθοδολογικών προσεγγίσεων που συνδυάζουν ισότοπα ραδονίου, ραδίου, μετρητές διαρροής και γεωφυσικές τεχνικές (Burnett et al., 2006). Επιπλέον, η αναγνώριση της επίδρασης των αλλαγών χρήσης γης, της αποδάσωσης και της αδιαβροχοποίησης της επιφάνειας μέσω των δεδομένων τηλεπισκόπησης είναι κρίσιμη για την ολιστική αξιολόγηση των πιέσεων στα υπόγεια ύδατα (Fallatah, 2018). Η διαχείριση της ποιότητας απαιτεί ενσωμάτωση υδροχημικών, ισοτοπικών και στατιστικών μεθόδων με στόχο την ταξινόμηση των υδάτων ως προς την καταλληλότητα για ύδρευση και άρδευση, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση πινάκων Wilcox και SAR καθώς και διαγραμμάτων Piper (Ehteshami et al., 2016). Η ανάπτυξη ψηφιακών γεωγραφικών συστημάτων (GIS) σε συνδυασμό με υδρολογικά μοντέλα όπως το SWAT επιτρέπει την προσομοίωση του υδρολογικού ισοζυγίου και των επιδράσεων ανθρωπογενών δραστηριοτήτων σε πραγματικό χρόνο (Fallatah, 2018). Κλείνοντας, η παρακολούθηση και διαχείριση της ποσότητας και της ποιότητας των υπόγειων υδάτων απαιτεί μια πολυεπίπεδη προσέγγιση που περιλαμβάνει τη χρήση δεικτών ποιότητας, μαθηματικών μοντέλων, γεωφυσικής, τηλεπισκόπησης (Εικόνα 37) και ενεργής συμμετοχής της τοπικής κοινωνίας ώστε να εξασφαλιστεί η μακροχρόνια διατήρηση αυτού του πολύτιμου φυσικού πόρου (Gleeson et al., 2012).

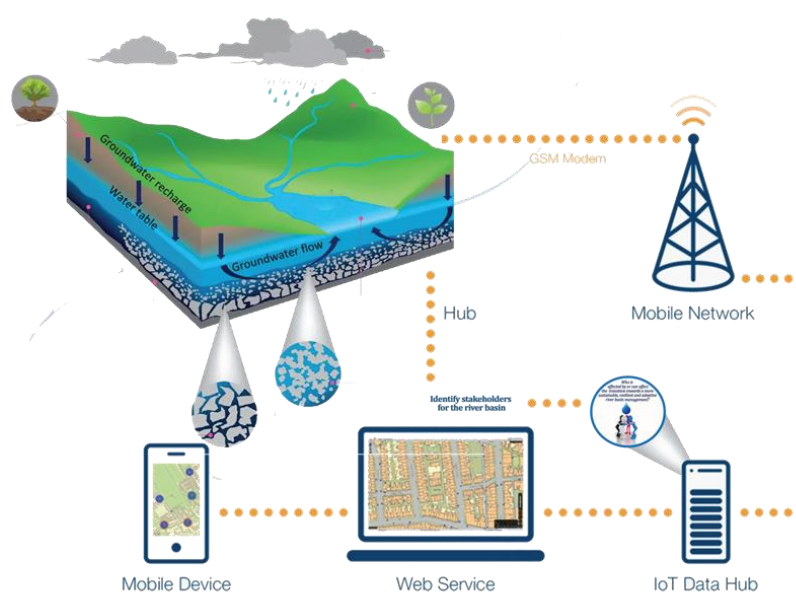


Εικόνα 373737 Επανασχεδιασμός και παρακολούθηση δικτύων ποιότητας και ποσότητας υπόγειων υδάτων χρησιμοποιώντας τη θεωρία της εντροπίας χρησιμοποιώντας ως περιοχή μελέτης την περιοχή Naqadeh στο Ιράν.

