



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Χημικών Μηχανικών και  
Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Κατεύθυνση:** Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Επίδραση των ρηγμάτων στην υπόγεια ροή του υδροφορέα της περιοχής  
αγιάς χανίων με χρήση του μοντέλου υπογείων υδάτων PTC -επίδραση  
κλιματικής αλλαγής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΑΥΓΕΛΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

ΧΑΝΙΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ, 2024



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Χημικών Μηχανικών και  
Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Κατεύθυνση:** Μηχανικών Περιβάλλοντος

**Επίδραση των ρηγμάτων στην υπόγεια ροή του υδροφορέα της περιοχής  
αγίας χανίων με χρήση του μοντέλου υπογείων υδάτων PTC -επίδραση  
κλιματικής αλλαγής**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΑΥΓΕΛΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Τριμελής Επιτροπή:

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Καθηγητής Παρανυχιανάκης Νικόλαος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής αποτελούν την πλέον βιώσιμη προσέγγιση για την παροχή κρίσιμων δεδομένων σχετικά με αποφάσεις διαχείρισης των υπόγειων υδάτων. Είναι απαραίτητα για την ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων, ενώ συμβάλλουν στην βιώσιμη εκμετάλλευση και προστασία των υπόγειων υδάτων, προσαρμοσμένη στις σύγχρονες ανάγκες και προκλήσεις.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της επίδρασης των γεωλογικών ρηγμάτων στον υπόγειο υδροφορέα της Αγυιάς Χανίων σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της κλιματικής κρίσης για την περίοδο 2017-2021. Για την διερεύνηση αυτή χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Princeton Transport Code (PTC) που αποτελεί ένα εργαλείο τρισδιάστατης προσομοίωσης της κίνησης των υπόγειων υδάτων και της μεταφοράς ρύπων σε γεωλογικά στρώματα. Βασίζεται σε μια συνδυαστική προσέγγιση των αριθμητικών μεθόδων, πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.

Η περιοχή της Αγυιάς αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους υδροτόπους της Κρήτης, με τον υπόγειο υδροφορέα της να αντιμετωπίζει σοβαρές προκλήσεις. Η αυξημένη ζήτηση νερού, τόσο για τουριστικές δραστηριότητες όσο και για άρδευση, έχει οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση του αριθμού των γεωτρήσεων, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτων. Στο πρώτο κομμάτι της εργασίας παρουσιάζονται θεμελιώδη στοιχεία της υπόγειας υδραυλικής, το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, καθώς και τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την διερεύνηση των επιπτώσεων της, δηλαδή, τα κλιματικά μοντέλα. Κατόπιν γίνεται μια ανάλυση του μοντέλου PTC, καθώς και της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για την δημιουργία του μοντέλου. Για το στήσιμο του μοντέλου λήφθηκαν υπόψιν όλες οι γεωτρήσεις που υπάρχουν στην περιοχή, ενώ η γνώση των γεωλογικών δομών ήταν απαραίτητη. Δημιουργήθηκε ένας ψηφιακός χάρτης για την περιοχή της Αγυιάς, συνδυάζοντας τα ίχνη των ρηγμάτων από την ανάλυση διάφορων γεωλογικών χαρτών. Ακόμα, εισήχθησαν στο μοντέλο τα δεδομένα της μηνιαίας βροχόπτωσης, για κάθε σενάριο. Στην προσομοίωση του μοντέλου που ακολούθησε εξετάστηκε η επίδραση των ρηγμάτων και της κλιματικής κρίσης στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων που δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον excel.

## **ABSTRACT**

Simulation models for groundwater flow are the most sustainable approach to provide important data for groundwater management decisions. They are essential for the rational management of water resources and contribute to sustainable use and protection of groundwater tailored to today's needs and challenges.

The aim of this work was to investigate the impact of geological faults on the aquifer of Agia Chania in relation to the effects of the climate crisis in the period 2017–2021. The Princeton Transport Code (PTC) software, a tool for three-dimensional simulation of groundwater flow and contaminant transport in geological strata, was used for this study. It is based on a combined approach with numerical methods, in particular finite elements and finite differences.

The Agia region is one of the most important wetlands in Crete and its aquifer is facing major challenges. The increasing demand for water for both tourism and irrigation has led to a rapid increase in the number of wells, resulting in a deterioration of water quality. The first part of the paper presents basic aspects of groundwater hydraulics, the phenomenon of climate change and the tools used to study its effects, namely climate models. This is followed by an analysis of the PTC model and the process that led to its development. All existing wells in the area were taken into account when creating the model, and knowledge of the geological structures was essential. A digital map of the Agia area was created, integrating fault traces from the analysis of different geological maps. In addition, monthly precipitation data was entered into the model for each scenario. After the model runs, one node was selected to study the impact of the faults on the hydraulic head and six nodes were analyzed to assess the impact of the climate crisis on the aquifer water table. The results are presented in the form of graphs created in the Excel environment.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Ολοκληρώνοντας την διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω βαθύτατα τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Καρατζά Γεώργιο για τον πολύτιμο χρόνο και την υποστήριξη που μου προσέφερε. Το επιστημονικό του υπόβαθρο και το αμέριστο ενδιαφέρον του συνέβαλαν όχι μόνο στην επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας μου, αλλά και στην απόκτηση σημαντικών γνώσεων.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Νικόλαο Νικολαΐδη και τον κ. Νικόλαο Παρανυχιανάκη για την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή για την αξιολόγηση της διπλωματικής εργασίας μου.

# Πίνακας Περιεχομένων

<b>1: Εισαγωγή στην υπόγεια υδραυλική και στην κλιματική αλλαγή .....</b>	<b>13</b>
1.1 Εισαγωγή.....	13
1.2 Ο υδρολογικός κύκλος .....	14
1.2.1 Τα βασικά στοιχεία του υδρολογικού κύκλου .....	15
1.2.2 Το υδατικό ισοζύγιο .....	17
1.3 Κατηγοριοποίηση των υπογείων υδάτων .....	18
1.4 Υδροφορείς .....	19
1.4.1 Πετροφυσικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων.....	21
1.5 Κλιματική αλλαγή.....	24
1.5.1 Οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στα υδάτινα οικοσυστήματα.....	25
1.5.2 Οι μελλοντικές προβλέψεις για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους.....	27
1.5.3 Κλιματικά μοντέλα.....	29
1.5.4 Κλιματικά σενάρια.....	30
<b>2: Μοντελοποίηση ροής υπογείων υδάτων .....</b>	<b>33</b>
2.1 Εισαγωγή στην μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων .....	33
2.2 Μαθηματικές θεωρήσεις στην μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων.....	34
2.2.1 Θεώρηση υδροφορέα.....	34
2.2.2 Θεώρηση συστήματος ροής.....	35
2.2.3 Παραγωγή της εξίσωσης υπόγειας ροής.....	36
2.3 Κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης υπόγειας ροής.....	39
2.3.1 Φυσικά και αριθμητικά μοντέλα.....	39
2.3.2 Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων.....	40
2.3.3 Μοντέλα πεπερασμένων διαφορών.....	41
2.3.4 Ευρέως διαδεδομένα μοντέλα ροής υπογείων υδάτων και μεταφοράς ρύπων.....	42
2.4 Το μοντέλο Princeton Transport Code (PTC) .....	43
2.4.1 Εισαγωγή στην χρήση του μοντέλου PTC και ιστορική αναδρομή.....	43
2.4.2 Βασικές εξισώσεις του μοντέλου .....	44
2.4.3 Ο αλγόριθμος επίλυσης του μοντέλου PTC.....	45
2.5 Τρισδιάστατη Ροή Υπόγειας Ροής.....	46
2.5.1 Η βασική εξίσωση.....	46
2.5.2 Οριακές συνθήκες.....	46

2.5.2.1 Καθορισμένο υδραυλικό ύψος (συνθήκες Dirichlet).....	47
2.5.2.2 Καθορισμένη ροή (συνθήκες Neumann).....	47
2.5.2.3 Τρίτου Τύπου (συνθήκες Cauchy).....	48
2.6 Μεθοδολογία κατασκευής μοντέλων υπόγειας ροής.....	49
<b>3: Περιοχή μελέτης .....</b>	<b>52</b>
3.1 Οριοθέτηση της περιοχής μελέτης .....	52
3.2 Περιγραφή της περιοχής μελέτης .....	54
3.2.1 Ρύπανση και χρήση γης.....	55
3.2.2 Φυσικό περιβάλλον .....	58
3.2.2.1 Χλωρίδα.....	58
3.2.2.2 Πανίδα.....	60
3.3 Κλιματολογικά στοιχεία.....	61
3.3.1 Θερμοκρασία.....	62
3.3.2 Άνεμοι.....	63
3.3.3 Ηλιοφάνεια.....	64
3.3.4 Υγρασία και Εξάτμιση.....	64
3.3.5 Βροχόπτωση.....	65
3.4 Γεωλογία της περιοχής.....	67
3.4.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής.....	67
3.4.2 Ρήγματα.....	69
3.4.3 Κατανομή των υδρολιθικών σχηματισμών της περιοχής του Κερίτη.....	70
<b>4: Αποτελέσματα και συζήτηση .....</b>	<b>72</b>
<b>5: Συμπεράσματα.....</b>	<b>80</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>82</b>



## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.1.</b> Δορυφορική εικόνα της Γης (Πηγή: Graham et al., 2010).....	13
<b>Σχήμα 1.2.</b> Ο υδρολογικός κύκλος (Πηγή: European Space Agency).....	15
<b>Σχήμα 1.3.</b> Η ακόρεστη ζώνη, ο υδροφόρος ορίζοντας, η ζώνη τριχοειδών φαινομένων και η κορεσμένη ζώνη (Πηγή: Alley et al., 1999).....	19
<b>Σχήμα 1.4.</b> Αναπαράσταση ενός τυπικού ελευθέρου και περιορισμένου υδροφορέα και της κίνησης του υπόγειου νερού (Πηγή: Adebayo and Abraham, 2018).....	20
<b>Σχήμα 1.5.</b> Απεικόνιση ενός ρηχού υδροφορέα (Πηγή: Mishra, Jiwaji University).....	21
<b>Σχήμα 1.6.</b> Διάγραμμα πρωτογενών και δευτερογενών πόρων (Πηγή: Maliva, 2006).....	22
<b>Σχήμα 1.7.</b> Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του νερού και άλλων σημαντικών κοινωνικοοικονομικών τομέων που επηρεάζονται από τη μεταβλητότητα του κλίματος (Πηγή: United Nations, 2020)....	25
<b>Σχήμα 1.8.</b> Η αύξηση των επιπέδων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα ( $CO_2$ , $CH_4$ , $N_2O$ ) (Πηγή: United Nations, 2020).....	26
<b>Σχήμα 1.9.</b> Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας (Πηγή: Graham et al., 2010).....	26
<b>Σχήμα 1.10.</b> Η εξέλιξη της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας και της κατανάλωσης πετρελαίου για τα διαφορετικά RCPs (Πηγή: Van Vuuren et al., 2011).....	31
<b>Σχήμα 1.11.</b> Οι τάσεις των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με τα RCPs (Πηγή: Van Vuuren et al., 2011).....	31
<b>Σχήμα 1.12.</b> Οι εκπομπές των $SO_2$ και $NO_x$ για τα διαφορετικά RCPs (Πηγή: Van Vuuren et al., 2011).....	31
<b>Σχήμα 2.1.</b> Μοναδιαίος όγκος πορώδους υλικού ( $\Delta x \Delta y \Delta z$ ) που αναπαριστά τις συνιστώσες της ροής κατά μήκος του άξονα $y$ (Πηγή: Anderson and Woessner, 2002).....	36
<b>Σχήμα 2.2.</b> Απεικόνιση καθολικών και τοπικών συστημάτων προσανατολισμού σε δυο διαστάσεις. (α) Το καθολικό σύστημα προσανατολισμού $x-z$ είναι ευθυγραμμισμένο με τις κύριες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας. (b) Τοπικά συστήματα συντεταγμένων $x'-z'$ επίσης ευθυγραμμισμένα με τις κύριες συνιστώσες του $K$ (Πηγή: Anderson and Woessner, 2002).....	38
<b>Σχήμα 2.3.</b> Διάγραμμα ροής μοντελοποίησης υπογείων υδάτων. (Πηγή: Sanford, 2013).....	40
<b>Σχήμα 2.4.</b> Αναπαράσταση των υδραυλικών υψών με τις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων. (α) Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων τα στοιχεία είναι τριγωνικά και τα υδραυτικά ύψη ορίζονται στους κόμβους του κάθε τριγωνικού στοιχείου (b) Στις πεπερασμένες διαφορές το υδραυτικό ύψος καθορίζεται μόνο σε συγκεκριμένους κόμβους του πλέγματος. (Πηγή: Anderson and Woessner, 2002).....	41

<b>Σχήμα 2.5.</b> Εφαρμογή του μοντέλου MODFLOW στο μοντέλο LMB (Lake Michigan Basin). Παράδειγμα ημιδομημένου διαχωρισμού στρωμάτων: Διαχωρισμός με μειωμένη ανάλυση σε βάθος αλλά με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων εντός κάθε στρώματος. Η επιφανειακή στρώση ενσωματώνει το δίκτυο επιφανειακών υδάτων, ενώ οι πυθμένες των στρωμάτων παρουσιάζονται σχηματικά ως επίπεδοι αλλά στην πραγματικότητα είναι ανώμαλοι. (Πηγή: Feinstein et al., 2017).....	43
<b>Σχήμα 2.6.</b> Αναπαράσταση οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων τοποθετημένων σε στρώσεις, συνθέτοντας τον τρισδιάστατο διαχωρισμό. (Πηγή: Babu et al., 1997).....	45
<b>Σχήμα 2.7.</b> Κατανομή της ροής $q$ σε κόμβους κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους $L$ . Στα γραμμικά στοιχεία η συνεισφορά κάθε κόμβου είναι ίσης βαρύτητας. (Πηγή: Babu et al.).....	48
<b>Σχήμα 2.8.</b> Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας των δύο στρωμάτων και των ρηγμάτων του υπό μελέτη προβλήματος.....	49
<b>Σχήμα 2.9.</b> Οι οριακές συνθήκες τύπου δύο στο πρώτο στρώμα και οι αντλήσεις ενός πηγαδιού.....	50
<b>Σχήμα 2.10.</b> Η επιλογή του τριγωνικού πλέγματος και των δυο στρωμάτων στο υπό μελέτη πρόβλημα.....	51
<b>Σχήμα 2.11.</b> Οι χρονολογικές περιόδους (stresses) του PTC.....	51
<b>Σχήμα 3.1.</b> Το ποσοστό των ενδημικών ειδών που βρίσκονται σε ορεινές περιοχές, σε σχέση με το συνολικό αριθμό των ενδημικών ειδών της Κρήτης (Πηγή: Legakis and Kyriotakis, 1994).....	58
<b>Σχήμα 3.2.</b> Η υδρόφιλη βλάστηση ανά ζώνες στην λίμνη της Αγυιάς. (Πηγή: Gradstein and Smittenberg, 1977).....	60
<b>Σχήμα 3.3.</b> Οι θερμοκρασίες για τα έτη 2012-2019 από τον μετεωρολογικό σταθμό του Αλικιανού. (Πηγή: Nikolaidis et al., 2023).....	62
<b>Σχήμα 3.4.</b> Η γραμμική και αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ των τιμών του υψομέτρου και της θερμοκρασίας από μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Pavlaki and Lionis, 2013).....	63
<b>Σχήμα 3.5.</b> Η μέση μηνιαία ένταση και η επικρατούσα διεύθυνση των ανέμων που πνέουν στην περιοχή της Σούδας Χανίων κατά την χρονική περίοδο 1958-2010 (Πηγή: Hellenic National Meteorological Service).....	63
<b>Σχήμα 3.6.</b> Οι ετήσιες συχνότητες των ανέμων που πνέουν στην περιοχή της Σούδας Χανίων κατά την χρονική περίοδο 1958-2010 (Πηγή: Hellenic National Meteorological Service).....	64
<b>Σχήμα 3.7.</b> Κλιματικά δεδομένα της υγρασίας στην περιοχή της Σούδας Χανίων κατά την χρονική περίοδο 1958-2010 (Πηγή: Hellenic National Meteorological Service).....	65
<b>Σχήμα 3.8.</b> Μηνιαίες βροχοπτώσεις κατά την χρονική περίοδο 1961-2019 από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Nikolaidis et al., 2023).....	66
<b>Σχήμα 3.9.</b> Η γραμμική και ανάλογη σχέση μεταξύ των τιμών του υψομέτρου και του μέσου ετήσιου ύψους βροχής στους μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Pavlaki and Lionis, 2013).....	66

<b>Σχήμα 4.1.</b> Οι μετρήσεις του πεδίου, τα μοντέλο με και χωρίς τα ρήγματα και τα υδραυλικά ύψη στον κόμβο 608.....	72
<b>Σχήμα 4.2.</b> Τα υδραυλικά ύψη σε συνάρτηση με τους υδρολογικούς μήνες με και χωρίς την επίδραση των ρηγμάτων στον κόμβο 608.....	73
<b>Σχήμα 4.3.</b> Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 608.....	75
<b>Σχήμα 4.4.</b> Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 630.....	75
<b>Σχήμα 4.5.</b> Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 767.....	76
<b>Σχήμα 4.6.</b> Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 794.....	77
<b>Σχήμα 4.7.</b> Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 937.....	77
<b>Σχήμα 4.8.</b> Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 637.....	78

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 1.1.</b> Τα τέσσερα σενάρια και οι συγκεντρώσεις τους το 2100 (Πηγή: Jubb et al.,2013).....	30
<b>Πίνακας 3.1.</b> Βασικές χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη (Πηγή: Karatzas and Nikolaidis,2010).....	56

## Κατάλογος Χαρτών

<b>Χάρτης 1.1.</b> Η ετήσια απορροή ( $\text{mm/year}$ ) (Πηγή: Oki and Kanae,2006).....	16
<b>Χάρτης 1.2.</b> Η ετήσια εκφόρτιση των ποταμών ( $10^6\text{m}^3/\text{year}$ ) (Πηγή: Oki and Kanae,2006).....	16
<b>Χάρτης 1.3.</b> Παγκόσμιος χάρτης βροχόπτωσης κατά την χρονική περίοδο του Μαρτίου 2024 (Πηγή: NASA).....	17
<b>Χάρτης 1.4.</b> Η αύξηση της έντασης της βροχόπτωσης μέχρι το τέλος του 21 <sup>ου</sup> αιώνα (Πηγή: Graham et al,2010).....	28
<b>Χάρτης 1.5.</b> Οι μεγάλης κλίμακας μεταβολές στην ετήσια απορροή για την περίοδο 2090–2099, σε σύγκριση με την περίοδο 1980–1999 με την βοήθεια 12 κλιματικών μοντέλων. Το λευκό χρώμα	

αντιπροσωπεύει τις περιοχές που τα μοντέλα συμφωνούν με τη φύση της αλλαγής (60%), ενώ οι περιοχές με διαγράμμιση είναι αυτές, όπου περισσότερο από το 90% των μοντέλων συμφωνούν με τη φύση της αλλαγής. (Πηγή: Bates et al.,2008).....	28
<b>Χάρτης 1.6.</b> Οι προβλέψεις των μοντέλων για την περίοδο 2081–2100 σε σχέση με την περίοδο 1986–2005: α) Η μεταβολή στη μέση ετήσια θερμοκρασία της επιφάνειας, β) Η μεταβολή στην μέση ετήσια βροχόπτωση. (Πηγή: Porinchu,2017).....	32
<b>Χάρτης 1.7.</b> Η αλλαγή της ετήσιας απορροής με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2°C σε σχέση με την τρέχουσα κατάσταση, κάτω από το σενάριο RCP8.5. (Πηγή: United Nations,2020).....	32
<b>Χάρτης 2.1.</b> Παγκόσμιος υδρολογικός χάρτης (Πηγή: BGR and UNESCO,2008).....	33
<b>Χάρτης 3.1</b> Ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένη εικόνα της Δυτικής Κρήτης (Πηγή: Alexakis et al.,2008).....	52
<b>Χάρτης 3.2.</b> Απεικόνιση της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Staboulitzidis et al.,2017).....	53
<b>Χάρτης 3.3.</b> Τοποθεσία της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη. (Οι αριθμοί στους κύκλους δείχνουν τα σημεία δειγματοληψίας επιφανειακών υδάτων) (Πηγή: Alexakis et al.,2008).....	54
<b>Χάρτης 3.4.</b> Κάλυψη της γης της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Corine Land Cover).....	57
<b>Χάρτης 3.5.</b> Κάλυψη της γης της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Corine Land Cover).....	57
<b>Χάρτης 3.6.</b> Παγκόσμιος κλιματικός χάρτης σύμφωνα με την ταξινόμηση Köppen-Geiger: Απεικόνιση των περιοχών με μεσογειακό κλίμα (Πηγή: Wikipedia Commons,2011).....	61
<b>Χάρτης 3.7.</b> Οι γεωλογικοί σχηματισμοί των λεκανών απορροής Κερίτη και Θερίσσου (Πηγή: Nikolaidis et al.,2023).....	68
<b>Χάρτης 3.8.</b> Νεογενής, Φυλλιτικοί και Καρστικοί σχηματισμοί εντός των λεκανών απορροής Κερίτη και Θερίσσου (Πηγή: Karatzas et al.,2010).....	68
<b>Χάρτης 3.9.</b> Τα ρήγματα και οι πηγές εκφόρτισης των υπογείων υδάτων στις λεκάνες απορροής Κερίτη και Θερίσσου (Πηγή: Karatzas et al.,2010).....	69
<b>Χάρτης 3.10.</b> Υδρολιθολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Πηγή: Karatzas et al.,2010).....	71
<b>Χάρτης 4.1.</b> Οι θέσεις των κόμβων στον γεωλογικό χάρτη.....	74

## 1. Εισαγωγή στην υπόγεια υδραυλική και στην κλιματική αλλαγή

---

### 1.1 Εισαγωγή

---

Ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του πλανήτη μας είναι το νερό, το οποίο καλύπτει περίπου το 75% της επιφάνειας της Γης. Η παρουσία του καθιστά τη Γη μοναδική σε σχέση με τους άλλους πλανήτες του ηλιακού μας συστήματος. Συνολικά, η ποσότητα του νερού στον πλανήτη μας ανέρχεται σε περίπου 1,38 δισεκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα, με το 96,4% αυτού να βρίσκεται στους ωκεανούς. Όσον αφορά το υπόλοιπο, περίπου το 1,8% αποθηκεύεται στους πόλους, στους παγετώνες και στο χιόνι, ενώ το 1,7% σε υπόγεια ύδατα, λίμνες, ποτάμια και εδάφη. Μόλις το ένα χιλιοστό του 1% του νερού στη Γη υπάρχει ως υδρατμοί στην ατμόσφαιρα (Graham et al., 2010). Είναι θεμελιώδεις για την ανάπτυξη και την υποστήριξη της ζωής στη Γη, αποτελώντας βασικό στοιχείο των οικοσυστημάτων μας. Όμως, τόσο η κλιματική αλλαγή όσο και οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες επηρεάζουν και μεταβάλλουν τους υδατικούς πόρους, με αποτέλεσμα να δέχονται ισχυρή πίεση. Επομένως, η προστασία των υδατικών πόρων και η αειφόρος διαχείριση τους κρίνεται απαραίτητη και πρέπει να αποτελεί το πρωταρχικό μέλημα των σύγχρονων κοινωνιών.



**Σχήμα 1.1.** Δορυφορική εικόνα της Γης (Πηγή: Graham et al., 2010)

## 1.2 Ο υδρολογικός κύκλος

---

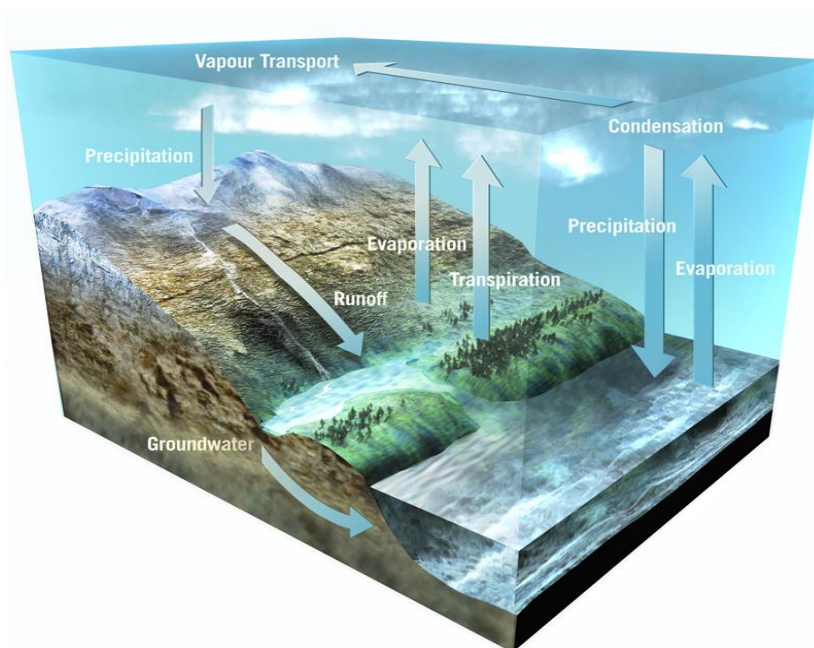
Για την μελέτη των υπογείων υδάτων είναι απαραίτητη η ερμηνεία του υδρολογικού κύκλου, καθώς τα δύο συνδέονται άμεσα μεταξύ τους και είναι αλληλεξαρτώμενα.

Ο υδρολογικός κύκλος είναι μια συνεχής ανταλλαγή νερού μεταξύ της λιθόσφαιρας, της ατμόσφαιρας και της βιόσφαιρας. Χαρακτηρίζεται από την έντονη κυκλοφορία ενός σχεδόν ασήμαντου ποσοστού, περίπου 0,01%, του συνολικού νερού που υπάρχει στη Γη. Ωστόσο, είναι αξιοσημείωτο, πως παρόλο που σχεδόν όλοι οι οργανισμοί στη στεριά χρειάζονται γλυκό νερό για την επιβίωσή τους, έχουν εξελιχθεί και πολλαπλασιαστεί βασιζόμενοι στην χρήση ενός τόσο μικρού ποσοστού διαθέσιμου νερού.

Οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας συμπυκνώνονται και πέφτουν ως βροχή ή χιόνι. Ένα μικρό μέρος αυτής της βροχόπτωσης συγκρατείται από τα φυλλώματα της βλάστησης, ενώ το υπόλοιπο φτάνει στο έδαφος. Μια ποσότητα αυτών των υδάτων ρέει στην επιφάνεια του εδάφους ως επιφανειακό νερό, κατευθυνόμενο προς τον ωκεανό ή εσωτερικές λεκάνες, ενώ στην πορεία του συναντά λίμνες και υγροτόπους.

Ένα άλλο μέρος του νερού διεισδύει στο έδαφος, επαναφορτίζοντας τη ζώνη του εδάφους μεταξύ της επιφάνειας και του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, καθώς και το υπόγειο υδατικό απόθεμα. Το υπόγειο νερό μπορεί να κινηθεί σε μεγαλύτερα βάθη λόγω της βαρύτητας, αλλά οι στρώσεις χαμηλής διαπερατότητας του εδάφους αντιστέκονται στην καθοδική κίνηση του, εκτρέποντας το προς την επιφάνεια, όπου εκφορτίζεται σε ρέματα, λίμνες, λιμνοθάλασσες και υγροτόπους.

Το νερό που διαφεύγει από τις αντιστάσεις των στρωμάτων και κινείται σε μεγαλύτερα βάθη συναντά γεωθερμική θερμότητα. Αυτή η θερμότητα εμποδίζει, επίσης την καθοδική κίνηση, ωθώντας το υπόγειο νερό προς την επιφάνεια. Στην επιφάνεια, το επιφανειακό νερό και το υπόγειο που εκφορτίζεται υπόκεινται σε εξάτμιση λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας και σε διαπνοή από τα φυτά, τα οποία καταναλώνουν νερό για τη φωτοσύνθεση. Αυτή η διαδικασία, που ονομάζεται εξατμισοδιαπνοή, επιστρέφει το νερό στην ατμόσφαιρα, ολοκληρώνοντας τον υδρολογικό κύκλο. (Narasimhan, 2009)

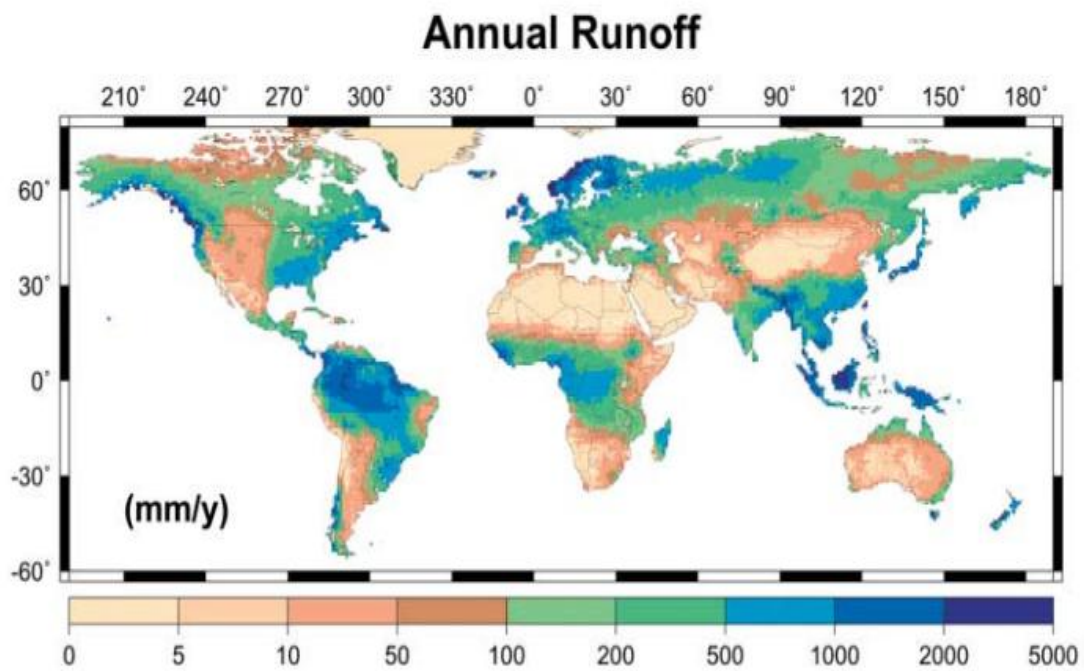


**Σχήμα 1.2.** Ο υδρολογικός κύκλος (Πηγή: European Space Agency)

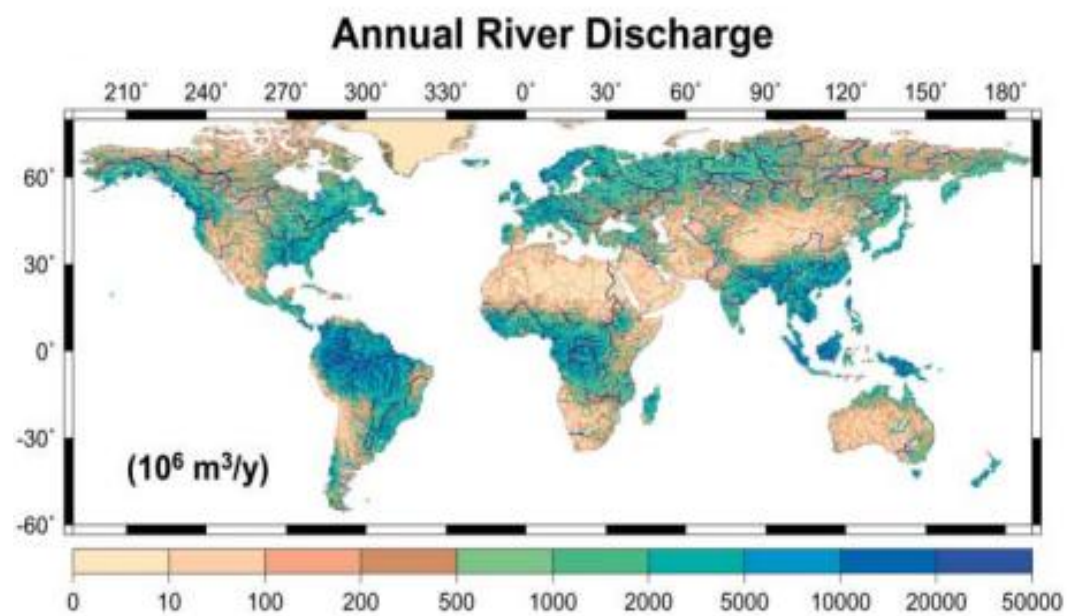
### 1.2.1 Τα βασικά στοιχεία του υδρολογικού κύκλου

Οι ανταλλαγές νερού που εμπλέκονται στα διάφορα στάδια του υδρολογικού κύκλου είναι οι εξής:

- **Κατακρήνιση:** Οι κύριοι τύποι κατακρημνίσεων είναι η βροχή, το χιόνι και το χαλάζι, με την πάχνη, τις σταγόνες από την ομίχλη και τον πάγο να συνεισφέρουν επίσης σημαντικά στην συνολική κατακρήνιση. (Barry,2021)
- **Εξατμισοδιαπνοή:** Παρέχει την υγρασία στην ατμοσφαιρική διάσταση του υδρολογικού κύκλου, με τους ωκεανούς να συνεισφέρουν το 84% της ετήσιας συνολικής ποσότητας, ενώ οι ήπειροι το 16%. Οι μεγαλύτερες ετήσιες απώλειες, που ξεπερνούν τα 200 cm, παρατηρούνται στους υποτροπικούς του δυτικού Βόρειου Ατλαντικού και του Βόρειου Ειρηνικού, με την εξάτμιση πάνω από το ρεύμα του Κόλπου του Μεξικού να είναι ιδιαίτερα έντονη το χειμώνα. Στην ξηρά, η μέγιστη εξατμισοδιαπνοή παρατηρείται κυρίως στις ισημερινές περιοχές λόγω της υψηλής ηλιακής ακτινοβολίας και της ανάπτυξης πλούσιας βλάστησης. (Barry,2021)
- **Απορροή:** Διαχωρίζεται στην επιφανειακή και στην υπόγεια απορροή, ενώ αντιπροσωπεύει την διαδικασία κατά την οποία το νερό αποθηκεύεται σε διάφορους αποδέκτες όπως ποτάμια, λίμνες και ωκεανούς (Karatzas,2003). Ο ρυθμός απορροής εξαρτάται από παράγοντες όπως η βροχόπτωση, η σύσταση, η κλίση του εδάφους και η παρουσία ή όχι φυτοκάλυψης. Το υπόγειο νερό συμβάλλει κατά μέσο όρο περίπου 30% στην συνολική απορροή, αν και αυτή η αναλογία διαφέρει σημαντικά ανάλογα με την γεωγραφική ζώνη. Η μέση απορροή από τις ηπειρωτικές μάζες μπορεί να εκτιμηθεί με δεδομένα βροχόπτωσης και εξάτμισης. Η Ασία, η Αφρική και η Αυστραλία, αντιπροσωπεύουν περίπου το 25% της απορροής των ποταμών. (Barry,2021)

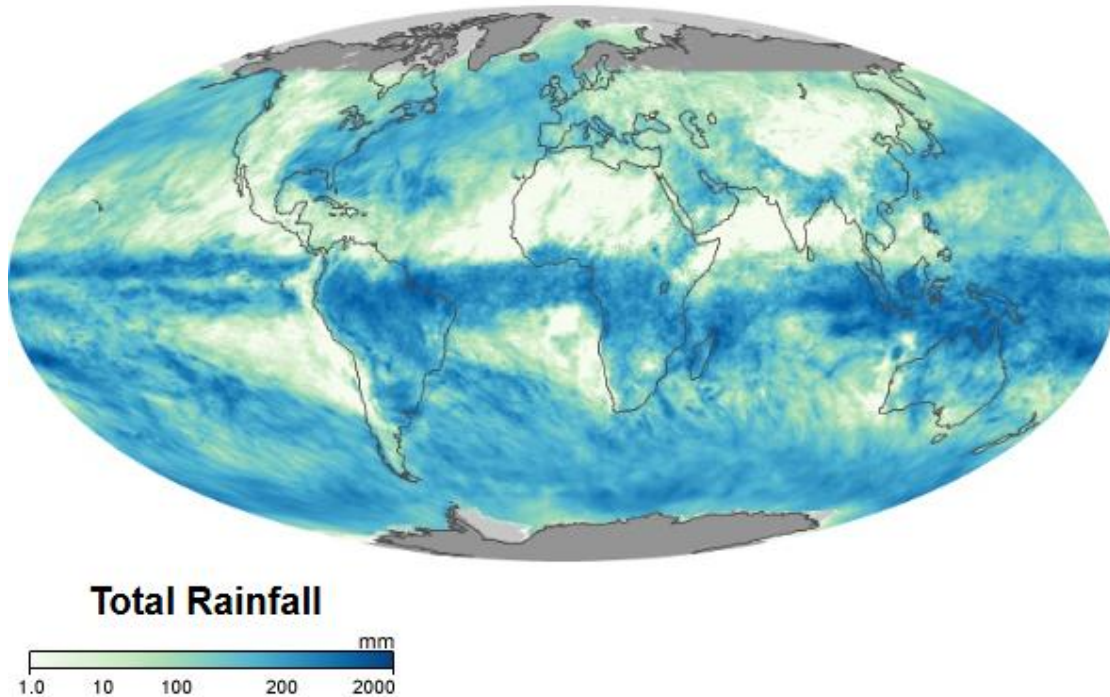


**Χάρτης 1.1.** Η ετήσια απορροή (mm/year) (Πηγή: Oki and Kanae, 2006)



**Χάρτης 1.2.** Η ετήσια εκφόρτιση των ποταμών ( $10^6 \text{ m}^3/\text{year}$ ) (Πηγή: Oki and Kanae, 2006)





**Χάρτης 1.3.** Παγκόσμιος χάρτης βροχόπτωσης κατά την χρονική περίοδο του Μαρτίου 2024 (Πηγή: NASA)

### 1.2.2 Το υδατικό ισοζύγιο

---

Η υδατικό ισοζύγιο που αντιπροσωπεύει τον υδρολογικό κύκλο είναι:

$$P - \Delta R - \Delta G - E - T = \Delta S \quad (1.1)$$

Όπου:

- **P:** Κατακρημνίσματα
- **$\Delta R$ :** Η μεταβολή της επιφανειακής απορροής
- **$\Delta G$ :** Η μεταβολή της υπόγειας απορροής
- **E:** Εξάτμιση
- **T:** Διαπνοή  
(Karatzas, 2003)

### 1.3 Κατηγοριοποίηση των υπογείων υδάτων

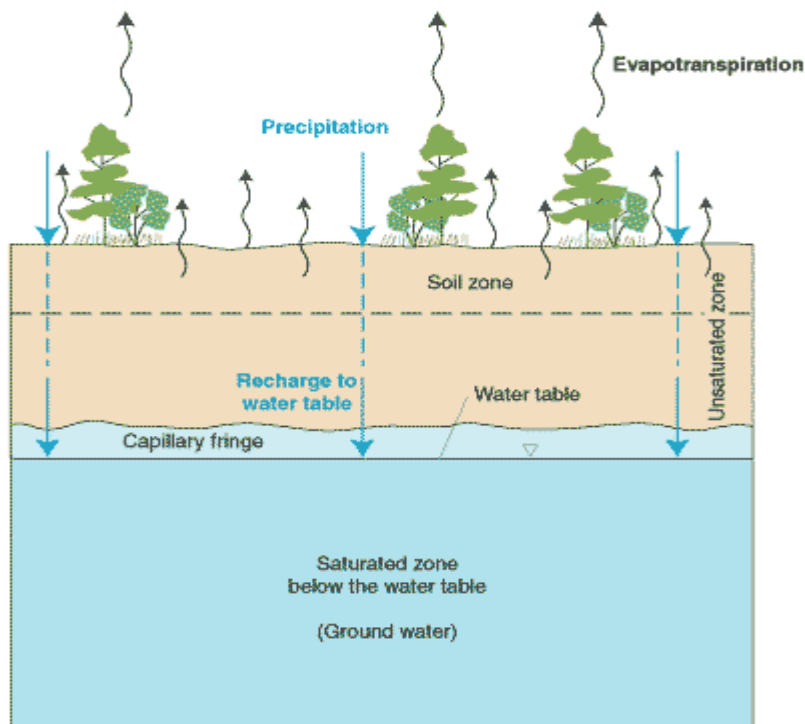
---

Το υπόγειο νερό που διηθείται στο υπέδαφος χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον βαθμό κορεσμού των πόρων του εδάφους ή των γεωλογικών σχηματισμών:

- **Ακόρεστη ζώνη:** Η ακόρεστη ζώνη του φλοιού της Γης παραμένει ένα αίνιγμα τόσο για την επιστημονική κοινότητα όσο και για την τεχνολογική της διαχείριση. Εναλλακτικά ονομάζεται ζώνη βαντόζ (vadose zone) ή μερικώς κορεσμένη ζώνη. Πρόκειται για την περιοχή μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του υδροφόρου ορίζοντα. Στην ζώνη αυτή οι πόροι του εδάφους περιέχουν ταυτόχρονα νερό και αέρα. Αγνοώντας τον παγιδευμένο ή διαλυμένο αέρα, η ακόρεστη ζώνη περιλαμβάνει εκείνα τα μέρη του εδαφικού προφίλ όπου το περιεχόμενο νερού είναι μικρότερο από την πορώδη φύση του εδάφους. Ουσιαστικά, δηλαδή, η πίεση του νερού στο έδαφος είναι αρνητική. (Nielsen et al., 1986)

Περιλαμβάνει, επίσης την τριχοειδή ζώνη η οποία βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα (Nielsen et al., 1986) και την ζώνη του εδαφικού ύδατος που αναφέρεται στην περιοχή του εδάφους που εκτείνεται από την επιφάνεια του, μέχρι το σημείο που φτάνει το ριζικό σύστημα των φυτών. Σε αυτή τη ζώνη, το νερό είναι προσβάσιμο από τα φυτά για την ανάπτυξή τους (Karatzas, 2003).

- **Κορεσμένη ζώνη:** Η κορεσμένη ζώνη αποτελεί το τμήμα του υπεδάφους που βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Στο σημείο του υδροφόρου ορίζοντα η υδροστατική πίεση ισούται με την ατμοσφαιρική (Karatzas, 2003). Σε αυτή την περιοχή, οι πόροι των γεωλογικών υλικών είναι πλήρως γεμάτοι με νερό, υπό πίεση μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική, ενώ το νερό που κινείται μέσα από αυτή τη ζώνη αποτελεί τμήμα του υπόγειου υδροφορέα. Συνιστά την κύρια πηγή άντλησης νερού για γεωτρήσεις και πηγάδια, ενώ διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην αποθήκευση του υπόγειου νερού. (Wang and Manga, 2021)



**Σχήμα 1.3.** Η ακόρεστη ζώνη, ο υδροφόρος ορίζοντας, η ζώνη τριχοειδών φαινομένων και η κορεσμένη ζώνη (Πηγή: Alley et al., 1999)

#### 1.4 Υδροφορείς

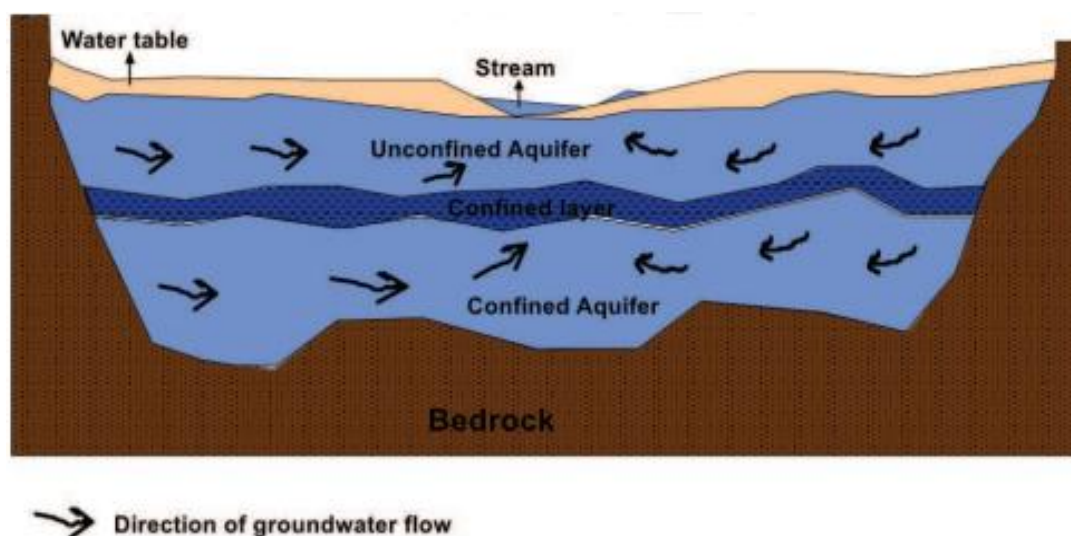
Σύμφωνα με την Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ ο υδροφορέας ορίζεται ως μια γεωλογική στρώση, ομάδα στρωμάτων ή μέρος ενός στρώματος που περιέχει επαρκές κορεσμένο υλικό, διαπερατό από το νερό και ικανό να αποδώσει σημαντικές ποσότητες νερού σε γεωτρήσεις και πηγάδια. Αυτό σημαίνει ότι οι υδροφορείς αποτελούνται από πετρώματα ή στρώματα ιζημάτων που μπορούν να μεταφέρουν νερό σε επαρκείς ποσότητες, αποτελώντας μια κρίσιμη πηγή υπόγειου νερού για άντληση. (Lohman et al., 1972)

Οι υδροφορείς, όμως, δεν πρέπει μόνο να είναι διαπερατοί, αλλά και πορώδεις. Ορισμένοι χαρακτηρίζονται από υψηλό πορώδες και χαμηλή διαπερατότητα, ενώ άλλοι έχουν υψηλό πορώδες και υψηλή παραγωγικότητα. Οι υδροφορείς με υψηλό πορώδες και χαμηλή διαπερατότητα θεωρούνται φτωχοί και περιλαμβάνουν πετρώματα ή γεωλογικούς σχηματισμούς όπως γρανίτες και σχιστόλιθους, ενώ αυτοί με υψηλό πορώδες και υψηλή διαπερατότητα θεωρούνται εξαιρετικοί και περιλαμβάνουν πετρώματα, όπως τα ρηγματωμένα ηφαιστειογενή πετρώματα. (Adebayo and Abraham, 2018)

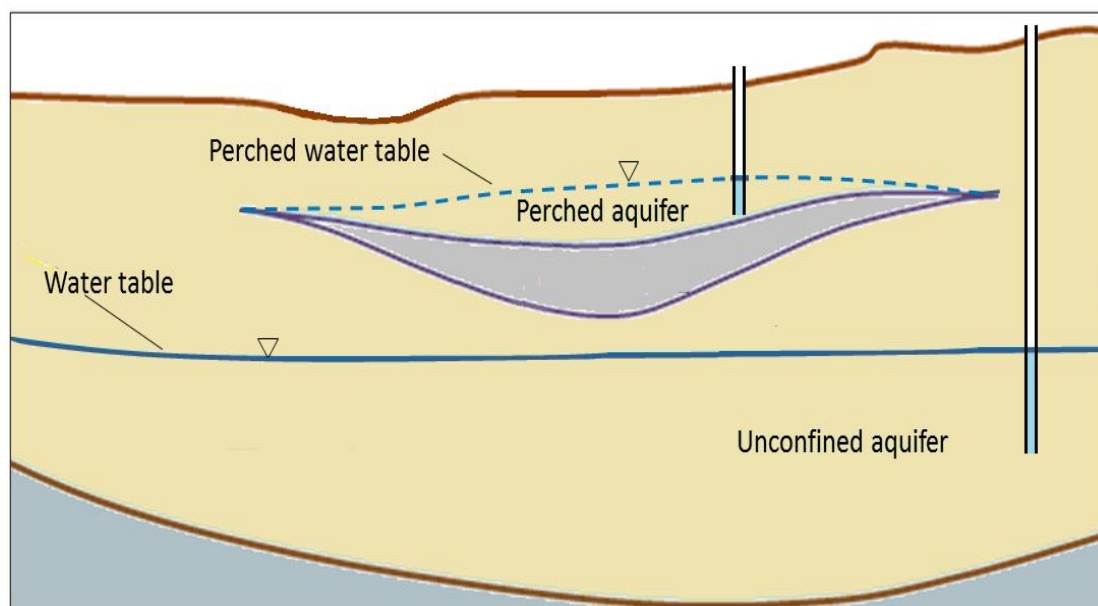
Διαχωρίζονται σε δυο βασικές κατηγορίες:

- **Περιορισμένοι Υδροφορείς:** Ονομάζονται και αρτεσιανοί και πρόκειται για αποθέματα νερού που συσσωρεύονται σε κάποιο διαπερατό πέτρωμα και περικλείονται από δύο αδιαπέρατα στρώματα ή σχηματισμούς πετρωμάτων. Αυτοί οι υδροφορείς καλύπτονται από ένα περιοριστικό στρώμα, συχνά από αργιλώδη υλικά, τα οποία μπορούν να προσφέρουν προστασία από επιφανειακές μολύνσεις. Η παρουσία αυτών των αδιαπέρατων γεωλογικών φραγμάτων δημιουργεί πίεση στο νερό, μεγαλύτερη από αυτήν της ατμόσφαιρας. Επίσης, η ύπαρξη ρωγμών στα πετρώματα μπορεί να συγκρατήσει μεγάλες ποσότητες ύδατος διαλύοντας μέρος του πετρώματος. Το γεγονός αυτό συμβάλλει σημαντικά στις υψηλές αποδόσεις των γεωτρήσεων σε καρστικές περιοχές. Η κίνηση του υπόγειου νερού μπορεί να είναι είτε κάθετη είτε οριζόντια, με τη βαρύτητα και τις γεωλογικές συνθήκες της περιοχής να επηρεάζουν τους ρυθμούς ροής. (Adebayo and Abraham, 2018)
- **Ελεύθεροι Υδροφορείς:** Σε αντίθεση με τους περιορισμένους υδροφορείς, βρίσκονται γενικά πιο κοντά στην επιφάνεια της γης. Παρόλο που συνήθως βρίσκονται πάνω από αδιαπέρατα γεωλογικά στρώματα, δεν περιβάλλονται από κάποιο αδιαπέρατο στρώμα πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Το ανώτερο όριο τους είναι ο υδροφόρος ορίζοντας, με το νερό να είναι πιο επιρρεπές σε μόλυνση από επιφανειακή ρύπανση σε σχέση με τους περιορισμένους. Αυτό οφείλεται στην ευκολία με την οποία τα ρυπαντικά στοιχεία από την επιφάνεια, μπορούν εύκολα να διαπεράσουν το έδαφος και να φτάσουν στο υπόγειο νερό. (Adebayo and Abraham, 2018)

Οι ρηχοί υδροφορείς (perched) αποτελούν μια ειδική κατηγορία ελεύθερων υδροφορέων και σχηματίζονται όταν τα υπόγεια ύδατα διαχωρίζονται από την κύρια πηγή τους, καλυπτόμενα από αδιαπέρατα στρώματα περιορισμένης έκτασης και από ζώνες αερισμού πάνω από το κύριο σώμα των υπόγειων υδάτων. Η ποσότητα του διαθέσιμου νερού σε αυτούς τους υδροφορείς είναι συνήθως μικρή και το νερό παραμένει διαθέσιμο για περιορισμένο χρονικό διάστημα. (Adebayo and Abraham, 2018)



**Σχήμα 1.4.** Αναπαράσταση ενός τυπικού ελεύθερου και περιορισμένου υδροφορέα και της κίνησης του υπόγειου νερού (Πηγή: Adebayo and Abraham, 2018)



**Σχήμα 1.5.** Απεικόνιση ενός ρηχού υδροφορέα (Πηγή: Mishra, Jiwaji Univesity)

#### 1.4.1 Πετροφυσικά και υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων

Οι πετροφυσικές και υδραυλικές ιδιότητες των υδροφορέων είναι χαρακτηριστικά που βοηθούν τόσο στον προσδιορισμό όσο και στην κατηγοριοποίησή τους. Ορισμένες από τις ιδιότητες που λαμβάνονται υπόψη είναι:

- **Πορώδες:** Ορίζεται ως ο ανοικτός χώρος μέσα σε ένα πέτρωμα διαιρεμένος με τον συνολικό όγκο του πετρώματος. Εκφράζεται είτε ως δεκαδικό κλάσμα είτε ως ποσοστό. (Maliva, 2016)  
Μαθηματικά δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$Porosity(n) = \frac{V_p}{V_t} \quad (1.2)$$

Όπου:

- $n$ : Το πορώδες
- $V_p$ : Ο Όγκος των κενών μέσα στο πέτρωμα ή το υλικό [ $L^3$ ]
- $V_t$ : Ο συνολικός όγκος του πετρώματος ή του δείγματος [ $L^3$ ]  
(Adebayo and Abraham, 2018)

Το πορώδες μπορεί να διαχωριστεί σε πρωτογενές και δευτερογενές (Choquette and Pray, 1970). Το πρωτογενές πορώδες αναφέρεται στο αρχικό «υλικό» ή στο μοτίβο των πόρων που υπάρχουν, αμέσως μετά την εναπόθεση των ιζημάτων. Το δευτερογενές πορώδες αναφέρεται στους πόρους που δημιουργούνται μετά την απόθεση των ιζημάτων και τον σχηματισμό των πετρωμάτων, κατά τη διαδικασία της διαγένεσης. (Maliva, 2016)

Το ενεργό πορώδες αποτελείται από πόρους που είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους και χρησιμεύουν ως χώροι μέσω των οποίων ρέει το νερό. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

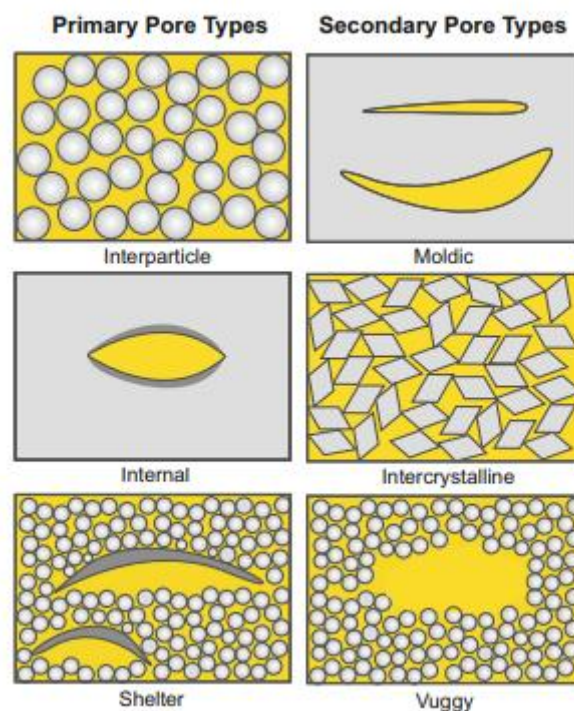
- Αποκλείει απομονωμένους πόρους και πόρους που περιέχουν νερό που έχει απορροφηθεί από ορυκτά αργίλου ή άλλους κόκκους.
- Είναι μικρότερο από το συνολικό πορώδες (Maliva, 2016)

Μαθηματικά περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$n_c = \frac{V_g}{V_t} \quad (1.3)$$

Όπου:

- $n_c$ : Το ενεργό πορώδες
- $V_g$ : Ο Όγκος του νερού που περιέχεται στο εσωτερικό των ενεργών πόρων [ $L^3$ ]
- $V_t$ : Ο συνολικός όγκος του πετρώματος ή του δείγματος [ $L^3$ ] (Karatzas, 2003)



**Σχήμα 1.6.** Διάγραμμα πρωτογενών και δευτερογενών πόρων (Πηγή: Maliva, 2006)

- **Υδραυλική Αγωγιμότητα:** Πρόκειται για την σχετική ευκολία με την οποία ένα υγρό, όπως το υπόγειο νερό, ρέει μέσω ενός μέσου, όπως ένας γεωλογικός σχηματισμός ή ένα πέτρωμα. Η υδραυλική αγωγιμότητα περιγράφει την ιδιότητα του μέσου να μεταφέρει νερό, χωρίς όμως να επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, την πίεση ή τη φύση του υγρού που περνά μέσα από τον γεωλογικό σχηματισμό. Εξαρτάται από διάφορους φυσικούς παράγοντες, όπως την διάταξη, το μέγεθος και την κατανομή των σωματιδίων.

Μαθηματικά δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad (1.4)$$

Όπου:

- $K$ : Η υδραυλική αγωγιμότητα [ $LT^{-1}$ ]
  - $k$ : Η ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου [ $L^2$ ]
  - $\rho$ : Η πυκνότητα [ $ML^{-3}$ ]
  - $g$ : Η επιτάχυνση της βαρύτητας [ $LT^{-2}$ ]
  - $\mu$ : Το δυναμικό ιξώδες [ $ML^{-1}T^{-1}$ ]  
(Adebayo and Abraham, 2018)
- 
- **Μεταβιβασιμότητα:** Ορίζεται ως η ποσότητα του νερού που μπορεί να μεταφερθεί οριζόντια μέσω ενός υδροφορέα, πλήρους κορεσμένου πάχους και υπό υδραυλική κλίση ίση με 1. Εξαρτάται, λοιπόν, από τη διαπερατότητα του υλικού που τον απαρτίζει και το πάχος της κορεσμένης ζώνης του. Αυτές οι παράμετροι είναι κρίσιμες για την αξιολόγηση της ικανότητας του υδροφορέα να μεταφέρει νερό.

Μαθηματικά, η εκφράζεται με τον παρακάτω τύπο:

$$T = K \cdot b \quad (1.5)$$

Όπου:

- $T$ : Η μεταβιβασιμότητα [ $L^2T^{-1}$ ]
  - $K$ : Η υδραυλική αγωγιμότητα [ $LT^{-1}$ ]
  - $b$ : Το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα [ $L$ ]  
(Adebayo and Abraham, 2018)
- 
- **Ο νόμος του Darcy:** Το 1856, ο Henry Darcy δημοσίευσε το έργο του με τίτλο "*Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*". Σε αυτό, παρουσίασε μια εξίσωση που περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο ρέει το νερό μέσα από ένα φίλτρο άμμου. Η εξίσωση βασίζεται στη διαφορά του ύψους του νερού και περιλαμβάνει έναν συντελεστή που εξαρτάται από τη διαπερατότητα του υλικού της άμμου. (Simmons, 2008)

Η μαθηματική έκφραση του νόμου του Darcy είναι:

$$Q = -K \cdot A \cdot \left(\frac{\Delta h}{L}\right) \quad (1.6)$$

Όμως ισχύει ότι:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (1.7)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1.6) και (1.7) προκύπτει:

$$q = -K \cdot \left(\frac{\Delta h}{L}\right) \quad (1.8)$$



Όπου:

- $q$ : Η ταχύτητα του Darcy [ $LT^{-1}$ ]
- $K$ : Η υδραυλική αγωγιμότητα [ $LT^{-1}$ ]
- $A$ : Η επιφάνεια [ $L^2$ ]
- $Q$ : Η παροχή [ $L^3T^{-1}$ ]
- $\frac{\Delta h}{L}$ : Η υδραυλική κλίση  
(Karatzas, 2003)

- **Η μέση γραμμική ταχύτητα ροής:** Είναι η πραγματική ταχύτητα με την οποία το νερό ή άλλα υγρά διέρχονται μέσα από το πορώδες υλικό, όπως το έδαφος ή τα πετρώματα. Αντιπροσωπεύει την κίνηση του νερού μέσω των διασυνδεδεμένων πόρων και δεν είναι ισοδύναμη με την ταχύτητα του Darcy, καθώς η τελευταία λαμβάνει υπόψη μόνο τη συνολική διατομή του εδάφους και όχι την περιορισμένη ροή μέσα από τους πόρους. Μαθηματικά περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$v = \frac{Q}{An_c} = \frac{q}{n_c} = -\frac{KA}{n_c} \left( \frac{dh}{dl} \right) \quad (1.9)$$

Όπου:

- $q$ : Η ταχύτητα του Darcy [ $LT^{-1}$ ]
- $K$ : Η υδραυλική αγωγιμότητα [ $LT^{-1}$ ]
- $A$ : Η επιφάνεια [ $L^2$ ]
- $Q$ : Η παροχή [ $L^3T^{-1}$ ]
- $\frac{dh}{dl}$ : Η υδραυλική κλίση
- $n_c$ : Το ενεργό πορώδες  
(Maliva, 2016)

## 1.5 Κλιματική αλλαγή

---

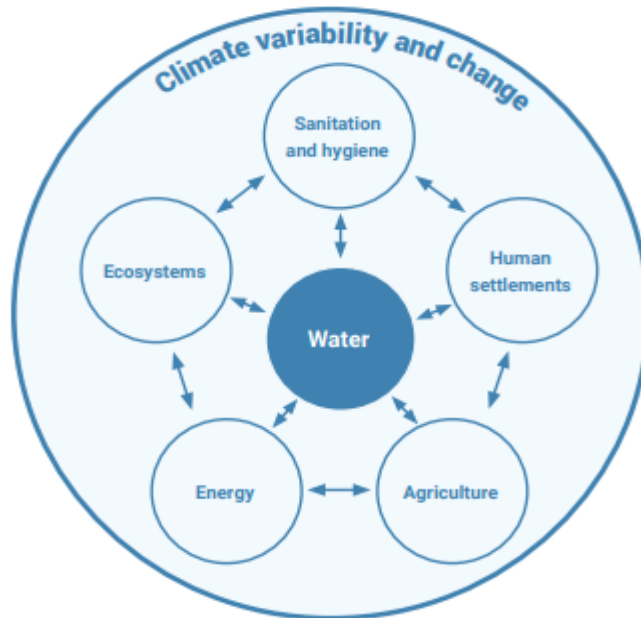
Η προστασία των υδατικών πόρων αποτελεί σημείο κλειδί για την ανθρωπότητα. Σε αυτό το πλαίσιο πρέπει να εξεταστούν σύγχρονες προσεγγίσεις σχετικά με την διαχείριση και την ασφάλεια των υδάτων, με την κλιματική αλλαγή να αποτελεί τον πλέον βασικό παράγοντα που ασκεί πίεση στα υδατικά αποθέματα. (Allan et al., 2013)

Η κλιματική αλλαγή επηρεάζει τους παγκόσμιους υδάτινους πόρους με πολλούς τρόπους: Μέσω σύνθετων χωροχρονικών μοτίβων, ανατροφοδοτικών επιδράσεων καθώς και μέσω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ φυσικών και ανθρώπινων διαδικασιών. (Bates et al., 2008)

Ειδικότερα, οι υδρολογικές αλλαγές που οφείλονται στην κλιματική αλλαγή δύναται να προκαλέσουν σημαντικούς κινδύνους στην κοινωνία τόσο άμεσα όσο και έμμεσα. Άμεσα, μέσω αλλαγών στις υδρομετεωρολογικές διαδικασίες του κύκλου του νερού και έμμεσα μέσω κινδύνων για την παραγωγή ενέργειας, την επισιτιστική ασφάλεια, την



οικονομική ανάπτυξη αλλά και τις κοινωνικές ανισότητες (σχήμα 1.7). Επομένως, η μετρίαση των συνεπειών της μέσω της διαχείρισης των υδάτινων πόρων είναι κρίσιμη για τη βιώσιμη ανάπτυξη και απαραίτητη για την επίτευξη της Ατζέντας του 2030 για τη Βιώσιμη Ανάπτυξη και της Συμφωνίας των Παρισίων για το κλίμα.(United Nations,2020)



**Σχήμα 1.7.** Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του νερού και άλλων σημαντικών κοινωνικοοικονομικών τομέων που επηρεάζονται από τη μεταβλητότητα του κλίματος (Πηγή: United Nations, 2020)

#### 1.5.1 Οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στα υδάτινα οικοσυστήματα

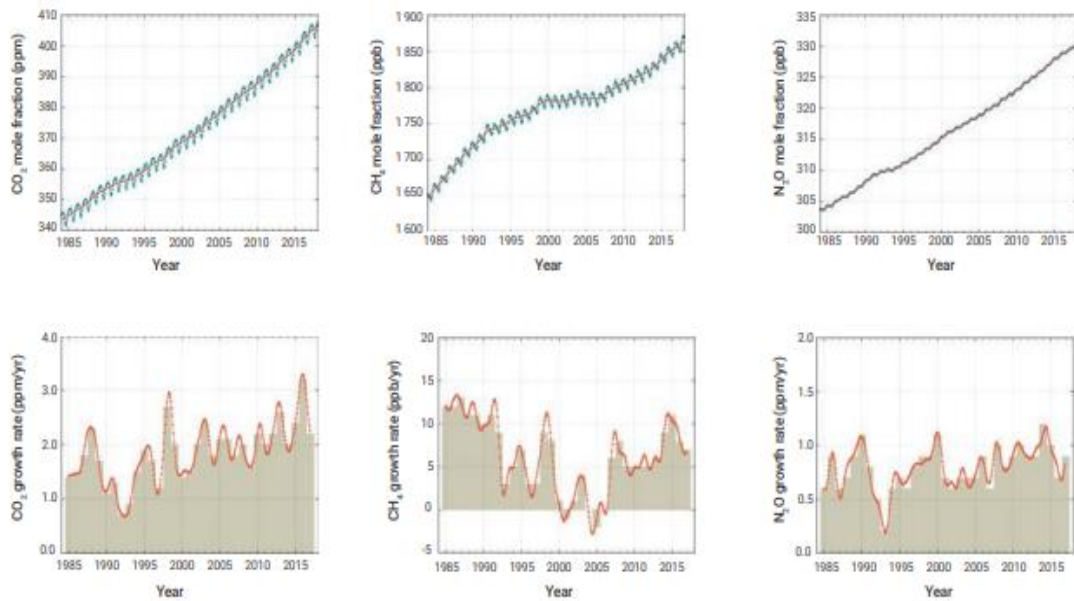
---

Οι δυσμενείς συνέπειες της κλιματικής αλλαγής στους υδάτινους φυσικούς πόρους είναι πολυδιάστατες. Από τον 19ο αιώνα, η μέση θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης έχει αυξηθεί κατά περίπου 0,9°C. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της αύξησης έχει σημειωθεί τα τελευταία 35 χρόνια, με τα πέντε θερμότερα έτη που έχουν καταγραφεί να έχουν λάβει χώρα μετά το 2010 (United Nations,2020). Επιπλέον, τον Ιούλιο του 2019 καταγράφηκε, σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό ο πιο θερμός μήνας από την αρχή των μετρήσεων (WMO,2019). Αυτή η σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας αποδίδεται κυρίως στα αέρια του θερμοκηπίου και στις ανθρωπογενείς δραστηριότητες, οι οποίες αποτελούν τον κύριο παράγοντα της υπερθέρμανσης του πλανήτη.(United Nations,2020)

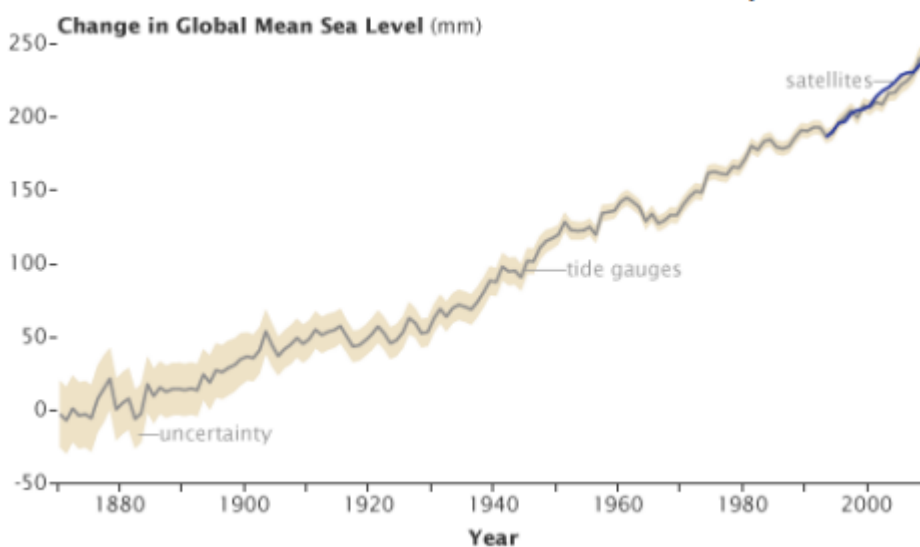
Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας αποτελεί ακόμα ένα σύμπτωμα της κλιματικής κρίσης. Οφείλεται τόσο στη θέρμανση των ωκεανών, η οποία προκαλεί αύξηση του όγκου του νερού, όσο και στο γεγονός ότι εισέρχεται περισσότερη ποσότητα νερού στους ωκεανούς από ό,τι φεύγει μέσω της εξάτμισης ή άλλων μέσων (Cheng et al.,2019). Παρόλο που στους ωκεανούς το φαινόμενο της εξάτμισης υπερτερεί της βροχόπτωσης, η στάθμη της θάλασσας έχει αυξηθεί περίπου 17 εκατοστά κατά τη διάρκεια του 20ού

αιώνα. Αυτό οφείλεται στην απορροή από περιοχές της ξηράς. Σε διαφορετική περίπτωση οι ωκεανοί θα είχαν αδειάσει. (Graham et al.,2010)