Η ολιστική κατανόηση της παρακολούθησης της ποσότητας και της ποιότητας των υπόγειων υδάτων απαιτεί τη σύνδεση διαφορετικών επιστημονικών κλάδων, εργαλείων και εμπειρικών δεδομένων που επιτρέπουν τη συστηματική καταγραφή των χωρικών και χρονικών διακυμάνσεων σε επίπεδο λεκάνης απορροής, υδροφορέα και διοικητικής περιφέρειας (Fallatah, 2018). Το θεμέλιο κάθε στρατηγικής παρακολούθησης είναι η εγκατάσταση ενός αποτελεσματικού δικτύου παρακολούθησης (monitoring network), το οποίο περιλαμβάνει στρατηγικά τοποθετημένες γεωτρήσεις, δειγματοληπτικούς σταθμούς και αισθητήρες, ώστε να καταγράφονται συνεχώς παράμετροι όπως η υδροστατική πίεση, η υδραυλική αγωγιμότητα, η αγωγιμότητα ηλεκτρικού ρεύματος, η συγκέντρωση θρεπτικών και τοξικών ουσιών, η θερμοκρασία και η ραδιενέργεια (Barbieri et al., 2023). Η ποιότητα του υπόγειου νερού επηρεάζεται ιδιαίτερα από γεωλογικούς παράγοντες όπως ο τύπος των πετρωμάτων, η παρουσία φυσικών ιχνοστοιχείων (π.χ. αρσενικό, φθόριο, βόριο), καθώς και από γεωχημικές αντιδράσεις όπως η ιοντοανταλλαγή, η διαλυτοποίηση και η απορρόφηση, που τροποποιούν τη χημική σύνθεση του νερού κατά την πορεία του εντός του υπόγειου συστήματος (Ehteshami et al., 2016). Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν τα φαινόμενα υφαλμύρωσης σε παράκτιες περιοχές, όπου η υπεράντληση προκαλεί την είσοδο θαλασσινού νερού στους υδροφορείς, αυξάνοντας ραγδαία τη συγκέντρωση ιόντων νατρίου, χλωρίου και μαγνησίου (Barbieri et al., 2023). Η μακροχρόνια παρακολούθηση τέτοιων φαινομένων είναι κρίσιμη για τον προσδιορισμό κρίσιμων κατωφλίων υποβάθμισης και την πρόβλεψη των ζωνών υψηλού κινδύνου (Carmon et al., 1997). Από τη σκοπιά της διαχείρισης, τα δεδομένα παρακολούθησης πρέπει να ενσωματώνονται σε λογισμικά περιβάλλοντα ανάλυσης που υποστηρίζουν μοντελοποίηση, στατιστική ανάλυση,

γεωχωρική απεικόνιση και εκτίμηση κινδύνου, επιτρέποντας τον προσδιορισμό σεναρίων, την επιλογή παρεμβάσεων και τη βελτιστοποίηση της κατανομής πόρων (Gleeson et al., 2012). Επιπρόσθετα, οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής πρέπει να εκτιμώνται δυναμικά μέσω της ενσωμάτωσης προβλέψεων σεναρίων μελλοντικής βροχόπτωσης, θερμοκρασίας και συχνότητας ξηρασιών, που επηρεάζουν τη διαθέσιμη ποσότητα και την ποιότητα μέσω της αλλαγής του κύκλου επανατροφοδότησης και της συγκέντρωσης ρύπων (Barbieri et al., 2023). Για την αποτελεσματική λειτουργία ενός προγράμματος παρακολούθησης απαιτείται θεσμική συνεργασία μεταξύ υπηρεσιών περιβάλλοντος, υδάτων, αγροτικής ανάπτυξης, υγείας και πολεοδομίας, ώστε να διασφαλίζεται η συνέπεια, η αξιοπιστία και η αξιοποίηση των δεδομένων στη χάραξη πολιτικής (Fallatah, 2018). Ο ρόλος της εκπαίδευσης, της ευαισθητοποίησης και της συμμετοχής της τοπικής κοινωνίας είναι κρίσιμος για τη διατήρηση της λειτουργίας των σταθμών παρακολούθησης και την ορθή χρήση των διαθέσιμων πληροφοριών (Gleeson et al., 2012). Η έλλειψη πρόσβασης σε καθαρό και ασφαλές υπόγειο νερό έχει συσχετιστεί με σοβαρά προβλήματα δημόσιας υγείας, όπως μεταδοτικές ασθένειες, βλάβες από βαρέα μέταλλα και μείωση της γεωργικής παραγωγικότητας, κάτι που εντείνει την ανάγκη για επαρκή, έγκαιρη και διαφανή πληροφόρηση σχετικά με την ποιότητα των υδάτων (Barbieri et al., 2023). Στις άνυδρες περιοχές, όπως η Σαουδική Αραβία, η χρήση τηλεπισκόπησης και υδρολογικών δορυφορικών δεδομένων επέτρεψε την αναγνώριση μείωσης των υδατικών αποθεμάτων κατά 8-10% ετησίως λόγω εξαντλητικής γεωργικής χρήσης και απουσίας φυσικής επανατροφοδότησης (Fallatah, 2018). Μεθοδολογικά, η χρήση πολυμεταβλητών στατιστικών τεχνικών όπως η ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA), η ανάλυση ιεραρχικών συστάδων (HCA) και η πολυκριτηριακή αξιολόγηση (MCDA) μπορεί να συμβάλει στον εντοπισμό πηγών ρύπανσης και στη διαχωριστική αξιολόγηση περιοχών υψηλού κινδύνου (Ehteshami et al., 2016). Σύγχρονες πρακτικές περιλαμβάνουν τη χρήση αισθητήρων IoT (Internet of Things) σε πραγματικό χρόνο για τη συνεχή καταγραφή τιμών σε υδρογεωτρήσεις και τη διασύνδεσή τους με διαδικτυακές βάσεις δεδομένων ανοιχτής πρόσβασης για ερευνητές, διαχειριστές και πολίτες (Barbieri et al., 2023; Εικόνα 38). Η παρακολούθηση της δυναμικής του υδροφόρου απαιτεί κατανόηση της υδρολογικής αλληλεπίδρασης με επιφανειακά ύδατα, καθώς η υπόγεια ροή μπορεί να υποστηρίζει ροή σε ποτάμια, λίμνες και υγροτόπους, η οποία με τη σειρά της επηρεάζεται από τα κλιματικά και υδρολογικά πρότυπα (Carmon et al., 1997). Η παρακολούθηση της ποσότητας του υπόγειου νερού