Ακόμα, από τα μέσα του 20ού αιώνα, παρατηρήθηκαν σημαντικές μεταβολές στην ένταση και τη συχνότητα ακραίων καιρικών φαινομένων. Τέτοια χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν: Η αύξηση των έντονων βροχοπτώσεων σε διάφορες περιοχές, η αύξηση των ακραία υψηλών θερμοκρασιών και η μείωση των ακραία χαμηλών θερμοκρασιών.(Min et al.,2011)



**Σχήμα 1.8.** Η αύξηση των επιπέδων των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα ( $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$ ) (Πηγή: United Nations, 2020)



**Σχήμα 1.9.** Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας (Πηγή: Graham et al., 2010)

### 1.5.2 Οι μελλοντικές προβλέψεις για τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους υδατικούς πόρους

---

Παρόλο που οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ανάλογα με την περιοχή, οι τρέχουσες τάσεις και οι μελλοντικές προβλέψεις δείχνουν σημαντικές αλλαγές στο κλίμα και πιο ακραία καιρικά φαινόμενα σε πολλές περιοχές του κόσμου. Συνεπώς, είναι απαραίτητο κατά την διαχείριση των υδάτινων πόρων να λαμβάνονται υπόψη οι πιθανές επιπτώσεις ενός μεταβαλλόμενου κλίματος. (IPCC, 2019)

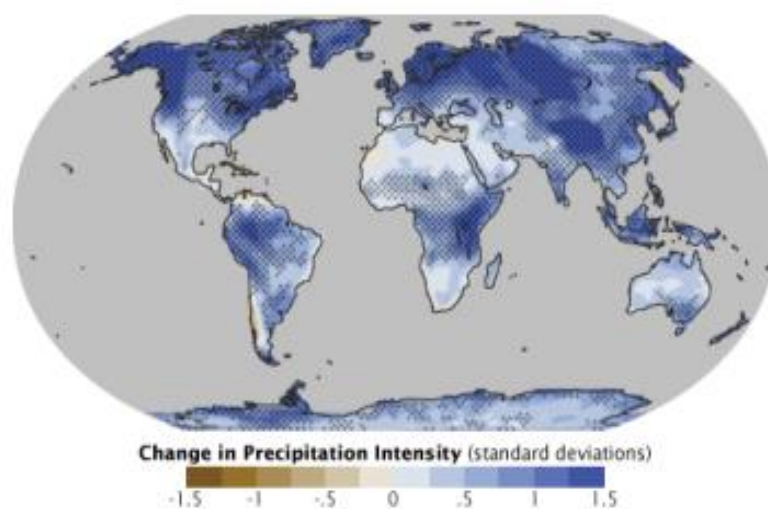
Οι προσομοιώσεις κλιματικών μοντέλων για τον 21ο αιώνα προβλέπουν μια σημαντική αύξηση των βροχοπτώσεων σε περιοχές με υψηλό γεωγραφικό πλάτος και σε τροπικές περιοχές, ενώ ταυτόχρονα θα μειωθούν σε υποτροπικές και χαμηλού γεωγραφικού πλάτους περιοχές. (Bates et al., 2008)

Ο κίνδυνος για πλημμύρες και ξηρασίες προβλέπεται να αυξηθεί λόγω της αυξημένης έντασης και μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων. Ταυτόχρονα, το ποσοστό της χερσαίας επιφάνειας που αντιμετωπίζει ακραίες ξηρασίες αναμένεται να αυξηθεί. (Bates et al., 2008)

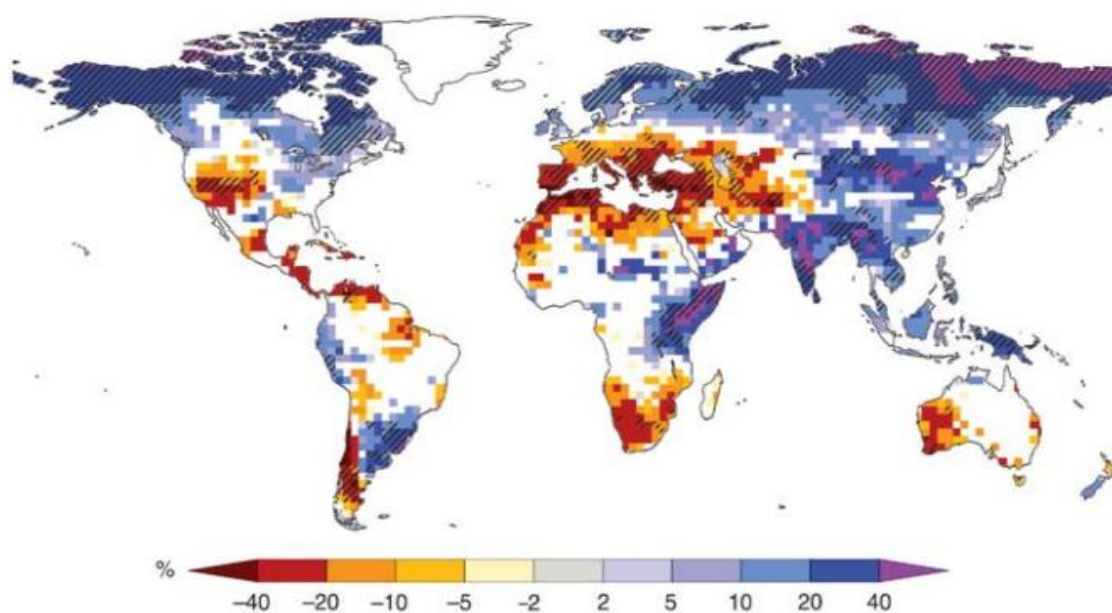
Σχετικά με την απορροή, προβλέπεται πως η ετήσια απορροή των ποταμών θα αυξηθεί λόγω της κλιματικής αλλαγής, σε περιοχές με υψηλό γεωγραφικό πλάτος και σε κάποιες υγρές τροπικές περιοχές. Αντίθετα, αναμένεται να μειωθεί σε ξηρές περιοχές μεσαίων γεωγραφικών πλατών. Οι άνυδρες και ημίξηρες περιοχές όπως η Μεσόγειος και η Δυτική ΗΠΑ αναμένεται να αντιμετωπίσουν μια δραματική μείωση των υδάτινων πόρων λόγω της κλιματικής αλλαγής. (Bates et al., 2008)

Οι υδατικοί πόροι που αποθηκεύονται σε παγετώνες και σε εκτάσεις καλυμμένες από χιόνι αναμένεται να μειωθούν μέχρι τα τέλη του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Έτσι, θα μειωθεί η διαθεσιμότητα νερού κατά τις θερμές και ξηρές περιόδους, με αποτέλεσμα να επηρεαστούν περιοχές που εξαρτώνται από το νερό που προέρχεται από το τήξη των πάγων. Οι περιοχές αυτές καταλαμβάνουν το ένα έκτο του παγκόσμιου πληθυσμού. (Bates et al., 2008)

Η ποιότητα των υδάτινων οικοσυστημάτων αναμένεται να επηρεαστεί και πολλές μορφές υδατικής ρύπανσης να επιδεινωθούν. Αυτό οφείλεται τόσο στις υψηλότερες θερμοκρασίες του νερού όσο και σε ακραία φαινόμενα, όπως η ξηρασία. Επίσης, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας προβλέπεται να επεκτείνει τις περιοχές αλάτωσης των υπόγειων υδάτων και να μειώσει τις διαθέσιμες ποσότητες γλυκού νερού για τους ανθρώπους και τα παράκτια οικοσυστήματα. (Bates et al., 2008)



**Χάρτης 1.4.** Η αύξηση της έντασης της βροχόπτωσης μέχρι το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα (Πηγή: Graham et al, 2010)



**Χάρτης 1.5.** Οι μεγάλης κλίμακας μεταβολές στην ετήσια απορροή για την περίοδο 2090–2099, σε σύγκριση με την περίοδο 1980–1999 με την βοήθεια 12 κλιματικών μοντέλων. Το λευκό χρώμα αντιπροσωπεύει τις περιοχές που τα μοντέλα συμφωνούν με τη φύση της αλλαγής (60%), ενώ οι περιοχές με διαγράμμιση είναι αυτές, όπου περισσότερο από το 90% των μοντέλων συμφωνούν με τη φύση της αλλαγής. (Πηγή: Bates et al., 2008)

Η ανάπτυξη των κλιματικών μοντέλων προήρθε από την επιθυμία μας για πρόβλεψη των καιρικών συνθηκών. Παρόλο που είναι αδύνατη η δημιουργία ενός κλιματικού μοντέλου για ολόκληρη την Γη, η επιτυχία τους είναι αδιαμφισβήτητη, καθώς μας επιτρέπουν να απαντήσουμε σε πολλά ερωτήματα σχετικά με το κλίμα. Βέβαια είναι άξιο αναφοράς, πως σε ορισμένες περιπτώσεις η πολυπλοκότητα του πλανήτη βάζει προσκόμματα στην λειτουργία τους. Κύριος στόχος τους δεν αποτελεί η πρόβλεψη μεμονωμένων καιρικών φαινομένων αλλά οι στατιστικές των φαινομένων αυτών. Ουσιαστικά, δηλαδή, ο σκοπός τους είναι η επέκταση της πρόβλεψης για μεγαλύτερες χρονικές περιόδους, όπως η σταδιακή εξέλιξη των ωκεανών και των παγετώνων. (Bader et al.,2008)

Τα σύγχρονα συνδυαστικά κλιματικά μοντέλα αποτελούνται από τέσσερα κύρια συστατικά: Την ατμόσφαιρα, τους ωκεανούς, την επιφάνεια της γης και τους θαλάσσιους πάγους. Η ανάπτυξη του κάθε ενός από αυτά τα επιμέρους στοιχεία θέτει σημαντικά ερωτήματα σχετικά με την εκπροσώπηση σημαντικών φυσικών διεργασιών στα μοντέλα. Επιπλέον, η κατηγοριοποίηση τους γίνεται με βάση τα τέσσερα αυτά στοιχεία. Έτσι, λοιπόν, τα κλιματικά μοντέλα χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες (Bader et al.,2008):

- **Γενικά μοντέλα κυκλοφορίας της ατμόσφαιρας:** Πρόκειται για υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της τρισδιάστατης κατάστασης της ατμόσφαιρας μέσα στον χρόνο. Αυτή η κατάσταση περιγράφεται από μεταβλητές όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η υγρασία και οι άνεμοι. Αν και χρησιμοποιούν τις ίδιες εξισώσεις, βασίζονται σε διαφορετικούς αριθμητικούς αλγόριθμους για την επίλυσή τους. Πιο συγκεκριμένα, η ατμόσφαιρα διαιρείται σε κατακόρυφα στρώματα, τα οποία καλύπτονται από ένα δισδιάστατο οριζόντιο πλέγμα, δημιουργώντας ένα τρισδιάστατο πλέγμα στοιχείων δικτύου. Επίσης, πρέπει να ενσωματώνουν τις επιδράσεις της ακτινοβολίας, της θερμότητας, αλλά και της κίνησης των αέριων μαζών. (Bader et al.,2008)
- **Γενικά Μοντέλα Κυκλοφορίας των Ωκεανών:** Αυτά τα μοντέλα προβλέπουν την κυκλοφορία των ωκεανών παγκοσμίως, επιλύοντας πρωτογενείς εξισώσεις για την ροή των ασυμπίεστων υγρών. Συνδέονται με τα μοντέλα της ατμόσφαιρας και του πάγου μέσω της ανταλλαγής θερμότητας και της αλατότητας. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό τους, είναι η επιλογή του κάθετου διαχωρισμού που προσφέρουν στους χρήστες. (Bader et al.,2008)
- **Μοντέλα της ξηράς:** Η μοντελοποίηση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα πάνω στη Γη είναι ιδιαίτερα δύσκολη, κυρίως λόγω της ετερογενούς επιφάνειας της. Για αυτό τον λόγο, οι προσομοιώσεις είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες όταν επιλέγονται αυτά τα μοντέλα. Κύριος στόχος τους είναι η πρόβλεψη των ανατροφοδοτήσεων που συμβαίνουν μεταξύ της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας του εδάφους. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι ανταλλαγές μάζας, ενέργειας και υδρατμών που έχουν σημαντικές επιπτώσεις στο κλιματικό σύστημα. (Bader et al.,2008)
- **Μοντέλα θαλάσσιου πάγου:** Περιλαμβάνονται στα περισσότερα κλιματικά μοντέλα συνδυάζοντας τόσο δυναμικά όσο και θερμοδυναμικά στοιχεία. Πιο συγκεκριμένα, περιλαμβάνουν την κίνηση του πάγου, καθώς και την μεταφορά θερμότητας και άλατος εντός του πάγου. Αν και στην πραγματικότητα, ο θαλάσσιος πάγος εμφανίζεται σε μορφή

πλακών με διαστάσεις πολλών μέτρων, στα κλιματικά μοντέλα αντιμετωπίζεται ως συνεχές υλικό. (Bader et al.,2008)

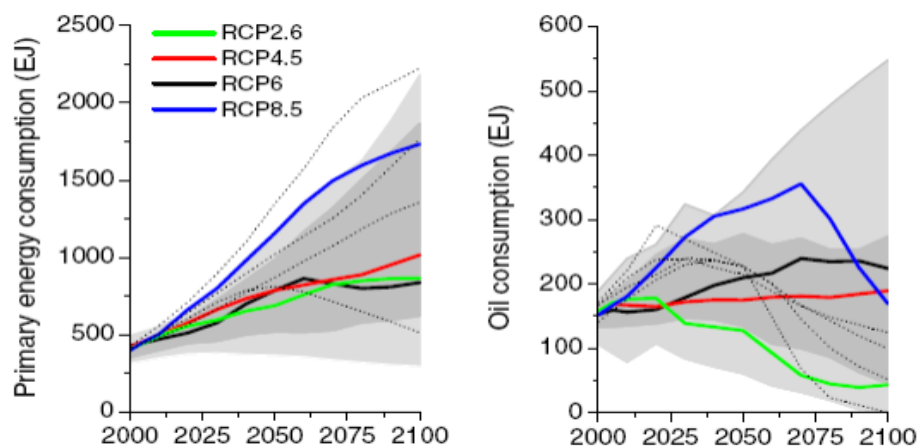
#### 1.5.4 Κλιματικά σενάρια

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στο περιβάλλον και την κοινωνία θα καθοριστούν τόσο από την αντίδραση του πλανητικού μας συστήματος όσο και από το πώς η ανθρωπότητα θα προσαρμοστεί στις μεταβολές που συντελούνται στην τεχνολογία, την οικονομία και τον τρόπο ζωής. Δεδομένης της αβεβαιότητας αυτών των αντιδράσεων, χρησιμοποιούνται μελλοντικά σενάρια που αξιολογούν τις επιδράσεις των διαφόρων επιλογών. Για αυτούς τους λόγους δημιουργήθηκαν τα σενάρια RCPs (Representative Concentration Pathways). Πρόκειται για σενάρια που περιγράφουν τις διαδρομές των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου και των αεροζόλ σε συνάρτηση με τις μεταβολές που συμβαίνουν στην χρήση της γης. Τα σενάρια αυτά χαρακτηρίζονται από την πρόσθετη θερμότητα που συγκρατείται στο χαμηλότερο τμήμα της ατμόσφαιρας λόγω των επιπλέον αερίων του θερμοκηπίου, η οποία ονομάζεται εξαναγκασμένη ακτινοβολία και μετριέται σε ( $W/m^2$ ). Η πολυπλοκότητα των πιθανών μελλοντικών εκπομπών της ανθρωπότητας έχει απλοποιηθεί σε τέσσερα αντιπροσωπευτικά σενάρια (Jubb et al.,2013):

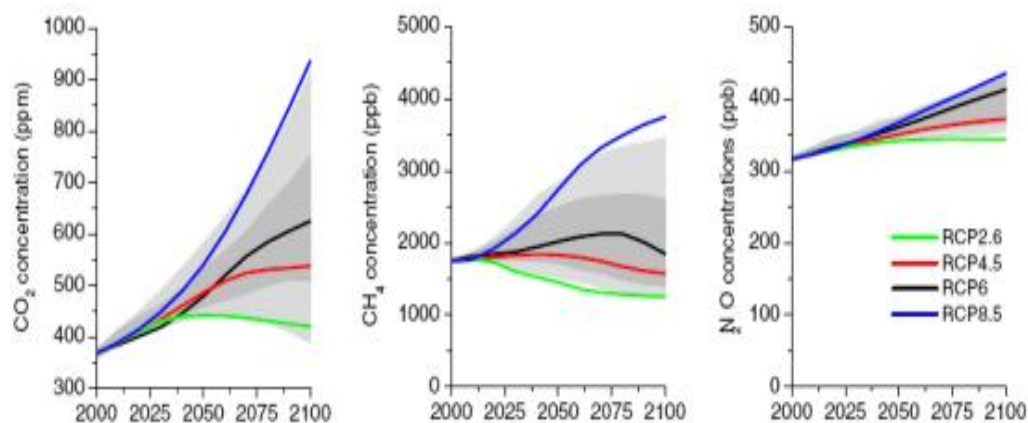
- **RCP2.6:** Αποτελεί το πιο φιλόδοξο σενάριο καθώς οδηγεί σε πολύ χαμηλά επίπεδα αναγκαστικής ενεργειακής επίδρασης λόγω ακτινοβολίας ( $2.6 \frac{W}{m^2}$ ). Οι εκπομπές κορυφώνονται στην αρχή και έπειτα μειώνονται λόγω της απομάκρυνσης διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Απαιτεί την έγκαιρη συμμετοχή όλων των κύριων εκπομπών, συμπεριλαμβανομένων και των αναπτυσσόμενων χωρών. (Jubb et al.,2013)
- **RCP4.5 και RCP6.0:** Σταθεροποιούν την αναγκαστική ενεργειακή επίδραση λόγω ακτινοβολίας λίγο μετά το 2100. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής σύγχρονων τεχνολογιών και στρατηγικών. (Jubb et al.,2013)
- **RCP8.5:** Πρόκειται για σενάριο πολύ υψηλών εκπομπών και σηματοδοτεί την αποτυχία περιορισμού του φαινομένου της υπερθέρμανσης έως το 2100. (Jubb et al.,2013)

Σενάριο	Ισοδύναμη συγκέντρωση $CO_2(ppm)$	Χρονική εξέλιξη
RCP2.6	490	Κορύφωση πριν από το 2100 και μετά πτώση
RCP4.5	850	Σταθεροποίηση μετά το 2100
RCP6.0	650	Σταθεροποίηση μετά το 2100
RCP8.5	>1370	Συνεχής αύξηση και μετά το 2100

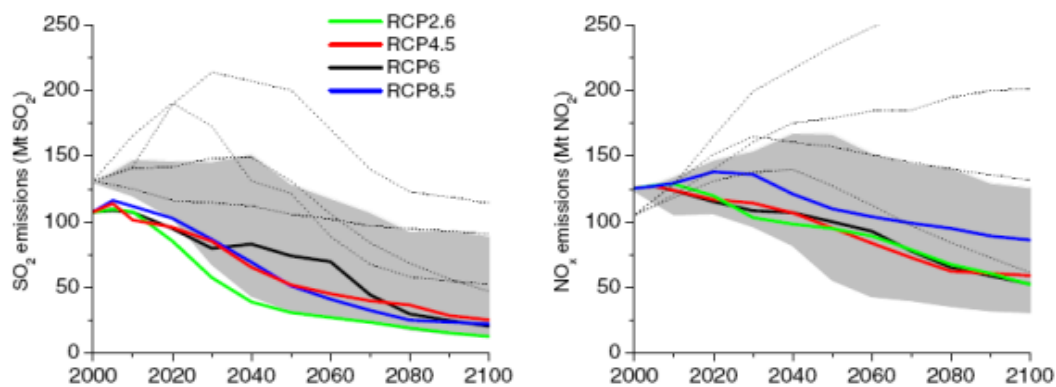
**Πίνακας 1.1.** Τα τέσσερα σενάρια και οι συγκεντρώσεις τους το 2100 (Πηγή: Jubb et al.,2013)



**Σχήμα 1.10.** Η εξέλιξη της πρωτογενούς κατανάλωσης ενέργειας και της κατανάλωσης πετρελαίου για τα διαφορετικά RCPs (Πηγή: Van Vuuren et al., 2011)

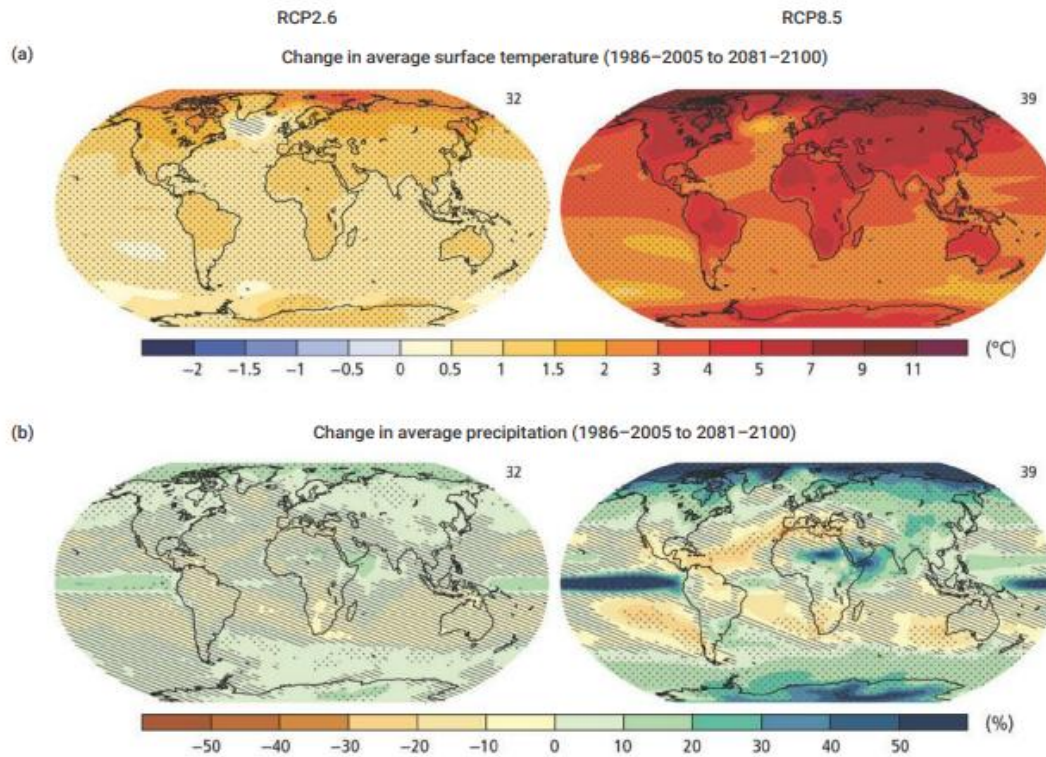


**Σχήμα 1.11.** Οι τάσεις των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου σύμφωνα με τα RCPs (Πηγή: Van Vuuren et al., 2011)

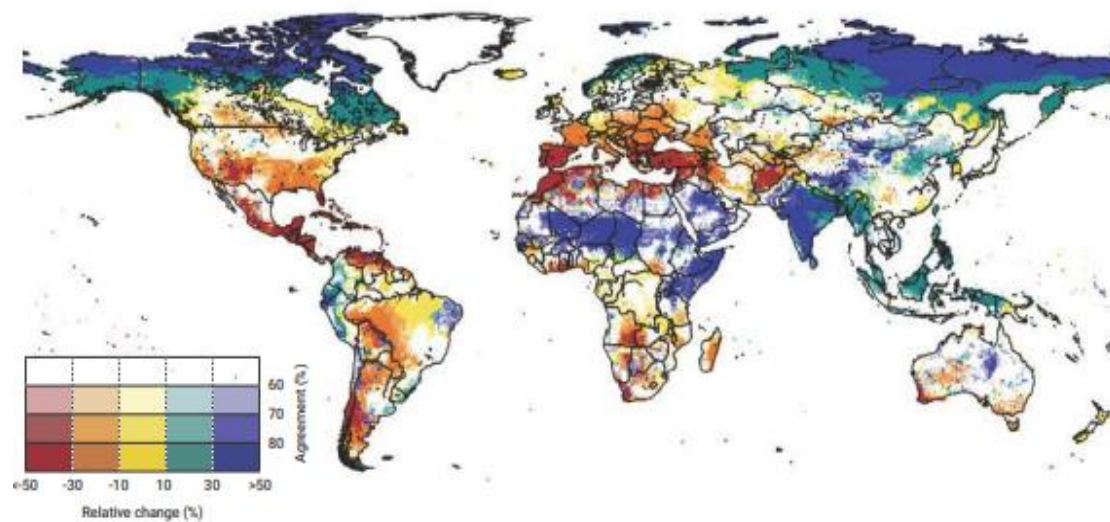


**Σχήμα 1.12.** Οι εκπομπές των  $SO_2$  και  $NO_x$  για τα διαφορετικά RCPs (Πηγή: Van Vuuren et al., 2011)





**Χάρτης 1.6.** Οι προβλέψεις των μοντέλων για την περίοδο 2081–2100 σε σχέση με την περίοδο 1986–2005: α) Η μεταβολή στη μέση ετήσια θερμοκρασία της επιφάνειας, β) Η μεταβολή στην μέση ετήσια βροχόπτωση. (Πηγή: Porinchu, 2017)



**Χάρτης 1.7.** Η αλλαγή της ετήσιας απορροής με αύξηση της θερμοκρασίας κατά 2°C σε σχέση με την τρέχουσα κατάσταση, κάτω από το σενάριο RCP8.5. (Πηγή: United Nations, 2020)

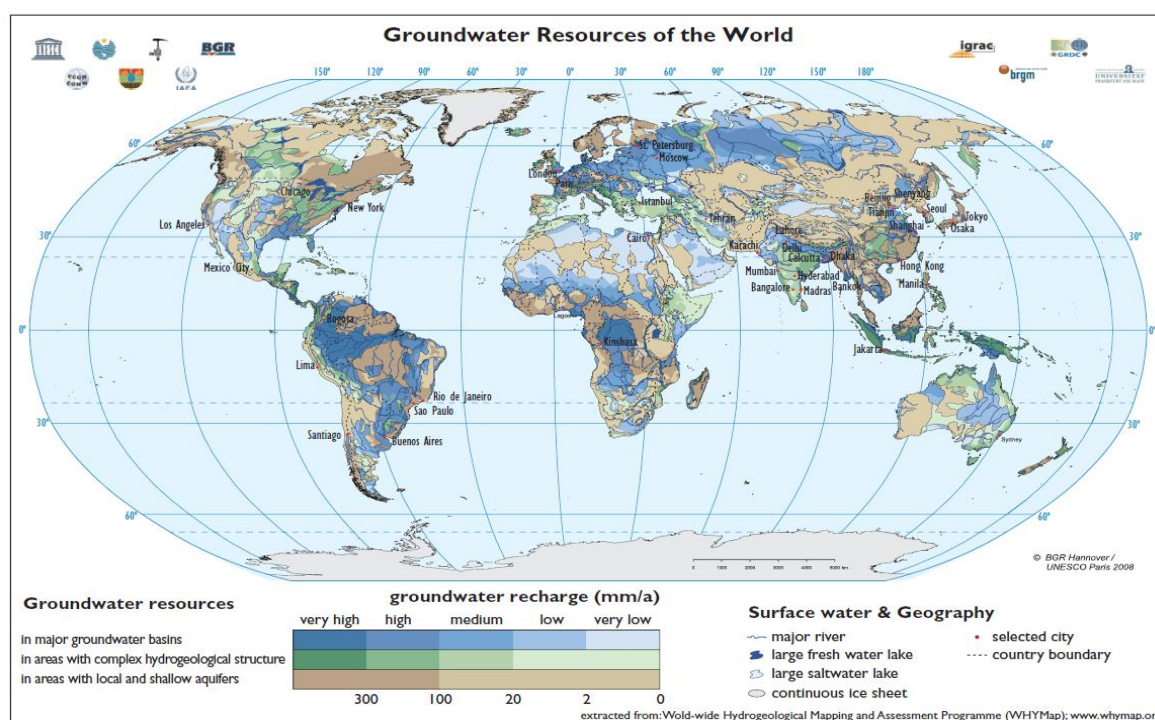


## 2. Μοντελοποίηση ροής υπογείων υδάτων

### 2.1 Εισαγωγή στην μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων

Η αύξηση του πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο προβλέπεται να αγγίξει τα 9,7 δισεκατομμύρια έως το 2050 και τα 10,4 δισεκατομμύρια έως το 2100. Το γεγονός αυτό σηματοδοτεί μια δύσκολη πρόκληση σε παγκόσμιο επίπεδο, ως προς την διαχείριση των υπόγειων υδάτινων πόρων καθώς η ζήτηση για νερό αυξάνεται, λόγω βιομηχανικών, γεωργικών και οικιακών χρήσεων, ενώ οι διαθέσιμοι πόροι μειώνονται. (United Nations, 2022)

Τα μοντέλα προσομοίωσης συχνά αποτελούν την πιο βιώσιμη μέθοδο για την παροχή δεδομένων σε αποφάσεις διαχείρισης των υπογείων υδάτων, καθώς μπορούν να προβλέψουν τις πιθανές επιπτώσεις μιας συγκεκριμένης στρατηγικής διαχείρισης νερού. Παρέχουν πολύτιμες δυνατότητες για την εκτίμηση της υδραυλικής πίεσης, των διακυμάνσεων στα επίπεδα των υπόγειων υδάτων, των αλλαγών στις συγκεντρώσεις, όπως στην περίπτωση εξάπλωσης ρύπων, καθώς και στην αξιολόγηση στρατηγικών διαχείρισης και προστασίας των υδροφορέων. Επιπλέον, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανασκόπηση παλαιότερων αλλαγών στις συγκεντρώσεις, παρέχοντας αναλυτικές πληροφορίες για τις ιστορικές τάσεις. Επιπρόσθετα, στοχεύουν στον εντοπισμό της πηγής που προκαλεί την ρύπανση. (Karatzas, 2017)



**Χάρτης 2.1.** Παγκόσμιος υδρολογικός χάρτης (Πηγή: BGR and UNESCO, 2008)

## 2.2 Μαθηματικές θεωρήσεις στην μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων

---

Ένα μαθηματικό μοντέλο για τη ροή υπόγειων υδάτων αποτελείται από:

- **Βασική εξίσωση:** Προκύπτει από την αρχή διατήρησης της μάζας σε συνδυασμό με τον νόμο του Darcy. Πρόκειται για μια διαφορική εξίσωση που εξαρτάται από τη ροή και τη διαπερατότητα του υλικού.
- **Οριακές συνθήκες:** Περιγράφουν τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά μήκος των ορίων του συστήματος, καθορίζοντας πώς επηρεάζεται η ροή στα άκρα του μοντέλου.
- **Αρχικές συνθήκες:** Για προβλήματα που μεταβάλλονται με τον χρόνο οι αρχικές συνθήκες καθορίζουν τις αρχικές τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής στην έναρξη της προσομοίωσης. (Anderson and Woessner, 2002)

### 2.2.1 Θεώρηση υδροφορέα

---

Η κατανόηση των υδροφορέων εστιάζει στη διάκριση τους σε περιορισμένους και ελεύθερους. Ο υδροφορέας είναι μια πορώδης γεωλογική δομή ικανή να συγκρατεί και να μεταφέρει μεγάλες ποσότητες νερού, οι οποίες μπορούν να αντληθούν από πηγάδια. Οι περιορισμένοι υδροφορείς περιβάλλονται από πορώδη υλικά που δρουν ως φράγματα, μειώνοντας τη ροή του νερού. Αντίθετα, οι ελεύθεροι επιτρέπουν την ελεύθερη κίνηση του νερού και επηρεάζονται άμεσα από την ατμοσφαιρική πίεση. Αυτές οι έννοιες είναι καθοριστικές στην ανάλυση της ροής προς πηγάδια άντλησης, καθώς επηρεάζουν τις μεθόδους υπολογισμού και πρόβλεψης των μεταβολών στη στάθμη του νερού κατά τη διάρκεια της άντλησης. Επίσης, αυτή η θεώρηση αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για πολλές αναλυτικές λύσεις, όπως των Thiem, Theis και Jacob. Η κίνηση του υπογείου νερού θεωρείται αυστηρά οριζόντια ανάμεσα στους υδροφορείς και κάθετη μεταξύ των περιοριστικών στρωμάτων. Επιπλέον, οι περιορισμένοι υδροφορείς παρουσιάζουν σταθερή μεταβιβασιμότητα, γεγονός που οφείλεται στο σταθερό τους πάχος και στην ομογένειά τους. Από την άλλη πλευρά, στους ελεύθερους υδροφορείς, η μεταβιβασιμότητα μεταβάλλεται χωροταξικά, καθώς επηρεάζεται από το υδραυλικό ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Παρόλο που στις αναλυτικές μαθηματικές προσεγγίσεις η διαπερατότητα και η μεταβιβασιμότητα είναι αμετάβλητες, στην πραγματικότητα αυτές οι παράμετροι εμφανίζουν χωρική μεταβλητότητα. Αυτό οφείλεται στους υδροφορείς που συναντάμε στο πεδίο, οι οποίοι είναι ομοιογενείς. (Anderson and Woessner, 2002)

Παρακάτω παρουσιάζεται η γενική μορφή της εξίσωσης που περιγράφει τη θεώρηση του υδροφορέα:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (2.1)$$

Όπου:

- $L = K'_z \frac{h_{source} - h}{b'}$
- $h$ : Το υδραυλικό ύψος [L]
- $S$ : Ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας
- $T_x$ : Η μεταβιβασιμότητα στον άξονα x [ $L^2 T^{-1}$ ]
- $T_y$ : Η μεταβιβασιμότητα στον άξονα y [ $L^2 T^{-1}$ ]

- $R$ : Ένας όρος εμπλουτισμού ή άντλησης. Σε περίπτωση άντλησης με ρυθμό  $W$  τότε ισχύει,  $R = -W$
- $K'_z$ : Η υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα  $z$  [ $LT^{-1}$ ]
- $b'$ : Το πάχος του υδροφορέα [ $L$ ]
- $h_{source}$ : Το υδραυλικό ύψος στο στρώμα που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του περιοριστικού στρώματος [ $L$ ]
- $T_x = K_x * h$  και  $T_y = K_y * h$ , όπου  $h$  η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα, δηλαδή το ύψος του νερού πάνω από τον πυθμένα του υδροφορέα γνωστό και ως κορεσμένο πάχος.

Στην εφαρμογή της σχέσης (2.1) σε έναν ελεύθερο υδροφορέα, ισχύουν οι παραδοχές Dupuit. Αυτές οι παραδοχές περιλαμβάνουν τα εξής:

- Οι γραμμές ροής θεωρούνται ότι είναι οριζόντιες, ενώ οι ισοδυναμικές γραμμές (δηλαδή οι γραμμές που συνδέουν σημεία με την ίδια πίεση ή υδραυλική ανύψωση) είναι κάθετες προς αυτές.
- Η υδραυλική κλίση θεωρείται ότι ταυτίζεται με την κλίση του υδροφόρου ορίζοντα και παραμένει ανεξάρτητη του βάθους.  
Οι παραπάνω παραδοχές διευκολύνουν τη μελέτη της ροής του υπόγειου νερού, επιτρέποντας την απλοποίηση των υπολογισμών που σχετίζονται με τη δυναμική των ελεύθερων υδροφορέων. (Anderson and Woessner, 2002)

## 2.2.2 Θεώρηση συστήματος ροής

Η θεώρηση αυτή εστιάζει στην διαμόρφωση της τρισδιάστατης κατανομής της ροής, της υδραυλικής αγωγιμότητας και των χαρακτηριστικών της αποθηκευτικότητας σε κάθε σημείο του συστήματος. Έτσι, η ανάλυση των υδροφορέων και των περιοριστικών στρωμάτων δεν είναι αναγκαία. Προσφέρει την δυνατότητα προσομοίωσης της ροής είτε σε δύο είτε σε τρεις διαστάσεις λόγω της ύπαρξης οριζόντιων και κατακόρυφων συνιστωσών ροής. Η εξίσωση του συστήματος μπορεί να εκφραστεί στη γενική της μορφή ως:

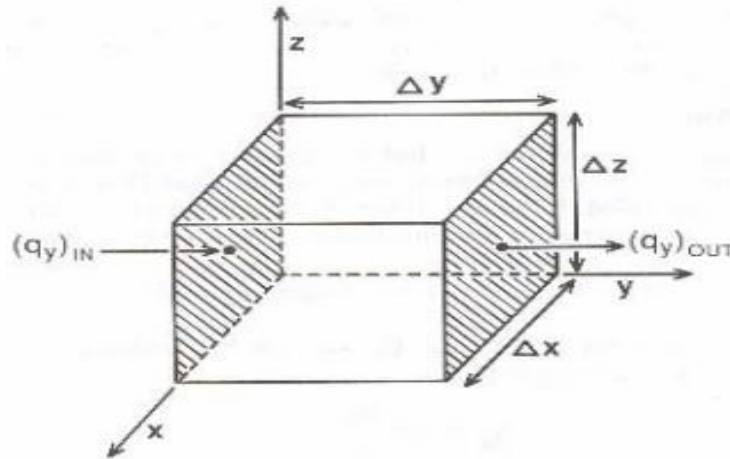
$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_S \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (2.2)$$

Όπου:

- $K_{xx}$ : Η υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα  $x$  [ $LT^{-1}$ ]
- $K_{yy}$ : Η υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα  $y$  [ $LT^{-1}$ ]
- $K_{zz}$ : Η υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα  $z$  [ $LT^{-1}$ ]
- $S_S$ : Ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας [ $L^{-1}$ ]
- $R^*$ : Ένας όρος εμπλουτισμού ή άντλησης. Σε περίπτωση άντλησης με ρυθμό  $W$  τότε ισχύει,  $R^* = -W$   
(Anderson and Woessner, 2002)

### 2.2.3 Παραγωγή της εξίσωσης της υπόγειας ροής

Η εξίσωση που περιγράφει τη ροή μέσα από ένα πορώδες μέσο συνήθως προκύπτει αναφερόμενη στη ροή νερού διαμέσου ενός κύβου πορώδους υλικού. Αυτός ο κύβος έχει τέτοιο μέγεθος που του επιτρέπει να αναπαριστά επαρκώς τις ιδιότητες του μέσου, ενώ παραμένει αρκετά μικρός ώστε η μεταβολή των υδραυλικών υψών εντός του όγκου να είναι σχετικά περιορισμένη (σχήμα 2.2). Ο κύβος αυτός ονομάζεται μοναδιαίος όγκος πορώδους υλικού (REV, representative elementary volume), με όγκο  $\Delta x \Delta y \Delta z$ .



**Σχήμα 2.1.** Μοναδιαίος όγκος πορώδους υλικού ( $\Delta x \Delta y \Delta z$ ) που αναπαριστά τις συνιστώσες της ροής κατά μήκος του άξονα  $y$  (Πηγή: Anderson and Woessner, 2002).

Η ροή μέσω του μοναδιαίου όγκου (REV),  $q$  είναι ένα διάνυσμα του οποίου το μέτρο εκφράζεται από τα τρία διανύσματα  $q_x, q_y, q_z$ . Τυπικά γράφεται:

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z \quad (2.3)$$

Όπου  $i_x, i_y, i_z$  είναι τα μοναδιαία διανύσματα κατά μήκος των αξόνων  $x, y$ , και  $z$ , αντίστοιχα.

Το υδατικό ισοζύγιο του νερού (αρχή διατήρησης της μάζας) μέσα στον μοναδιαίο όγκο δηλώνει ότι:

$$ΕΚΡΟΗ - ΕΙΣΡΟΗ = ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΤΗΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ \quad (2.4)$$

Όπως φαίνεται και στο σχήμα (2.2) θεωρούμε πως η ροή διέρχεται από τον άξονα  $y$  του μοναδιαίου όγκου (REV). Η εισροή πραγματοποιείται μέσω της επιφάνειας  $\Delta x \Delta z$  και είναι ίση με  $(q_y)_{in}$  ενώ αντίστοιχα η εκροή είναι ίση με  $(q_y)_{out}$ . Έτσι, προκύπτει ο ογκομετρικός ρυθμός εκροής στον άξονα  $y$ :

$$[(q_y)_{out} - (q_y)_{in}] \Delta x \Delta z \quad (2.5)$$

Όπου ο όρος (2.4) μπορεί να γραφτεί και αλλιώς:

$$\frac{(q_y)_{out} - (q_y)_{in}}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (2.6)$$

Έπειτα αν αφαιρέσουμε τους δείκτες in και out και μετατρέψουμε την εξίσωση (2.6) σε μερική διαφορική, η μεταβολή του ρυθμού ροής μέσω του στοιχειώδους όγκου κατά μήκος του άξονα y θα είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z) \quad (2.7)$$

Με όμοιο τρόπο γίνεται και η περιγραφή των μεταβολών του ρυθμού ροής τόσο στον άξονα y όσο και στον άξονα x. Με την χρήση της εξίσωσης (2.4) η συνολική μεταβολή της ροής ισούται με την μεταβολή της αποθήκευσης και εκφράζεται ως:

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \Delta storage (\text{μεταβολή στην αποθήκευση}) \quad (2.8)$$

Είναι, όμως, απαραίτητο να λάβουμε υπόψη μας την πιθανότητα ύπαρξης πηγής ύδατος (π.χ. πηγάδι εμπλουτισμού) είτε την ύπαρξη καταβόθρας (π.χ. πηγάδι άντλησης). Ο ρυθμός ογκομετρικής εισροής από πηγές και καταβόθρες αναπαρίσταται από τον όρο  $R^* \Delta x \Delta y \Delta z$ , με τον όρο R να είναι θετικός όταν πρόκειται για πηγή ύδατος.

$$\left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \pm R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \Delta storage (\text{μεταβολή στην αποθήκευση}) \quad (2.9)$$

Σχετικά με το δεξί μέλος της εξίσωσης (2.9). Η μεταβολή στην αποθήκευση εκφράζεται μέσω της ειδικής αποθηκευτικότητας ( $S_s$ ), η οποία αντιπροσωπεύει τον όγκο νερού που απελευθερώνεται από την αποθήκευση ανά μονάδα μεταβολής του υδραυλικού ύψους και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (2.10)$$

Η θεώρηση στην εξίσωση (2.10) είναι ότι ο όρος  $\Delta V$  είναι θετικός όταν το  $\Delta h$  είναι αρνητικό, δηλαδή, το νερό απελευθερώνεται από την αποθήκευση όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται. Ο ρυθμός μεταβολής της αποθήκευσης στον μοναδιαίο στοιχειώδη όγκο (REV) είναι:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (2.11)$$

Συνδυάζοντας τις Εξισώσεις (2.9) και (2.11) και διαιρώντας με τον όγκο  $\Delta x \Delta y \Delta z$  προκύπτει η τελική μορφή της εξίσωσης ισοζυγίου νερού:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.12)$$

Αυτή η εξίσωση έχει περιορισμένη πρακτική αξία, διότι δεν είναι εύκολο να μετρήσουμε την τιμή του q. Αντίθετα, επιθυμούμε μια εξίσωση που να βασίζεται στην υδραυλικό ύψος, καθώς πρόκειται για ένα παρατηρήσιμο μέγεθος που μετριέται εύκολα σε γεωτρήσεις. Ο νόμος του Darcy συνδέει την ειδική παροχή q με το υδραυλικό ύψος h. Σε τρεις διαστάσεις ο νόμος του Darcy λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$q_x = -K_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$q_y = -K_y \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.13)$$

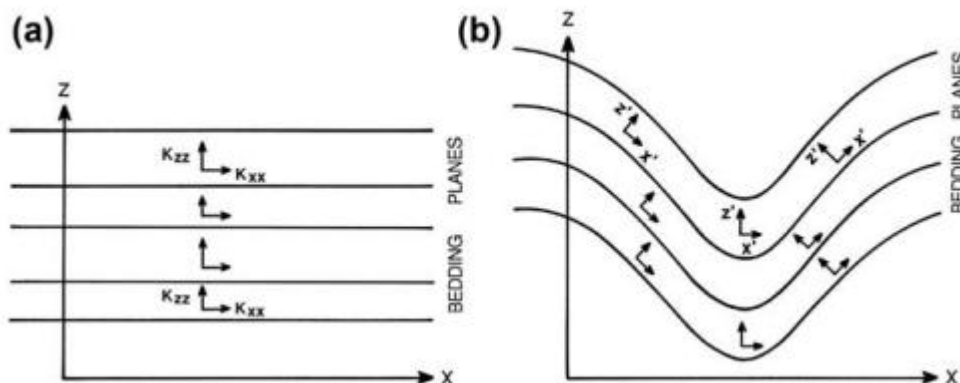
$$q_z = -K_z \frac{\partial h}{\partial x}$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (2.13) στην εξίσωση (2.12) προκύπτει η γενική διαφορική εξίσωση (2.2) που περιγράφει τη ροή υπόγειου νερού σε τρεις διαστάσεις για ετερογενείς και ανισοτροπικές συνθήκες.

Στις εξισώσεις (2.1) και (2.2) οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας ευθυγραμμίζονται με τους άξονες συντεταγμένων  $x$ ,  $y$  και  $z$ . Όταν, όμως, δεν συμβαίνει αυτό τότε είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί μια εκδοχή της βασικής διαφορικής εξίσωσης που περιλαμβάνει και τα εννέα στοιχεία του πίνακα της υδραυλικής αγωγιμότητας, αντί μόνο των τριών κύριων συνιστωσών:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων για μια ολόκληρη περιοχή ενδιαφέροντος πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές των κύριων και των μη διαγώνιων συνιστωσών του  $\bar{K}$ . Παρόλο που συμμετρικός ο πίνακας  $\bar{K}$  είναι συμμετρικός ως προς την κύρια διαγώνιο ( $K_{xx} = K_{yx}$ ,  $K_{zx} = K_{xz}$ ,  $K_{zy} = K_{yz}$ ) εξακολουθούμε να πρέπει να υπολογίσουμε τις τιμές τόσο για αυτές τις συνιστώσες όσο και για τις συνιστώσες κατά μήκος της κύριας διαγωνίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί στο πεδίο με τεστ άντλησης. Συνήθως, όμως, υπολογίζουμε αυτές τις τιμές ορίζοντας τοπικά συστήματα συντεταγμένων σε κάθε κελί ή στοιχείο του μοντέλου, έτσι ώστε κάθε τοπικό σύστημα συντεταγμένων να ευθυγραμμίζεται τοπικά με τις κύριες συνιστώσες του  $\bar{K}$  σε αυτό το σύστημα συντεταγμένων. Έτσι, στο τοπικό σύστημα συντεταγμένων στον πίνακα  $\bar{K}$  υπάρχουν μόνο τρεις μη μηδενικές συνιστώσες, καθώς οι εκτός διαγωνίου συνιστώσες είναι μηδενικές. (Anderson and Woessner, 2002)



**Σχήμα 2.2.** Απεικόνιση καθολικών και τοπικών συστημάτων προσανατολισμού σε δυο διαστάσεις. **(a)** Το καθολικό σύστημα προσανατολισμού  $x$ - $z$  είναι ευθυγραμμισμένο με τις κύριες συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας. **(b)** Τοπικά συστήματα συντεταγμένων  $x'$ - $z'$  επίσης ευθυγραμμισμένα με τις κύριες συνιστώσες του  $K$  (Πηγή: Anderson and Woessner, 2002)

## 2.3 Κατηγορίες μοντέλων προσομοίωσης υπόγειας ροής

---

### 2.3.1 Φυσικά και Αριθμητικά μοντέλα

---

Τα μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής διακρίνονται σε φυσικά και αριθμητικά.

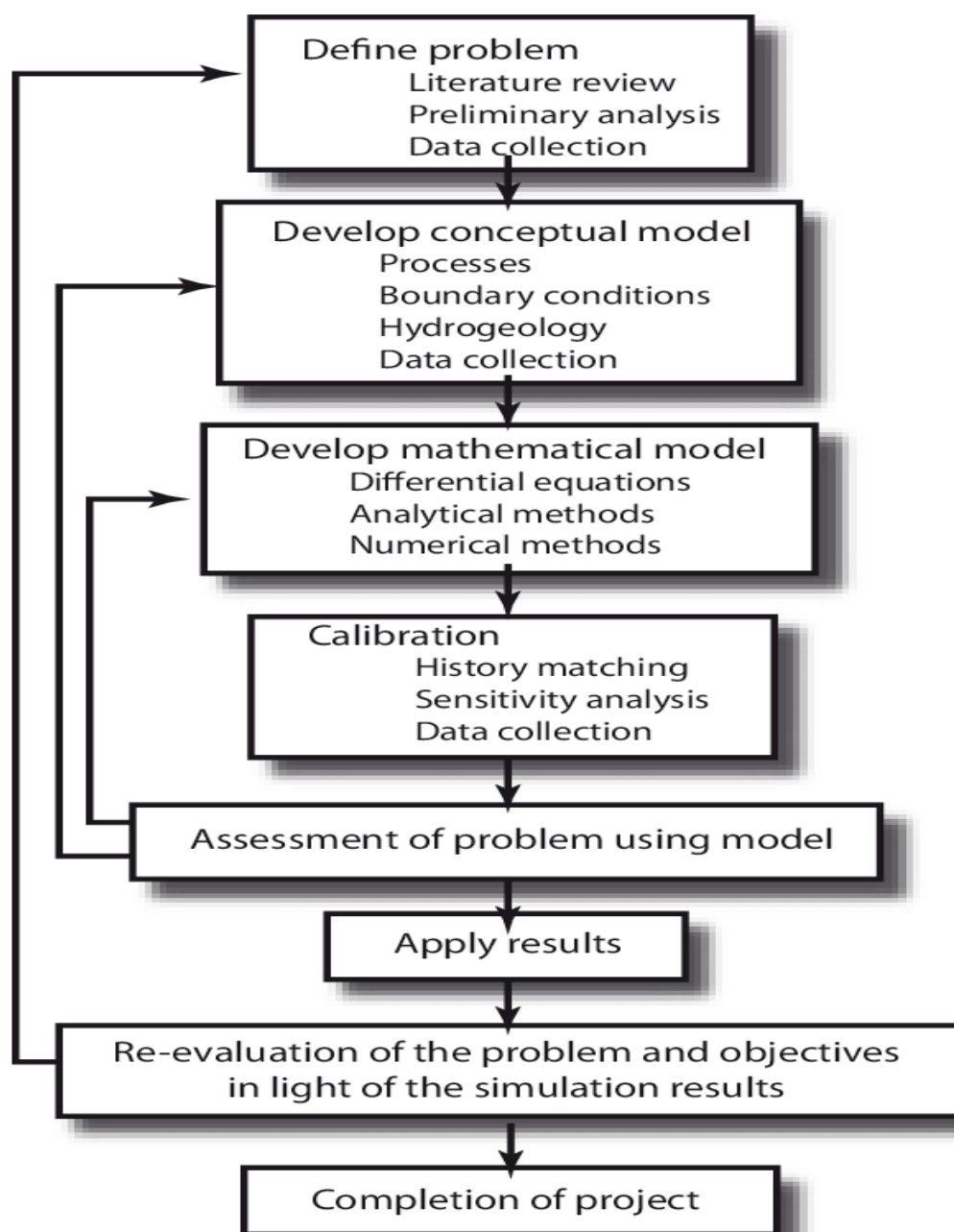
Τα φυσικά μοντέλα, όπως οι εργαστηριακές δεξαμενές με άμμο, επιτρέπουν την άμεση αναπαράσταση της ροής υπόγειων υδάτων.

Αντί για άμεση προσέγγιση, τα μαθηματικά μοντέλα προσεγγίζουν τη ροή με έμμεσο τρόπο, αξιοποιώντας μια κύρια εξίσωση που αντιπροσωπεύει τις φυσικές διεργασίες του συστήματος σε συνδυασμό με εξισώσεις που περιγράφουν τις οριακές συνθήκες του μοντέλου. Ανάλογα με τον τρόπο επίλυσης τους διαχωρίζονται σε αναλυτικά και αριθμητικά, ενώ τις περισσότερες φορές απαιτείται η χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Πιο συγκεκριμένα, στα προβλήματα που οι παραδοχές που απαιτούνται για την αναλυτική λύση είναι υπερβολικά απλοϊκές ή ακατάλληλες, η αριθμητική μοντελοποίηση αποτελεί συχνά την προτιμώμενη επιλογή. Ένα αριθμητικό μοντέλο μπορεί να είναι πιο εύκολο στην εφαρμογή από ένα αναλυτικό, ειδικά όταν το αναλυτικό πρόβλημα απαιτεί σύνθετους συνδυασμούς λύσεων. (Anderson and Woessner)

Η επίλυση ενός συνόλου μερικών διαφορικών εξισώσεων, οι οποίες αποτυπώνουν τη ροή του νερού, την ταχύτητα μετακίνησής του και τη μεταφορά μάζας σε καταστάσεις ρύπανσης αποτελούν το πρωτεύον χαρακτηριστικό των αριθμητικών μοντέλων για τα υπόγεια νερά. Η κατηγοριοποίηση αυτών των μοντέλων βασίζεται στη μέθοδο που χρησιμοποιείται για την επίλυση των εξισώσεων και περιλαμβάνει τις εξής:

- Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών
- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων
- Ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές
- Μέθοδος οριακών στοιχείων
- Μέθοδος αναλυτικών στοιχείων

Σε περιπτώσεις επίλυσης ζητημάτων που σχετίζονται με την ροή των υπόγειων υδάτων και την μεταφορά μάζας, οι δύο πρώτες αποτελούν τις πιο δημοφιλείς. Πιο συγκεκριμένα, με την βοήθεια υπολογιστικού προγράμματος επιλύονται οι αλγεβρικές εξισώσεις που προκύπτουν από την προσέγγιση μερικών διαφορικών. Το αποτέλεσμα αυτών των αλγεβρικών εξισώσεων δύναται να αναπαρασταθεί ως πίνακας. Η απόφαση ανάμεσα στις δύο μεθόδους εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά του προβλήματος όσο και από τις ανάγκες ή τις προτιμήσεις του ατόμου που τις εφαρμόζει. Οι πεπερασμένες διαφορές είναι γενικά πιο εύχρηστες, καθώς απαιτούν λιγότερα στοιχεία για τη διαμόρφωση του πίνακα εξισώσεων. Αντίθετα, τα πεπερασμένα στοιχεία είναι πιο κατάλληλα για την προσομοίωση ορίων με ακανόνιστο σχήμα. (Anderson and Woessner)



**Σχήμα 2.3.** Διάγραμμα ροής μοντελοποίησης υπογείων υδάτων. (Πηγή: Sanford, 2013)

### 2.3.2 Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων

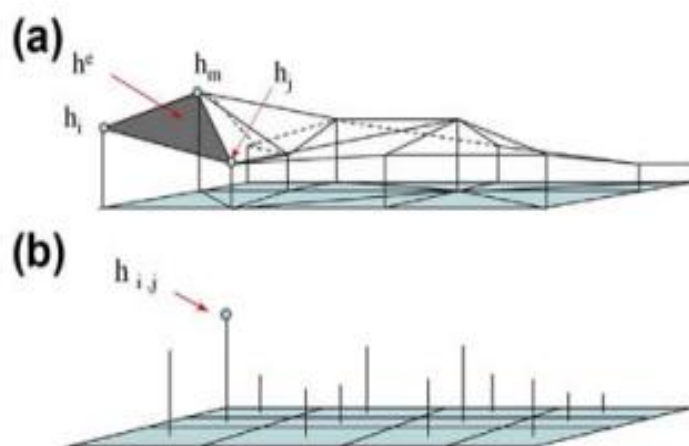
Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το πρόβλημα χωρίζεται σε μικρότερα τμήματα καθένα από τα οποία περιλαμβάνει συγκεκριμένους κόμβους. Η εξαρτημένη μεταβλητή (υδραυλικό ύψος) προσδιορίζεται συνεχώς μέσα σε κάθε στοιχείο. Η λύση παραμένει κατά τμήματα συνεχής καθώς τα στοιχεία ενώνονται στις άκρες τους. Η μεθοδολογία αυτή προσφέρει ευελιξία στον σχεδιασμό και την κατανομή των στοιχείων στο πλέγμα, καθιστώντας εφικτή την εφαρμογή διαφόρων γεωμετρικών σχημάτων, όπως τριγωνικά και τετραγωνικά στοιχεία. Οι θέσεις των κόμβων στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων



προσδιορίζονται με τις συντεταγμένες  $x$ ,  $y$  και  $z$ . Κάθε κόμβος και στοιχείο είναι αριθμημένα, και η θέση του κάθε στοιχείου ορίζεται με βάση τους αριθμούς των κόμβων που το περιβάλλουν. Το γεγονός πως είναι αναγκαίο όχι μόνο να γνωρίζουμε τις συντεταγμένες των κόμβων, αλλά και την αρίθμηση των στοιχείων και των κόμβων που σχηματίζουν κάθε στοιχείο καθιστά την εφαρμογή της μεθόδου απαιτητική, λόγω της προσεκτικής διαχείρισης δεδομένων που απαιτείται. Επιπλέον, η σειρά αρίθμησης των κόμβων μπορεί να επηρεάσει τη μνήμη που καταναλώνει το πρόγραμμα κατά την εκτέλεση. Οι εξισώσεις της μεθόδου δημιουργούνται με την εισαγωγή μιας προσεγγιστικής λύση για το υδραυλικό ύψος ή οποιοδήποτε άλλο μέγεθος μέσα στο στοιχείο. Η λύση αναφέρεται και ως δοκιμαστική λύση. (Anderson and Woessner, 2002)

### 2.3.3 Μοντέλα Πεπερασμένων Διαφορών

Αρχικά, στην μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών γίνεται προσδιορισμός των κόμβων με τους δείκτες  $i$ ,  $j$  και  $k$ , οι οποίοι αναπαριστούν την στήλη, την γραμμή και την επίπεδη διάταξη ενός κόμβου. Ουσιαστικά οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις στις οποίες υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη. Έπειτα, καθορίζονται οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων από τις τιμές  $Dx$ ,  $Dy$ ,  $Dz$  για τις κατευθύνσεις  $x$ ,  $y$  και  $z$ . Κάθε κόμβος βρίσκεται μέσα σε ένα κελί και το υδραυλικό ύψος στον κόμβο αντιπροσωπεύει το μέσο υδραυλικό ύψος σε αυτό το κελί. Στη συνέχεια, οι μερικές παράγωγοι των εξισώσεων της ροής ή της διασποράς αντικαθίστανται με πεπερασμένες διαφορές, μετατρέποντας τις διαφορικές εξισώσεις σε αλγεβρικές. Τέλος, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι για την επίλυση του συνόλου των αλγεβρικών εξισώσεων. Έτσι, υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη σε διάφορα σημεία του πλέγματος.



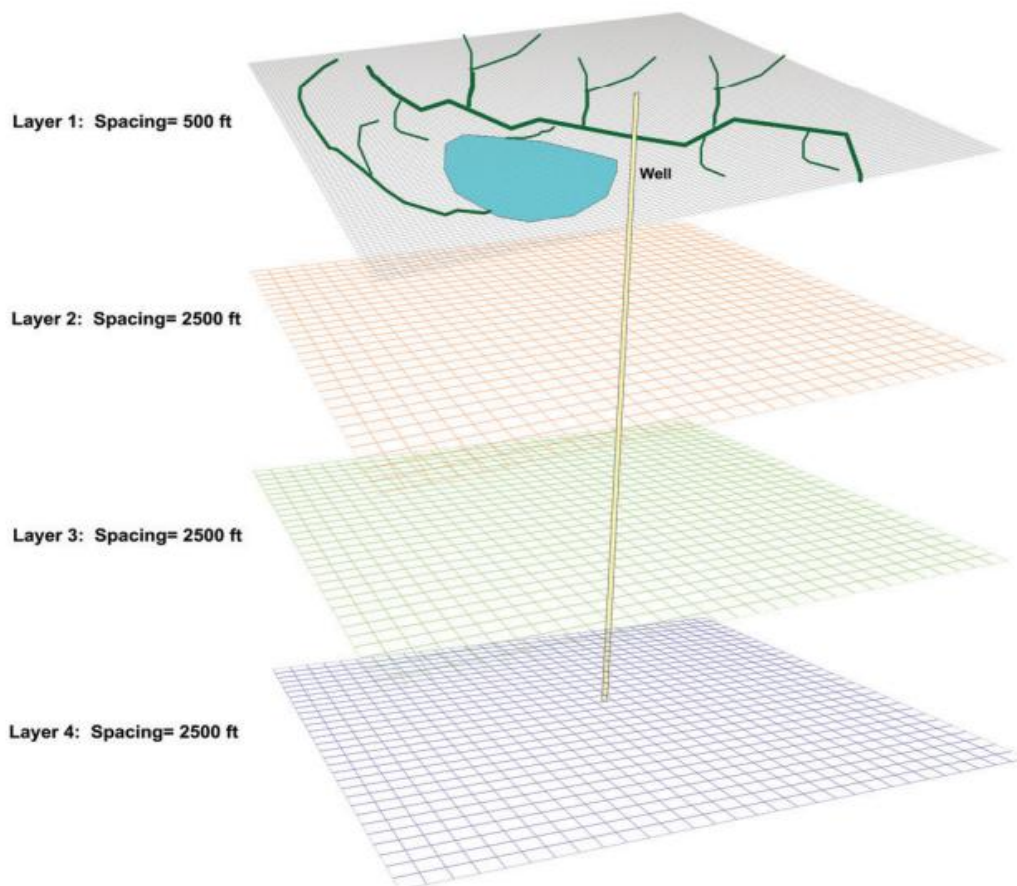
**Σχήμα 2.4.** Αναπαράσταση των υδραυλικών υψών με τις μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων. **(α)** Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων τα στοιχεία είναι τριγωνικά και τα υδραυλικά ύψη ορίζονται στους κόμβους του κάθε τριγωνικού στοιχείου **(β)** Στις πεπερασμένες διαφορές το υδραυλικό ύψος καθορίζεται μόνο σε συγκεκριμένους κόμβους του πλέγματος. (Πηγή: Anderson and Woessner, 2002)

### 2.3.4 Ευρέως διαδεδομένα μοντέλα ροής υπόγειων υδάτων και μεταφοράς ρύπων

---

Σε αυτό το κομμάτι παρουσιάζονται κάποια ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα προσομοίωσης τόσο της ροής υπογείων υδάτων όσο και της μεταφοράς ρύπων.

- **FEFLOW:** Πρόκειται για ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ροής σε 2 και 3 διαστάσεις, με εξάρτηση από την πυκνότητα, την μεταφορά ρύπων και την θερμότητα. Ορισμένες από τις δυνατότητές που περιλαμβάνει για προσομοίωση είναι: Φρεατικοί υδροφόροι ορίζοντες, υδροφόροι ορίζοντες σε υπερκείμενα επίπεδα, κινούμενα πλέγματα, ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη καθώς και μεταφορά ρύπων που εξαρτάται από την αλατότητα και την θερμοκρασία.
- **MODFLOW:** Είναι παγκοσμίως το πιο διαδεδομένο μοντέλο προσομοίωσης της ροής υπογείων υδάτων σε τρεις διαστάσεις κάνοντας χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών. Αναπτύχθηκε από την Υπηρεσία Γεωλογικών Μελετών των Η.Π.Α. στις αρχές της δεκαετίας του 1980. Η προσομοίωση βασίζεται σε κεντρικά μπλοκ πεπερασμένων διαφορών, ενώ τα στρώματα των υδροφορέων που προσομοιώνονται μπορούν να είναι κορεσμένα, ακόρεστα ή να περιλαμβάνουν έναν συνδυασμό και των δύο. Επίσης, προσομοιώνει ροές προς πηγάδια και αποχετεύσεις.
- **SUTRA:** Είναι ένα δισδιάστατο μοντέλο προσομοίωσης της ροής σε κορεσμένες ή ακόρεστες ζώνες με έμφαση στην διείσδυση αλμυρού νερού και την μεταφορά ενέργειας. Χρησιμοποιεί μια υβριδική μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών για την προσομοίωση.
- **FEMWATER:** Είναι ένα πλήρως τρισδιάστατο μοντέλο που βασίζεται στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, σχεδιασμένο για την προσομοίωση ροής και μεταφοράς ρύπων που εξαρτώνται από την πυκνότητα, σε κορεσμένες και ακόρεστες ζώνες. Δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης φαινομένων όπως η υφαλμύριση και η μεταφορά ρύπων εξαρτώμενων από την πυκνότητα. Το Femwater αποτελεί συνδυασμό των δύο μοντέλων 3DFEMWATER και 3DLEWASTE.
- **AQUA3D:** Αποτελεί ένα μοντέλο τριών διαστάσεων που χρησιμοποιεί τα πεπερασμένα στοιχεία Galerkin για την προσομοίωση της ροής και της μεταφοράς υπογείων υδάτων σε ανισότροπες συνθήκες και σε συνθήκες ομοιογενούς και μη ομοιογενούς ροής. (Karatzas,2017)



**Σχήμα 2.5.** Εφαρμογή του μοντέλου MODFLOW στο μοντέλο LMB (Lake Michigan Basin). Παράδειγμα ημιδομημένου διαχωρισμού στρωμάτων: Διαχωρισμός με μειωμένη ανάλυση σε βάθος αλλά με ομοιόμορφη κατανομή στοιχείων εντός κάθε στρώματος. Η επιφανειακή στρώση ενσωματώνει το δίκτυο επιφανειακών υδάτων, ενώ οι πυθμένες των στρωμάτων παρουσιάζονται σχηματικά ως επίπεδοι αλλά στην πραγματικότητα είναι ανώμαλοι. (Πηγή: Feinstein et al., 2017)

## 2.4 Το μοντέλο Princeton Transport Code (PTC)

---

### 2.4.1 Εισαγωγή στην χρήση του μοντέλου PTC και ιστορική αναδρομή

---

Το πρόγραμμα Princeton Transport Code (PTC) είναι ένα εξελιγμένο εργαλείο τρισδιάστατης προσομοίωσης για τη μελέτη της κίνησης υπόγειων υδάτων και τη μεταφορά ρύπων σε γεωλογικά στρώματα. Βασίζεται σε μια συνδυαστική προσέγγιση των αριθμητικών μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. (Cristina Di Salvo, 2022)

Το Princeton Transport Code δημιουργήθηκε ως αποτέλεσμα συνεργασιών μεταξύ πολλών ερευνητών στο Πανεπιστήμιο του Πρίνστον. Αρχικά, αναπτύχθηκε ένας δισδιάστατος κώδικας που σχεδιάστηκε από τους Pinder και Gray, ενώ στην συνέχεια ο D. Krishna Babu

επέκτεινε τον κώδικα, προσθέτοντας τη δυνατότητα τρισδιάστατης προσομοίωσης, επιτρέποντας έτσι πιο σύνθετες υδρογεωλογικές αναλύσεις (Babu et al., 1997).

## 2.4.2 Βασικές εξισώσεις του μοντέλου

Το PTC στηρίζεται στις αρχές του νόμου του Darcy και της διατήρησης της μάζας για να αναπαραστήσει τη ροή των υπόγειων υδάτων στην υπό εξέταση περιοχή. Έτσι, λοιπόν, ο κώδικας του επιλύει ένα σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για τον υπολογισμό των υδραυλικών υψών και των συνιστωσών της ταχύτητας ροής.

Το πρώτο βήμα είναι η επίλυση της εξίσωσης για τα υδραυλικά ύψη:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (2.15)$$

Αφού λυθεί η παραπάνω διαφορική εξίσωση υπολογίζονται οι ταχύτητες Darcy στις τρεις διαστάσεις x, y και z.