περιλαμβάνει τη συνεχή μέτρηση της πιεζομετρικής στάθμης, των ρυθμών άντλησης, της επανατροφοδότησης μέσω καθίζησης και την κατανόηση του αποθέματος ως χρονική αποθήκη νερού με πολυετή καθυστέρηση απόκρισης (Fallatah, 2018). Η αναγνώριση περιοχών με ταχύτερη ανανέωση (π.χ. μέσω χαλαρών ιζημάτων, ρωγμώδους ασβεστόλιθου ή ηφαιστειακών σχηματισμών) είναι κρίσιμη για τον εντοπισμό περιοχών που μπορούν να διαχειριστούν δυναμικά με βάση τις μεταβολές στη ζήτηση και στην προσφορά (Gleeson et al., 2012). Σε επίπεδο πολιτικής, η καθιέρωση κανονιστικών πλαισίων που απαιτούν την τακτική παρακολούθηση των ποιοτικών και ποσοτικών παραμέτρων από τους χρήστες (π.χ. βιομηχανίες, γεωργικές μονάδες) θα ενίσχυε τη λογοδοσία και τη διαφάνεια στην προστασία των υδάτων (Barbieri et al., 2023). Η παρακολούθηση της υπόγειας ρύπανσης απαιτεί τη χρήση τρισδιάστατων υδρογεωλογικών μοντέλων που λαμβάνουν υπόψη την κατεύθυνση και την ταχύτητα της υπόγειας ροής και επιτρέπουν τον υπολογισμό του χρόνου άφιξης ρύπων σε περιοχές προστασίας υδροληψιών (Ehteshami et al., 2016). Τέλος, η παρακολούθηση της ποσότητας και της ποιότητας των υπόγειων υδάτων συνιστά ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης, κοινωνικής ευθύνης και επιστημονικής τεκμηρίωσης για μια βιώσιμη, ασφαλή και δίκαιη διαχείριση των φυσικών πόρων στο παρόν και στο μέλλον (Gleeson et al., 2012).



Εικόνα 383838 Το έργο SMART IWRM Medjerda εφαρμόζει ένα σύστημα παρακολούθησης υπόγειων υδάτων που βασίζεται σε ένα δίκτυο ασύρματα συνδεδεμένων αισθητήρων πίεσης. Το προτεινόμενο

σύστημα θα επιτρέψει στους ερευνητές υπόγειων υδάτων και στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να έχουν γρήγορη πρόσβαση στα δεδομένα των υπόγειων υδάτων με λιγότερη προσπάθεια και κόστος (Πηγή: <https://smartmedjerda.agrinet.tn/>)

## Κεφάλαιο 10. Γενικά Συμπεράσματα

- Οι καρστικοί υδροφορείς αποτελούν ζωτικούς υδατικούς πόρους, αλλά η δομή τους τους καθιστά ευάλωτους σε περιβαλλοντικές και ανθρωπογενείς πιέσεις.
- Οι υποθαλάσσιες πηγές νερού έχουν καθοριστική σημασία για τη διατήρηση του θαλάσσιου οικοσυστήματος και την παροχή σημαντικών υδατικών πόρων.
- Η προστασία και η βιώσιμη διαχείρισή τους είναι κρίσιμες για τη διασφάλιση της οικολογικής ισορροπίας και της ποιότητας των υδάτων.
- Η υιοθέτηση ολοκληρωμένων στρατηγικών διαχείρισης είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ποιότητας και της διαθεσιμότητας των υδάτινων αποθεμάτων.
- Η ελληνική νομοθεσία που αφορά τη διαχείριση των υπόγειων και υποθαλάσσιων υδάτων είναι ολοκληρωμένη και συμβαδίζει με τις ευρωπαϊκές κατευθύνσεις. Παρ' όλα αυτά, η αποτελεσματική εφαρμογή της απαιτεί περαιτέρω ενίσχυση, μέσα από τη συνεργασία των αρμόδιων φορέων, της τοπικής αυτοδιοίκησης και του ιδιωτικού τομέα, ώστε να διασφαλιστεί η βιώσιμη
- Η ενσωμάτωση ισχυρής νομοθεσίας και η αποτελεσματική εφαρμογή της είναι απαραίτητες για την πρόληψη της υποβάθμισης και τη διασφάλιση της βιωσιμότητας.
- Οι θερμές πηγές συνιστούν ιδιαίτερα σημαντικά γεωλογικά και υδρολογικά φαινόμενα, με αξιοσημείωτη ιαματική, πολιτιστική και τουριστική αξία. Η προστασία και διατήρησή τους ενισχύει την προώθηση του ιαματικού τουρισμού και συμβάλλει στη βιώσιμη αξιοποίηση των φυσικών πόρων της χώρας.
- Οι βασικοί στόχοι περιλαμβάνουν:
  - Μείωση της υπερεκμετάλλευσης των υδροφορέων και αντιμετώπιση των προβλημάτων υφαλμύρωσης.
  - Προώθηση τεχνικών επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης του νερού σε γεωργία και άλλους τομείς.
  - Ενδυνάμωση του νομικού πλαισίου και ενίσχυση των περιβαλλοντικών ελέγχων.
  - Επένδυση στην έρευνα και την ανάπτυξη καινοτόμων λύσεων στον τομέα των υδατικών πόρων.