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2.16)$$

$$V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2.17)$$

$$V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (2.18)$$

Τελευταίο βήμα είναι η επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς ρύπων που περιγράφεται από την συγκέντρωση c:

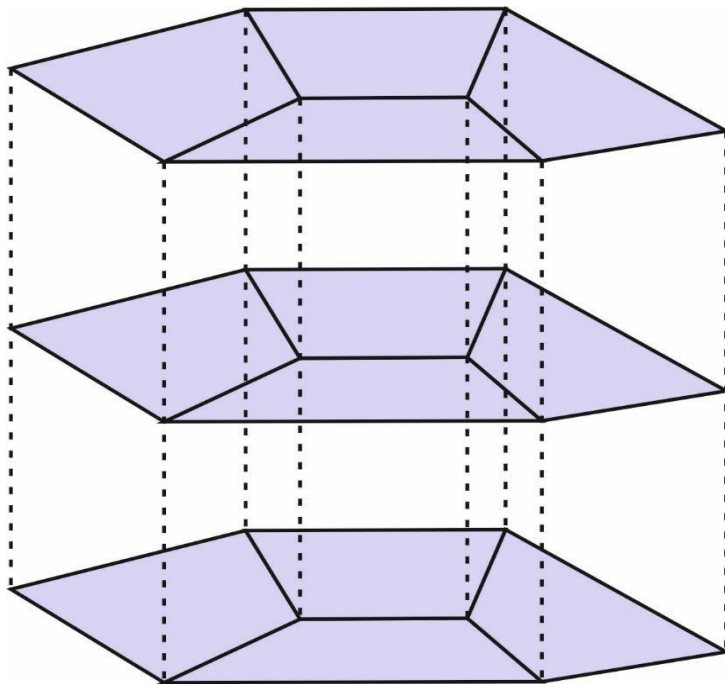
$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[ V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \quad (2.19)$$

Όπου:

- **h**: Το υδραυλικό ύψος [L]
- **K<sub>xx</sub>**: Η υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα x [ $LT^{-1}$ ]
- **K<sub>yy</sub>**: Η υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα y [ $LT^{-1}$ ]
- **K<sub>zz</sub>**: Η υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα z [ $LT^{-1}$ ]
- **S**: Ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας [ $L^{-1}$ ]
- **Q**: Ο ρυθμός άντλησης [ $L^3T^{-1}$ ]
- **V<sub>x</sub>, V<sub>y</sub>, V<sub>z</sub>**: Οι συνιστώσες της ταχύτητας Darcy στους άξονες x, y, και z [ $LT^{-1}$ ]
- **D<sub>xx</sub>, D<sub>xy</sub>, D<sub>xz</sub>, D<sub>yx</sub>, D<sub>yy</sub>, D<sub>yz</sub>, D<sub>zy</sub>, D<sub>zz</sub>**: Οι όροι της υδροδυναμικής διασποράς [ $L^2T^{-1}$ ]
- **c**: Η συγκέντρωση του ρύπου την χρονική στιγμή t στο σημείο (x, y, z) [ $\frac{M}{L^3}$ ]
- **c<sup>w</sup>**: Η συγκέντρωση του αντλούμενου νερού στο σημείο (x<sub>i</sub>, y<sub>i</sub>, z<sub>i</sub>)
- **θ**: Το πορώδες του υδροφορέα
- **E(c)**: Η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει τις ιδιότητες της χημικής προσρόφησης

### 2.4.3 Ο αλγόριθμος επίλυσης του μοντέλου PTC

Τα συστήματα των εξισώσεων (2.15)-(2.19) σχετίζονται με πολύπλοκα φυσικά συστήματα, ενώ η επίλυση τους συνήθως απαιτεί την χρήση των αριθμητικών μεθόδων. Σε συστήματα μεγάλης κλίμακας, η υπολογιστική προσπάθεια που απαιτείται για την αριθμητική διακριτοποίηση αυτών των τρισδιάστατων εξισώσεων είναι σημαντική. Η μέθοδος PTC χρησιμοποιεί έναν πρωτότυπο αλγόριθμο διαχωρισμού για την επίλυση των εξισώσεων σε τρεις διαστάσεις, μειώνοντας έτσι σημαντικά το υπολογιστικό κόστος. Ο αλγόριθμος βασίζεται στη διακριτοποίηση του πεδίου σε σχεδόν παράλληλα οριζόντια στρώματα. Σε κάθε στρώμα χρησιμοποιείται διακριτοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων [Pinder και Gray, 1977], η οποία καθιστά δυνατή την λεπτομερή αποτύπωση περιοχών με ακανόνιστο σχήμα. Η σύνδεση ανάμεσα στα στρώματα πραγματοποιείται κατακόρυφα με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Αυτός ο υβριδικός συνδυασμός των δύο μεθόδων καθιστά δυνατή την εφαρμογή της διαδικασίας διαχωρισμού. Σε κάθε χρονική επανάληψη, καθορισμένου χρόνου, οι υπολογισμοί χωρίζονται στα παρακάτω στάδια: Αρχικά επιλύονται ανεξάρτητα όλοι οι οριζόντιοι διαχωρισμοί των πεπερασμένων στοιχείων και στη συνέχεια οι κατακόρυφες εξισώσεις, μέσω των οποίων συνδέονται τα επίπεδα. (Babu et al.,1997)



**Σχήμα 2.6.** Αναπαράσταση οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων τοποθετημένων σε στρώσεις, συνθέτοντας τον τρισδιάστατο διαχωρισμό. (Πηγή: Babu et al.,1997)

## 2.5 Τρισδιάστατη Ροή Υπόγειας Ροής

---

### 2.5.1 Η βασική εξίσωση

---

Για να καθορίσει το μοντέλο Princeton Transport Code τα χαρακτηριστικά της ροής ενός υπόγειου συστήματος επιλύει την παρακάτω διαφορική εξίσωση ως προς την παράμετρο του υδραυλικού ύψους:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (2.20)$$

Όπου:

- **h**: Το υδραυλικό ύψος [*L*]
- ***K<sub>xx</sub>***: Η υδραυλική αγωγιμότητα στους άξονα *x* [*LT<sup>-1</sup>*]
- ***K<sub>yy</sub>***: Η υδραυλική αγωγιμότητα στους άξονα *y* [*LT<sup>-1</sup>*]
- ***K<sub>zz</sub>***: Η υδραυλική αγωγιμότητα στους άξονα *z* [*LT<sup>-1</sup>*]
- ***S***: Ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας [*L<sup>-1</sup>*]
- ***Q***: Ο ρυθμός άντλησης [*L<sup>3</sup>T<sup>-1</sup>*]
- ***δ***: Η συνάρτηση δέλτα του Dirac
- ***r***: Ο αριθμός των σημείων που περιλαμβάνουν πηγές ή καταβόθρες

Με την χρήση των μεθόδων των πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων το PTC επιλύει αριθμητικά εξίσωση (2.20), ενώ ο τελευταίος όρος της εξίσωσης για διευκόλυνση μας αναγράφεται ως *Q*. (Babu et al.,1997)

### 2.5.2 Οριακές συνθήκες

---

Μαθηματικά οι οριακές συνθήκες ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες: Οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένο υδραυλικό ύψος), Neumann (καθορισμένη ροή) και Cauchy (διαρροή) (Anderson, Woessner, 2002). Αυτές τις οριακές συνθήκες χρησιμοποιεί και το μοντέλο PTC στην εξίσωση ροής. Κατά την διάρκεια της προσομοίωσης υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής των συνθηκών από τον χρήστη ενώ η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι η μηδενική ροή. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει έναν περιορισμένο υδροφόρα, με αδιαπέραστες πλευρές και πυθμένα. Επίσης, η επιλογή διαφορετικών οριακών συνθηκών κατά μήκος της περιοχής ενδιαφέροντος που προσφέρει το πρόγραμμα, παρέχει την δυνατότητα προσομοίωσης διαφορετικών υδρολογικών συνθηκών. (Babu et al.,1997)

### 2.5.2.1 Καθορισμένο υδραυλικό ύψος (συνθήκες Dirichlet)

---

Σε αυτές τις συνθήκες τα υδραυλικά ύψη λαμβάνουν μια γνωστή τιμή κατά μήκος του ορίου αλλά οι τιμές τους μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με την τοποθεσία τους στον χώρο. Η ειδική περίπτωση που τα υδραυλικά ύψη παραμένουν σταθερά σε όλο το μήκος του ορίου είναι γνωστή και ως συνθήκη τύπου 1 (Anderson, Woessner, 2002). Τα όρια του σταθερού υδραυλικού ύψους καθορίζονται από συγκεκριμένους κόμβους και τις αντίστοιχες τιμές των υδραυλικών υψών στους κόμβους αυτούς. Ακόμα, οι γραμμές και στήλες των συντελεστών του πίνακα που αντιστοιχούν σε αυτούς τους κόμβους εξαιρούνται αυτόματα από τον αλγόριθμο. Με αυτόν τον τρόπο οι κόμβοι με σταθερό υδραυλικό ύψος απομακρύνονται αποτελεσματικά από την εξίσωση του πίνακα. Τελικά οι όροι που απομένουν είναι  $(N \times M - Nc)$  εξισώσεις, με  $(N \times M - Nc)$  αγνώστους, όπου  $Nc$  είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή ροής. (Babu et al., 1997)

### 2.5.2.2 Καθορισμένη ροή (συνθήκες Neumann)

---

Οι συνθήκες καθορισμένης ροής εφαρμόζονται όταν η παράγωγος του υδραυλικού ύψους κατά μήκος του ορίου είναι καθορισμένη. Με την εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων καθορίζονται με απλό τρόπο οι οριακές συνθήκες καθορισμένης ροής. Ειδικότερα μέσω του θεωρήματος Green, προκύπτει ένα οριακό μέλος (εξίσωση (2.7)), στο οποίο το  $q_n$  αντιπροσωπεύει την κάθετη ροή. Αν η ροή  $q_n$  θεωρηθεί σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους  $L$ , η ολοκλήρωση αυτής της συνθήκης καθορίζει τις κατανομές των κόμβων (σχήμα 2.8).

$$-\int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n w_i d\sigma \quad (2.21)$$

Επομένως, ο χρήστης εισάγει την ογκομετρική ροή σε έναν κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος του ορίου, ενώ παράλληλα οι ογκομετρικές ροές που προκύπτουν λόγω της άντλησης εισάγονται μαθηματικά με τον ίδιο τρόπο. Επίσης, για την εισαγωγή ομοιόμορφης διήθησης, ο κώδικας επιτρέπει τον καθορισμό μιας ροής διήθησης σε κάθε κόμβο. Η ολοκλήρωση για τον υπολογισμό της ογκομετρικής ροής σε όλη την περιοχή πραγματοποιείται αυτόματα από τον υπολογιστικό κώδικα. (Babu et al., 1997)

### 2.5.2.3 Τρίτου Τύπου (συνθήκες Cauchy)

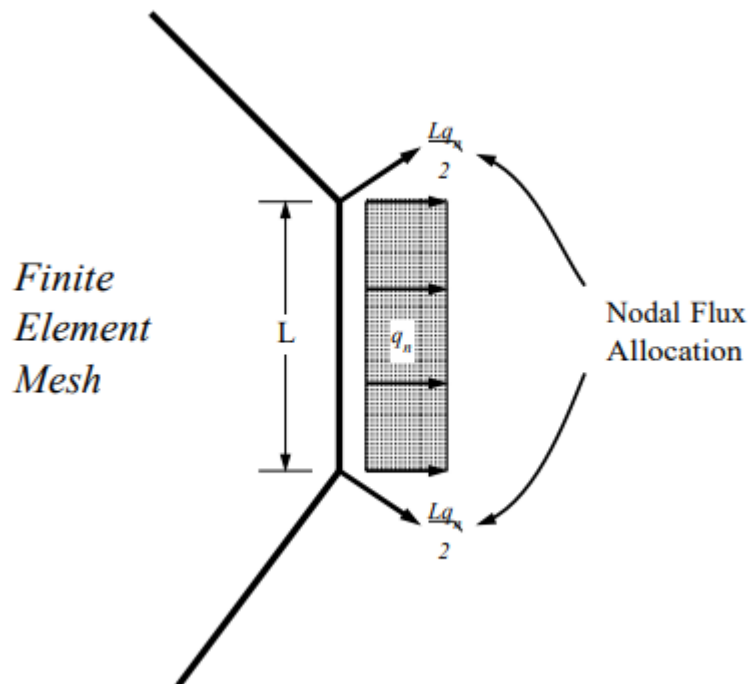
Οι οριακές συνθήκες της διαρροής αντικαθίστανται στις εξισώσεις του συστήματος με αποτέλεσμα να προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$Q = k_L(h_{j,L}^t - h_{j,k}^t) \quad (2.22)$$

Όπου:

- $h_{j,k}^t$ : Το άγνωστο υδραυλικό ύψος στον κόμβο  $j$ , στο στρώμα  $k$  την χρονική στιγμή  $t$
- $h_{j,L}^t$ : Το αντίστοιχο υδραυλικό ύψος στο σημείο αναφοράς της διαρροής
- $k_L$ : Η αγωγιμότητα διαρροής

Ο όρος "αγωγιμότητα διαρροής"  $k_L$  αναφέρεται στην αναλογία της υδραυλικής αγωγιμότητας με την απόσταση, προσδιορίζοντας έτσι την ικανότητα του υλικού να επιτρέπει την ροή μέσω των πόρων του υπό συνθήκες πίεσης. Η τιμή της αγωγιμότητας ενσωματώνεται στην επιφάνεια του υδροφόρου ορίζοντα και εκπροσωπεί έμμεσα την κάθετη διαρροή. Με την επιλογή της κατάλληλης σταθεράς  $k_L$ , η οποία καθορίζεται από τον χρήστη, μπορεί να καθοριστεί η κατεύθυνση της διαρροής, επιτρέποντας έτσι προσομοίωση της ροής σε διάφορες διευθύνσεις, ανάλογα με το υδρολογικό μοντέλο. (Babu et al.,1997)



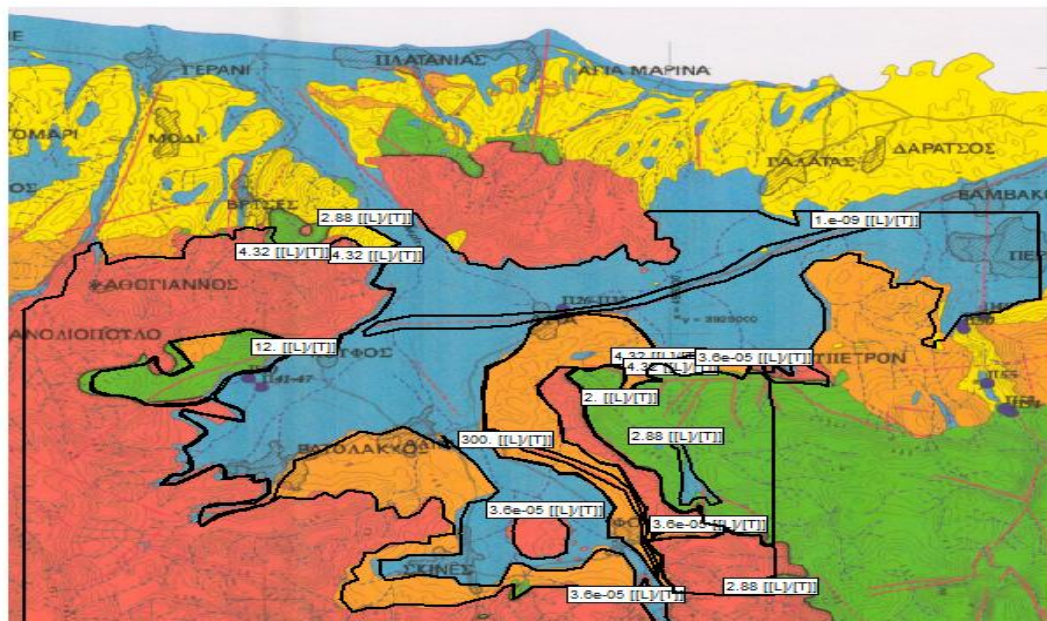
**Σχήμα 2.7.** Κατανομή της ροής  $q$  σε κόμβους κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους  $L$ . Στα γραμμικά στοιχεία η συνεισφορά κάθε κόμβου είναι ίσης βαρύτητας. (Πηγή: Babu et al.)



## 2.6 Μεθοδολογία κατασκευής μοντέλων υπόγειας ροής

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι κύριες φάσεις κατασκευής ενός μοντέλου υπόγειας ροής.

- **Αρχική φάση:** Το πρώτο βήμα για την κατασκευή ενός μοντέλου είναι η συλλογή όλων των διαθέσιμων πληροφοριών για την περιοχή ενδιαφέροντος που θα μοντελοποιηθεί. Αυτές οι πληροφορίες μπορεί να περιλαμβάνουν χάρτες, μελέτες, καθώς και επιπλέον πηγές που αναφέρονται στις μελέτες.
- **Πρώτη φάση:** Αξιοποιώντας τα δεδομένα που συγκεντρώθηκαν στο προηγούμενο στάδιο, είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά:
  - **Γεωλογία:** Για να επιτευχθεί μια ακριβής αναπαράσταση της γεωλογίας, είναι σημαντικό να εντοπιστούν τα δεδομένα των γεωτρήσεων που βρίσκονται στην περιοχή, καθώς και να συλλεχθούν γεωφυσικά δεδομένα. Με βάση αυτά, μπορεί να δημιουργηθεί ένα θεωρητικό μοντέλο στρωματογραφίας, που θα περιλαμβάνει δεδομένα σχετικά με τη λιθολογία της περιοχής. Έτσι, θα καθοριστούν οι γεωλογικοί σχηματισμοί, οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες x,y,z και το πορώδες των γεωλογικών στρωμάτων.
  - **Παράμετροι υδροφορέων:** Για να προσδιοριστούν οι παράμετροι ενός υδροφορέα, είναι απαραίτητο να συγκεντρωθούν τόσο τα δεδομένα άντλησης όσο και οι συντελεστές υδραυλικής αγωγιμότητας που έχουν προκύψει από αυτές. Επίσης, απαιτείται συλλογή πληροφοριών, όπως αναλύσεις κοκκομετρίας, περιεκτικότητα σε ενεργό άνθρακα και εργαστηριακά αποτελέσματα, σχετικά με την υδραυλική αγωγιμότητα. Στην περίπτωση που οι πληροφορίες είναι περιορισμένες, γίνεται χρήση λιθολογικών δεδομένων και χαρτών.



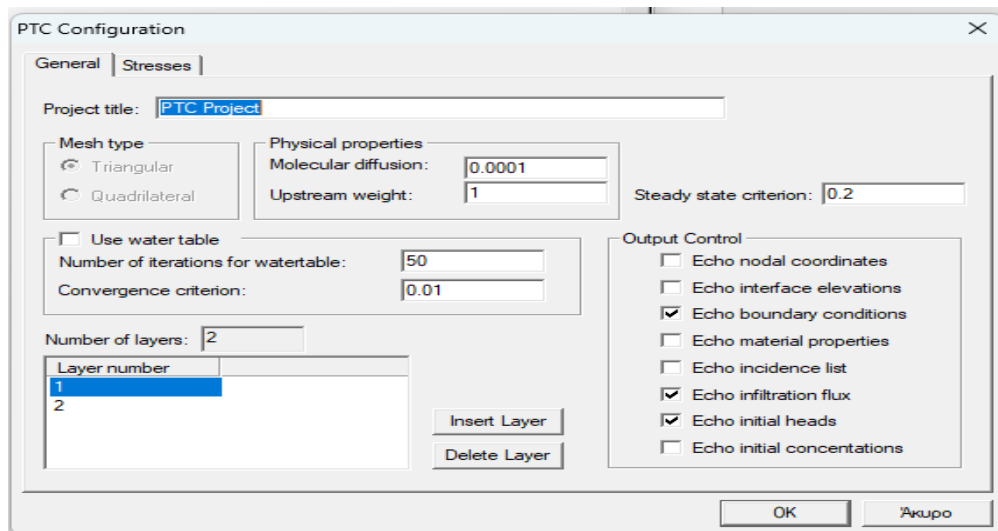
**Σχήμα 2.8.** Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας των δύο στρωμάτων και των ρηγμάτων του υπό μελέτη προβλήματος

- **Υδρολογικές Επιβαρύνσεις:** Ο προσδιορισμός τους απαιτεί τον εντοπισμό των γεωτρήσεων που αντλούν. Οι ρυθμοί εκροής πρέπει να προσδιορίζονται για κάθε γεωτρήση, εκτός από αυτές που βρίσκονται κοντά η μία στην άλλη, που ομαδοποιούνται. Επίσης, πρέπει να συγκεντρωθούν μετεωρολογικά δεδομένα, όπως οι βροχοπτώσεις, για τον υπολογισμό της καθαρής εισροής. Παράλληλα, πρέπει να εντοπιστούν και να καταγραφούν στον χάρτη τυχόν διαρροές από σωλήνες, αποχετεύσεις ή άλλες πηγές.
- **Οριακές συνθήκες:** Είναι απαραίτητο να εντοπιστούν οι υδάτινοι πόροι που λειτουργούν ως πηγές ή καταβόθρες, πηγές με γνωστές εκροές και λίμνες. Πρόκειται για τις συνθήκες, τύπου 1 (Dirichlet) με καθορισμένο υδραυλικό ύψος, τύπου 2 (Neumann) με καθορισμένη ροή και τύπου 3 (Cauchy) για συνθήκες διαρροής. Στο μοντέλο μας χρησιμοποιήθηκαν και στα δύο στρώματα οι συνθήκες καθορισμένης ροής (Neumann).

Parameter	Value	Units
BC Type L1	2	1 or 2
BC Stress1	-98721	
BC Stress2	-95595	
BC Stress3	-88663	
BC Stress4	-65805	
BC Stress5	-47388	

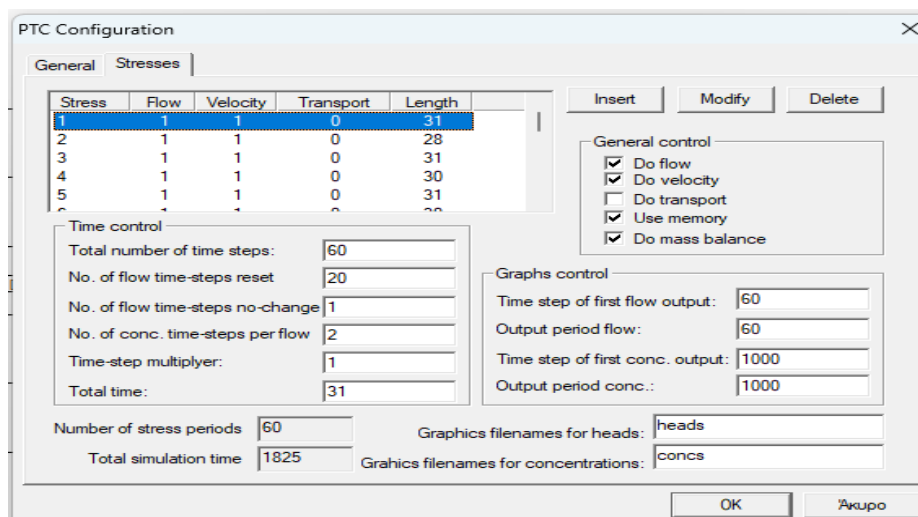
**Σχήμα 2.9.** Οι οριακές συνθήκες τύπου δύο στο πρώτο στρώμα και οι αντλήσεις ενός πηγαδιού

- **Δεύτερη φάση:** Αυτή η φάση αφορά τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου, τα οποία περιλαμβάνουν τη γεωμετρική διάταξη του μοντέλου, το πλέγμα και τα χρονικά βήματα.
  - **Γεωμετρία:** Η περιοχή του μοντέλου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την περιοχή μελέτης και αν είναι δυνατόν, να συμπίπτει με τα υδρολογικά όρια. Αν δεν υπάρχουν συγκεκριμένα όρια βασιζόμαστε σε κάποιο όριο με σταθερή ροή.
  - **Πλέγμα:** Σε αυτό το στάδιο οι πιο συνηθισμένες προσεγγίσεις είναι τα πεπερασμένα στοιχεία και οι πεπερασμένες διαφορές. Στη δική μας περίπτωση χρησιμοποιήθηκε τριγωνικό πλέγμα για καλύτερη ακρίβεια.



Σχήμα 2.10. Η επιλογή του τριγωνικού πλέγματος και των δυο στρωμάτων στο υπό μελέτη πρόβλημα.

- **Χρονική προσομοίωση:** Όταν προσομοιώνεται η μεταβατική ροή υπόγειων υδάτων λόγω αντλήσεων, απαιτείται ένα μικρό χρονικό βήμα. Το τελευταίο μπορεί να αυξάνεται όσο προχωρά η προσομοίωση, εφόσον δεν εισάγονται νέες υδρολογικές επιβαρύνσεις. Ο πολλαπλασιαστής του χρονικού βήματος δεν πρέπει να ξεπερνά το 1,5. Στην περίπτωση μας ο πολλαπλασιαστής αυτός έλαβε την τιμή 1, ενώ η χρονική περίοδος της μοντελοποίησης πραγματοποιήθηκε για τα υδρολογικά έτη 2017-2021, δηλαδή 60 χρονικές περιόδους.



Σχήμα 2.11. Οι χρονολογικές περίοδοι (stresses) του PTC

- **Τρίτη φάση:** Αυτή η φάση περιλαμβάνει την βαθμονόμηση του μοντέλου. Οι εποχιακές μεταβολές του υδροφόρου ορίζοντα θα πρέπει να συγκρίνονται με αυτές του πεδίου. Το ίδιο ισχύει για τα προσομοιωμένα επίπεδα του νερού, τις εκροές και τις εισροές. (Karatzas,2017)

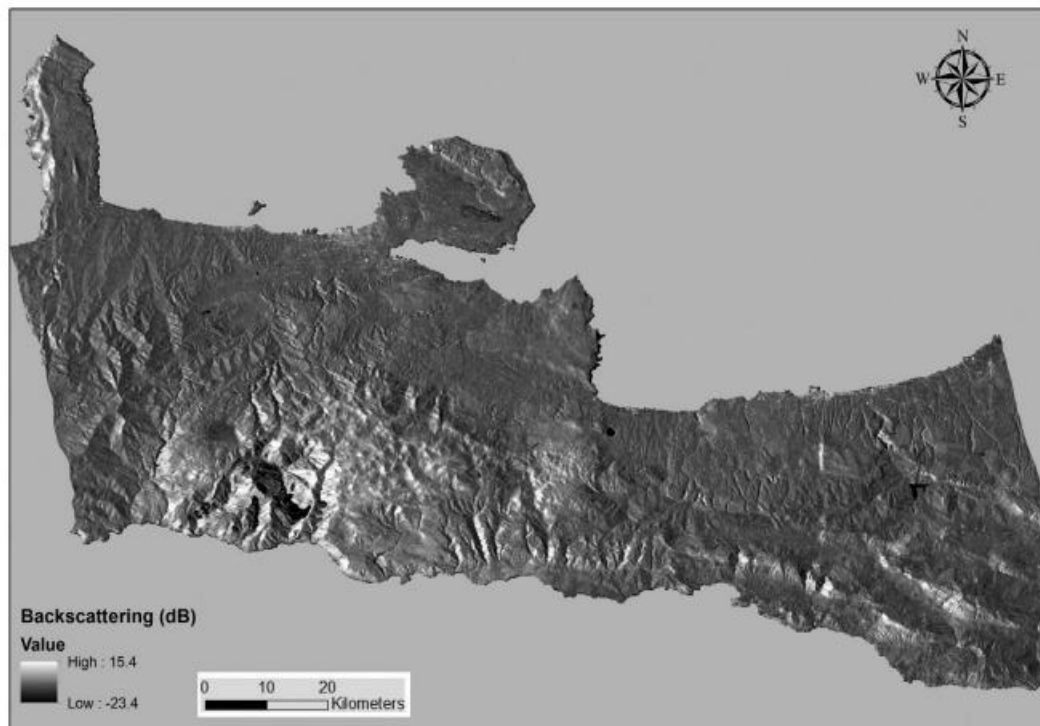
### 3. Περιοχή Μελέτης

---

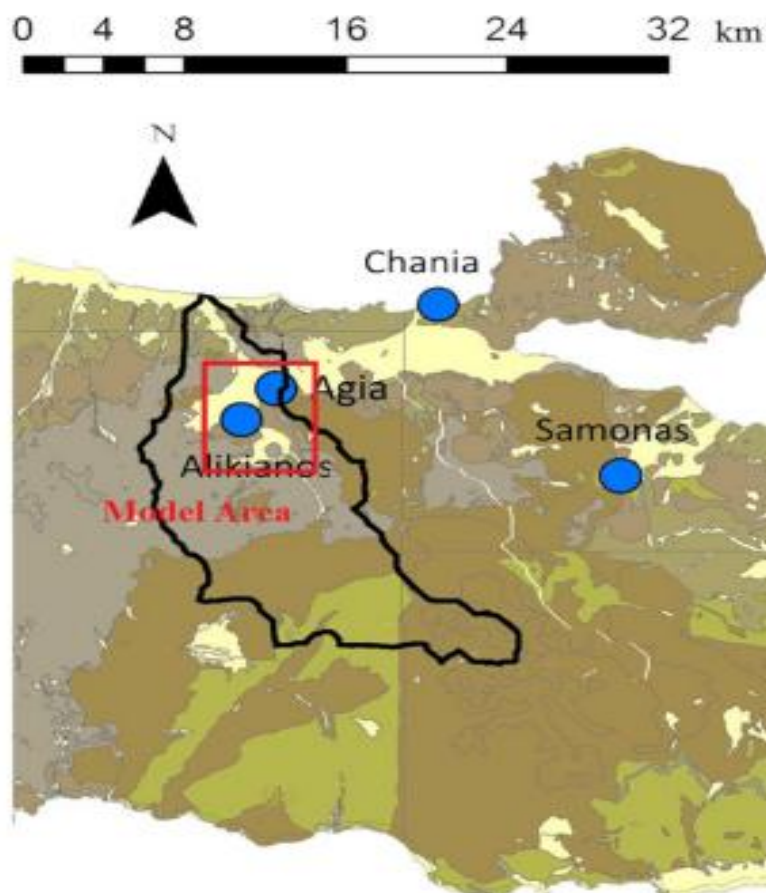
#### 3.1 Οριοθέτηση της περιοχής μελέτης

---

Η προσομοίωση του κώδικα Princeton Transport Code πραγματοποιήθηκε στον υπόγειο υδροφορέα της Αγκιάς που βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή του Δήμου Χανίων στη Δυτική Κρήτη. Αν και πρόκειται για είναι μια τεχνητή λίμνη που εκτείνεται σε μια περιοχή 450 ha, φιλοξενεί μια από τις πιο ποικιλόμορφες κοινότητες υγροτόπων στην Κρήτη. Ανατολικά, το ρέμα Ξεκολωμένος (Xekolomenos stream) τροφοδοτεί τη λίμνη με νερό, ενώ δυτικά η λίμνη τροφοδοτείται από υπόγειες πηγές που προέρχονται από τον ποταμό Κερίτη. Αποτελεί μέρος της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη. (Alexakis et al.,2008)



**Χάρτης 3.1** Ραδιομετρικά και γεωμετρικά διορθωμένη εικόνα της Δυτικής Κρήτης (Πηγή: Alexakis et al.,2008)



**Χάρτης 3.2.** Απεικόνιση της περιοχής μελέτης. (Πηγή: Staboultzidis et al.,2017)

Ο ποταμός Κερίτης βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της Περιφερειακής Ενότητας Χανίων. Πηγάζει από τα Λευκά Όρη και εκβάλλει στη Θάλασσα της Κρήτης. Η μέση ροή του νερού είναι  $3.500 \text{ m}^3/\text{h}$ , με μεγάλες διακυμάνσεις μεταξύ των χειμερινών και καλοκαιρινών μηνών. Το συνολικό μήκος του κύριου τμήματος του ποταμού είναι περίπου 22 χιλιόμετρα. (Parafilippaki et al.,2008)

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη περιλαμβάνει δύο επιμέρους λεκάνες απορροής: Την λεκάνη του ποταμού Θερίσου και την λεκάνη του ποταμού Κερίτη.

Η έκταση της λεκάνης απορροής του Θερίσου υπολογίστηκε σε  $60 \text{ km}^2$ , ενώ ο κύριος ποταμός της λεκάνης είναι ο εποχικός ποταμός Κλαδισσός (Nerantzaki and Nikolaidis, 2020). Απέχει από την πόλη των Χανίων περίπου  $3 \text{ km}$  και ανήκει στους δήμους Χανίων, Ελευθερίου Βενιζέλου, Θερίσου και Κεραμίων. (Karatzas and Nikolaidis,2010)

Η λεκάνη απορροής του Κερίτη καλύπτει έκταση  $16.036 \text{ ha}$  αποτελώντας την μεγαλύτερη υδρολογική λεκάνη των Χανίων. Απέχει από την πόλη των Χανίων περίπου  $15 \text{ km}^2$ . Το μεγαλύτερο μέρος της βρίσκεται στον Δήμο Μουσούρων, ενώ περιλαμβάνει επίσης περιοχές που ανήκουν στους Δήμους Πλατανιά, Νέας Κυδωνίας, Χανίων και Ελευθερίου Βενιζέλου. Περιλαμβάνει 10 χωριά, με τον πληθυσμό να ανέρχεται περίπου στους 7.000 κατοίκους. Τα χωριά αυτά είναι: Βατόλακκος, Μεσκλά, Σκηνές, Κουφός, Αλικιανός, Ορθόνιο, Λάκκοι, Βρύσσει, Αγκιά, Καρές. (Parafilippaki et al.,2008)





**Χάρτης 3.3.** Τοποθεσία της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη. (Οι αριθμοί στους κύκλους δείχνουν τα σημεία δειγματοληψίας επιφανειακών υδάτων) (Πηγή: Alexakis et al., 2008)

### 3.2 Περιγραφή της περιοχής μελέτης

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Κερίτη στην αρχαιότητα είχε το όνομα Ιορδανός. Έπειτα, έλαβε το όνομα Καιρίτης, λόγω των ορμητικών νερών που τον χαρακτηρίζουν και κατά την γερμανική κατοχή ονομάστηκε Κερίτης λόγω των κεριών που άναψαν οι κάτοικοι των Χανίων προς τιμή 397 ατόμων που θυσιάστηκαν.

Αποτελεί την κύρια πηγή πόσιμου νερού για την πόλη των Χανίων, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα σημαντική. Την περιοχή διασχίζει ο ποταμός Κερίτης, ο οποίος μεταφέρει νερό από τα Λευκά Όρη σε υψόμετρο περίπου 1900 μέτρων και καταλήγει στη θάλασσα αφού περάσει από την περιοχή του Πλατανιά. Η περιοχή αυτή, μαζί με τη λίμνη Αγκιάς, εντάσσονται στο δίκτυο προστατευόμενων περιοχών NATURA 2000. Πρόκειται για έναν τυπικό μεσογειακό ποταμό αφού έχει εποχική ροή. Επίσης, η λεκάνη απορροής του Κερίτη συμβάλλει στη δημιουργία σημαντικών υπόγειων και επιφανειακών υδάτινων πόρων στην ευρύτερη περιοχή.

Η λίμνη της Αγκιάς κατασκευάστηκε την περίοδο 1927–1928 σε παραπόταμο του Κερίτη. Οι εισροές που δέχεται προέρχονται από πηγές, ανάντη ποτάμια ή ρέματα και από το υδρογραφικό δίκτυο. Αντίθετα, οι εκροές περιλαμβάνουν άντληση νερού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και ύδρευσης, καθώς και απώλειες λόγω εξάτμισης και διήθησης από

τον πυθμένα της λίμνης (Alexis-Georgios Staboultzidis et al.,2017). Η λίμνη ερημοποιήθηκε πλήρως το 2005 λόγω υπεράντλησης. (Alexakis et al.,2008)

### 3.2.1 Ρύπανση και χρήση γης

---

Στην περιοχή μελέτης η πλειονότητα των κατοίκων απασχολείται με την καλλιέργεια εσπεριδοειδών, την ελαιοκαλλιέργεια, την κτηνοτροφία ενώ ένα κομμάτι του πληθυσμού απασχολείται στο κομμάτι του τουρισμού. Η καλλιέργεια αυτών των ειδών απαιτεί μεγάλες ποσότητες υδάτινων πόρων μέσω της άντλησης υπογείων υδάτων από τους υδροφορείς. Επομένως, οι υδατικοί πόροι της περιοχής αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις λόγω των αυξημένων αναγκών για άρδευση και τουρισμό, ειδικά κατά την ξηρή καλοκαιρινή περίοδο, όπου η διαθεσιμότητα του νερού είναι περιορισμένη. Η γεωργία αποτελεί τον μεγαλύτερο καταναλωτή νερού, καλύπτοντας περίπου το 84,5% της συνολικής χρήσης, ενώ το υπόγειο νερό αποτελεί την κύρια πηγή νερού, καλύπτοντας πάνω από το 95% των αναγκών της περιοχής για οικιακή και γεωργική χρήση. Τις τελευταίες δεκαετίες, η αύξηση της ζήτησης για νερό άρδευσης οδήγησε σε σημαντική αύξηση του αριθμού γεωτρήσεων. Μέχρι τη δεκαετία του 1990, πολλοί υπόγειοι (φρεατικοί) υδροφορείς άρχισαν να εμφανίζουν σημάδια εξάντλησης, με αποτέλεσμα να ανοίγονται πιο βαθιές γεωτρήσεις για την εξασφάλιση υδατικών πόρων. Η εξάρτηση αυτή, από βαθιές γεωτρήσεις και η μη βιώσιμη διαχείριση των υδάτων έχουν επιφέρει επιδείνωση της ποιότητας σε ορισμένους παράκτιους υδροφορείς, με το φαινόμενο της αλάτωσης και της ρύπανσης με νιτρικά να έχουν εξελιχθεί σε σοβαρά προβλήματα.(Markonis et al.,2016)

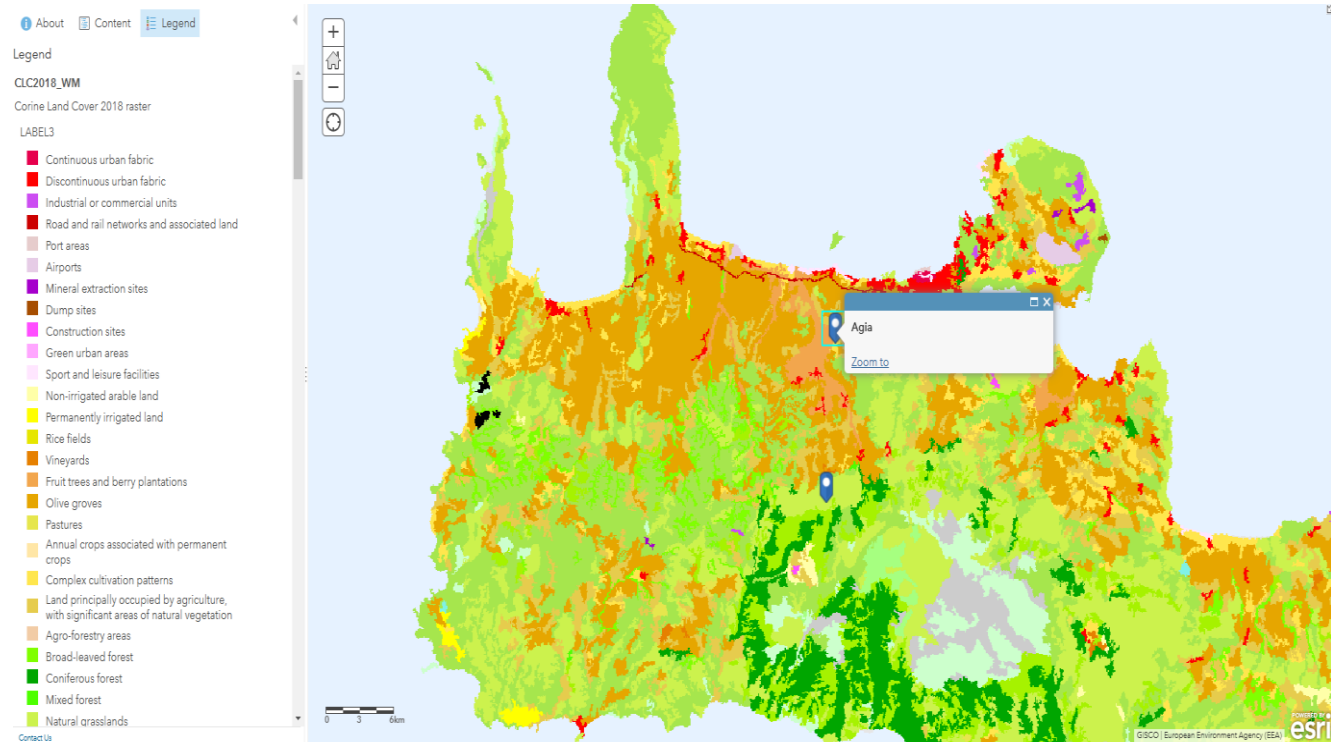
Οι απειλές που αντιμετωπίζει η περιοχή του κάμπου Χανίων οφείλεται κυρίως στα απόβλητα των μονάδων παραγωγής ελαιόλαδου και στα νεκροταφεία. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία παραγωγής ελαιόλαδου δημιουργεί μεγάλες ποσότητες οργανικών αποβλήτων, πλούσιων σε φαινόλες και άλλες επικίνδυνες ουσίες. Λόγω του τρόπου διαχείρισης τους συχνά αποθηκεύονται σε λίμνες, με αποτέλεσμα να προκαλείται εκτεταμένη ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων υδάτων, ενώ συγχρόνως κινδυνεύει η υγεία των ανθρώπων και των ζώων. Η απειλή ρύπανσης από τα νεκροταφεία οφείλεται κυρίως στη διήθηση των προϊόντων αποσύνθεσης (αμμωνία και διοξείδιο του άνθρακα) στα υπόγεια ύδατα. Έτσι κάτω από τα νεκροταφεία ανιχνεύονται συχνά υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου, νιτρικών, νιτρωδών και αμμωνίου. (Staboultzidis et al.,2017)

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις βασικές χρήσεις γης που λαμβάνουν χώρα στην λεκάνη απορροής του Κερίτη:

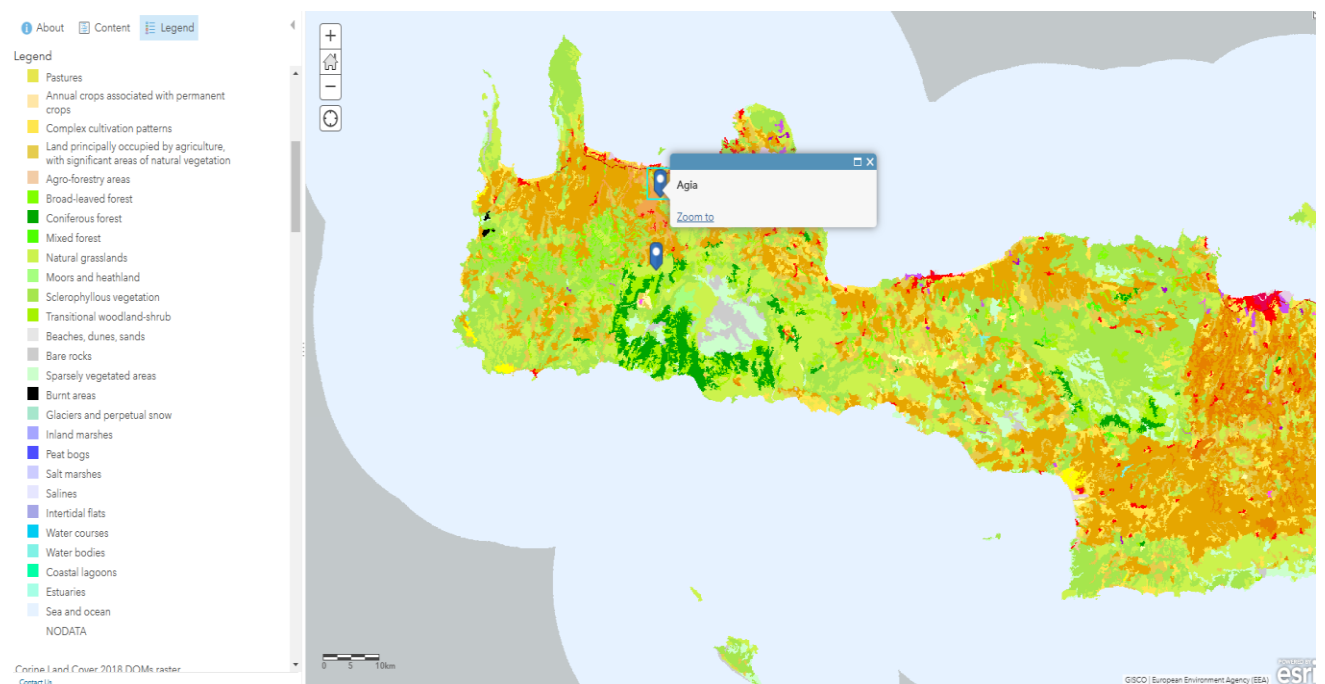
Χρήσεις γης	Ποσοστό
Σκληρόφυλλη βλάστηση	35%
Αγροτικές εκτάσεις	10.73%
Σύνθετες πρωτότυπες καλλιέργειες	10.25%
Περιοχές με καρποφόρα δέντρα	10.23%
Χερσότοποι	10.20%
Ελαιώνες	7.40%
Φυσικά λιβάδια	7.21%
Περιοχές με αραιή βλάστηση	4.49%
Δάση	3.45%
Αστικές περιοχές	0.47%
Αμμουδιές	0.37%
Επιφανειακά Ύδατα	0.2%

**Πίνακας 3.1.** Βασικές χρήσεις γης της λεκάνης απορροής του ποταμού Κερίτη (Πηγή: Karatzas and Nikolaidis, 2010)





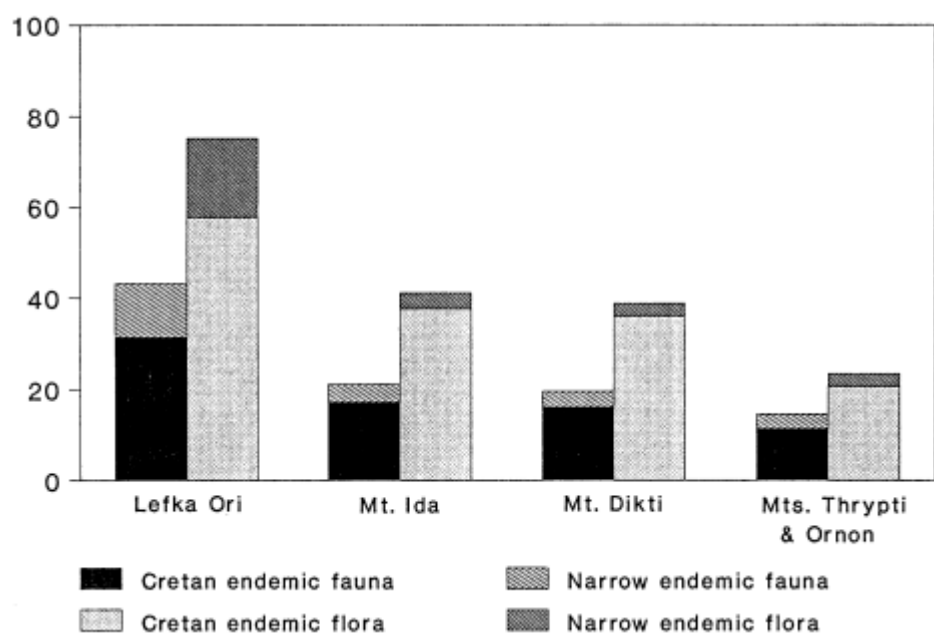
**Χάρτης 3.4.** Κάλυψη της γης της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Corine Land Cover)



**Χάρτης 3.5.** Κάλυψη της γης της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Corine Land Cover)

### 3.2.2 Φυσικό Περιβάλλον

Η Δυτική Κρήτη φιλοξενεί περισσότερα ενδημικά είδη από την Κεντρική Κρήτη, παρόλο που η έκτασή της είναι μικρότερη. Μια εξήγηση για αυτό το φαινόμενο είναι ότι το ποσοστό των ενδημικών ειδών που εμφανίζονται σε ορεινές περιοχές είναι εξαιρετικά υψηλό, με περίπου 70% των ενδημικών φυτών και 56% των ενδημικών ζώων να ζουν κυρίως σε τέτοια υψόμετρα. Επιπλέον, το γεγονός ότι το δυτικό κομμάτι της νήσου έχει πιο ευνοϊκό κλίμα συνέβαλε στην μη υποβάθμιση της χλωρίδας και της πανίδας της περιοχής. (Legakis and Kypriotakis, 1994)



**Σχήμα 3.1.** Το ποσοστό των ενδημικών ειδών που βρίσκονται σε ορεινές περιοχές, σε σχέση με το συνολικό αριθμό των ενδημικών ειδών της Κρήτης (Πηγή: Legakis and Kypriotakis, 1994)

#### 3.2.2.1 Χλωρίδα

Ειδικότερα, η λίμνη της Αγκιάς αποτελεί έναν σημαντικό υδροβιότοπο της Δυτικής Κρήτης με πλούσια χλωρίδα συμβάλλοντας σημαντικά στην ενίσχυση της βιοποικιλότητας της περιοχής. Αν και πρόκειται για τεχνητή λίμνη, έχει προσελκύσει μια πληθώρα υδρόβιων και παρόχθιων ειδών βλάστησης. Τα υδρόβια είδη χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

Σε βάθος από 1 – 3 m η βλάστηση αποτελείται τρία είδη:

- *Potamogeton lucens* (ποταμογείτονες),
- *Ceratophyllum demersum* (κερατόφυλλα),
- *Myriophyllum spicatum* (μυρόφυλλα)

Σε βάθη έως 50 m και κατά μήκος της λίμνης της Αγυιάς:

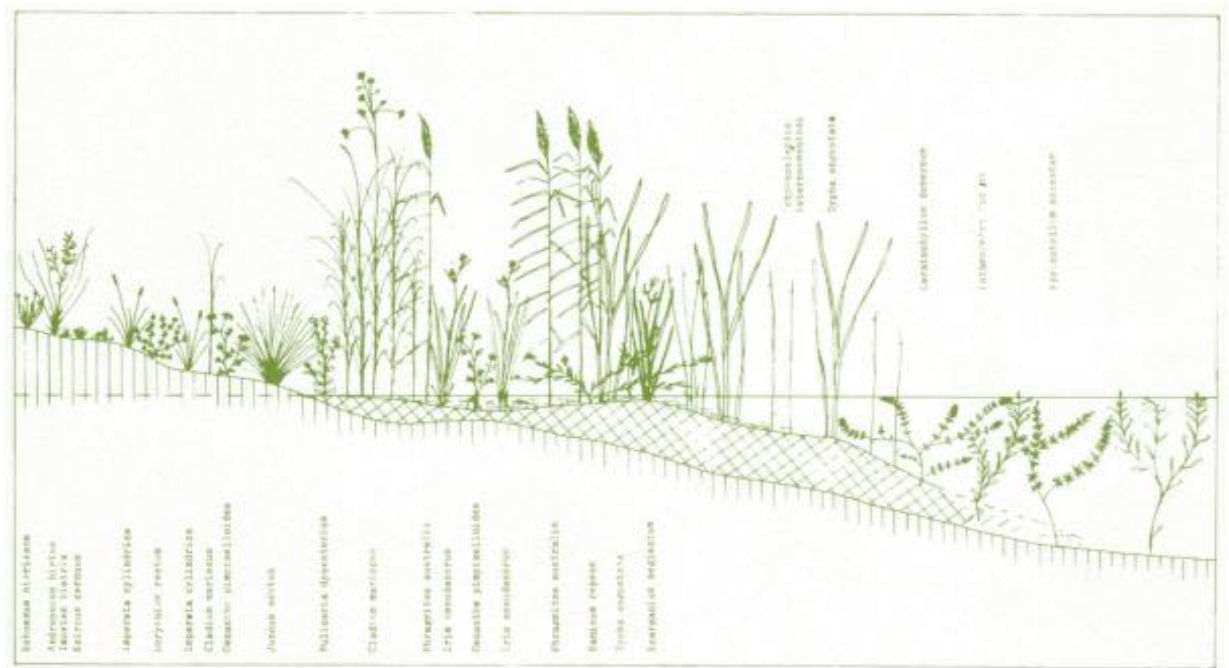
- *Potamogeton trichoides*,
- *Zannichellia palustris*,
- *Spartanium neglectum*

Σε βάθη από 6 – 60 cm και κατά μήκος της λίμνης κοντά στις εκβολές του ποταμού Κερίτη:

- *Polygonum salicifolium*,
- *Apium nodiflorum*,
- *Typha angustata*,
- *Scirpus tabernaemontani*,
- *Phragmites australis*,
- *Panicum repens*,
- *Spartanium neglectum*,
- *Juncus articulatus* ,
- *Eleocharis palustris*

Γύρω από την λίμνη:

- *Carex otrubae*,
- *Dorycnium rectum*,
- *Convolvulus arvensis*,
- *Lythrum junceum*,
- *Juncus effusus*,
- *Carex hispida*,
- *Cladium mariscus*
- *Arundo donax*,
- *Oxalis pes-caprae*,
- *Rumex conglomeratus*
- *Platanus orientalis* (πλατάνια)
- *Equisetum telmateia*
- *Nerium oleander* (πικροδάφνες)
- *Salix* (ιτιές)
- *Trifolium repens* (τριφύλλι)
- *Anthemis cotula* (άνθεμις)
- *Eucalyptus tostrata* (ευκάλυπτοι)
- *Rubus sanctus* (βάτα)
- *Nerium oleander* (πικροδάφνες)  
( Gradstein and Smittenberg, 1977)



**Σχήμα 3.2.** Η υδρόφιλη βλάστηση ανά ζώνες στην λίμνη της Αγκιάς. (Πηγή: Gradstein and Smittenberg, 1977)

### 3.2.2.2 Πανίδα

Η περιοχή μελέτης και ειδικότερα η λίμνη της Αγκιάς είναι μία από τις κυριότερες τοποθεσίες στη Δυτική Κρήτη για την παρατήρηση ποικίλων ειδών πτηνών, συμβάλλοντας στην προστασία της βιοποικιλότητας της περιοχής.

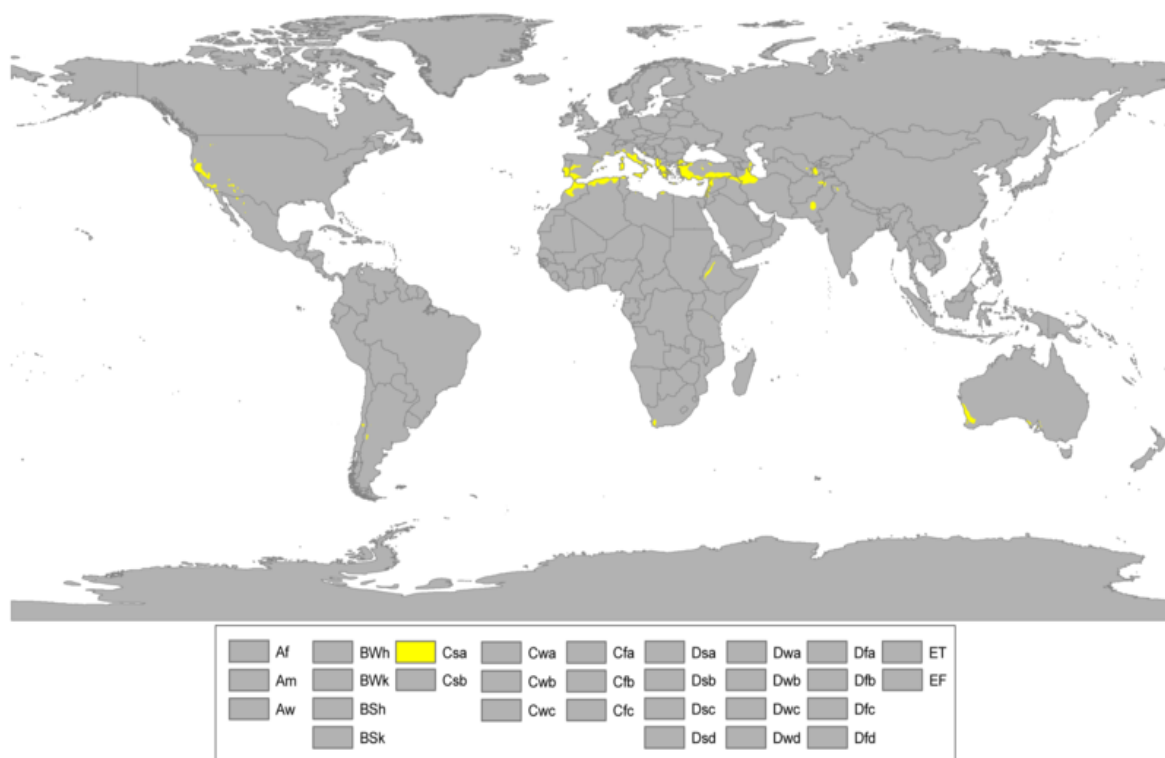
Ενδεικτικά, παρατίθενται ορισμένα είδη πτηνών που απαντώνται συχνά στην περιοχή: Αγριόπαπιες, βαλτόπαπιες, σταυραετός, μαυροπετρίτης, κραυγαετός, φιδαιτός, μαυροκιρκίνεζο, θαλασσοσφυριχτής, διπλομπεκάτσινο, ψευταηδόνι, μαυροβουχτάρι, μουστακοποταμίδα, λαγγόνα, λευκοτσικνιάς, χαλκόκοτα.

Επίσης, συναντώνται σημαντικοί πληθυσμοί θηλαστικών όπως λαγός, δασοποντικός, ποντικός, αρουραίος, σκαντζόχοιρος, μυγαλή και αμφίβια με κυρίαρχα τον κρητικό βάτραχο, δενδροβάτραχο, νεροχελώνα, φρύνο ενώ τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση του επικίνδυνου Αμερικάνικου βουβαλοβατράχου. Τα ερπετά αποτελούν σημαντικό κομμάτι της πανίδας της περιοχής. Συναντώνται, τρανόσαυρα, σπιτικό σαμιαμίθι, νερόφιδο, οχέντρα και δενδρογαλιά. (Karatzas and Nikolaidis, 2010)

### 3.3 Κλιματολογικά στοιχεία

Σύμφωνα με την κατάταξη Korppen-Geiger το κλίμα της νήσου Κρήτης ανήκει στην κλίμακα Csa και χαρακτηρίζεται ως υγρό υποτροπικό. Το κύρια χαρακτηριστικά του κλίματος αυτού είναι ζεστά, ξηρά καλοκαίρια καθώς και ψυχροί, βροχεροί χειμώνες. Αυτός ο τύπος κλίματος εντοπίζεται σε περιοχές της Βόρειας Αφρικής και Αμερικής (Pavlaki and Lionis,2013). Η Κρήτη βρίσκεται ανάμεσα στη Μεσογειακή και τη Βορειοαφρικανική κλιματική ζώνη. Το βόρειο τμήμα του νησιού είναι γενικά πιο υγρό από το νότιο, ενώ τα δύο μέρη διαχωρίζονται από μια κεντρική οροσειρά, όπου το χειμώνα είναι σύνηθες να σημειώνονται χιονοπτώσεις. Στα πεδινά, οι χειμώνες είναι πιο ήπιοι, ενώ το καλοκαίρι η θερμοκρασία κυμαίνεται κατά μέσο όρο στους 30°C, με τις μέγιστες τιμές να φτάνουν έως και τους 40°C. Η νότια ακτή της Κρήτης καταγράφει υψηλότερες μέσες και μέγιστες θερμοκρασίες καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, με το κλίμα, τη βλάστηση και το τοπίο της περιοχής να θυμίζουν περισσότερο αυτά της Μεσογειακής Αφρικής. (Markonis et al.,2016)

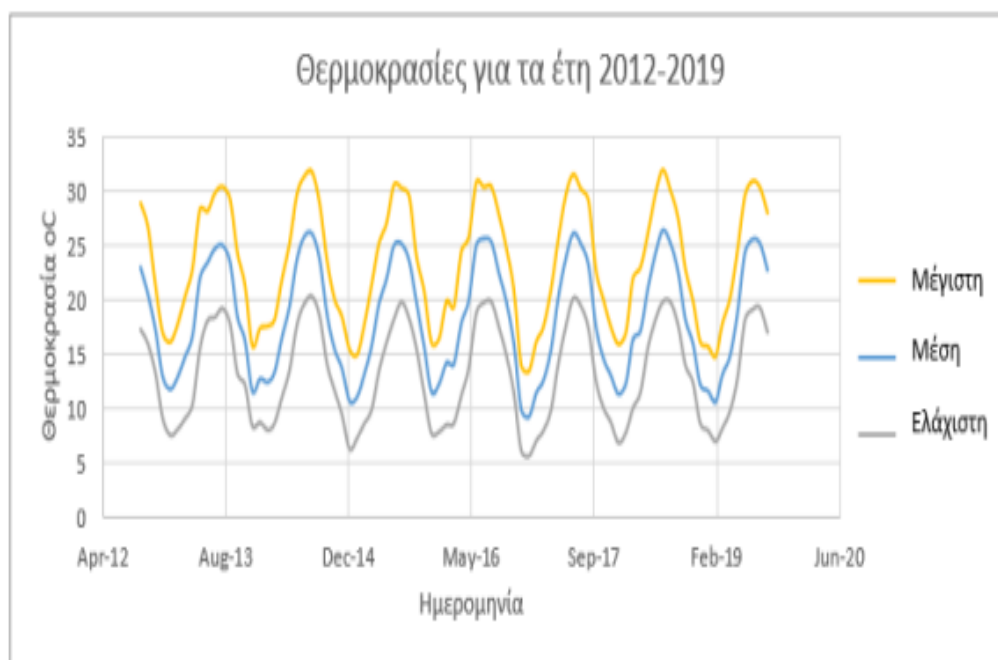
Στην περιοχή μελέτης ο χαρακτήρας του κλίματος είναι μεσογειακός με ξηρά καλοκαίρια και βροχερούς χειμώνες. Ειδικότερα, η διάρκεια του χειμώνα ξεκινά από τα μέσα Νοεμβρίου έως και τα μέσα Μαρτίου με νότιους και βόρειους ανέμους. Οι βόρειοι άνεμοι συμβάλουν καθοριστικά στις βροχοπτώσεις και στις χιονοπτώσεις που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή των Χανίων, ενώ οι νότιοι άνεμοι βοηθούν στην διατήρηση των υψηλών θερμοκρασιών της περιοχής. Η διάρκεια του καλοκαιριού υπολογίζεται στους 5 μήνες, από τις αρχές του Μαΐου έως και τα τέλη του Σεπτεμβρίου. Κατά την χρονική περίοδο αυτή οι άνεμοι που πνέουν στην περιοχή είναι βόρειοι και βορειοδυτικοί. (Pavlaki and Lionis,2013)



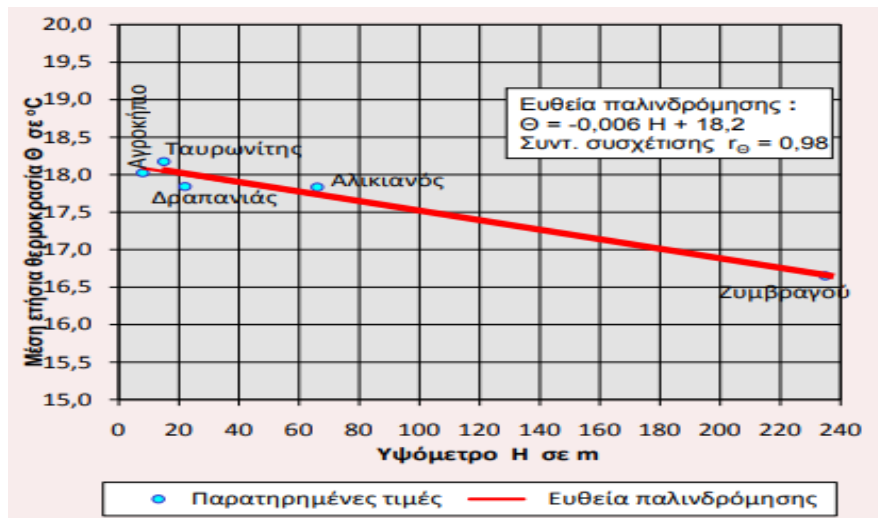
**Χάρτης 3.6.** Παγκόσμιος κλιματικός χάρτης σύμφωνα με την ταξινόμηση Köppen-Geiger: Απεικόνιση των περιοχών με μεσογειακό κλίμα (Πηγή: Wikipedia Commons,2011)

### 3.3.1 Θερμοκρασία

Λαμβάνοντας υπόψιν τα θερμοκρασιακά δεδομένα που συλλέχθηκαν από τον μετεωρολογικό σταθμό του Αλικιανού μπορούμε να συμπεράνουμε πως η μέση ετήσια θερμοκρασία ανέρχεται στους 18°C, με τους μήνες Ιανουάριο και Φεβρουάριο να αποτελούν τους πιο ψυχρούς μήνες. Πιο συγκεκριμένα, τους μήνες αυτούς η μέση θερμοκρασία ήταν 12°C. Επίσης, μπορούμε να παρατηρήσουμε (σχήμα 3.3) πως η ελάχιστη θερμοκρασία δεν βρίσκεται κάτω από τους 0°C, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στο υψόμετρο του μετεωρολογικού σταθμού. Αντίθετα, σε περιοχές που βρίσκονται σε υψηλότερα υψόμετρα συναντώνται θερμοκρασίες χαμηλότερες των 0°C. Επομένως, είναι κατανοητό πως η αύξηση της τιμής του υψομέτρου συνεπάγεται την μείωση της θερμοκρασίας, με την σχέση των δύο αυτών μεγεθών να είναι γραμμική. (Nikolaidis et al.,2023)



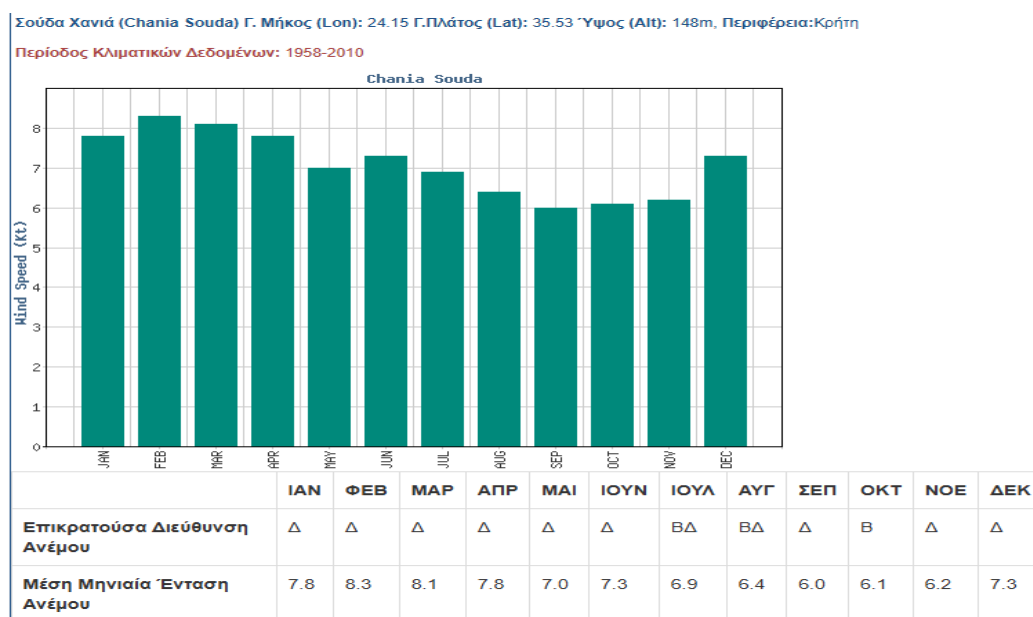
**Σχήμα 3.3.** Οι θερμοκρασίες για τα έτη 2012-2019 από τον μετεωρολογικό σταθμό του Αλικιανού (Πηγή: Nikolaidis et al., 2023)



**Σχήμα 3.4.** Η γραμμική και αντιστρόφως ανάλογη σχέση μεταξύ των τιμών του υψομέτρου και της θερμοκρασίας από μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Pavlaki and Lionis, 2013)

### 3.3.2 Άνεμοι

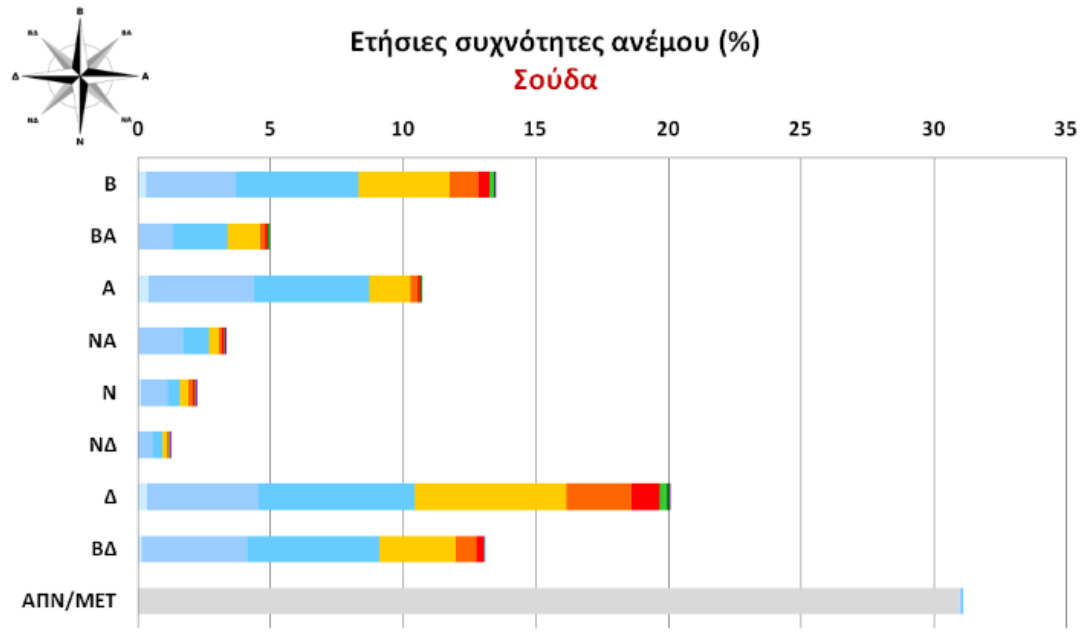
Οι άνεμοι που πνέουν στην Δυτική Κρήτη έχουν κυρίως βόρεια, βορειοδυτική και δυτική κατεύθυνση, με μέση ετήσια ταχύτητα περίπου 10 *Knotts*. Κατά τη χειμερινή περίοδο, οι ταχύτητες των ανέμων αυξάνονται σημαντικά, με ισχυρούς, θυελλώδεις ανέμους να εμφανίζονται συχνά. Η υψηλότερη ταχύτητα ανέμου καταγράφηκε τον Φεβρουάριο του 1988, φτάνοντας τα 54 *Knotts*. (Pavlaki and Lionis, 2013)