- Η αποτελεσματική διαχείριση των υπόγειων νερών στην Ελλάδα προϋποθέτει συνδυασμένες δράσεις που βασίζονται σε επιστημονικά δεδομένα, σύγχρονες τεχνολογίες και λειτουργικά διοικητικά πλαίσια.
- Η κλιματική αλλαγή εντείνει τις προκλήσεις, αυξάνοντας την αβεβαιότητα στη διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων.
- Οι σύγχρονες τεχνολογίες παρακολούθησης, μοντελοποίησης και διαχείρισης αποτελούν απαραίτητα εργαλεία για την κατανόηση και προστασία των καρστικών συστημάτων.
- Η διεπιστημονική προσέγγιση και η συνεργασία μεταξύ επιστημόνων, φορέων διαχείρισης και τοπικών κοινωνιών είναι καθοριστικής σημασίας για τη διατήρηση και προστασία των καρστικών υδροφορέων.

## Κεφάλαιο 11. Βιβλιογραφία

### 11.1 Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Alexakis, D. (2008). Geochemistry of stream sediments as a tool for assessing contamination by Arsenic, Chromium and other toxic elements: East Attica region, Greece. *Eur Water*, 21(22), 57-72.

Alexakis, D. (2011). Diagnosis of stream sediment quality and assessment of toxic element contamination sources in East Attica, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 63(6), 1369-1383.

Alexakis, D. (2016). Management Options of a Brackish Water Spring. Case Study: Almyros Spring (Heraklion, Greece). *Austin J Hydrol*, 3(1), 1017.

Alexakis, D. E. (2022). Applying factor analysis and the CCME water quality index for assessing groundwater quality of an Aegean Island (Rhodes, Greece). *Geosciences*, 12(10), 384.

Alfaro, C., & Wallace, M. (1994). Origin and classification of springs and historical review with current applications. *Environmental Geology*, 24, 112-124.

Allen, D. M., Taniguchi, M., & Gurdak, J. J. (2011). Global Groundwater: Issues and Solutions. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39, 363–387

Aloupi, M., Angelidis, M. O., Gavriil, A. M., Koulousaris, M., & Varnavas, S. P. (2009). Influence of geology on arsenic concentrations in ground and surface water in central Lesvos, Greece. *Environmental monitoring and assessment*, 151, 383-396.

Amanambu, A. C., Obarein, O. A., Mossa, J., Li, L., Ayeni, S. S., Balogun, O., ... & Ochege, F. U. (2020). Groundwater system and climate change: Present status and future considerations. *Journal of Hydrology*, 589, 125163.

Archontelis, A., & Ganoulis, J. (2014). Comparison between hydrodynamic simulation and available data in a karst coastal aquifer: the case of Almyros Spring, Crete Island, Greece. In *Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems* (pp. 303-311). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Bakalowicz, M. (2015). Karst and karst groundwater resources in the Mediterranean. *Environmental Earth Sciences*, 74, 5-14.

Barbieri, M., Barberio, M. D., Banzato, F., Billi, A., Boschetti, T., Franchini, S., Gori, F., & Petitta, M. (2023). Climate change and its effect on groundwater quality. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 1133–1144.

Bonacci, O., Fistanic, I., & Split, C. R. O. A. T. I. A. (2006). Contribution to hydrological analysis of the coastal karst spring Almyros (Crete, Greece). In *Conference on water observation and information system for decision support*. Balwois, Ohrid, FYROM, UNDP-Agency of Skopje (pp. 191-192).

Burnett, W. C., Aggarwal, P. K., Aureli, A., Bokuniewicz, H., Cable, J. E., Charette, M. A., Kontar, E., Krupa, S., Kulkarni, K. M., Loveless, A., Moore, W. S., Oberdorfer, J. A., Oliveira, J., Ozyurt, N., Povinec, P., Privitera, A. M. G., Rajar, R., Ramessur, R. T., Scholten, J., Stieglitz, T., Taniguchi, M., & Turner, J. V. (2006). Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Science of the Total Environment*.

Carmon, N., Shamir, U., & Meiron-Pistiner, S. (1997). Water-sensitive urban planning: Protecting groundwater. *Journal of Environmental Planning and Management*, 40(4), 413–434.

Chachami-Chalioi S.E., Zavraklis C., Emmanouil C. & Kungolos A. The evolution of the legislation on thermal springs in Greece. *Proceedings of the Sixth International Conference on Environmental Management, Engineering, Planning & Economics*. Thessaloniki, Greece, June 25-30, 2017. ISBN: 978-618-5251-15-2

Chifos, C., Doxastakis, Z., & Romanos, M. C. (2019). Public discourse and government action in a controversial water management project: The damming of the Aposelemis River in Crete, Greece. *Water Policy*, 21(3), 526-545.