**Σχήμα 3.5.** Η μέση μηνιαία ένταση και η επικρατούσα διεύθυνση των ανέμων που πνέουν στην περιοχή της Σούδας Χανίων κατά την χρονική περίοδο 1958-2010 (Πηγή: Hellenic National Meteorological Service)

Σούδα Χανιά (Chania Souda) Γ. Μήκος (Lon): 24.15 Γ.Πλάτος (Lat): 35.53 Ύψος (Alt): 148m, Περιφέρεια:Κρήτη

Περίοδος Κλιματικών Δεδομένων: 1958-2010



**Σχήμα 3.6.** Οι ετήσιες συχνότητες των ανέμων που πνέουν στην περιοχή της Σούδας Χανίων κατά την χρονική περίοδο 1958-2010 (Πηγή: Hellenic National Meteorological Service)

### 3.3.3 Ηλιοφάνεια

Η Κρήτη, χάρη στη γεωγραφική της θέση και το κλίμα της, είναι μια περιοχή με έντονη ηλιοφάνεια. Στη βόρεια περιοχή της μελέτης, η μέση ετήσια ηλιοφάνεια φτάνει τις 2.575,5 ώρες. Τον Ιανουάριο σημειώνεται η χαμηλότερη μέτρηση με 101 ώρες ηλιοφάνειας, ενώ τον Ιούλιο η ηλιοφάνεια αγγίζει την υψηλότερη τιμή, στις 346,5 ώρες. (Pavlaki and Lionis,2013)

### 3.3.4 Υγρασία και Εξάτμιση

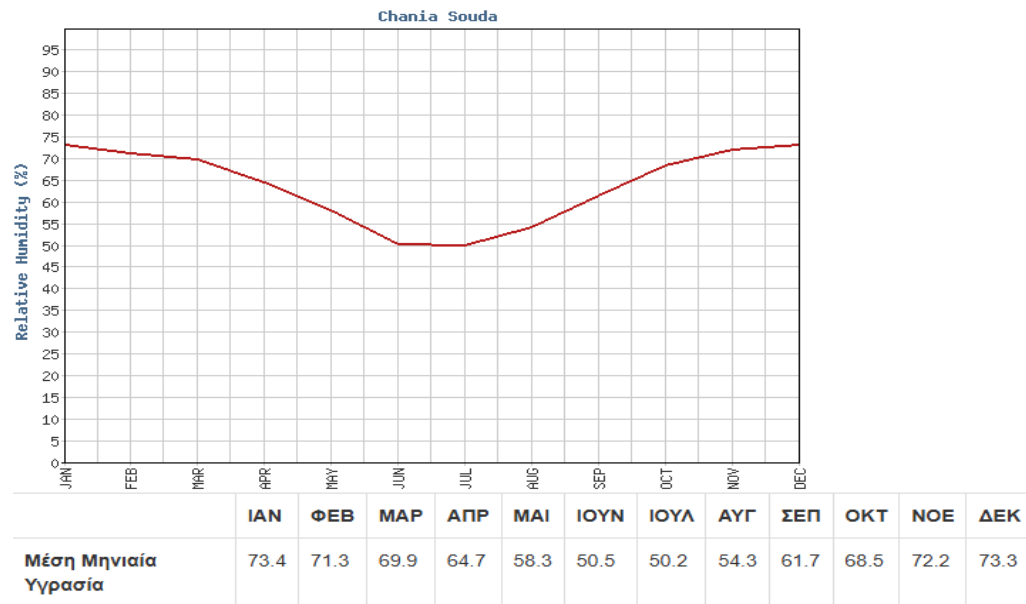
Στην περιοχή μελέτης, η σχετική υγρασία ανά μήνα μελέτης είναι αρκετά υψηλή, κυμαινόμενη μεταξύ 50% και 78%. Οι χαμηλότερες τιμές καταγράφονται κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ η μέση σχετική υγρασία κατά την διάρκεια του χρόνου υπολογίζεται στο 66%. (Pavlaki and Lionis,2013)

Σχετικά με την εξάτμιση, διαπιστώνουμε πως τους θερινούς μήνες και ειδικότερα από τις αρχές Ιουνίου μέχρι τα τέλη Αυγούστου παρατηρούνται οι υψηλότερες τιμές. (Pavlaki and Lionis,2013)



Σούδα Χανιά (Chania Souda) Γ. Μήκος (Lon): 24.15 Γ.Πλάτος (Lat): 35.53 Ύψος (Alt): 148m, Περιφέρεια:Κρήτη

Περίοδος Κλιματικών Δεδομένων: 1958-2010

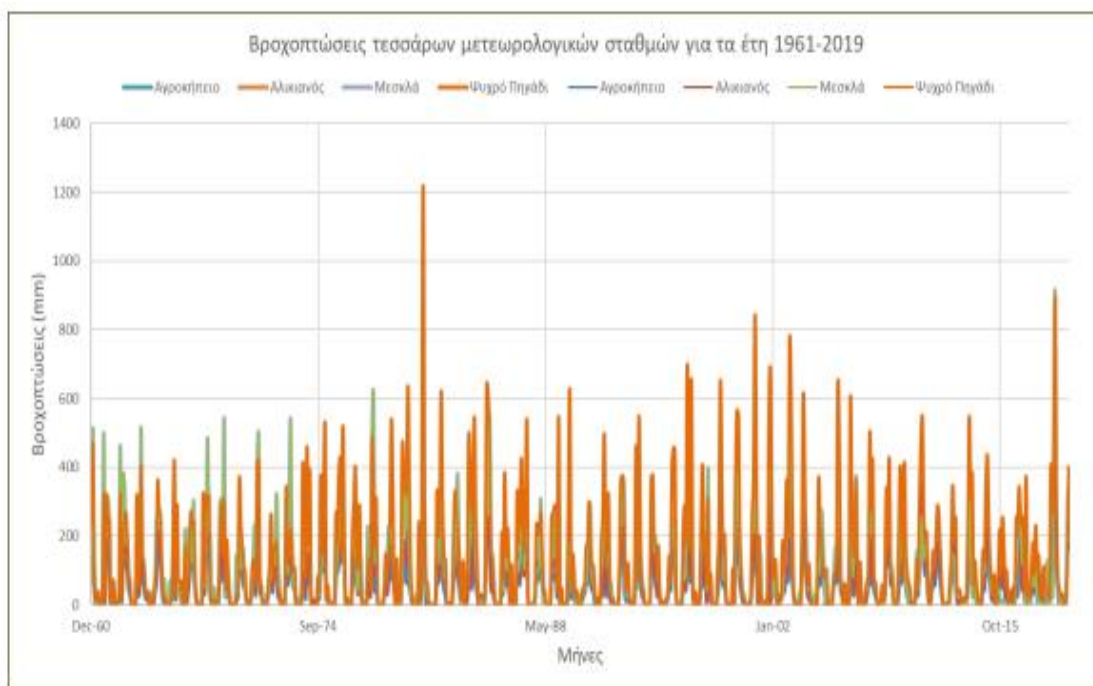


**Σχήμα 3.7.**Κλιματικά δεδομένα της υγρασίας στην περιοχή της Σούδας Χανίων κατά την χρονική περίοδο 1958-2010 (Πηγή: Hellenic National Meteorological Service)

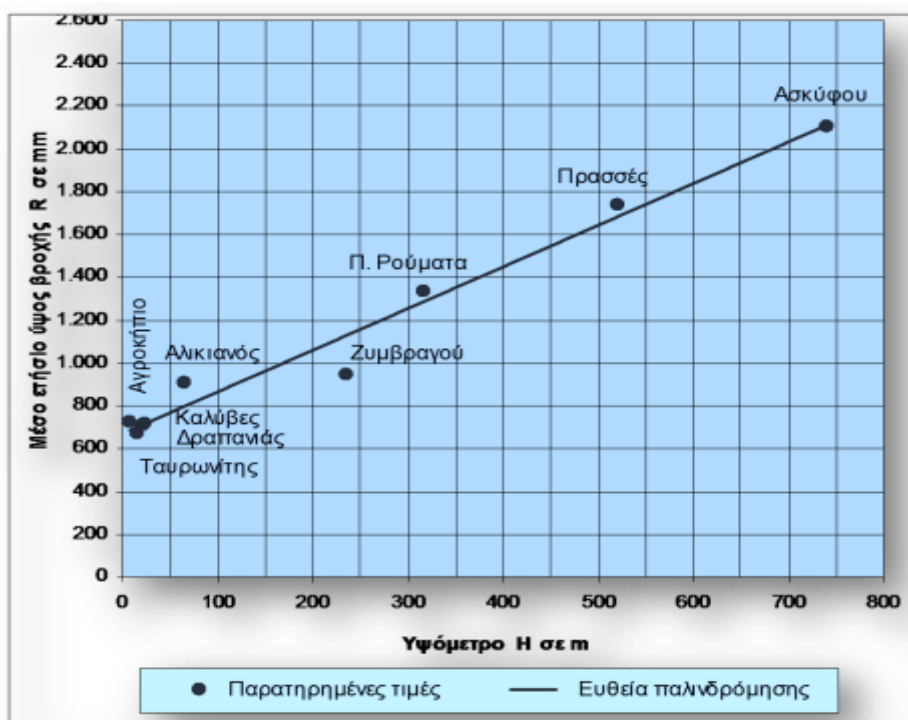
### 3.3.5 Βροχόπτωση

Σύμφωνα με τα βροχομετρικά δεδομένα που συλλέχθηκαν από μετεωρολογικούς και βροχομετρικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής μελέτης μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Κατά τους χειμερινούς μήνες και συγκεκριμένα από τις αρχές Οκτωβρίου έως και τα τέλη Απριλίου οι βροχοπτώσεις φτάνουν στα υψηλότερα επίπεδά τους, με τη μέση μηνιαία τιμή να αγγίζει τα 105 mm. Τους καλοκαιρινούς μήνες οι ποσότητες αυτές μειώνονται αισθητά καταγράφοντας τις χαμηλότερες τιμές της περιόδου (Nikolaidis et al.,2023). Ο Ιούλιος και ο Αύγουστος αποτελούν τους πιο ξηρούς μήνες του χρόνου. (Pavlaki and Lionis,2013)
- Ο σταθμός των Λευκών Όρεων καταγράφει σημαντικές ποσότητες βροχής. (Pavlaki and Lionis,2013)
- Ο σταθμός Ασκύφου καταγράφει ασυνήθιστα μεγάλες ποσότητες βροχής σε σχέση με το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται. Ειδικότερα, σε αυτόν τον σταθμό το ύψος της βροχής έφτασε τα 2.102,6 mm. (Pavlaki and Lionis,2013)
- Τα μεγέθη του υψομέτρου των σταθμών και της ετήσιας βροχόπτωσης είναι ανάλογα και γραμμικά μεταξύ τους (σχήμα 3.9). (Pavlaki and Lionis,2013)



**Σχήμα 3.8.** Μηνιαίες βροχοπτώσεις κατά την χρονική περίοδο 1961-2019 από τέσσερις μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Nikolaidis et al., 2023)



**Σχήμα 3.9.** Η γραμμική και ανάλογη σχέση μεταξύ των τιμών του υψομέτρου και του μέσου ετήσιου ύψους βροχής στους μετεωρολογικούς σταθμούς της ευρύτερης περιοχής (Πηγή: Pavlaki and Lionis, 2013)

### 3.4 Γεωλογία της περιοχής

---

#### 3.4.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής

---

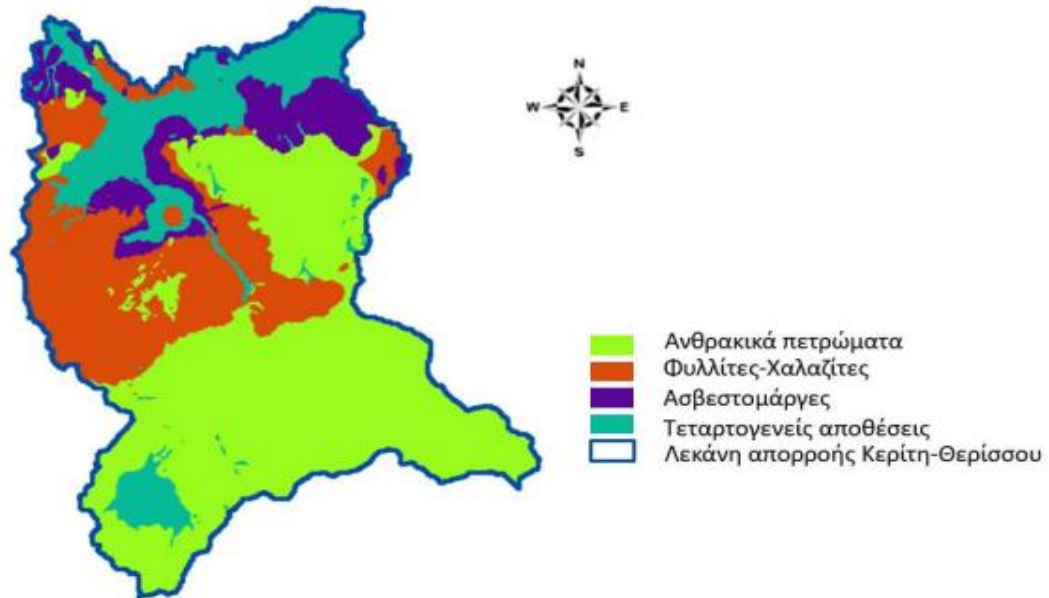
Η Κρήτη διαθέτει μια ιδιαίτερα σύνθετη γεωλογική δομή, η οποία χαρακτηρίζεται από έντονο τεκτονικό κατακερματισμό. Στο δυτικό τμήμα του νησιού, η γεωλογική σύνθεση περιλαμβάνει σχηματισμούς που ανήκουν σε τέσσερις βασικές γεωτεκτονικές ενότητες:

- Η ενότητα της Πίνδου,
  - Η ενότητα της Τρίπολης,
  - Η σειρά Φυλλιτών–Χαλαζιτών
  - Η Ιόνια ζώνη
- (Nefros et al.,2023)

Στην περιοχή μελέτης, η γεωλογική σύνθεση αποτελείται συγκεκριμένα από:

- **Τεταρτογενείς σχηματισμούς:** Αποτελούνται από λεπτόκοκκα έως χονδρόκοκκα υλικά, όπως αμμώδη αργιλικά υλικά, μη ενοποιημένα αργιλικά πετρώματα, καθώς και ανθρακικά, φυλλιτικά θραύσματα. Αυτά τα υλικά, μαζί με αποσαθρωμένα προϊόντα παλαιότερων σχηματισμών, εντοπίζονται κυρίως κατά μήκος της βόρειας ακτογραμμής και στα νότια της πόλης των Χανίων.(Nefros et al.,2023)
- **Νεογενή ιζήματα:** Αποτελούνται από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους είτε με παχύ στρώμα είτε άστρωτους, σχηματισμούς με αργιλώδη και μαργαϊκή σύσταση με εναλασσόμενα στρώματα από ιλύ και άμμο, καθώς και κροκαλοπαγή και θρυμματισμένα υλικά από τους σχηματισμούς των ζωνών της Τρίπολης και της Πίνδου. Αυτά τα ιζήματα είναι έντονα συμπαγή λόγω του ασβεστιτικού τσιμέντου (Nefros et al.,2023). Βρίσκονται κυρίως στο χωριό Πατελάρι. (Nikolaidis et al.,2023)
- **Τα ιζήματα της ζώνης της Πίνδου (αλλόχθονες σειρές):** Περιλαμβάνουν φλύσχη, όπως ψαμμίτες, ασβεστιτικούς ψαμμίτες και σχιστόλιθους, καθώς και λεπτές στρώσεις κροκαλοπαγών που εντοπίζονται τοπικά. Επιπλέον, συναντώνται ασβεστόλιθοι (ανθρακικά πετρώματα), κυρίως στα νοτιοανατολικά του νομού Χανίων. (Nefros et al.,2023)
- **Τα ιζήματα της ζώνης της Τρίπολης:** Περιλαμβάνουν μια ποικιλία ιζημάτων, όπως φλύσχη δηλαδή σχιστόλιθους και ψαμμίτες με παρεμβολές από ασβεστιτικά τουρβιδιτικά στρώματα. Υπάρχουν επίσης ασβεστόλιθοι, δολομίτες και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι. Το κατώτερο τμήμα της ζώνης αυτής, αποτελείται από ανθρακικά πετρώματα γνωστά και ως Τριπολιτικές ασβεστολιθικές αποθέσεις. Αυτές εμφανίζονται κυρίως στη χερσόνησο του Ακρωτηρίου. (Nefros et al.,2023)
- **Η σειρά Φυλλιτών–Χαλαζιτών:** Βρίσκεται τεκτονικά πάνω από τους σχηματισμούς της Ιόνιας ζώνης και χαρακτηρίζεται από ιζήματα με εναλλαγές φυλλιτών, ενώ κύριο γνώρισμα τους είναι οι έντονες πτυχές. Αυτή η σειρά περιλαμβάνει ορθογενή και παραγενή πετρώματα που μεταμορφώθηκαν υπό συνθήκες υψηλής πίεσης και χαμηλής θερμοκρασίας. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε κατά την διάρκεια του ανώτερου Ολιγόκαινου έως το κατώτερο Μειόκαινο (Nefros et al.,2023). Εκτείνονται από την περιοχή των Λευκών Όρεων έως και την πεδιάδα που περιλαμβάνει τον Αλικιανό και την Αγυιά. (Nikolaidis et al.,2023)

- **Τα ιζήματα της Ιόνιας ζώνης:** Βρίσκονται στο κατώτερο στρωματογραφικό προφίλ και είναι γνωστά ως «Plattenkalk». Περιλαμβάνουν σχιστόλιθους, ανακρυσταλλωμένους ασβεστόλιθους, δολομίτες, χαλαζιακά πετρώματα και κυριαρχούν στην περιοχή των Λευκών Ορέων, στα νοτιοανατολικά της υπό εξέτασης περιοχής. (Nefros et al.,2023)



**Χάρτης 3.7.** Οι γεωλογικοί σχηματισμοί των λεκανών απορροής Κερίτη και Θερίσου (Πηγή: Nikolaidis et al.,2023 )



**Χάρτης 3.8.** Νεογενής, Φυλλιτικοί και Καρστικοί σχηματισμοί εντός των λεκανών απορροής Κερίτη και Θερίσου (Πηγή: Karatzas et al.,2010)

### 3.4.2 Ρήγματα

Τα ρήγματα και τα νερά συνδέονται στενά μεταξύ τους, καθώς τα πρώτα δημιουργούν διόδους που επιτρέπουν τη ροή των υπόγειων υδάτων και μπορούν να επηρεάσουν τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των υδατικών πόρων. Τα βασικότερα ρήγματα που εντοπίζονται στην περιοχή μελέτης είναι:

Η ρηξιγενής ζώνη των Λευκών Ορών: Πρόκειται για μια ακολουθία ρηγμάτων με κατεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, με τη ζώνη αυτή να παρουσιάζει σημαντικό άλμα μετάπτωσης. Το πιο αξιοσημείωτο ρήγμα αυτής της ακολουθίας εντοπίζεται στην περιοχή του Ζούρβα (Pavlaki και Lionis, 2013). Τα ρήγματα αυτά έχουν διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των γεωλογικών και υδρογεωλογικών χαρακτηριστικών της ευρύτερης περιοχής, όπως αποδεικνύεται από την απότομη εναλλαγή υψομέτρων στα Λευκά Όρη (Nikolaïdis et al., 2023) και την επέκταση των καρστικών ασβεστολιθικών πετρωμάτων έως τη λίμνη της Αγυιάς (Pavlaki και Lionis, 2013).

Η ρηξιγενής ζώνη που εκτείνεται από την περιοχή της Αγυιάς έως την Σούδα και ειδικότερα το ρήγμα της Αγυιάς που ανήκει στην ζώνη αυτή. Το ρήγμα της Αγυιάς έχει διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ και έχει συμβάλει καθοριστικά στην υδρογεωλογία της περιοχής. Ειδικότερα, αποτρέπει την εισχώρηση υφάλμυρου νερού στην λίμνη της περιοχής ενώ ταυτόχρονα παρεμποδίζει την άμεση κίνηση του υπόγειου καρστικού νερού προς τη θάλασσα. (Nikolaïdis et al., 2023)

Η ρηξιγενής ζώνη Βενιζέλου-Βάρδιας: Πρόκειται για μια σειρά ρηγμάτων με κύρια διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ, ενώ εκτείνονται ανατολικά της πόλης των Χανίων. Τα ρήγματα αυτά κατέχουν καθοριστικό ρόλο στην διαμόρφωση των γεωλογικών χαρακτηριστικών της περιοχής και ειδικότερα στην σταδιακή ανύψωση της περιοχής των τάφων Βενιζέλων. (Pavlaki και Lionis, 2013)



**Χάρτης 3.9.** Τα ρήγματα και οι πηγές εκφόρτισης των υπογείων υδάτων στις λεκάνες απορροής Κερίτη και Θερίσσου (Πηγή: Karatzas et al., 2010)

### 3.4.3 Κατανομή των υδρολιθολογικών σχηματισμών της περιοχής του Κερίτη

---

Οι υδρολιθολογικοί σχηματισμοί της περιοχής του Κερίτη παρουσιάζουν μια ποικιλία γεωλογικών δομών και επηρεάζουν σημαντικά την διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής. Διαχωρίζονται σε τρεις κατηγορίες:

- Καρστικοί σχηματισμοί
- Πορώδεις σχηματισμοί
- Αδιαπέρατα στρώματα

Οι καρστικοί σχηματισμοί χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Σχηματισμοί με υψηλή έως μέτρια υδροπερατότητα, οι οποίοι περιλαμβάνουν ασβεστόλιθους, μάρμαρα και δολομίτες.
- Σχηματισμοί με μέτρια έως χαμηλή υδροπερατότητα, όπως οι ασβεστόλιθοι της ζώνης Πίνδου και οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι.
- Μειοκαινικοί ασβεστολιθικοί λατυποκροκαλοπαγείς του Τοπολίου, που χαρακτηρίζονται από μέτρια έως υψηλή υδροπερατότητα.

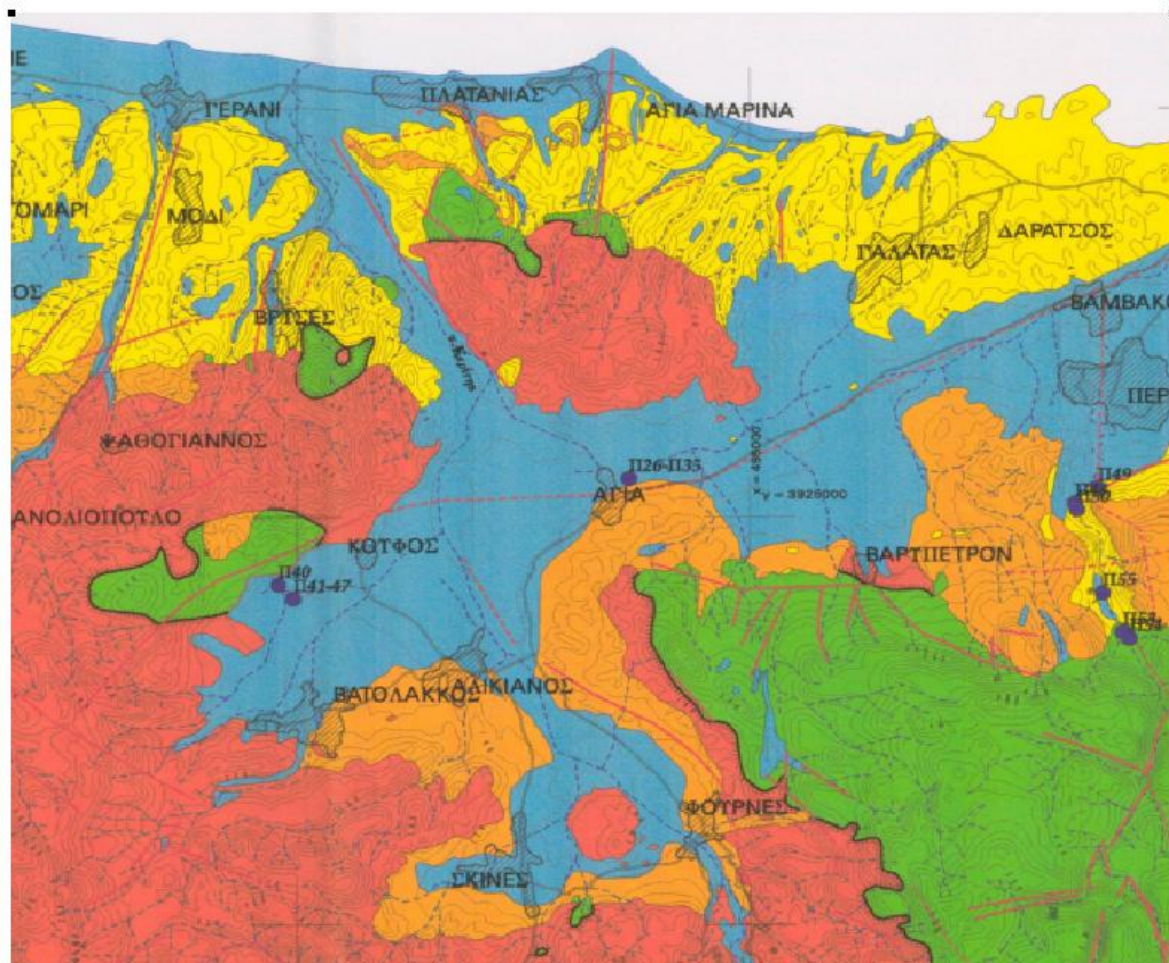
Οι πορώδεις σχηματισμοί διαχωρίζονται σε:

- Αποθέσεις κοκκώδους προσχωματικής φύσεως με υδροπερατότητα που διαφέρει, περιλαμβάνοντας αλλουβιακές αποθέσεις, πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων.
- Αποθέσεις της Μειοκαινικής και Πλειοκαινικής περιόδου που εμφανίζουν από μέτρια έως χαμηλή υδροπερατότητα, όπως οι μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι.
- Μη προσχωματικές κοκκώδεις αποθέσεις με πολύ χαμηλή υδροπερατότητα. Κυρίως μάργες της Πλειοκαινικής και Μειοκαινικής περιόδου.

Τα αδιαπέρατα στρώματα χωρίζονται σε:

- Γύψους
- Πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς: Αυτά τα στρώματα χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλή υδροπερατότητα και περιλαμβάνουν φλύσχη που απαντώνται σε διάφορες γεωλογικές ζώνες.
- Πετρώματα με περιορισμένη ή εκλεκτική κυκλοφορία: Πρόκειται για μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα με περιορισμένη διαπερατότητα, τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικές ζώνες και γεωλογικές καλύψεις.  
(Karatzas et al,2010)



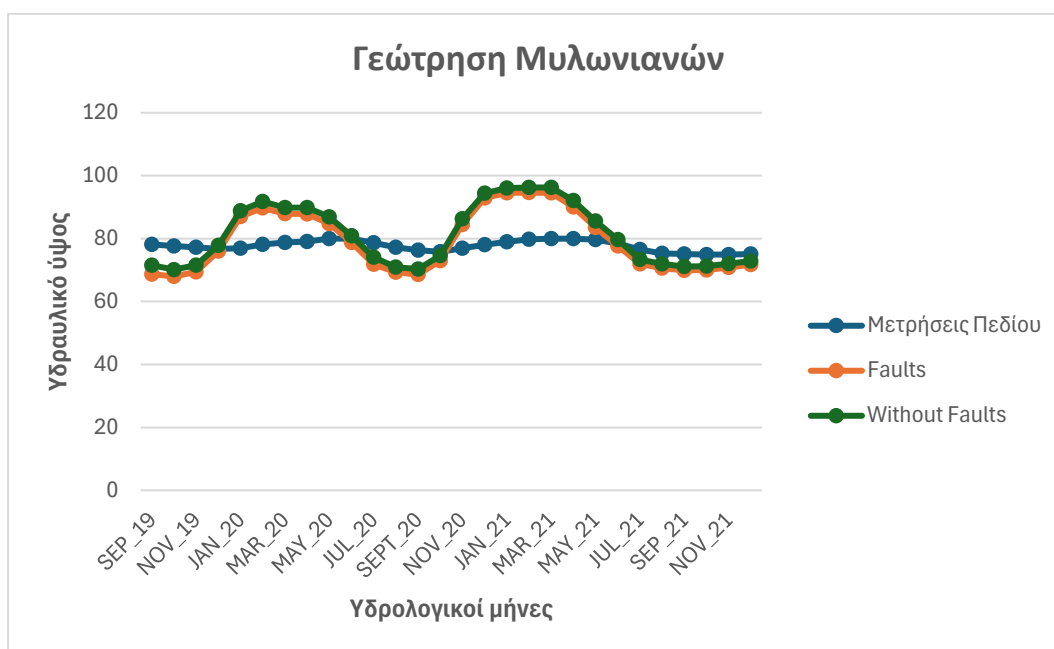


**Χάρτης 3.10.** Υδρολιθολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Πηγή: Karatzas et al., 2010)

#### 4. Αποτελέσματα και συζήτηση

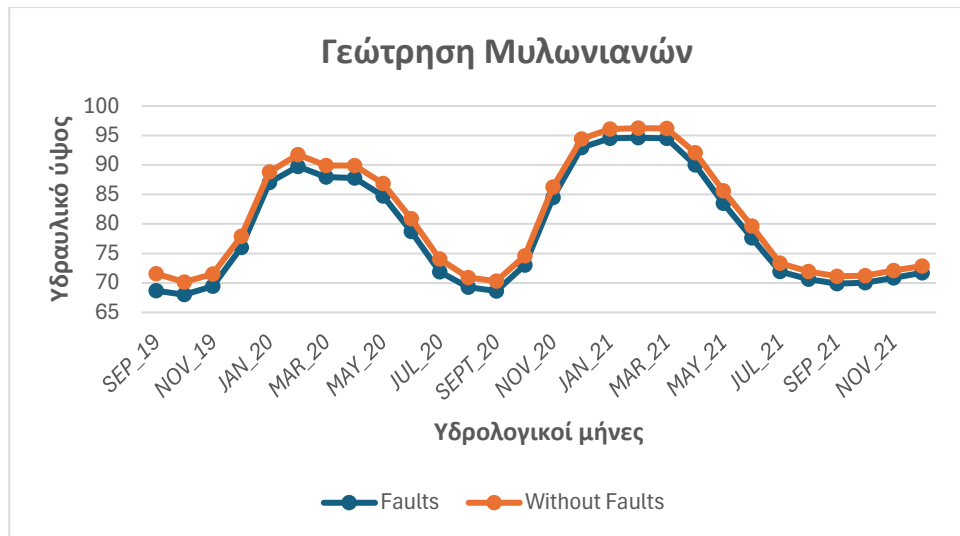
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν ύστερα από το “τρέξιμο” του μοντέλου PTC στο περιβάλλον Argus One. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να υπενθυμίσουμε πως η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε για 5 έτη και ειδικότερα για τα έτη 2017-2021. Η δημιουργία των διαγραμμάτων έλαβε χώρα στο περιβάλλον excel, ενώ τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε δύο φάσεις:

- **Πρώτη φάση:** Σε αυτό το σημείο έγινε επιλογή ενός συγκεκριμένου κόμβου, και συγκεκριμένα του κόμβου 608, για τον οποίο παρουσιάζεται η συσχέτιση των υδραυλικών υψών με τους υδρολογικούς μήνες, τόσο με την ύπαρξη των ρηγμάτων που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης όσο και χωρίς αυτά. Παράλληλα, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου σε σχέση με δεδομένα που λήφθηκαν στο πεδίο.



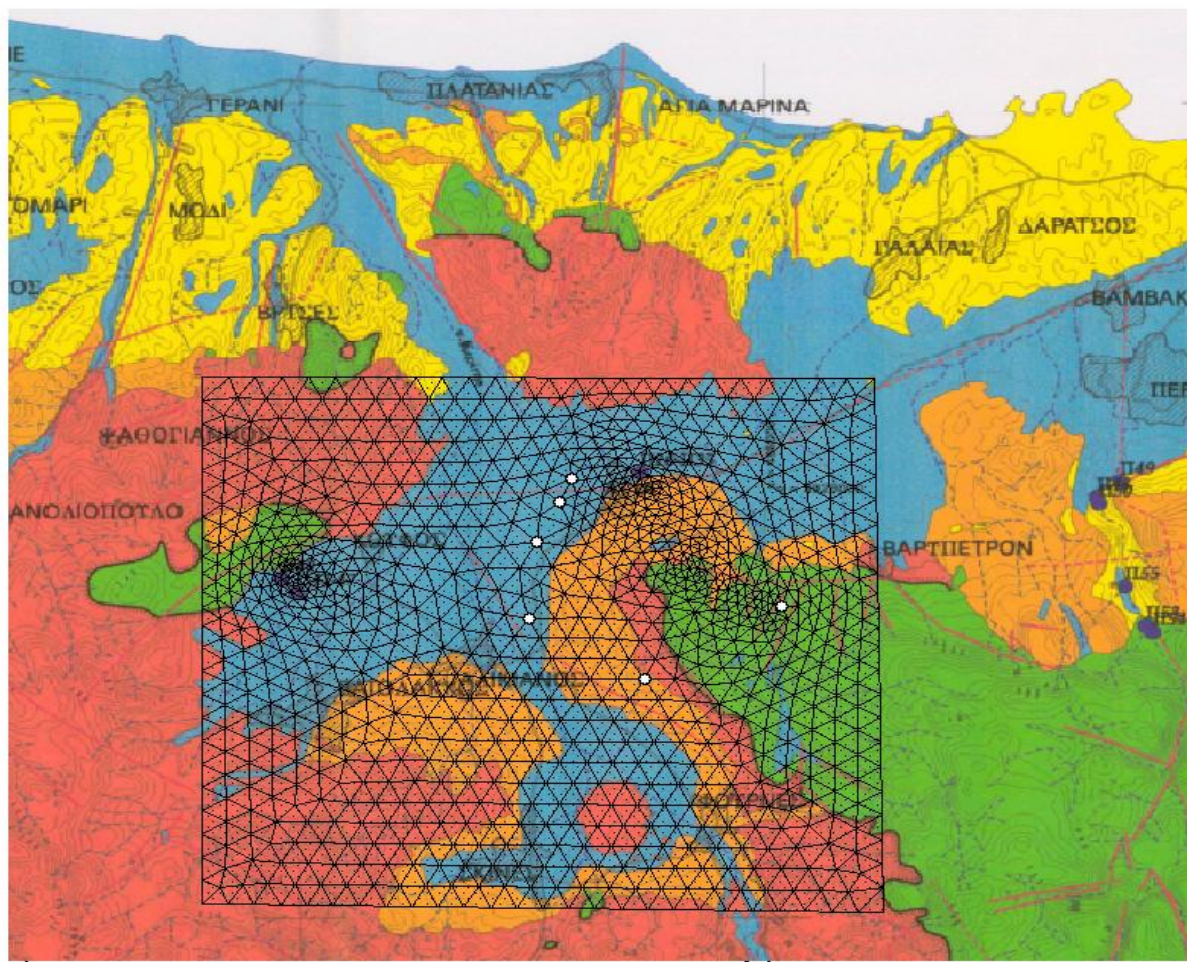
**Σχήμα 4.1.** Οι μετρήσεις του πεδίου, τα μοντέλα με και χωρίς τα ρήγματα και τα υδραυτικά ύψη στον κόμβο 608





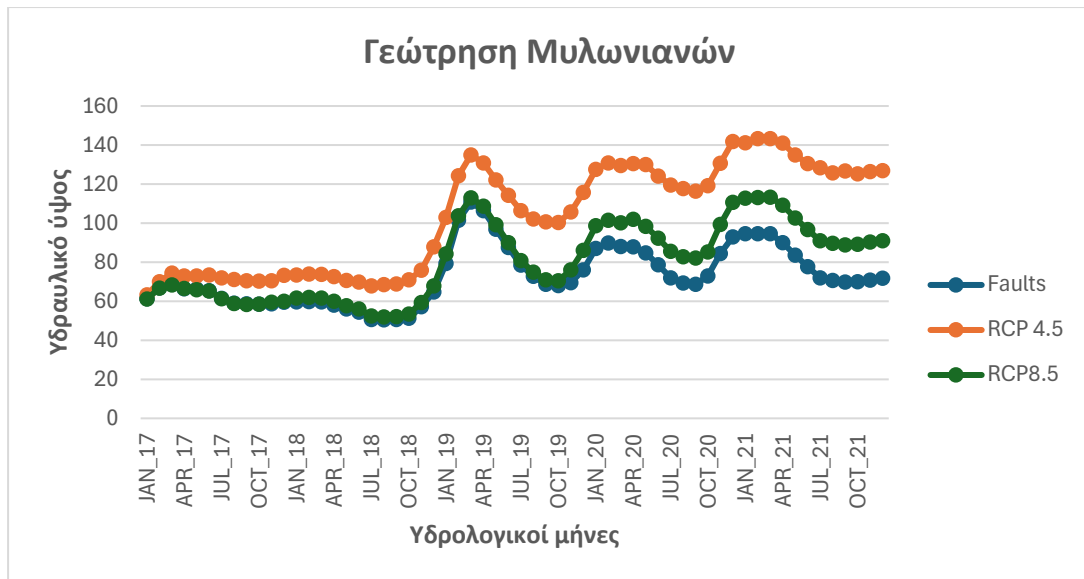
**Σχήμα 4.2.** Τα υδραυλικά ύψη σε συνάρτηση με τους υδρολογικούς μήνες με και χωρίς την επίδραση των ρηγμάτων στον κόμβο 608

Από την ανάλυση των παραπάνω διαγραμμάτων προκύπτει ότι η παράμετρος των ρηγμάτων στη μοντελοποίηση του υδροφορέα της Αγκιάς έχει μικρή επίδραση στη μεταβολή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Συγκεκριμένα, οι τιμές των υδραυλικών υψών, όταν λαμβάνονται υπόψη τα ρήγματα, κυμαίνονται από 69 m έως 94 m, ενώ χωρίς αυτά οι τιμές κυμαίνονται από 70m έως 97m. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η παρουσία των ρηγμάτων μειώνει ελαφρώς τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα σε κάθε υδρολογικό μήνα, ωστόσο η μείωση αυτή είναι αμελητέα, καθώς δεν ξεπερνά τα 3 m. Όσον αφορά τις μετρήσεις πεδίου, τα υδραυλικά ύψη κυμαίνονται από 74 m έως 81 m και παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις συγκριτικά με τα αποτελέσματα του μοντέλου. Αυτές οι αποκλίσεις αποδίδονται τόσο σε σφάλματα κατά τη διαδικασία της μέτρησης όσο και σε σφάλματα κατά την εκτέλεση του μοντέλου. Τέλος, από τα διαγράμματα παρατηρείται ότι κατά τους ξηρούς μήνες η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μειώνεται, ενώ κατά τους υγρούς αυξάνεται, γεγονός που αποδίδεται στην αύξηση των κατακρημνίσεων κατά τις υγρές περιόδους.



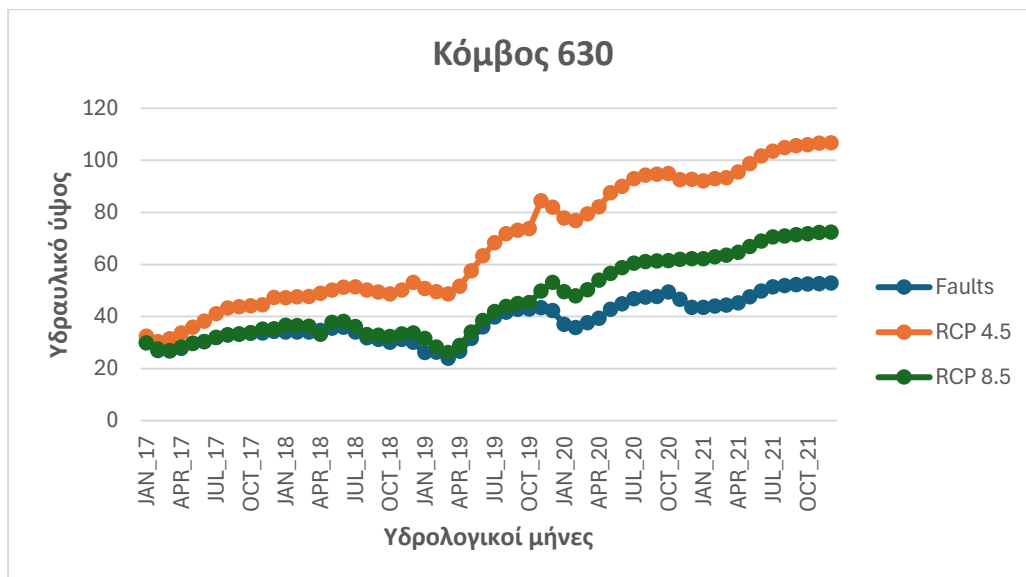
**Χάρτης 4.1.** Οι θέσεις των κόμβων στον γεωλογικό χάρτη

- **Δεύτερη φάση:** Σε αυτή την φάση επιλέχθηκαν 6 κόμβοι για τους οποίους αποτυπώνονται τα υδραυλικά ύψη για κάθε υδρολογική περίοδο σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Οι δυο από αυτές αφορούν τα κλιματικά σενάρια μέτριας και υψηλής ακτινοβολίας, RCP4.5 και RCP8.5, αντίστοιχα, ενώ η τρίτη αφορά το αρχικό μας μοντέλο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η παράμετρος των ρηγμάτων λήφθηκε υπόψιν και στις τρεις περιπτώσεις.



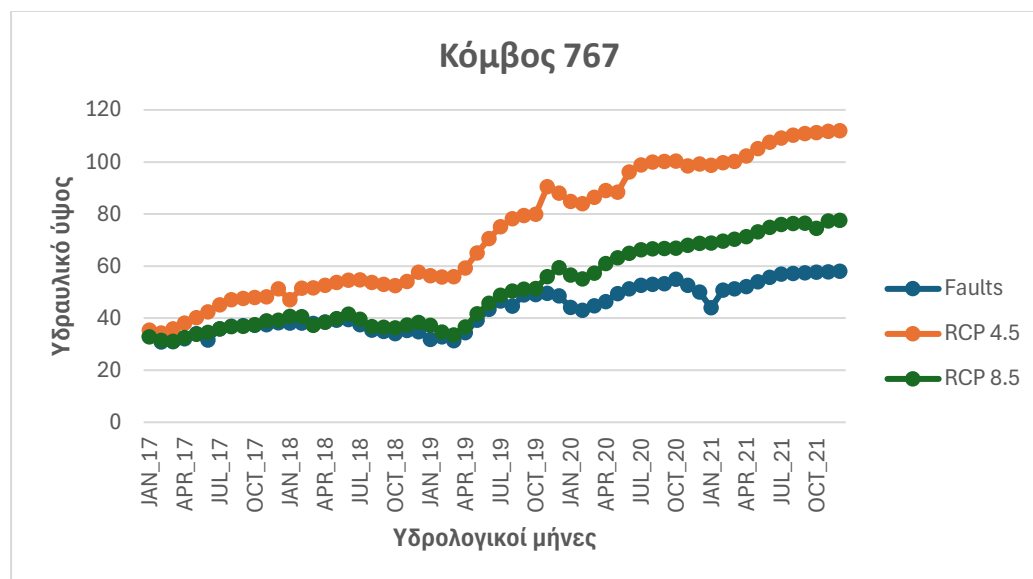
**Σχήμα 4.3.** Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 608

Στο διάγραμμα αυτό διακρίνεται ξεκάθαρα πως η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα φτάνει στις υψηλότερες τιμές κατά την εφαρμογή του σεναρίου RCP4.5, με τα υδραυλικά ύψη να κυμαίνονται από 63 *m* έως 144 *m*. Αντίθετα, τα υδραυλικά ύψη του σεναρίου RCP8.5 και του αρχικού μοντέλου εμφανίζουν σχεδόν ταυτόσημες τιμές κατά την έναρξη της μοντελοποίησης, έως τον Οκτώβριο του 2019. Στη συνέχεια, παρατηρούνται κάποιες αποκλίσεις, με τη μέγιστη να ανέρχεται στα 20 *m*. Στο σενάριο RCP8.5 οι τιμές κυμαίνονται από 51 *m* έως 110 *m*, ενώ στο αρχικό μοντέλο από 50 *m* έως 95 *m*.



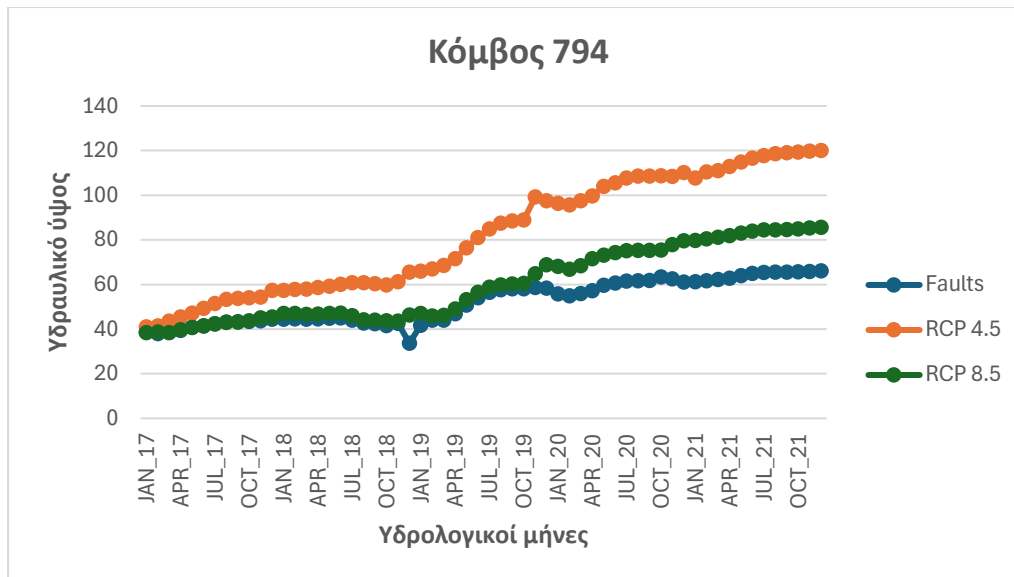
**Σχήμα 4.4.** Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 630

Για τον κόμβο 630, το κλιματικό σενάριο RCP4.5, που χαρακτηρίζεται από σταθεροποιητική τάση, καταγράφει τις υψηλότερες τιμές στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό αποδίδεται στα αυξημένα βροχομετρικά δεδομένα που εισήχθησαν στο μοντέλο σε σύγκριση με το άλλο κλιματικό σενάριο και το αρχικό μοντέλο. Η μέγιστη τιμή έφτασε τα 107 m, ενώ η ελάχιστη τα 30 m, δείχνοντας μια σημαντική μεταβολή στη στάθμη με έντονη αυξητική τάση. Στο κλιματικό σενάριο με τις πιο δυσοίωνες προβλέψεις, οι τιμές των υδραυλικών υψών κυμαίνονται από 29 m έως 73 m, χωρίς αξιοσημείωτες διακυμάνσεις. Το αρχικό μοντέλο εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές, οι οποίες κυμαίνονται από 26 m έως 53 m.



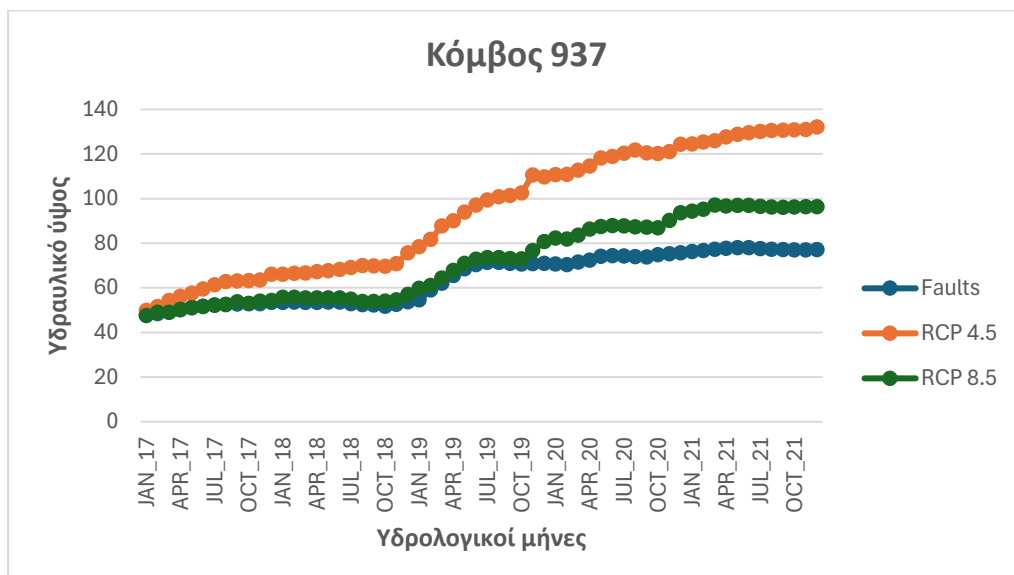
**Σχήμα 4.5.** Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 767

Στον κόμβο 767 το κλιματικό σενάριο RCP4.5 παρουσιάζει τις μεγαλύτερες τιμές στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα συγκριτικά με το σενάριο RCP8.5 και το αρχικό μοντέλο. Ειδικότερα, η χαμηλότερη τιμή των υδραυλικών υψών ήταν 34 m ενώ η υψηλότερη 112m. Τόσο το σενάριο RCP8.5 όσο και το αρχικό μοντέλο εμφανίζουν σχεδόν ταυτόσημες τιμές υδραυλικών υψών έως τον Ιούλιο του 2019. Μετά από αυτό το σημείο, το RCP8.5 καταγράφει υψηλότερες τιμές, οι οποίες κυμαίνονται από 31 m έως 78 m, ενώ οι τιμές του αρχικού μοντέλου κυμαίνονται από 30 m έως 59 m. Επιπλέον, είναι σαφές ότι, ανεξαρτήτως ξηρών και υγρών περιόδων, ο υδροφόρος ορίζοντας παρουσιάζει σταθερή αύξηση χωρίς έντονες διακυμάνσεις και στις τρεις περιπτώσεις.



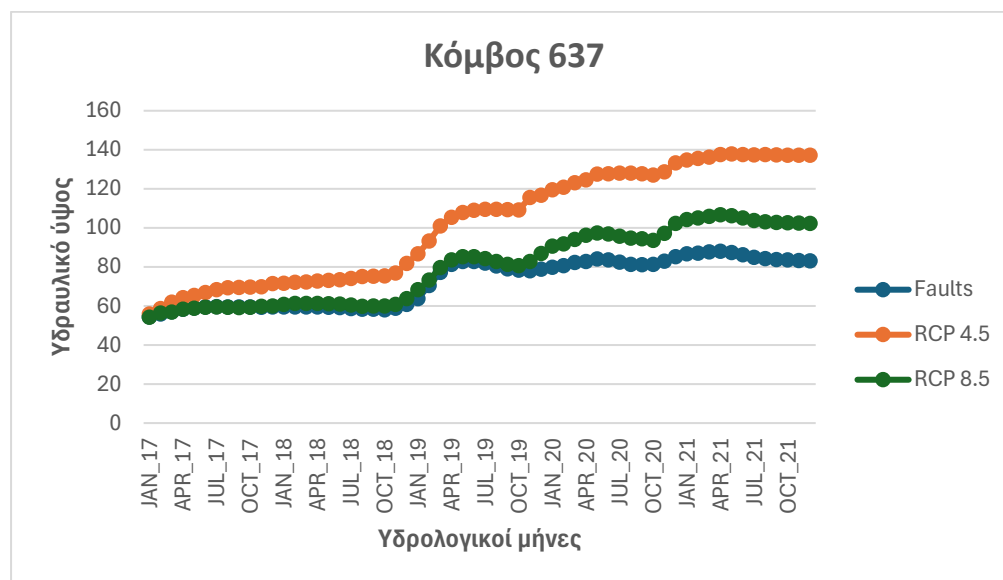
**Σχήμα 4.6.** Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 794

Όσον αφορά τον κόμβο 794 μπορούμε να διαπιστώσουμε πως το σενάριο RCP4.5 συνεχίζει να παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές υδραυλικών υψών. Πιο αναλυτικά, οι τιμές κυμαίνονται από 40 *m* έως 120 *m*. Ακολουθεί, το κλιματικό σενάριο RCP8.5 με τιμές από 38*m* έως 86*m* και έπειτα το αρχικό μοντέλο από 38*m* μέχρι 67*m*. Επίσης, φαίνεται καθαρά πως οι ξηρές και υγρές περιόδους δεν παίζουν σημαντικό ρόλο, καθώς η αύξηση είναι συνεχής. Αυτό οφείλεται στις υψηλότερες τιμές βροχομετρικών δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα.



**Σχήμα 4.7.** Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 937

Σχετικά με τον κόμβο 937 η μέγιστη τιμή υδραυλικού ύψους εμφανίστηκε στο κλιματικό σενάριο με τις χαμηλές εκπομπές ακτινοβολίας και έφτασε τα 132m με την ελάχιστη τιμή στο σενάριο αυτό να προσεγγίζει τα 49m. Η χαμηλότερη τιμή στον κόμβο αυτό εμφανίστηκε στο σενάριο RCP8.5 και ήταν 47m με την υψηλότερη τιμή του σεναρίου να φτάνει τα 96m. Το αρχικό μοντέλο εμφανίζει παρόμοια τάση με το τελευταίο σενάριο αλλά με χαμηλότερα υδραυλικά ύψη από τον Σεπτέμβριο του 2019 και μετά. Η μέγιστη τιμή του έφτασε τα 77m.



Σχήμα 4.8. Τα κλιματικά σενάρια και το αρχικό μοντέλο στον κόμβο 637

Όπως και στα προηγούμενα διαγράμματα, στο κόμβο 637 το κλιματικό σενάριο RCP4.5 συνεχίζει να αποτυπώνει την μεγαλύτερη τιμή της στάθμης του υδροφόρα ορίζοντα. Η στάθμη αυτή, λοιπόν, έφτασε την μέγιστη τιμή της τον Μάρτιο του 2021 στα 138 m με την αντίστοιχη ελάχιστη να προκύπτει τον Ιανουάριο του 2017 στα 56m. Τον Φεβρουάριο του 2017 παρουσιάζονται οι κατώτερες τιμές στα υπόλοιπα δυο σενάρια με 54m αντίστοιχα. Όσον αφορά τις μέγιστες τους τιμές το κλιματικό σενάριο RCP8.5 έφτασε τα 106m και το αρχικό μοντέλο τα 88m. Οι διακυμάνσεις και στις 3 περιπτώσεις δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές αλλά παρουσιάζουν αυξητική τάση. Αυτό συμβαίνει ιδιαίτερα στο σενάριο με τις χαμηλότερες εκπομπές ακτινοβολίας.

Παρατηρώντας συνολικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά το πέρας της μοντελοποίησης προκύπτουν τα παρακάτω:

- Η επίδραση των ρηγμάτων στην μεταβολή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, καθώς δεν υπερβαίνει τα 3m σε κάποιον υδρολογικό μήνα.
- Ο κόμβος 608, στην δεύτερη φάση των αποτελεσμάτων αναδεικνύεται ως ο κόμβος που το κλιματικό σενάριο RCP4.5 παρουσιάζει την υψηλότερη τιμή υδραυλικού ύψους. Η τιμή αυτή είναι 144m, τον Φεβρουάριο του 2021.

- Η χαμηλότερη τιμή υδραυλικού ύψους καταγράφεται στο αρχικό μοντέλο και συγκεκριμένα ήταν 26m τον Ιανουάριο του 2017.
- Η επίδραση των εποχικών μεταβολών στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι σημαντική αλλά όχι σε όλους τους κόμβους και με την ίδια ένταση. Ο κόμβος 608 παρουσιάζει τις μεγαλύτερες εποχικές μεταβολές με τους ξηρούς μήνες να καταγράφουν χαμηλότερη στάθμη σε σχέση με τους υγρούς. Αντίθετα, στους υπόλοιπους κόμβους το ύψος του νερού αυξάνεται συνεχώς με κάποιες ασήμαντες μεταπτώσεις, ανεξάρτητα από τις εποχικές μεταβολές. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει αύξηση των βροχοπτώσεων με την πάροδο του χρόνου και πιθανή μείωση της εξατμισοδιαπνοής λόγω των κλιματολογικών συνθηκών.
- Το κλιματικό σενάριο RCP8.5 και το αρχικό μοντέλο χαρακτηρίζονται από σταθερά μειωμένη στάθμη συγκριτικά με το σενάριο RCP4.5 σε κάθε κόμβο.



## 5. Συμπεράσματα

---

Η λίμνη της Αγυιάς Χανίων αποτελεί τον πιο σημαντικό υδροβιότοπο της Δυτικής Κρήτης με τον υπόγειο υδροφόρο της να αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις. Τις τελευταίες δεκαετίες η αύξηση της ζήτησης για νερό τόσο στον τομέα του τουρισμού όσο και για άρδευση οδήγησε σε σημαντική αύξηση του αριθμού γεωτρήσεων. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα ξηρά καλοκαίρια που χαρακτηρίζουν την περιοχή οδήγησε σε εξάρτηση από πιο βαθιές γεωτρήσεις, οι οποίες έχουν επιδεινώσει την ποιότητα του υδροφόρου. Το φαινόμενο της υπαλμύρινσης και η ρύπανση με νιτρικά έχουν εξελιχθεί σε σοβαρά προβλήματα, ενώ η λίμνη ερημοποιήθηκε πλήρως το 2005 λόγω υπεράντλησης.

Κύριος στόχος, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η διερεύνηση της επίδρασης των ρηγμάτων της περιοχής στον υπόγειο υδροφόρο της Αγυιάς για την χρονική περίοδο 2017-2021. Επίσης, διερευνήθηκε η επίδραση της κλιματικής κρίσης στην κατάσταση του υδροφόρου χρησιμοποιώντας τα κλιματικά σενάρια RCP4.5 και RCP8.5. Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον Argus One με την συμβολή του Princeton Transport Code που αποτελεί ένα εργαλείο τρισδιάστατης προσομοίωσης της ροής και μεταφοράς ρύπων. Για την πραγματοποίηση της μοντελοποίησης λήφθηκαν υπόψιν οι γεωτρήσεις που υπάρχουν στην περιοχή, ενώ η γνώση των γεωλογικών δομών ήταν απαραίτητη. Ένας κατάλληλος ψηφιακός χάρτης αναπτύχθηκε για την περιοχή της Αγυιάς, συνδυάζοντας τα ίχνη ρηγμάτων από την ανάλυση διάφορων γεωλογικών χαρτών. Για την αξιολόγηση της επίδρασης των ρηγμάτων στην υπόγεια ροή πραγματοποιήθηκε σύγκριση των υδραυλικών υψών τόσο με την παρουσία όσο και χωρίς την παρουσία των ρηγμάτων.

Όπως προέκυψε από τα αποτελέσματα του μοντέλου και πιο συγκεκριμένα στον κόμβο 608, η επίδραση των ρηγμάτων στην μεταβολή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα μπορεί να θεωρηθεί μικρή, καθώς δεν υπερβαίνει τα 3m. Αυτή η μικρή μεταβολή δεν επηρεάζει ουσιαστικά τη συνολική εικόνα του υδροφόρου. Οι αποκλίσεις μεταξύ της μοντελοποίησης και των μετρήσεων που λήφθηκαν στο πεδίο αποδίδονται σε σφάλματα μετρήσεων. Η εποχικότητα (ξηροί και υγροί μήνες) επηρεάζει τη στάθμη, με αυξήσεις κατά τις υγρές περιόδους λόγω αυξημένων κατακρημνίσεων.

Σχετικά με την επίδραση των δυο διαφορετικών κλιματικών σεναρίων RCP4.5 και RCP8.5 στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, συγκρίνοντάς τα με το αρχικό μοντέλο προέκυψαν τα εξής: Το κλιματικό σενάριο RCP4.5 παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές στη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα σε όλες τις περιπτώσεις, λόγω των μεγαλύτερων βροχομετρικών δεδομένων που εισήχθησαν στο μοντέλο. Το σενάριο RCP8.5 και το αρχικό μοντέλο καταγράφουν παρόμοιες τιμές στην αρχή της μοντελοποίησης και έπειτα το κλιματικό σενάριο παρουσιάζει υψηλότερες τιμές. Η σχεδόν ταυτόσημη αρχική συμπεριφορά του RCP8.5 με το αρχικό μοντέλο υποδηλώνει ότι, σε αυτό το χρονικό διάστημα, οι συνθήκες δεν έχουν διαφοροποιηθεί αισθητά από την αρχική κατάσταση. Αναλυτικότερα, το μέγιστο ύψος του νερού προέκυψε στον κόμβο 608 στα 144 m, ενώ το ελάχιστο στο αρχικό μοντέλο στα 26m. Η διαφορά αυτή είναι πολύ σημαντική και οφείλεται κατά κύριο λόγο σε κλιματολογικές παραμέτρους. Στους κόμβους 630, 767, 794, 937 και 637 η εναλλαγή μεταξύ ξηρών και υγρών περιόδων δεν επηρεάζει την στάθμη του νερού η οποία ακολουθεί αυξητική τάση αλλά με χαμηλότερο ύψος νερού σε σχέση με τον κόμβο 608 και στις τρεις περιπτώσεις.



Συμπερασματικά, η επίδραση των γεωλογικών ρηγμάτων στην υπόγεια ροή του υδροφορέα της Αγυιάς αποδεικνύεται αμελητέα, ενώ η ανάλυση αποδεικνύει ότι τα σενάρια κλιματικής αλλαγής επηρεάζουν σημαντικά την εξέλιξη της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Το RCP4.5 φαίνεται πιο ευνοϊκό για τη διατήρηση υψηλότερων υδραυλικών υψών, το οποίο όμως μπορεί να σηματοδοτεί και αυξημένα πλημμυρικά φαινόμενα ενώ το RCP8.5 και το αρχικό μοντέλο παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Adebayo, O. S. & Abraham, A. A. (2018). Aquifer, Classification and Characterization. *Aquifers Matrix and Fluids*. doi:10.5772/intechopen.72692
- Allan, C., Xia, J., & Pahl-Wostl, C. (2013). Climate change and water security: challenges for adaptive water management. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(6), 625–632. doi:10.1016/j.cosust.2013.09.004
- Alexakis, D. D., Stavroulaki E.G., & Tsanis I.K., (2018): Using Sentinel-1A DInSAR interferometry and Landsat 8 data for monitoring water level changes in two lakes in Crete, Greece, Geocarto International. doi: 10.1080/10106049.2018.1434685
- Alley, W. M., Thomas, E., Reilly, O., Franke, L. (1999). Sustainability Of Ground-water Resources
- Anderson, Mary P., Woessner, William W., Applied groundwater modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press 1992
- Babu DK, Pinder GF, Niemi A, Ahlfeld DP, and Stothoff SA. (1987). Chemical transport by three-dimensional groundwater flows
- Bader D. C., C. Covey, W. J. Gutowski Jr., I. M. Held, K. E. Kunkel, R. L. Miller, R. T. Tokmakian, and M. H. Zhang. (2008). Climate models: An Assessment of Strengths and Limitations. U.S. Climate Change Science Program Synthesis and Assessment Product 3.1. Department of Energy, Office of Biological and Environmental Research, 124 pp.
- Barry, R. G. (1969). Water, Earth, and Man. A Synthesis of Hydrology, Geomorphology, and Socio-Economic Geography. The World Hydrological Cycle
- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, Eds. (2008): Climate Change and Water. *Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp*
- BGR and Unesco, World Water Forum in Daegu & Gyeongbuk, Republic of Korea, April 12 – 17, 2008
- Cheng, L., Abraham, J., Hausfather, Z. and Trenberth, K. E. (2019). How fast are the oceans warming? *Science*, Vol. 363, No. 6423, pp. 128–129. doi.org/10.1126/science.aav7619
- Choquette, P. W., & Pray, L. C. (1970). Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 54, 207–250
- Corine Land Cover
- Di Salvo, C. (2022). Improving Results of Existing Groundwater Numerical Models Using Machine Learning Techniques: A Review. *Water* 2022, 14, 2307. <https://doi.org/10.3390/w14152307>
- European Space Agency
- Feinstein, D. T., Fienen, M. N., Reeves, H. W., & Langevin, C. D. (2016). A Semi-Structured MODFLOW-USG Model to Evaluate Local Water Sources to Wells for Decision Support. <https://doi.org/10.1111/gwat.12389>
- Gradstein, S. R and Smittenberg, J. H. (1977). The Hydrophilous Vegetation of Western Crete. *Vegetatio*, Vol. 34, No. 2, pp. 65-86. doi: 10.1007/BF00054476
- Graham, S., Parkinson, C. & Simmon, R. (2010). The Water Cycle
- Hellenic National Meteorological Service. (2024)

- IPCC. (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Geneva, IPCC. [www.ipcc.ch/srocc/](http://www.ipcc.ch/srocc/)
- Jubb, I., Canadell, P., Dix, M. (2013). Australian Government Department of the Environment. Representative Concentration Pathways (RCPs)
- Karatzas, G. P. (2017). Developments on Modeling of Groundwater Flow and Contaminant Transport. *Water Resources Management*, 31(10), 3235–3244. doi:10.1007/s11269-017-1729-z
- Karatzas, G. P. (2003). University Notes, *Groundwater Flow and Contaminant Transport* (in Greek)
- Legakis, A., & Kypriotakis, Z. (1994). A Biogeographical Analysis of the Island of Crete, Greece. *Journal of Biogeography*, 21(4), 441. doi:10.2307/2845761
- Lohman, S., W., et al. (1972). *Definition of selected ground-water terms – revisions and conceptual refinements*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1988
- Maliva, R., G. (2016). Aquifer Characterization Techniques. Schlumberger Methods in Water Resources Evaluation Series No. 4
- Markonis, Y., Angelakis, A. N., Christy, J., & Koutsoyiannis, D. (2016). Climatic variability and the evolution of water technologies in Crete, Hellas. *Water History*, 8(2), 137–157. doi:10.1007/s12685-016-0159-9
- Min, S. K., Zhang, X., Zwiers, F. W. and Hegerl, G. C. 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, Vol. 470, No. 7334, pp. 378–381. doi.org/10.1038/nature09763
- Mishra, V. *Classification of rocks according to water bearing properties*. Jiwaji University
- Narasimhan, T. N. (2009). River Ecosystem Ecology. *Hydrological Cycle and Water Budgets*
- NASA. Retrieved from: [https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/GPM\\_3IMERGM](https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/GPM_3IMERGM)
- Nefros, C., Tsagkas, D.S., Kitsara, G., Loupasakis, C., Giannakopoulos, C., Landslide Susceptibility Mapping under the Climate Change Impact in the Chania Regional Unit, West Crete, Greece. *Land* 2023, 12, 154. <https://doi.org/10.3390/land12010154>
- Nerantzaki, S. D., & Nikolaidis, N. P. (2020). The response of three Mediterranean karst springs to drought and the impact of climate change. *Journal of Hydrology*, 125296. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125296
- Nielsen, D. R., Th. Van Genuchten, M., & Biggar, J. W. (1986). Water flow and solute transport processes in the unsaturated zone. *Water Resources Research*, 22(9S), 89S–108S. doi:10.1029/wr022i09sp0089s
- Nikolaidis, N. P., Karatzas, G. P., Maragkaki, A., Vozinakis, K. (2023). Preparation of the Operational Plan for the Reorganization of the Agia Springs – Draft for Consultation (in Greek)
- Nikolaidis, N. P., Karatzas, G. P., Vozinakis, K., Kourgialas, N., Kousouris, T., Stamati, F., Moraitis, D., Kritsotakis, M. (2010). Special Management Plan for Water Resources for the Drainage Basins of Keritis River, Therisso, and Koliaris, Chania (in Greek)
- Oki, T. and Kanae, S. (2006). *Global Hydrological Cycles and World Water Resources*. *Science*, 313(5790), 1068–1072. doi:10.1126/science.1128845

- Pavlaki, A., Lionis, M., Revision and Expansion of the General Urban Plan of the Municipality of Chania and the Periurban Municipalities of Eleftherios Venizelos, Therisso, and Souda, Preliminary Study of Geological Suitability, 2013 (in Greek)
- Papafilippaki, A. K., Kotti, M.E., Stavroulakis, G.G. (2008). Seasonal Variations in Dissolved Heavy Metals in the Keritis River, Chania, Greece
- Pinder GF, Gray WG. (1977). Finite element simulation in surface and subsurface hydrology
- Porinchu, D. F. (2017). Global Climate Change. International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology, 1–8. doi:10.1002/9781118786352.wbieg0922
- Sanford, W., E. (2013). Isotope Methods for Dating Old Groundwater (pp.245-258)
- Simmons, C., T. (2008). Henry Darcy (1803–1858): Immortalised by his scientific legacy. *Hydrogeology Journal*, 16, 1023–1038
- Staboultzidis, A. G. , Dokou, Z., Karatzas, G.P. (2017). Capture Zone Delineation and Protection Area Mapping in the Aquifer of Agia, Crete, Greece. doi 10.1007/s40710-017-0221-3
- United Nations. (2022). World Population Prospects
- United Nations. (2020). The United Nations World Water Development Report 2020. *Water and Climate Change*
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Rose, S. K. (2011). *The representative concentration pathways: an overview. Climatic Change*, 109(1-2), 5–31. doi:10.1007/s10584-011-0148-z
- Wang, C., Manga, M. (2021). Water and Earthquakes
- Wikipedia Commons
- WMO. (2019). Statement on the State of the Global Climate in 2018. Geneva, WMO. [library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=5789](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5789)