Carmon, N., Shamir, U., & Meiron-Pistiner, S. (1997). Water-sensitive urban planning: Protecting groundwater. *Journal of Environmental Planning and Management*, 40(4), 413–434.

Daskalaki, P., & Voudouris, K. (2008). Groundwater quality of porous aquifers in Greece: a synoptic review. *Environmental Geology*, 54, 505-513.

Dercas, N. (2020). Agricultural Water Management in Greece. *Water Resources Management in Balkan Countries*, 421-453.

- Diamantopoulou, P., & Voudouris, K. (2008). Optimization of water resources management using SWOT analysis: the case of Zakynthos Island, Ionian Sea, Greece. *Environmental geology*, 54, 197-211.
- Dimitriou, E., & Tsintza, P. (2015). Hydrogeologic investigations in western Crete by using isotopic analyses and GIS techniques. *Journal of Water Resource and Protection*, 7(12), 923-937.
- Dotsika, E., Poutoukis, D., & Raco, B. (2010). Fluid geochemistry of the Methana Peninsula and Loutraki geothermal area, Greece. *Journal of Geochemical Exploration*, 104(3), 97-104.
- Dragoni, W., & Sukhija, B. S. (2008). Climate Change and Groundwater: A Short Review. Geological Society, London, Special Publications, 288(1), 1–12.
- Duriez, A., Marlin, C., Dotsika, E., Massault, M., Noret, A., & Morel, J. L. (2008). Geochemical evidence of seawater intrusion into a coastal geothermal field of central Greece: example of the Thermopylae system. *Environmental Geology*, 54, 551-564.
- Earman, S., & Dettinger, M. (2011). Potential impacts of climate change on groundwater resources – A global review. *Journal of Hydrology*, 405(3–4), 193–209.
- Ehteshami, M., Salari, M., & Zaresefat, M. (2016). Sustainable development analyses to evaluate groundwater quality and quantity management. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2:133.
- Fallatah, O. A. (2018). Assessing Groundwater Quantity and Quality Variations in Arid Regions Due to Climate Changes and Anthropogenic Factors: Case Study Saudi Arabia. Doctoral Dissertation, University of Rhode Island.
- Fleury, P., Bakalowicz, M., & De Marsily, G. (2007). Submarine springs and coastal karst aquifers: a review. *Journal of hydrology*, 339(1-2), 79-92.
- Fytikas, M., Kavouridis, T., Leonis, C., & Marini, L. (1989). Geochemical exploration of the three most significant geothermal areas of Lesbos Island, Greece. *Geothermics*, 18(3), 465-475.
- Ghikas, L. C., Kruseman, G. P., Leontiadis, L. L., & Wozab, D. H. (1983). Flow pattern of a karst aquifer in the Molai area, Greece. *Groundwater*, 21(4), 445-455.

- Gleeson, T., Alley, W. M., Allen, D. M., Sophocleous, M. A., Zhou, Y., Taniguchi, M., & VanderSteen, J. (2012). Towards sustainable groundwater use: Setting long-term goals, backcasting, and managing adaptively. *Ground Water*, 50(1), 19–26.
- Gounari, C., Skordas, K., Gounaris, A., Kosmidis, D., & Karyoti, A. (2014). Seawater intrusion and nitrate pollution in the coastal aquifer of Almyros-Nea Anchialos basin, Central Greece. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 10, 211-222.
- Green, T. R., Taniguchi, M., Kooi, H., Gurdak, J. J., Allen, D. M., Hiscock, K. M., Treidel, H., & Aureli, A. (2011). Beneath the surface of global change: Impacts of climate change on groundwater. *Journal of Hydrology*, 405(3–4), 532–560.
- Hasan, I., Reza, S., Siddique, A.B. et al. Assessment of groundwater vulnerability for seawater intrusion using DRASTIC model in coastal area at Patuakhali District, Bangladesh. *Environ Sci Pollut Res* 30, 109021–109040 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29988-3>
- Jiménez Cisneros, B. E., Oki, T., Arnell, N. W., Benito, G., Cogley, J. G., Doll, P., ... & Mwakalila, S. S. (2014). Freshwater resources.
- Kallioras, A., & Marinos, P. (2015). Water resources assessment and management of karst aquifer systems in Greece. *Environmental Earth Sciences*, 74, 83-100.
- Kallioras, A., Pliakas, F., Diamantis, I., & Kallergis, G. (2010). SWOT analysis in groundwater resources management of coastal aquifers: A case study from Greece. *Water International*, 35(4), 425-441.
- Kanellopoulos, C., Vougioukalakis, G., Mavrogonatos, C., Megremi, I., & Iliopoulos, I. (2019). Mineralogical, Petrological and Geochemical Study of the Agios Ioannis Volcanic Rocks, Kamena Vourla Area, Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 55, 274-289.
- Karakatsanis, D., Patsialis, T., Kalaitzidou, K., Kougias, I., Ntona, M. M., Theodossiou, N., & Kazakis, N. (2023). Optimization of Dam Operation and Interaction with Groundwater: An Overview Focusing on Greece. *Water*, 15(21), 3852.

- Kazakis, N., Chalikakis, K., Mazzilli, N., Ollivier, C., Manakos, A., & Voudouris, K. (2018). Management and research strategies of karst aquifers in Greece: Literature overview and exemplification based on hydrodynamic modelling and vulnerability assessment of a strategic karst aquifer. *Science of the Total Environment*, 643, 592-609.
- Kirlas, M. C., Karpouzou, D. K., Georgiou, P. E., & Katsifarakis, K. L. (2022). A comparative study of groundwater vulnerability methods in a porous aquifer in Greece. *Applied Water Science*, 12(6), 123.
- Kløve, B., Ala-aho, P., Bertrand, G., Boukalova, Z., Ertürk, A., Goldscheider, N., ... & Pulido-Velazquez, M. (2014). Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. *Journal of Hydrology*, 518, 250–266.
- Kokinou, E., Zacharioudaki, D. E., Kokolakis, S., Kotti, M., Chatzidavid, D., Karagiannidou, M., ... & Kontaxakis, E. (2023). Spatiotemporal environmental monitoring of the karst-related Almyros Wetland (Heraklion, Crete, Greece, Eastern Mediterranean). *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(8), 955.
- Kopsiaftis, G., Mantoglou, A., & Giannouloupoulos, P. (2009). Variable density coastal aquifer models with application to an aquifer on Thira Island. *Desalination*, 237(1-3), 65-80.
- Kopsiaftis, G., Tigkas, D., Christelis, V., & Vangelis, H. (2017). Assessment of drought impacts on semi-arid coastal aquifers of the Mediterranean. *Journal of Arid Environments*, 137, 7-15.
- Koutsomichou, I., Poulos, S., Evelpidou, N., Anagnostou, C., Ghionis, G., & Vassilopoulos, A. (2009). The role of beachrock formations in the evolution of embayed coastal zones of Attica (Greece) in relation to sea level rise. The case of Kalyvia beach zone. *Geografia física e dinamica quaternaria*, 32(1), 49-56.
- Kresic, N. (2010). Types and classifications of springs. In *Groundwater hydrology of springs* (pp. 31-85). Butterworth-Heinemann.
- Lambrakis, N., & Kallergis, G. (2005). Contribution to the study of Greek thermal springs: hydrogeological and hydrochemical characteristics and origin of thermal waters. *Hydrogeology Journal*, 13, 506-521.

Lambrakis, N., Katsanou, K., & Siavalas, G. (2014). Geothermal fields and thermal waters of Greece: an overview. *Geothermal Systems and Energy Resources*, 63-84.

Lambrakis, N. J., & Stamatis, G. N. (2008). Contribution to the study of thermal waters in Greece: chemical patterns and origin of thermal water in the thermal springs of Lesbos. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(2), 171-180.

Lappas, I., Sabatakakis, P., Stefouli, M. (2011). The hydrodynamic behaviour of the coastal karst aquifer system of Zarakas - Parnon (Southeastern Peloponissos). In: Lambrakis, N., Stournaras, G., Katsanou, K. (eds) *Advances in the Research of Aquatic Environment. Environmental Earth Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Lepuri, S., Loukas, A., & Lyra, A. (2023). Seawater Intrusion Vulnerability Assessment Using the GALDIT and the Modified GALDIT–AHP Methods: Application in the Coastal Almyros Aquifer, Thessaly, Greece. *Environmental Sciences Proceedings*, 25(1), 15.

Li Vigni, L., Daskalopoulou, K., Calabrese, S., Brusca, L., Bellomo, S., Cardellini, C., ... & D'Alessandro, W. (2023). Hellenic karst waters: geogenic and anthropogenic processes affecting their geochemistry and quality. *Scientific Reports*, 13(1), 11191.

Lyra, A., Loukas, A., & Sidiropoulos, P. (2021). Impacts of irrigation and nitrate fertilization scenarios on groundwater resources quantity and quality of the Almyros Basin, Greece. *Water Supply*, 21(6), 2748-2759.

Lyra, A., Loukas, A., Sidiropoulos, P., Voudouris, K., & Mylopoulos, N. (2022). Integrated modeling of agronomic and water resources management scenarios in a degraded coastal watershed (Almyros Basin, Magnesia, Greece). *Water*, 14(7), 1086.

Lyra, A., Loukas, A., Sidiropoulos, P., Tziatzios, G., & Mylopoulos, N. (2021). An integrated modeling system for the evaluation of water resources in coastal agricultural watersheds: application in Almyros Basin, Thessaly, Greece. *Water*, 13(3), 268.

Mace, R. E. (2023). *Groundwater sustainability: Conception, development, and application*. Springer Nature.

Maramathas, A. I., & Gialamas, I. (2011). Climate change impact on the Almiros brackish karst spring at Heraklion Crete Greece. In *Advances in the Research of*

Aquatic Environment: Volume 1 (pp. 83-90). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Matiatos, I., & Alexopoulos, A. (2007, May). Isotopic and chemical investigation of water samples in Argolis Peninsula (Greece). In Proceedings of International Symposium Advances in Isotope Hydrology and Its Role in Sustainable Water Resources Management (IHS-2007) (Vol. 2, pp. 101-9). IAEA Publishing Vienna, Austria.

Matiatos, I., & Alexopoulos, A. (2011). Application of stable isotopes and hydrochemical analysis in groundwater aquifers of Argolis Peninsula (Greece). *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 47(4), 512-529.

Meixner, T., Manning, A. H., Stonestrom, D. A., Allen, D. M., Ajami, H., Blasch, K. W., ... & Walvoord, M. A. (2016). Implications of projected climate change for groundwater recharge in the western United States. *Journal of Hydrology*, 534, 124–138.

Mendrinou, D., Choropanitis, I., Polyzou, O., & Karytsas, C. (2010). Exploring for geothermal resources in Greece. *Geothermics*, 39(1), 124-137.

Mavriou, Z., Kazakis, N., & Pliakas, F. K. (2019). Assessment of groundwater vulnerability in the north aquifer area of Rhodes Island using the GALDIT method and GIS. *Environments*, 6(5), 56.

Meziti, A., Nikouli, E., Hatt, J. K., Konstantinidis, K. T., & Kormas, K. A. (2021). Time series metagenomic sampling of the Thermopyles, Greece, geothermal springs reveals stable microbial communities dominated by novel sulfur-oxidizing chemoautotrophs. *Environmental Microbiology*, 23(7), 3710-3726.

Minissale, A., Duchi, V., Kolios, N., & Totaro, G. (1989). Geochemical characteristics of Greek thermal springs. *Journal of volcanology and geothermal research*, 39(1), 1-16.

Mitropapas, A., Koumantakis, I., Vasileiou, E., Perdikaki, M., & Kallioras, A. (2016). Overexploitation of groundwater resources in the coastal aquifer system of argolis. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 50(2), 865-873.

Myriounis, C., Dimopoulos, G., & Manakos, A. (2011). Hydrogeological conditions of the coastal area of the Hydrological basin Almyros, Prefecture Magnesia, Greece. In *Advances in the Research of Aquatic Environment: Volume 1* (pp. 503-510). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Nisa, F. U., & Umar, R. (2024). Spring water system classifications and their methods of study: An overview of the current status and future perspectives. *Journal of Earth System Science*, 133(1), 10.

Panagopoulos, G., & Lambrakis, N. (2006). The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete). *Journal of hydrology*, 329(3-4), 368-376.

Papachristou, M., Fytikas, M., Andritsos, N., Nikolaidou, E., & Kolios, P. (2016). New thermometric data from shallow aquifers in Santorini island (Greece): Possibilities for geothermal exploitation. In *European Geothermal Congress* (pp. 1-9).

Perdikaki, M., Makropoulos, C., & Kallioras, A. (2022). Participatory groundwater modeling for managed aquifer recharge as a tool for water resources management of a coastal aquifer in Greece. *Hydrogeology Journal*, 30(1), 37-58.

Sabatakakis P, Makris A (1993) Salinization case and rational management capabilities to coastal aquifers of SW and SE Peloponnese. 2nd Greek Hydrogeological Congress, Patras.

Sidiropoulos, P., Loukas, A., & Georgiadou, I. (2016). Response of a degraded coastal aquifer to water resources management scenarios: the case of Almyros aquifer, magnesia, central Greece. *European Water*, 55, 67-77.

Sofios, S., Arabatzis, G., & Baltas, E. (2008). Policy for management of water resources in Greece. *The Environmentalist*, 28, 185-194.

Stamatakis, M. G., Tziritis, E. P., & Evelpidou, N. (2009). The geochemistry of boron-rich groundwater of the Karlovassi Basin, Samos Island, Greece. *Central European Journal of Geosciences*, 1, 207-218.

Stamatis, G., Parpodis, K., Filintas, A., & Zagana, E. (2011). Groundwater quality, nitrate pollution and irrigation environmental management in the Neogene sediments

of an agricultural region in central Thessaly (Greece). *Environmental Earth Sciences*, 64, 1081-1105.

Serelis, K. G., Kafkala, I. G., Parpodis, K., & Lazaris, S. (2010). Anthropogenic and geogenic contamination due to heavy metals in the vast area of Vari, Attica. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(5), 2390-2397.

Smerdon, B. D. (2017). A synopsis of climate change effects on groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 555, 125–128.

Tardieu, B., & Potié, L. (2014). Freshwater Submarine Springs: Role of a Dam in Submerged Karst—Investigations Measurement and Works in Subterranean Rivers of Cassis—France) from 1964 to 2013. In *Engineering Geology for Society and Territory-Volume 3: River Basins, Reservoir Sedimentation and Water Resources* (pp. 557-562). Cham: Springer International Publishing.

Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., ... & Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. *Nature climate change*, 3(4), 322-329.

Tsakiris, G., Spiliotis, M., Paritsis, S., & Alexakis, D. (2009). Assessing the water potential of karstic saline springs by applying a fuzzy approach: the case of Almyros (Heraklion, Crete). *Desalination*, 237(1-3), 54-64.

Tzanakakis, V. A., Angelakis, A. N., Paranychianakis, N. V., Dialynas, Y. G., & Tchobanoglous, G. (2020). Challenges and opportunities for sustainable management of water resources in the island of Crete, Greece. *Water*, 12(6), 1538.

Tzedopoulos, Y., Kamara, A., Lampada, D., & Ferla, K. (2018). Thermalism in Greece: An ancient cultural habitus in crisis. *International Journal of Professional Business Review: Int. J. Prof. Bus. Rev.*, 3(2), 205-219.

Vangelis, H., Kopsiaftis, G., Tigkas, D., & Christelis, V. (2017). Coastal aquifer response to drought scenarios: The case of Rhodes island. *Eur. Water*, 60, 219-225.

Villholth, K. G., López-Gunn, E., Conti, K., Garrido, A., & Van Der Gun, J. (Eds.). (2017). *Advances in groundwater governance*. CRC Press.

Voudouris, K., & Kazakis, N. (2021). Groundwater quality and groundwater vulnerability assessment. *Environments*, 8(10), 100.

Voudouris, K., Mandrali, P., & Kazakis, N. (2018). Preventing groundwater pollution using vulnerability and risk mapping: The case of the Florina Basin, NW Greece. *Geosciences*, 8(4), 129.

Xanke, J., Goldscheider, N., Bakalowicz, M., Barberá, J. A., Broda, S., Chen, Z., ... & Stevanović, Z. (2024). Carbonate rocks and karst water resources in the Mediterranean region. *Hydrogeology Journal*, 32(5), 1397-1418.

Xynogala, L. (2021). Learning from Loutraki: Thermalism, hydrochemistry and the architectures of collective wellness. In *Architecture and Collective Life* (pp. 182-194). Routledge.

Zagana, E., Papailiopoulos, M., Mylonas, A., Giannakea, A. M., & Pouliaris, C. (2024). Cross Comparison of GALDIT Method Application in Three Coastal Aquifers in Greece. *Water*, 16(21), 3093.

Zaimes, G. N., & Emmanouloudis, D. (2012). Sustainable Management of the Freshwater Resources of Greece. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 5(1).

Zhou, Y., & Li, W. (2011). A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience frontiers*, 2(2), 205-214.

Zotalis, K., Dialynas, E. G., Mamassis, N., & Angelakis, A. N. (2014). Desalination technologies: Hellenic experience. *Water*, 6(5), 1134-1150.

Zouzias, D., St. Seymour, K. A. R. E., & Papaioannou, G. (2007). Preliminary thermal and mineral water survey of Nisyros Volcano, Aegean Sea: A study targeted towards sustainable development. *Energy*, 256.

## 11.2 Ελληνική βιβλιογραφία

Αγγελόπουλος, Κ. & Κωνσταντινίδης, Δ. (1988) Το κοίτασμα ψευδαργύρου - αργύρου - μόλυβδου των Μολάων Λακωνίας. Πρακτικά 3ου Συνεδρίου του Δελτίου Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας. Τόμος XX/2, σελ 305-320, Αθήνα.

Γιάνναρου, Χ. (2009) Υδρολογική διερεύνηση της πηγής του Αλμυρού Ηρακλείου στην Κρήτη. Διπλωματική Εργασία. Κεντρική Βιβλιοθήκη Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Γκίκα Ε. (2017). Γεωαρχαιολογικές παρατηρήσεις και μεταβολές στάθμης της θάλασσας στη Νότια Πελοπόννησο. Μεταπτυχιακή διατριβή. Βιβλιοθήκη Σχολής Θετικών Επιστημών. Εθνικό Και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Θεοδοσίου, Ν. (1994). Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης και διαχείρισης υπόγειων υδροφορέων: εφαρμογή στον υδροφορέα Κοκκινοχωρίων Κύπρου (Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ)).

Λατινόπουλος, Δ. Π. (2006). Εφαρμογή πολυκριτηριακής ανάλυσης για την οικονομική θεώρηση του νερού στη γεωργία, στο πλαίσιο της αειφορικής διαχείρισης των υδατικών πόρων (Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης).

Μαρκοζάννης Σ. (2013). Σύστημα αφαλάτωσης νερού στη Σαντορίνη. (Πτυχιακή διατριβή, Τεχνολογικό Ίδρυμα Κρήτης)

Μπαμπάτσος Α. (2021) Θερμομεταλλικές πηγές Νομού Ξάνθης. Σημερινό καθεστώς-αξιοποίηση. (Μεταπτυχιακή διατριβή, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης).

Παρπόδης, Κ. (2021). Περιβαλλοντική επιβάρυνση των υπόγειων νερών και εδαφών από φυσικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες στη λεκάνη των Φαρσάλων Θεσσαλίας. (Διδακτορική διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών).

Στράντζαλης, Κ. Ν. (2008). Προσδιορισμός υδάτινου ισοζυγίου υπόγειου παράκτιου υδροφορέα της Ν. Θήρας υπο την επίδραση έντονων κλιματικών αλλαγών (Προπτυχιακή διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών).

Ταβιτιάν, Κ. (1991). Οι υδρογεωλογικές συνθήκες των Καρστικών και νεογενών συστημάτων της λεκάνης Μολάων (Λακωνία). (Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Πατρών)

Τσίγκος, Ι. (2023). Αποτίμηση ενεργειακού κόστους αρδευτικών αναγκών και διαχείριση εμπλουτισμού υδροφορέων (Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο)