



## **ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

Σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών  
Περιβάλλοντος

**Κατεύθυνση:** Μηχανικών Περιβάλλοντος

Διπλωματική Εργασία:

**«Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής στην περιοχή Τυμπακίου  
Ηρακλείου Κρήτης υπό την επίδραση κλιματικής αλλαγής –  
εξέταση κλιματικών σεναρίων»**

**ΗΛΙΑΣ ΟΒΑΡΔΑΣ**

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Επιβλέπων)

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΝΙΚΟΛΑΙΔΗΣ

ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ

Αναπληρωματικός: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ

Χανιά, 2025

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 τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Πολυτεχνείου Κρήτης.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής του Τυμπακίου Κρήτης, με χρήση του μοντέλου υπόγειας ροής Princeton Transport Code (PTC), υπό την επιρροή κλιματικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Η μοντελοποίηση έγινε για τα επόμενα 45 χρόνια και θα εξεταστεί η συμπεριφορά του υδραυλικού ύψους. Το Τυμπάκι είναι μια παραθαλάσσια περιοχή στα νότια της Κρήτης του νομού Ηρακλείου, διαθέτει μεγάλες εκτάσεις καλλιερχειών και τουριστικών εγκαταστάσεων καθιστώντας το νερό έναν ιδιαίτερα πολύτιμο πόρο για τη περιοχή.

Πριν την χρήση του μοντέλου PTC, συλλέχθηκαν δεδομένα σχετικά με τις τοποθεσίες και το ρυθμό άντλησης των γεωτρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν προηγούμενες μελέτες καθώς και χάρτες για τον προσδιορισμό της γεωμορφολογίας της περιοχής και ακολούθησε η κατάλληλη επεξεργασία τους σε περιβάλλον ArcMap GIS. Επίσης συλλέχθηκαν μετεωρολογικά δεδομένα βροχόπτωση για την περιοχή από διάφορα μοντέλα, για να γίνει η σύγκριση τους και να επιλεγθούν τα κατάλληλα για τη παρακάτω ερεύνα.

Πριν αναλυθεί η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων και των αποτελεσμάτων δόθηκε το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση βασικών εννοιών υδρολογίας και μηχανικής υπόγειων νερών, καθώς και το ρόλο της κλιματικής αλλαγής στις ανθρώπινες δραστηριότητες και στους υπόγειους πόρους. Επιπρόσθετα γίνεται η χρήση κωδικών Matlab για την επεξεργασία των δεδομένων, οι οποίοι θα εξηγηθούν και θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια. Τέλος τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε μορφή γραφικών παραστάσεων για τα σημεία παρατήρησης του υπόγειου νερού, που θα ορίσουμε παρακάτω, ως προς τη χρονική περίοδο μελέτης και θα ακολουθήσει η ανάλυση των αποτελεσμάτων αυτών σε συνάρτηση με τη κλιματική αλλαγή.

## **ABSTRACT**

The objective of this thesis is to study the groundwater aquifer in the Tympaki region of Crete using the Princeton Transport Code (PTC) groundwater flow model, under the influence of climatic and anthropogenic factors. The modeling will be conducted for the next 45 years, and the behavior of the hydraulic head will be examined.

Tympaki is a coastal area in southern Crete, in the Heraklion regional unit, characterized by extensive agricultural lands and tourism facilities, making water a particularly valuable resource for the region.

Before using the PTC model, data were collected on the locations and pumping rates of wells. Previous studies and maps were also utilized to determine the area's geomorphology, followed by appropriate data processing in the ArcMap GIS environment. Additionally, meteorological rainfall data for the area were gathered from various models to facilitate comparison and the selection of the most suitable datasets for this study.

Before analyzing the data processing methodology and results, the necessary theoretical background will be provided to aid in understanding key concepts of hydrology and groundwater mechanics, as well as the role of climate change in human activities and groundwater resources. Furthermore, Matlab scripts were used for data processing, which will be explained and analyzed in the following chapters.

Finally, the results are presented in the form of graphical representations for the groundwater observation points defined in this study, in relation to the study period. The analysis of these results will follow, in correlation with climate change.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθ. Γεώργιο Καρατζά, για την εξαιρετική συνεργασία και βοήθεια κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της διπλωματικής, η οποία με βοήθησε να εμβαθύνω στο αντικείμενο που με ενδιαφέρει και να μου δοθεί μια ευκαιρία να βιώσω αυτή την εμπειρία με έναν άνθρωπο που έχει πάθος και αγάπη για αυτή την επιστήμη. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη συνάδελφο κ. Περογιαννάκη Χρυσή, προπτυχιακή φοιτήτρια ΜΠΔ, για την πολύτιμη βοήθεια της στην κατανόηση της θεωρίας προγραμματισμού. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω τον κ. Νικολαΐδη Νικόλαο, κ. Αριστεΐδη Κουτρούλη για την συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

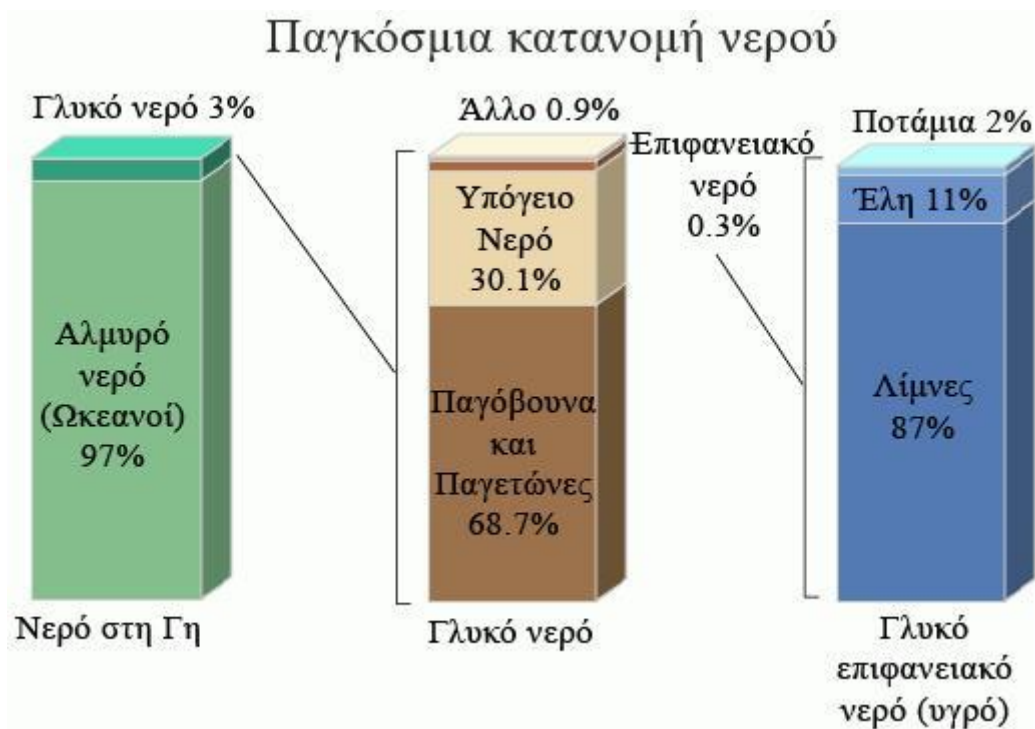
<b>1. Κεφάλαιο 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Βασικές Έννοιες, Ύδατα, Νομοθεσία και Υδροφορείς .....</b>	<b>8</b>
1.1. Υδάτινοι πόροι.....	8
1.2. Στοιχεία Νομοθεσίας για τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα .....	10
1.2.1. Οδηγία 2000/60 .....	10
1.2.1.1. Περιβαλλοντικοί Στόχοι.....	11
1.3. Υδρολογικός κύκλος .....	12
1.4. Υδρολογικό ισοζύγιο .....	13
1.5. Βασικές έννοιες Υπόγειας Υδρολογίας .....	14
1.6. Υδροφορείς (Aquifers) .....	14
<b>2. Κεφάλαιο 2- Θεωρητικό υπόβαθρο .....</b>	<b>17</b>
2.1. Κλιματική αλλαγή.....	17
2.1.1. Παγκόσμια μοντέλα .....	20
2.1.2. Κλιματικά σενάρια .....	20
2.1.3. Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα ύδατα .....	23
2.1.4. Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στο τομέα των Υδάτων στην Ελλάδα	23
2.2. Φαινόμενο υφαλμύρισης .....	24
2.2.1. Μηχανισμός της υφαλμύρισης .....	24
2.2.2. Αντιμετώπιση – Αναστροφή του φαινομένου υφαλμύρισης .....	26
2.3. Μαθηματικό υπόβαθρο .....	27
2.3.1. Παράμετροι υδροφορέων.....	27
2.3.2. Νόμος του Darcy .....	31
2.3.3. Θεωρήσεις της υπόγειας ροής .....	34
2.3.4. Γενικές Εξισώσεις ροής.....	35
<b>3. Κεφάλαιο 3 – Μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής .....</b>	<b>38</b>
3.1. Μοντέλο Πεπερασμένων Διαφορών .....	38
3.2. Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων .....	39
<b>4. Κεφάλαιο 4- Περιοχή Μελέτης.....</b>	<b>42</b>
4.1. Υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης .....	45
4.2. Γεωλογία της περιοχής .....	48

4.3.	Κλιματικά δεδομένα της περιοχής .....	49
<b>5.</b>	<b>Κεφάλαιο 5 – Μοντελοποίηση με χρήση H/Y: PTC .....</b>	<b>52</b>
5.1.	Το πρόγραμμα Argus one .....	52
5.2.	Οι βασικές εξισώσεις του PTC .....	52
5.3.	Αλγόριθμος επίλυσης του PTC.....	53
5.4.	Τρισδιάστατη ροή υπόγειων υδάτων .....	53
5.4.1.	Βασική εξίσωση .....	53
5.4.2.	Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων .....	54
5.4.3.	Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών.....	56
5.4.4.	Οριακές συνθήκες.....	57
<b>6.</b>	<b>Κεφάλαιο 6- Χρήση του λογισμικού ArgusONE &amp; Επεξεργασία αρχικών δεδομένων</b>	<b>60</b>
6.1.	Βασικά στοιχεία και επεξήγηση UI.....	60
6.2.	Αρχικές ρυθμίσεις και εισαγωγή δεδομένων .....	64
6.3.	Βαθμονόμηση.....	72
6.4.	Επεξεργασία δεδομένων βροχόπτωσης με κώδικα Matlab.....	72
6.5.	Επιλογή κατάλληλων κλιματικών σεναρίων .....	75
6.6.	Προσαρμογή παραμέτρων PTC .....	82
6.7.	Επεξεργασία αρχικών αποτελεσμάτων PTC .....	84
<b>7.</b>	<b>Κεφάλαιο 7- Αποτελέσματα τελικών δεδομένων &amp; Συζήτηση .....</b>	<b>91</b>
<b>8.</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>98</b>
	<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>100</b>

# 1. Κεφάλαιο 1- ΕΙΣΑΓΩΓΗ: Βασικές Έννοιες, Ύδατα, Νομοθεσία και Υδροφορείς

## 1.1. Υδάτινοι πόροι

Όταν αναφερόμαστε στους υδάτινους πόρους, εννοούμε όλα τα επιφανειακά αλλά και υπόγεια ύδατα μιας περιοχής. Υπόγεια ύδατα είναι οι υδάτινες ποσότητες που υπάρχουν μέσα στο υπέδαφος και στους διάφορους υπόγειους γεωλογικούς σχηματισμούς (Καρατζάς, 2005) . Το νερό καταλαμβάνει περίπου το 70% του πλανήτη μας, το οποίο και φυσικά είναι απαραίτητο για την ανάπτυξη και εξέλιξη όλης της οργανικής ζωής. Παρακάτω παρουσιάζονται το διάγραμμα και ο πίνακας σχετικά με την ποσοστιαία και ποσοτική κατανομή του νερού και παρατηρούμε ότι περισσότερο από το 96% του νερού είναι αλμυρό, το οποίο μας αφήνει μόλις στο 3% για το διαθέσιμο γλυκό νερό στη Γη. Όπου το 68.7% των αποθεμάτων γλυκού νερού βρίσκεται στο πάγο και στους παγετώνες, το 30.1% στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα, περίπου το 0.9% στην ατμόσφαιρα και στο έδαφος σε μορφή υγρασίας και το υπόλοιπο 0.3% είναι επιφανειακό νερό. Παρόλο που μόνο το 0.3% είναι επιφανειακό νερό (δηλ. λίμνες, ποτάμια) παίζουν τεράστιο ρόλο για την εξυπηρέτηση των ανθρωπίνων αναγκών σε νερό. (ΔΕΥΑΕΛ, 2024)



Εικόνα 1.1 Παγκόσμια κατανομή νερού (ΔΕΥΑΕΛ, 2024)



Πίνακας 1-1 Εκτίμηση παγκόσμιας κατανομής νερού (Schneider, 1996)

Μορφή νερού	Όγκος νερού σε κυβικά χιλιόμετρα (Km <sup>3</sup> )	Ποσοστό νερού (%)	Ποσοστό συνολικού νερού (%)
<b>Ωκεανοί, Θάλασσες &amp; Κόλποι</b>	1,338,000,000	-	96.5
<b>Παγόβουνα, Παγετώνες &amp; Μόνιμο χιόνι</b>	24,064,000	68.7	1.74
<b>Υπόγειο Νερό</b>	23,400,000	-	1.7
<b>Γλυκό</b>	10,530,000	30.1	0.76
<b>Αλμυρό</b>	12,870,000	-	0.94
<b>Εδαφική Υγρασία</b>	16,500	0.05	0.001
<b>Εδαφικός πάγος &amp; Μόνιμα παγωμένο έδαφος</b>	300,000	0.86	0.022
<b>Λίμνες</b>	176,400	-	0.013
<b>Γλυκές</b>	91,000	0.26	0.007
<b>Αλμυρές</b>	85,400	-	0.006
<b>Ατμόσφαιρα</b>	12,900	0.04	0.001
<b>Έλη</b>	11,470	0.03	0.0008
<b>Ποταμοί</b>	2,120	0.006	0.0002
<b>Βιολογικό Νερό</b>	1,120	0.003	0.0001
<b>Σύνολο</b>	1,386,000,000	-	100

Αυτό που πρέπει να αναφέρουμε είναι ότι παρόλο που το νερό που βρίσκεται στα υπόγεια ύδατα, σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, είναι πολύ περισσότερο, σε σχέση με τα επιφανειακά, δεν ανανεώνεται με τους ίδιους ρυθμούς που ανανεώνονται τα επιφανειακά και γ' αυτό το λόγο τα επιφανειακά νερά χρησιμοποιούνται πιο έντονα για τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Επομένως πρέπει να λάβουμε υπόψη όλη την εικόνα της κυκλοφορίας του νερού, δηλαδή το νερό που μεταφέρεται στον υδρολογικό κύκλο, που θα αναλυθεί παρακάτω, και όχι μόνο τη καθαρή ποσότητα νερού που μπορεί να αποθηκεύσει κάθε πηγή. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω πίνακα, για μια μέση ετήσια βάση.

Πίνακας 1-2 Εκτίμηση των μέσων ετήσιων φυσικών διακινήσεων του νερού της Γης (συνιστωσών του υδρολογικού κύκλου) (Ξανθόπουλος, 1999)

Επιφάνεια αναφοράς	Έκταση σε δισεκατομμύρια τετραγωνικά χιλιόμετρα	Διακίνηση	Μέσος ετήσιος όγκος σε κυβικά χιλιόμετρα	Ποσοστό επί των κατακρημνισμάτων, %
Σύνολο επιφάνειας Γης	510.0	Κατακρημνίσματα= Εξατμισοδιαπνοή	577,000	100.0
Ωκεανοί	361.1	Κατακρημνίσματα	458,000	100.0
		Εξάτμιση	505,000	110.3
Ξηρά	148.9	Κατακρημνίσματα	119,000	100.0
		Εξατμισοδιαπνοή	72,000	60.5
		Συνολική απορροή	47,000	39.5
		Επιφανειακή συνιστώσα απορροής	44,700	37.6
		Υπόγεια συνιστώσα απορροής	2,300	1.9

## 1.2. Στοιχεία Νομοθεσίας για τα υπόγεια και επιφανειακά ύδατα

### 1.2.1. Οδηγία 2000/60

Σκοπός της παρούσας οδηγίας είναι η θέσπιση πλαισίου για την προστασία των εσωτερικών επιφανειακών, των μεταβατικών, των παράκτιων και των υπόγειων υδάτων, το οποίο:

- Να αποτρέπει την περαιτέρω αλλοίωση, να προστατεύει και να αναβαθμίζει την κατάσταση των υδάτινων οικοσυστημάτων, καθώς και των αμέσως εξαρτώμενων από αυτά οικοσυστήματα πανίδας και χλωρίδας.
- Να προωθεί την βιώσιμη χρήση νερού, μέσω της μακροπρόθεσμης και συνεχούς προστασίας των υδάτινων πόρων
- Να αποσκοπεί στην ενίσχυση και τη προστασία του υδάτινου περιβάλλοντος, με χρήση μέτρων προοδευτικής μείωσης απορρίψεων, εκπομπών και διαρροών ουσιών προτεραιότητας και με την παύση ή τη σταδιακή εξάλειψη των απορρίψεων, εκπομπών και διαρροών των επικίνδυνων ουσιών προτεραιότητας.
- να διασφαλίζει την προοδευτική μείωση της ρύπανσης των υπογείων υδάτων και να αποτρέπει την περαιτέρω μόλυνσή τους
- να συμβάλλει στο μετριασμό των επιπτώσεων από πλημμύρες και ξηρασίες (Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2000)

#### 1.2.1.1. Περιβαλλοντικοί Στόχοι

Σύμφωνα με το άρθρο 4 της οδηγίας 2000/60 οι περιβαλλοντικοί στόχοι για τα υπόγεια ύδατα έχουν ως εξής:

a) Για τα επιφανειακά ύδατα:

1. Τα κράτη μέλη να εφαρμόζουν τα απαραίτητα προληπτικά μέτρα για την προστασία του συνόλου του συστήματος των επιφανειακών νερών.
2. Τα κράτη μέλη να αποσκοπούν την προστασία, την αναβάθμιση και την προστασία όλων των συστημάτων των επιφανειακών νερών για τα τεχνητά και τροποποιημένα υδατικά συστήματα. Η χρονική διάρκεια που δίνεται για την επίτευξη καλής κατάστασης των επιφανειακών υδάτων είναι το αργότερο 15 έτη από την ημερομηνία ισχύος της οδηγίας.
3. Με τελικό αποτέλεσμα την επίτευξη καλού οικολογικού δυναμικού και καλής χημικής κατάστασης των επιφανειακών υδάτων, τα κράτη μέλη καλούνται να προστατέψουν και να αναβαθμίσουν όλα τα τεχνητά και ιδιαιτέρως τροποποιημένα υδατικά συστήματα. Η διεκπεραίωση του στόχου ορίζεται όπως και πριν στα 15 χρόνια από την εφαρμογή της οδηγίας.
4. Σύμφωνα με το άρθρο 16 και τις παραγράφους 1 και 8, τα κράτη μέλη πρέπει να αποσκοπήσουν στην συστηματική και αποτελεσματική μείωση της ρύπανσης από ουσίες προτεραιότητας και την ταυτόχρονη διακοπή ή σταδιακή κατάργηση των εκπομπών, των απορρίψεων και των διαρροών επικίνδυνων ουσιών προτεραιότητας.

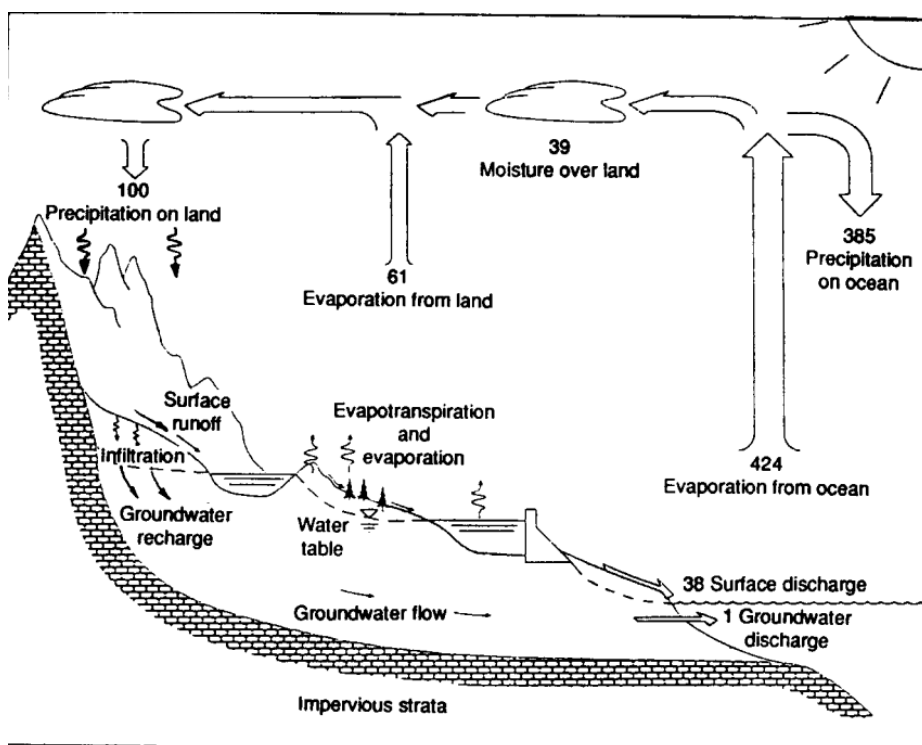
b) Για τα υπόγεια ύδατα:

1. Τα κράτη μέλη να εφαρμόσουν τα απαραίτητα προληπτικά μέτρα ώστε να αποφευχθεί η απόρριψη αποβλήτων στα υπόγεια ύδατα, ώστε να αποτραπεί η υποβάθμιση της κατάστασης των συστημάτων των υπόγειων νερών.
2. Τα κράτη μέλη πρέπει να εξασφαλίζουν την ισορροπία μεταξύ της άντλησης και της ανατροφοδότησης των υπόγειων υδάτων, με σκοπό την επίτευξη καλής κατάστασης των υπόγειων υδάτων, με όριο διεκπεραίωσης στόχου τα 15 έτη από την στιγμή εφαρμογής της οδηγίας.
3. Τέλος τα κράτη μέλη να εφαρμόζουν τα αναγκαία μέτρα για την παρεμπόδιση και αναστροφής κάθε σημαντικής και έμμεσης ανοδικής συγκέντρωσης οποιουδήποτε ρύπου, ο οποίος οφείλεται σε ανθρώπινη δραστηριότητα. Έτσι ώστε να μειωθεί μακροπρόθεσμα και βραχυπρόθεσμα η ρύπανση των υπόγειων υδάτων.

(Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο, 2000)

### 1.3. Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος μας περιγράφει την αέναη κίνηση του νερού μεταξύ των ωκεανών, την ατμόσφαιρα και την ξηρά, δείχνοντας μας παράλληλα και τις αλλαγές που επικρατούν ανάμεσα στην υγρή, την αέρια και τη στερεή φάση του νερού. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται η σχηματική περιγραφή του κύκλου. (Μπαλτάς, 2018)



Εικόνα 1.2 Ο υδρολογικός κύκλος και το παγκόσμιο ετήσιο υδρολογικό ισοζύγιο (Maidment, 1993)

Ως αρχή του υδρολογικού κύκλου θεωρούμε την ατμόσφαιρα. Καθώς λόγο της εξάτμισης του νερού από τη θάλασσα, την ξηρά και από την διαπνοή των δέντρων και της βλάστησης, συγκεντρώνονται οι υδρατμοί του νερού. Στη συνέχεια υπό ορισμένες συνθήκες, οι υδρατμοί αυτοί με τη βοήθεια των ανέμων συμπυκνώνονται σε νέφη και έπειτα υπό τη μορφή ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι) επανέρχονται στην επιφάνεια της γης. Από τη στιγμή που το νερό φτάσει στην επιφάνεια, επικρατούν τρία σενάρια. Στο πρώτο, ένα μέρος του νερού συγκρατείται από τη βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά. Στο δεύτερο, ένα άλλο μέρος του νερού διηθείται εντός του εδάφους. Τέλος στο τρίτο σενάριο, ένα μέρος του νερού καταλήγει στις λίμνες ή τις θάλασσες.

Το νερό που διηθείται, ένα μέρος του εξατμίζεται ή διαπνέεται μέσω των φυτών και το υπόλοιπο διηθείται σε βαθύτερα στρώματα ανανεώνοντας τους υπόγειους υδροφορείς βρίσκοντας αργότερα διέξοδο προς την επιφάνεια της γης σε χαμηλότερα υψόμετρα και καταλήγοντας τελικά στη θάλασσα. Οι υπόγειοι υδροφορείς θα αναλυθούν περαιτέρω σε επόμενες ενότητες. Τέλος αφού το νερό φτάσει στη θάλασσα, μέσω της εξάτμισης όπως προαναφέραμε, το νερό θα επιστρέψει πίσω στην ατμόσφαιρα και κάπως έτσι θα ολοκληρωθεί ο υδρολογικός κύκλος.

(Μπαλτάς, 2018)

#### 1.4. Υδρολογικό ισοζύγιο

Η μαθηματική έκφραση που περιγράφει τον υδρολογικό κύκλο, είναι το υδρολογικό ισοζύγιο ή υδατικό ισοζύγιο. Το ισοζύγιο αυτό, όπως και κάθε άλλο, εκφράζει τη διαφορά μεταξύ της εισροής και της εκροής σε μια λεκάνη απορροής, με το ρυθμό αλλαγής της αποθήκευσης νερού στη λεκάνη  $\Delta S$ , σε καθορισμένο χρόνο  $\Delta t$ . Αν θεωρηθεί ότι έχουμε ένα σύστημα που αποτελείται από τη λεκάνη απορροής, ή ένα ταμιευτήρα, στον οποίο είναι γνωστές μόνο η εκροή και η εισροή και άγνωστες οι εσωτερικές διεργασίες, το υδρολογικό της ισοζύγιο μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \bar{I} - \bar{O}$$
$$\frac{S_2 - S_1}{\Delta t} = \frac{I_1 + I_2}{2} - \frac{O_1 + O_2}{2}$$

Όπου:

$\bar{I}$  &  $\bar{O}$  είναι αντίστοιχα η μέση εισροή και εκροή για το χρονικό διάστημα  $\Delta t$ , το οποίο υποτίθεται ότι είναι αρκετά μικρό, ώστε να έχει νόημα ο υπολογισμός μέσων τιμών.

Οι δείκτες 1 και 2 αντιστοιχούν στις τιμές στην αρχή και το τέλος του χρονικού διαστήματος  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

Αν τα  $I$  και  $O$  μεταβάλλονται συνεχώς με το χρόνο  $t$ , τότε η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{dS(t)}{dt} = I_{(t)} - O_{(t)}$$

Σε μια λεκάνη απορροής, το νερό που εισρέει προέρχεται από βροχοπτώσεις, χιονοπτώσεις, χαλάζι και άλλες μορφές κατακρήμνισης. Αφού το νερό εισέλθει στη λεκάνη, έχει δύο δυνατότητες, να εκρέει ή να αποθηκεύεται. Η εκροή οφείλεται στην απορροή. Η απορροή διακρίνεται σε επιφανειακή, ενδιάμεση και υπόγεια συνυπολογίζοντας την εξάτμιση, τη διαπνοή και τη διήθηση. Παράλληλα υπάρχουν και διάφοροι μηχανισμοί αποθήκευσης, όπως η αποθήκευση ως επιφανειακό νερό (σε ταμιευτήρες ή ρέματα), υπεδάφια αποθήκευση (εντός στη ριζική ζώνη των φυτών) και υπόγεια αποθήκευση (στους υδροφορείς). Επομένως λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω μεταβλητές καταλήγουμε στην εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου:

$$\Delta S = P - R - G - E - T$$

Όπου:

P η ποσότητα ύδατος που κατακρημνίζεται

R η ποσότητα ύδατος που απορρέει επιφανειακά

G η ποσότητα ύδατος που απορρέει υπόγεια

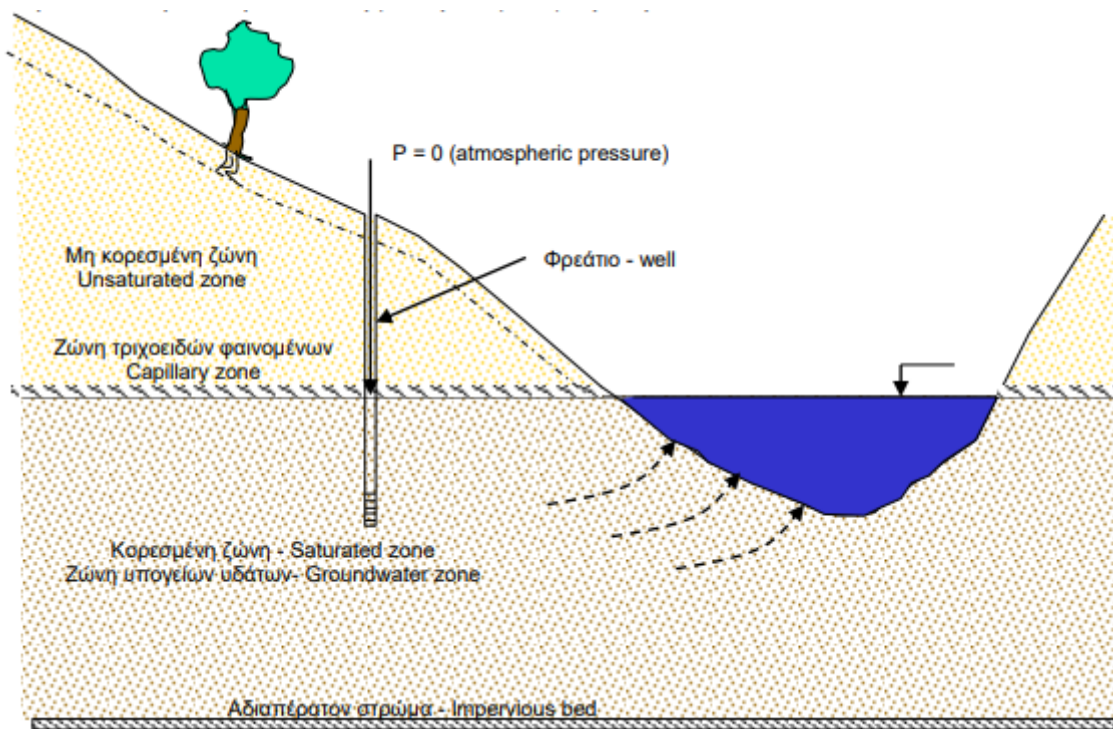
E η ποσότητα ύδατος που εξατμίζεται

Τ η ποσότητα ύδατος που διαπνέεται από την βλάστηση  
(Μπαλτάς, 2018)

### 1.5. Βασικές έννοιες Υπόγειας Υδρολογίας

Τα υπόγεια ύδατα ταξινομούνται σε δύο ζώνες:

1. Στην ακόρεστη ζώνη(unsaturated zone): όπου οι εδαφικοί πόροι καταλαμβάνονται από ένα μείγμα αέρα και νερού.
2. Στην κορεσμένη ζώνη(saturated zone): όπου όλοι οι πόροι είναι πλήρεις με νερό και βρίσκονται υπό υδροστατική πίεση. Η άνω επιφάνεια της κορεσμένης ζώνης ονομάζεται υδροφόρος ορίζοντας, στον οποίο η υδροστατική και η ατμοσφαιρική πίεση είναι ίσες. (Καρατζάς, 2005)



Εικόνα 1.3 Ταξινόμηση Υπόγειων Υδάτων (Καρατζάς, 2005)

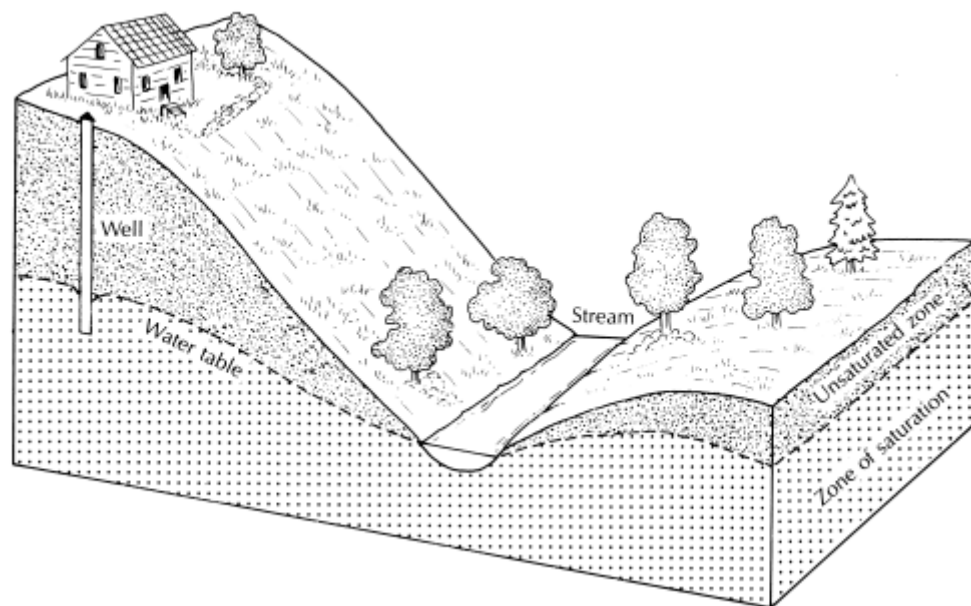
### 1.6. Υδροφορείς (Aquifers)

Υδροφορέας είναι ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό και τα οποία προμηθεύουν τα φρέατα τις πηγές με σημαντικές ποσότητες νερού. Λόγο της μεγάλης έκτασης και χωρητικότητας που έχουν οι υδροφορείς μπορούμε να τους θεωρήσουμε σαν υπόγειες δεξαμενές.

Οι υδροφορείς χωρίζονται σε:

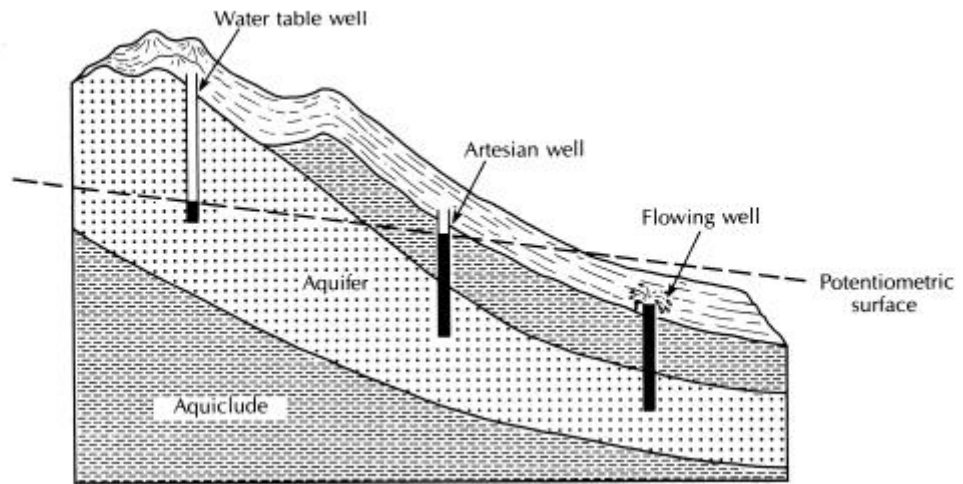
1. Ελεύθερους(unconfined aquifer): Ελεύθερος υδροφορέας είναι ένα υδροφόρο στρώμα πάνω σε ένα αδιαπέρατο υπόστρωμα. Το νερό σχηματίζει μια ελεύθερη επιφάνεια όπου το πιεζομετρικό φορτίο είναι ίσο με την ατμοσφαιρική πίεση. Η ελεύθερη επιφάνεια του νερού ονομάζεται και υδροστατική επιφάνεια ή υδροφόρος ορίζοντας (water table).
2. Περιορισμένους(confined aquifer): Περιορισμένος ή αρτεσιανός υδροφορέας (artesian aquifer) είναι ένα υδροφόρο στρώμα το οποίο περιορίζεται μεταξύ δύο αδιαπέραστων στρωμάτων. Το νερό μέσα σε περιορισμένους υδροφορείς έχει πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Επομένως, η στάθμη του νερού σε πηγάδι παρατήρησης που διαπερνά ένα περιορισμένο υδροφορέα υπερβαίνει την πάνω αδιαπέραστη επιφάνεια του υδροφορέα. Το πηγάδι αυτό ονομάζεται αρτεσιανό (artesian well). Η φανταστική επιφάνεια η οποία ορίζεται από το πιεζομετρικό ύψος, το οποίο θεωρητικά είναι δυνατόν να παρατηρηθεί σε διάφορα χωρικά κατανεμημένα πηγάδια παρατήρησης, ονομάζεται πιεζομετρική επιφάνεια (piezometric surface ή potentiometric surface). (Χρυσικόπουλος, 2020)

Δίνονται σχηματικές απεικονίσεις ελεύθερου και περιορισμένου υδροφορέα.

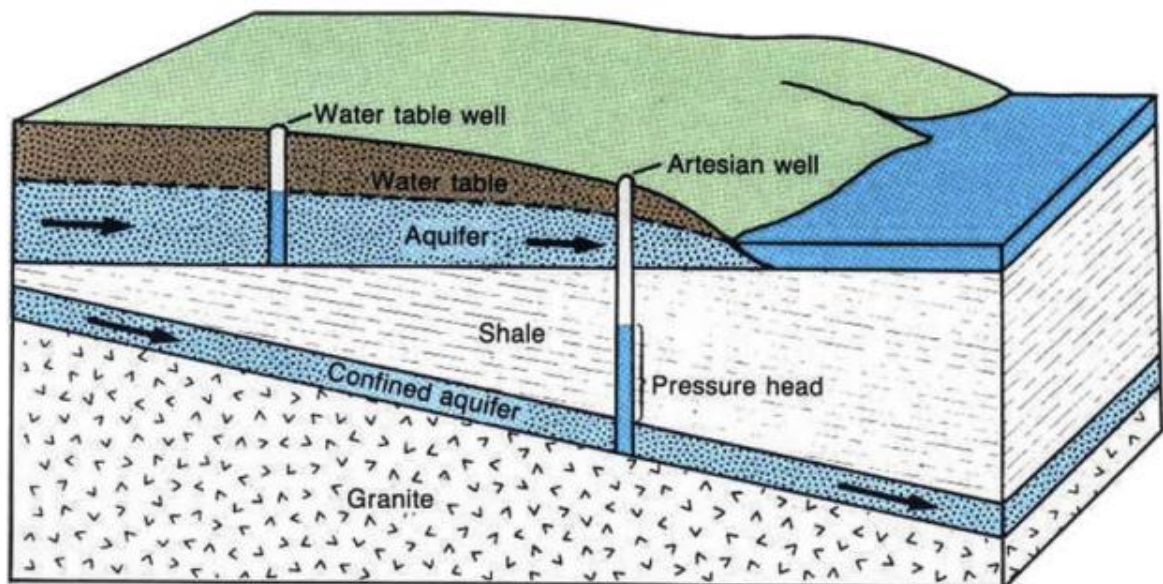


Εικόνα 1.4 Ελεύθερος Υδροφορέας (C.W. Fetter, 2014)





Εικόνα 1.5 Περιορισμένος Υδροφόρας (C.W. Fetter, 2014)



Εικόνα 1.6 Απεικόνιση ελεύθερου και περιορισμένου υδροφόρα (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)



## 2. Κεφάλαιο 2- Θεωρητικό υπόβαθρο

### 2.1. Κλιματική αλλαγή

Με τον όρο κλιματική αλλαγή αναφερόμαστε στη παγκόσμια μεταβολή των μετεωρολογικών συνθηκών σε βάθος χρόνου. Αυτές οι μεταβολές αποτελούνται από μεγάλες στατιστικές διακυμάνσεις ως προς τη μέση κατάσταση του κλίματος ή το ρυθμό μεταβολής του, που καταγράφονται εδώ και πολλά χρόνια. Οι κλιματικές αλλαγές οφείλονται κυρίως στις ανθρώπινες δραστηριότητες αλλά παρατηρούνται από τις φυσικές διαδικασίες, όπως για παράδειγμα η τροποποίηση της σύνθεσης της ατμόσφαιρας. Στη Σύμβαση – Πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCC), η Κλιματική Αλλαγή ορίζεται ως η μεταβολή στο κλίμα που οφείλεται άμεσα ή έμμεσα σε ανθρώπινες δραστηριότητες, διακρίνοντας τον όρο από την κλιματική μεταβλητότητα που συνδέεται με φυσικά αίτια. (United Nations, 1992)

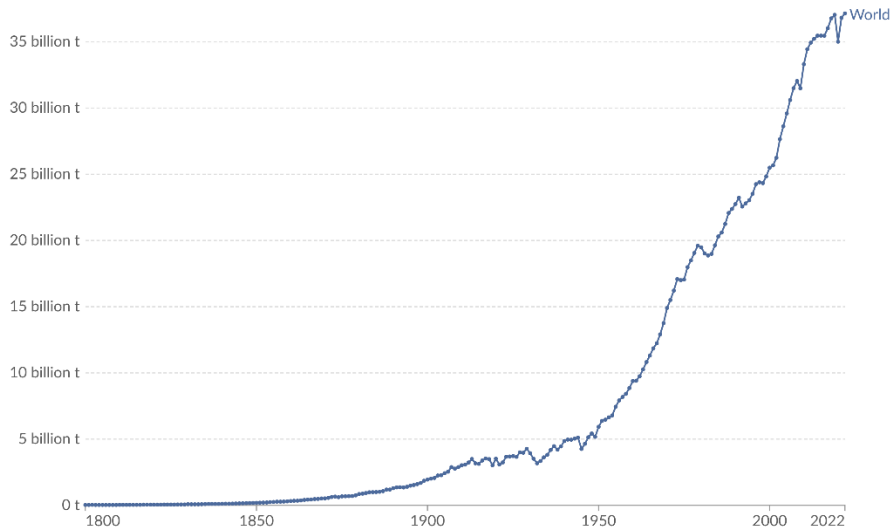
Το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής τα τελευταία χρόνια έχει γίνει μείζον ζήτημα σε παγκόσμια κλίμακα στη πολιτική σκηνή μεταξύ των κρατών. Από οικονομικής πλευράς, το ζήτημα της αυθαίρετης ρύπανσης της ατμόσφαιρας από το διοξείδιο του άνθρακα, ως αποτέλεσμα της οικονομικής δραστηριότητας, αποτελεί ισχυρό παράδειγμα αρνητικής εξωτερικότητας όσο και κατάχρηση ενός πόρου κοινής ιδιοκτησίας. (Τσούτσος, 2023)

Όσο συνεχίζεται η διαρκής συσσώρευση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα, θα ασκείτε όλο και μεγαλύτερη πίεση στο παγκόσμιο κλίμα. Το γεγονός ότι η Κλιματική Αλλαγή είναι πλέον από τα σημαντικότερα ζητήματα, αν όχι το σημαντικότερο, που πρέπει να λύσει η ανθρωπότητα, θα ήταν προς όφελος του καθενός να μειωθούν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου. Όμως αυτό που παρατηρείτε και πρέπει να γίνει ξεκάθαρο είναι ότι καμία μεμονωμένη προσπάθεια δεν θα επιφέρει ουσιαστικά αποτελέσματα, πρέπει να γίνει αναφορά για μια ισχυρή διεθνή συμφωνία, που θα δεσμεύει τα έθνη να δράσουν για το κοινό αγαθό. Δυστυχώς παρά τις αλληπάλληλες παγκόσμιες διασκέψεις, είναι ακόμα βραδεία η πρόοδος στο ζήτημα της Κλιματικής Αλλαγής και στην πορεία μας σε μια πιο βιώσιμη και αειφόρο κοινωνία. (Τσούτσος, 2023)

## Annual CO<sub>2</sub> emissions

Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions from fossil fuels and industry<sup>1</sup>. Land-use change is not included.

Our World  
in Data



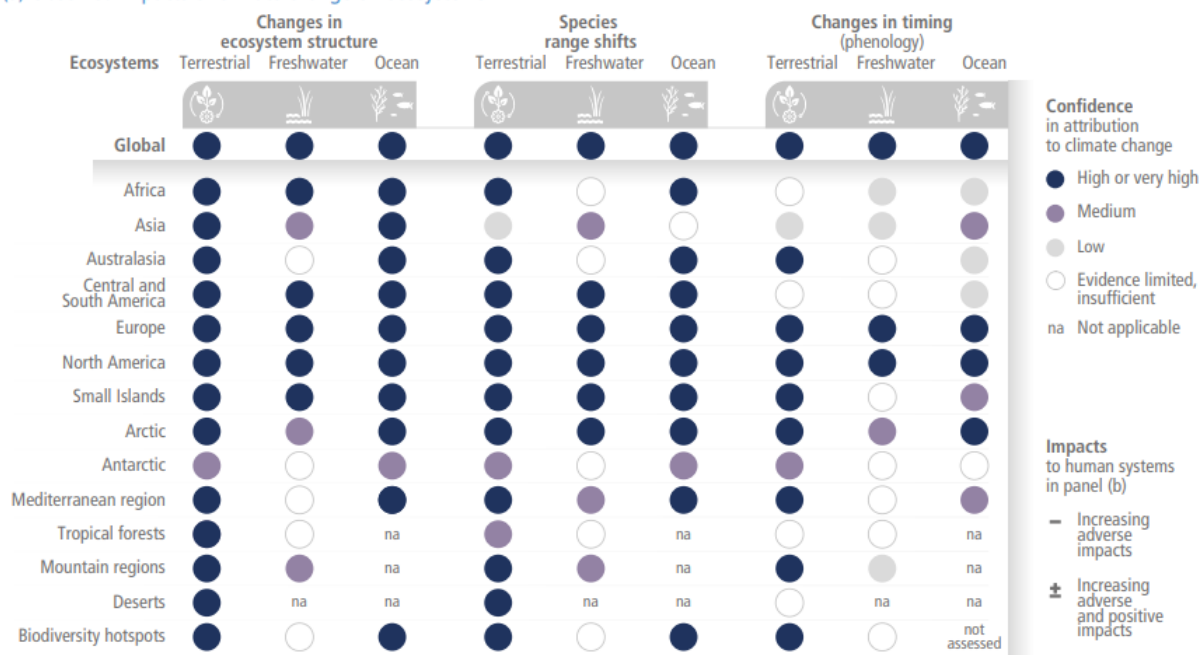
Data source: Global Carbon Budget (2023)

OurWorldinData.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions | CC BY

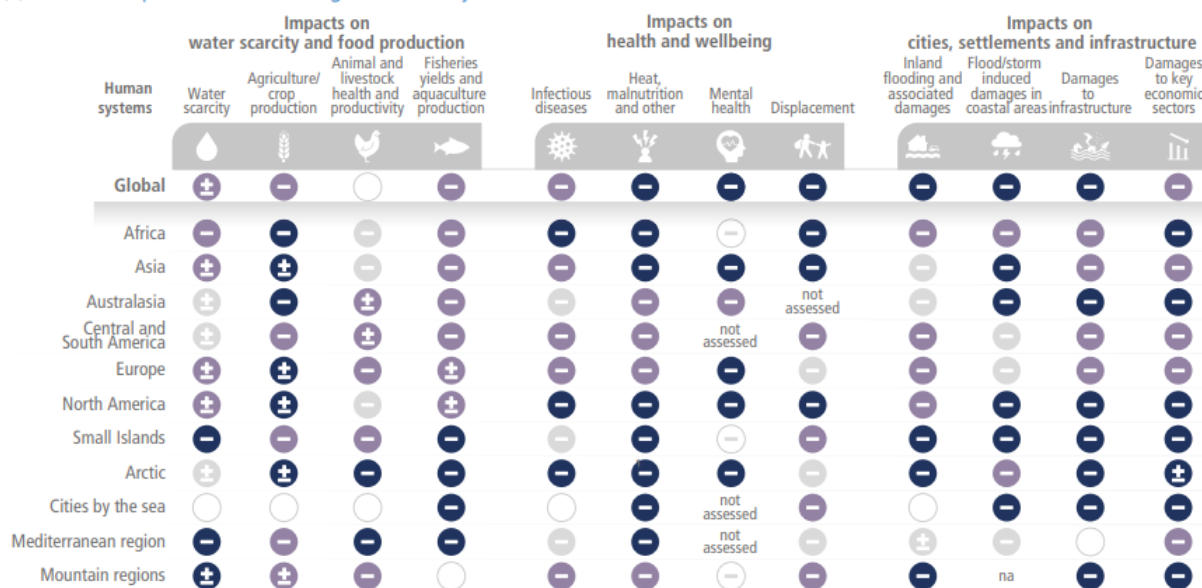
1. **Fossil emissions:** Fossil emissions measure the quantity of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emitted from the burning of fossil fuels, and directly from industrial processes such as cement and steel production. Fossil CO<sub>2</sub> includes emissions from coal, oil, gas, flaring, cement, steel, and other industrial processes. Fossil emissions do not include land use change, deforestation, soils, or vegetation.

Εικόνα 2.1 Ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> από ορυκτά καύσιμα και τη βιομηχανία (Roser, 2020)

(a) Observed impacts of climate change on ecosystems



(b) Observed impacts of climate change on human systems



Εικόνα 2.2 Παρατηρούμενες επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στο οικοσύστημα και στον άνθρωπο (IPCC, 2022)

### 2.1.1. Παγκόσμια μοντέλα

Τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργηθεί η ανάγκη να παρατηρείται, να καταγράφεται και να ερμηνεύεται μέσω μοντέλων η εξέλιξη του κλίματος. Τέτοια δυνατότητα παρέχουν τα κλιματικά μοντέλα, δηλαδή τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας ή GCM, τα οποία δίνουν ως αποτέλεσμα τιμές θερμοκρασίας και βροχοπτώσεων για τον πλανήτη. Η προσομοίωση λειτουργεί με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων για την μοντελοποίηση των αλληλεπιδράσεων της ατμόσφαιρας με τους ωκεανούς, την επιφάνεια της γης και τις πολικές περιοχές. Η πιο δημοφιλής χρήση των κλιματικών μοντέλων είναι η εκτίμηση της εξέλιξης της παγκόσμιας θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου (κλιματική αλλαγή). (Advanced Environmental Studies Σύμβουλοι Μηχανικοί Ανώνυμη Μελετητική Εταιρεία, 2020)

Βασικό μειονέκτημα των μοντέλων GCM είναι ότι προορίζονται για περιοχές μελέτης μεγάλης κλίμακας, με αποτέλεσμα να μην έχουν την επιθυμητή ακρίβεια για μικρότερες περιοχές. Το κενό αυτό έρχονται να αναπληρώσουν τα μικρής κλίμακας τοπικά κλιματικά μοντέλα ή RCM (Regional Climate Models), τα οποία λειτουργούν με τις ίδιες αρχές των GCM, με τη διαφορά ότι προορίζονται για μικρότερες περιοχές μελέτης, συνήθως ακτίνας 10-50 χιλιομέτρων. (Advanced Environmental Studies Σύμβουλοι Μηχανικοί Ανώνυμη Μελετητική Εταιρεία, 2020)

### 2.1.2. Κλιματικά σενάρια

Σύμφωνα με την Πέμπτη Έκθεση Αξιολόγησης της IPCC (Fifth Assessment Report-AR5), έχουν επικρατήσει τέσσερα κλιματικά σενάρια εκπομπών αερίων (Representative Concentration Pathways- RCPs), τα οποία αποτελούνται από χρονοσειρές συγκεντρώσεων εκλυόμενων αερίων του θερμοκηπίου, αιωρούμενων σωματιδίων και χημικά ενεργών αερίων στην ατμόσφαιρα, συμπεριλαμβάνοντας και τις αλλαγές χρήσεων γης. Οι βασικές παράμετροι που προσδιορίζουν τα σενάρια αυτά είναι:

- Ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού
- Οι οικονομικές δραστηριότητες
- Ο τρόπος ζωής των ανθρώπων
- Οι πηγές παραγωγής ενέργειας
- Ο ρυθμός τεχνολογικής ανάπτυξης
- Οι μελλοντικές μεταβολές στις χρήσεις γης και
- Η πολιτική που εφαρμόζεται για τη κλιματική αλλαγή

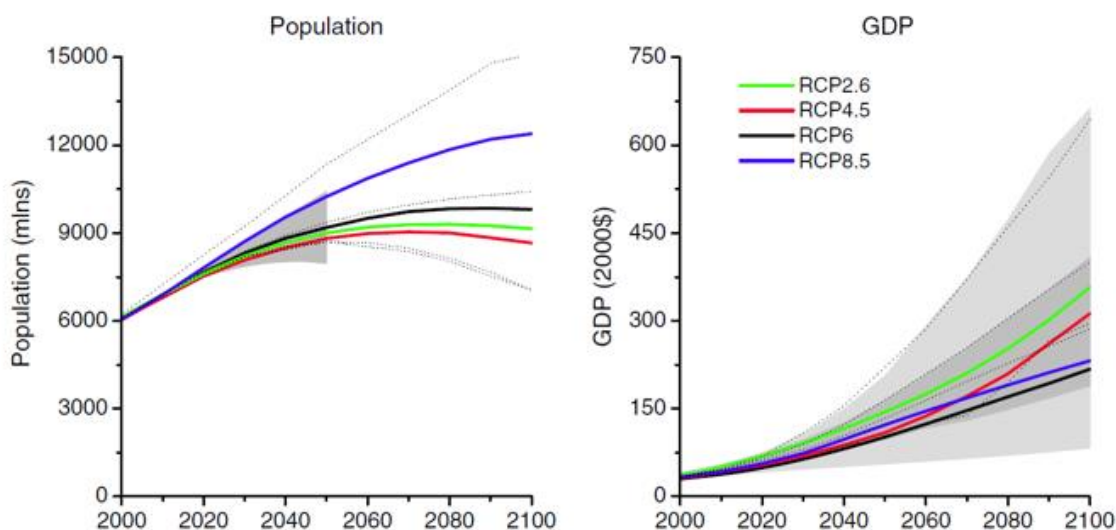
Τα σενάρια αυτά κατατάσσονται σε:

- Ένα ήπιο (RCP2.6)
- Δύο μέτρια (RCP4.5 & RCP6.0)
- Και ένα με πολύ υψηλές συγκεντρώσεις ελκυόμενων αερίων του θερμοκηπίου (RCP8.5)

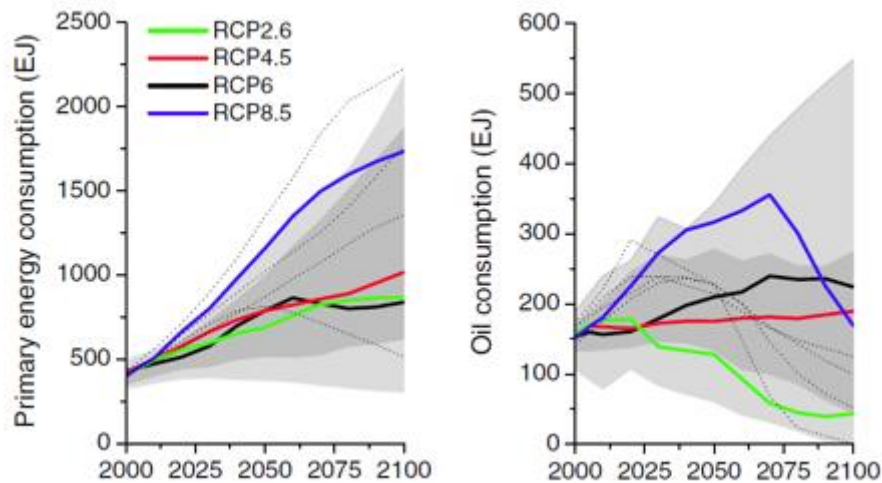
Στο RCP2.6 σενάριο, εκτιμάται ότι η αύξηση της μέσης παγκόσμιας θερμοκρασίας συγκριτικά με την προ-βιομηχανική εποχή εκτιμάται κάτω από 2°C.

Το Σενάριο Αντιπροσωπευτικής Συγκέντρωσης (Representative Concentration Pathway- RCP4.5) είναι ένα σενάριο που προβλέπει τη σταθεροποίηση του ενεργειακού ισοζυγίου στα 4.5 Watt ανά τετραγωνικό μέτρο μέχρι το έτος 2100, χωρίς να υπερβαίνει το στόχο αυτό. Το RCP4.5 προσομοιώνεται με το Μοντέλο Αξιολόγησης Παγκόσμιας Αλλαγής (Global Change Assessment Model- GCAM) και περιλαμβάνει μακροπρόθεσμες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ουσιών και χρήσεων γης σε παγκόσμιο οικονομικό πλαίσιο. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, το σενάριο προβλέπει γενική μείωση στη κατανάλωση ενέργειας και αλλαγή στο τρόπο με τον οποίο παράγεται. Τέλος σύμφωνα με το σενάριο οι εκπομπές μεθανίου προβλέπονται να είναι σταθερές, ενώ οι εκπομπές CO<sub>2</sub> δείχνει να αυξάνονται μέχρι το 2040 και να αρχίσουν να μειώνονται έως το 2100. (Advanced Environmental Studies Σύμβουλοι Μηχανικοί Ανώνυμη Μελετητική Εταιρεία, 2020) (Pacific Northwest National Laboratory and the University of Maryland)

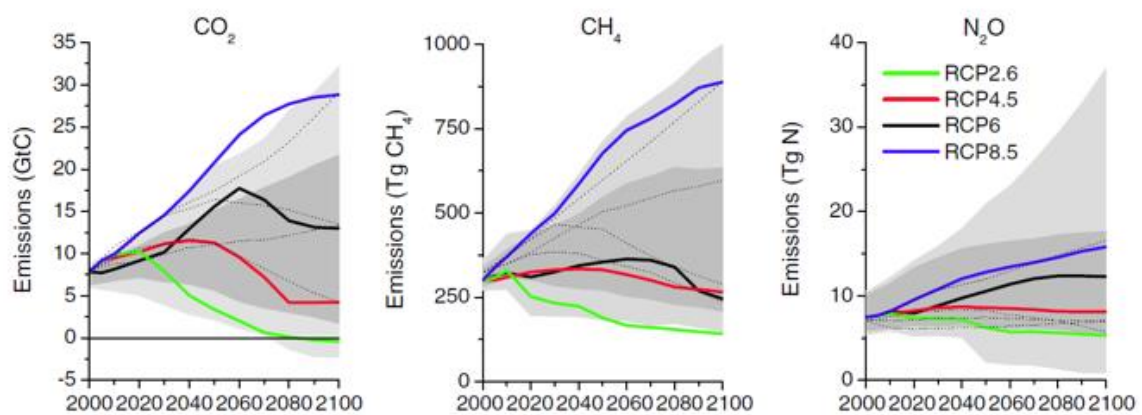
Το RCP8.5 δημιουργήθηκε μέσω του μοντέλου MESSAGE και το IIASA (Integrated Assessment Framework) του International Institute for Applied Analysis στην Αυστρία. Πρόκειται για ένα σενάριο που προβλέπει υψηλές αυξήσεις συγκεντρώσεων και εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Στο σενάριο αυτό δεν εφαρμόζονται πολιτικές για την μείωση των εκπομπών κάτι το οποίο θα προκαλέσει απότομη αύξηση των εκπομπών μεθανίου και N<sub>2</sub>O μέχρι το τέλος του αιώνα. Επίσης προβλέπεται αύξηση στη χρήση γης λόγω περαιτέρω αύξησης του πληθυσμού και παράλληλα διατήρηση της καύσης ορυκτών καυσίμων για παραγωγή ενέργειας και για μετακίνηση. (Advanced Environmental Studies Σύμβουλοι Μηχανικοί Ανώνυμη Μελετητική Εταιρεία, 2020)



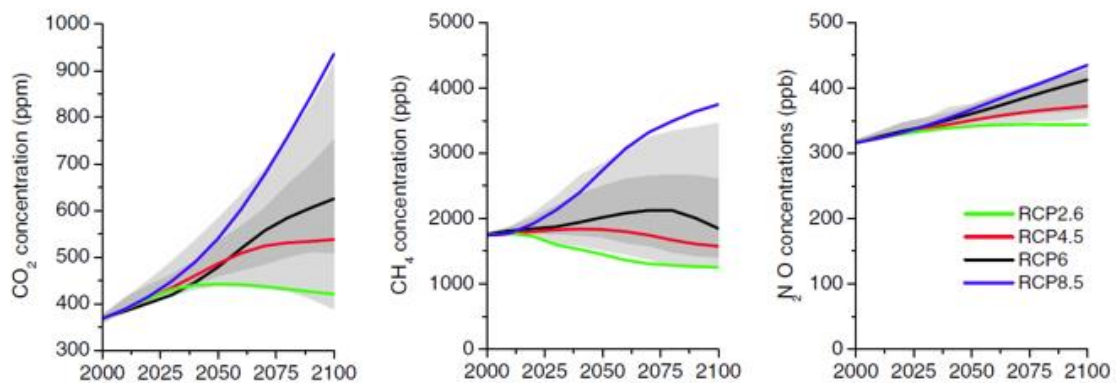
Εικόνα 2.3 Εξέλιξη του Πληθυσμού και του ΑΕΠ κατ' επέκταση για κάθε σενάριο (Government of Canada, 2024)



Εικόνα 2.4 Βασική κατανάλωση ενέργειας και κατανάλωση πετρελαίου για κάθε σενάριο (Government of Canada, 2024)



Εικόνα 2.5 Εκπομπές  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  &  $\text{N}_2\text{O}$  για κάθε σενάριο (Government of Canada, 2024)



Εικόνα 2.6 Συγκεντρώσεις  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  &  $\text{N}_2\text{O}$  για κάθε σενάριο (Government of Canada, 2024)



### 2.1.3. Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα ύδατα

Η κλιματική αλλαγή και η ερημοποίηση έχουν συνδεθεί με την απώλεια νερού, τη μείωση της ποσότητας νερού σε επίπεδο επιφανειακών αλλά και υπόγειων υδάτων για άρδευση και ύδρευση. (Bayram, 2014). Η έλλειψη νερού ήταν από τις πρώτες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής που αναγνωρίστηκαν σε χώρες της Βόρειας Αφρικής, όπως το Μαρόκο, οι οποίες διαθέτουν εκτεταμένες ξηρές περιοχές, ενώ χώρες όπως η Τουρκία, η Λιβύη, οι ΗΠΑ και η Κίνα πραγματοποιούν μεγάλης κλίμακας έργα μεταφοράς νερού. Η συχνότητα και η σοβαρότητα των χαμηλών ροών προβλέπεται να αυξηθούν, καθιστώντας την ξηρασία σε ροές και την έλλειψη νερού πιο έντονες και επίμονες στην Νοτιοανατολική Ευρώπη (ΝΑΕ) και στη Δυτική και Κεντρική Ευρώπη (ΔΚΕ). Στην Ανατολική Ευρώπη (ΑΝΕ), η αβεβαιότητα σχετικά με τις αλλαγές στην έλλειψη νερού δημιουργεί ιδιαίτερες προκλήσεις. Καθώς όταν φτάσουμε στους 1.5°C (παγκόσμια άνοδος θερμοκρασίας), οι ημέρες με έλλειψη νερού (η διαθεσιμότητα νερού σε σχέση με τη ζήτηση) θα αυξηθούν στην ΝΑΕ, με αποτέλεσμα το 18% του πληθυσμού να εκτίθεται σε μέτρια έλλειψη νερού, ποσοστό που θα αυξηθεί στο 54% στους 2 °C. (IPCC, 2022)

### 2.1.4. Επιπτώσεις της Κλιματικής Αλλαγής στο τομέα των Υδάτων στην Ελλάδα

Η επιφάνεια της Ελλάδας ανέρχεται περίπου στα 132,000 km<sup>2</sup>, εκ των οποίων το 20% της επιφάνειας αυτής είναι τα νησιά. Το 75% της επιφάνειας αυτής χαρακτηρίζεται ορεινό, και η οροσειρά της Πίνδου φαίνεται να έχει πρωταγωνιστικό ρόλο στη κατανομή των κατακρημνισμάτων στην Ελλάδα. (Τράπεζα της Ελλάδος, 2011)

Επομένως λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες της γεωγραφικής θέσης, της μορφολογίας και της γεωλογίας της χώρας, παρατηρούμε ότι δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για τον εμπλουτισμό των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Όμως αυτό σημαίνει επίσης ότι τα ύδατα είναι εκτεθειμένα στις έντονες διακυμάνσεις του κλίματος το οποίο τα καθιστά ευαίσθητα και επιρρεπή στην υποβάθμιση της ποιότητάς τους. Λόγω της Κλιματικής Αλλαγής αναμένεται αύξηση της εξάτμισης και της διαπνοής, ενώ αναφορικά με τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες παρατηρούμε και εκεί αύξηση στις ανάγκες άρδευσης και ύδρευσης, ειδικά όταν γίνεται λόγος για τουριστικές περιοχές τους καλοκαιρινούς μήνες. Επίσης έχουμε αύξηση και στο ρυπαντικό φορτίο, καθώς αυτό θα αυξάνεται σε ένα όλο και πιο περιορισμένο όγκο υδατικού σώματος. (Στουρνάρας, 2007)

Οι έμμεσες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα υπόγεια υδατικά συστήματα είναι οι παρακάτω:

- Μείωση του ρυθμού ανανέωσης των νερών των υπόγειων υδροφόρων, που οφείλεται στην έλλειψη επαρκών βροχοπτώσεων και στην αύξηση του ρυθμού εξατμισοδιαπνοής.
- Περαιτέρω διείσδυση του μετώπου θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς, εξαιτίας της μειωμένης ποσότητας γλυκού νερού εντός της χερσαίας έκτασης λόγω έλλειψης υδατικών εισροών και υπεράντλησης.
- Αύξηση της συγκέντρωσης των ρυπογόνων ουσιών που βρίσκονται εντός των υδάτων, που οφείλεται στη μικρότερη αραιώση.

- Ρύπανση και ερημοποίηση των παράκτιων υγροτόπων και καταστροφή των δελταϊκών περιοχών.  
(Κουκούλη, 2014)

## 2.2. Φαινόμενο υφαλμύρινης

Υφαλμύριση είναι το φαινόμενο στο οποίο παρατηρείται ροή αλμυρού νερού στον υπόγειο υδροφορέα. Αυτή η ροή μπορεί να είναι σε κατάσταση ισορροπίας, αλλά κυρίως αποτελεί μια μεταβατική διαδικασία. Στη περίπτωση όπου είναι μεταβατική διαδικασία, το αλμυρό νερό που εισέρχεται αντικαθιστά το γλυκό νερό που υπήρχε αρχικά στο σύστημα. Επομένως το γλυκό νερό απομακρύνεται με ρυθμό περίπου ίσο με τον ρυθμό εισροής του αλμυρού νερού. Αυτή η ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε φυσικά μέσω διαρροής, είτε μέσω άντλησης. Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση του όγκου του αλμυρού υπόγειου νερού και η αντίστοιχη μείωση του γλυκού υπόγειου νερού. (Bear, Cheng, Sorek, Ouzar, & Herrera, 1999)

Δεδομένου ότι το μεγαλύτερο ποσοστό του πληθυσμού τόσο στην Ελλάδα όσο και παγκοσμίως κατοικούν σε παράκτιες ζώνες, το πρόβλημα της υφαλμύρισης πρέπει να αντιμετωπιστεί με προσοχή και μεθοδικότητα. Καθώς ακόμα και ελάχιστες ποσότητες αλμυρού νερού μπορούν να μετατρέψουν μια πηγή γλυκού νερού ως μη πόσιμη. Ο κίνδυνος της υφαλμύρισης όπως αναφέραμε και στη προηγούμενη υπό ενότητα είναι άρτια συνδεδεμένη με τις διαθέσιμες ποσότητες φρέσκου νερού και σε συνάρτηση με την οικονομική ανάπτυξη και την αύξηση του πληθυσμού, οι ποσότητες φρέσκου νερού που απαιτούνται αυξάνονται όλο και περισσότερο. (Καρατζάς, 2005)

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μείωση στη στάθμη των υπόγειων υδροφόρων στην Ελλάδα κατά 5 μέτρα ετησίως, το οποίο εντείνει το πρόβλημα της υφαλμύρισης και δεδομένου ότι το 33% του νερού στην Ελλάδα προέρχεται από υπόγειες πηγές αυτό δημιουργεί όλο και μεγαλύτερη ανάγκη για την ύπαρξη μιας σωστής και ορθολογικής διαχείρισης του υδάτινου δυναμικού.

Η Υφαλμύριση ενός υπόγειου υδροφορέα μπορεί να οφείλεται είτε σε φυσικά αίτια, λόγω της ύπαρξης θαλασσινού νερού και άλμης στα κατώτερα γεωλογικά στρώματα. Είτε σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες, κυρίως λόγω της υπεράντλησης υπόγειου νερού ή και δευτερευόντως της διείσδυσης του αλατιού που χρησιμοποιείται για το λιώσιμο των πάγων κατά τους χειμερινούς μήνες ή από τα διασταλάγματα των χωματερών.

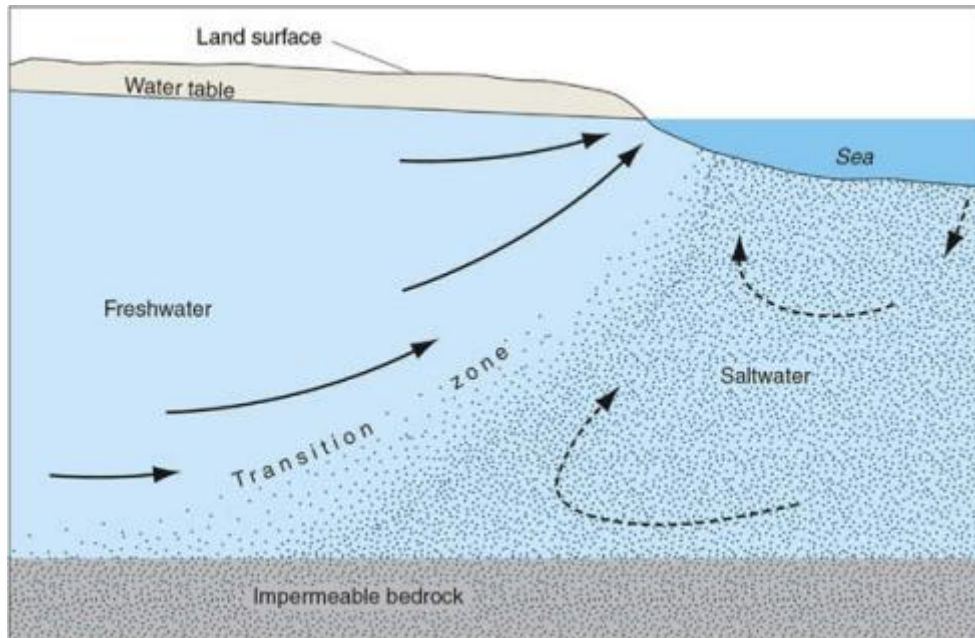
Η αναστροφή του φαινομένου είναι πολλές φορές ανέφικτη ή πολύ ακριβή λόγω της πολύ αργής κίνησης του υπόγειου νερού. Επομένως εξαιτίας του κινδύνου που προκαλεί το αλμυρό νερό στην ανθρώπινη υγεία και τις καταστροφικές ιδιότητες που έχει στις καλλιέργειες και στις βιομηχανίες, αν ένας υδροφορέας ρυπανθεί με θαλασσινό νερό τότε αχρηστεύετε και δεν χρησιμοποιείται πλέον. (Καρτεράκης, 2005)

### 2.2.1. Μηχανισμός της υφαλμύρισης

Επειδή το θαλασσινό νερό είναι βαρύτερο, έχει την τάση να κινείται κάτω από το στρώμα του φρέσκου νερού. Οι πιέσεις είναι ανάλογες με το βάθος του νερού με αποτέλεσμα να έχουμε βαθύτερη εισχώρηση του θαλασσινού ύδατος στα μεγαλύτερα βάθη. Ωστόσο, η υδραυλική κλίση του φρέσκου νερού (που οφείλεται στον συνεχή εμπλουτισμό λόγω βροχόπτωσης) μειώνεται προς την ακτή με αποτέλεσμα να κινείται τελικά προς τη θάλασσα.



Χωρίς αυτή τη δύναμη το θαλασσινό νερό θα κινούνταν σταδιακά προς τα ανάντη, τείνοντας να καταλάβει ολόκληρο τον υδροφορέα που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Αυτή η ορμή του φρέσκου νερού προβάλλει αντίσταση στην κίνηση του θαλασσινού νερού λόγω πυκνότητας και ουσιαστικά επιφέρει μια κατάσταση ισορροπίας, η οποία εκφράζεται ως η διεπιφάνεια του μετώπου της υφαλμύρινσης με τον υπόγειο υδροφορέα. Ο πόδας της θαλασσινής σφήνας (toe) αποτελεί το σημείο μέγιστης διείσδυσης. (Καρατζάς, 2005)



Εικόνα 2.7 Η διεπιφάνεια γλυκού και θαλασσινού νερού σε έναν παράκτιο υδροφορέα, που δείχνει τη μετάβαση από το γλυκό νερό στο θαλασσινό νερό στη ζώνη διάχυσης. Η διεπιφάνεια λειτουργεί ως φράγμα στη ροή των υπόγειων υδάτων το γλυκό νερό ρέει προς τα πάνω κατά μήκος της διεπιφάνειας και εκβάλλει στον ωκεανό. (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

Η εξίσωση που περιγράφει τη θεωρία της διεπιφάνειας, είναι αυτή των Ghyben – Hezberg:

$$\xi = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \approx 40 h_f \quad (2.1)$$

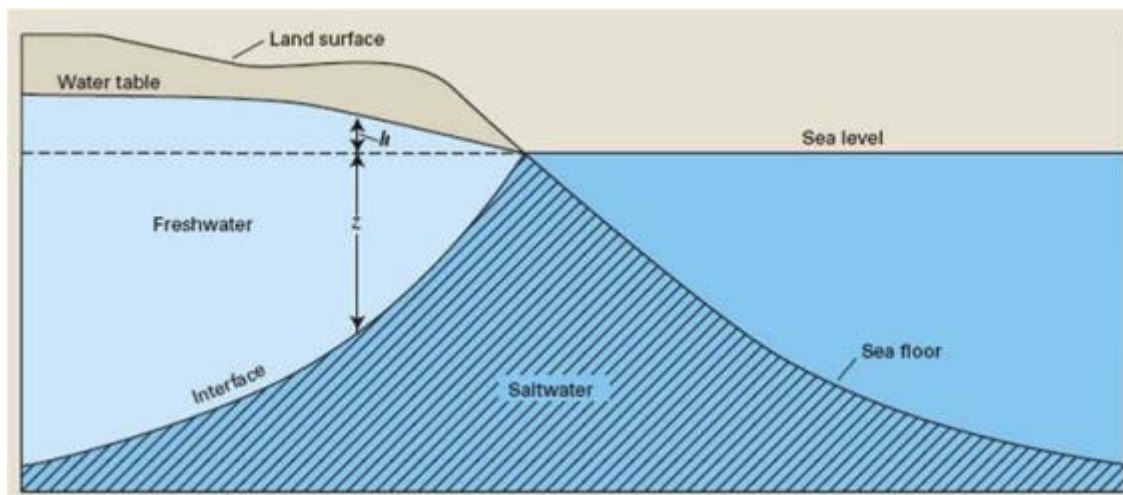
Όπου:  $\xi$  η θέση της διεπιφάνειας κάτω από τη στάθμη της θάλασσας

$h_f$  το υδραυλικό ύψος του φρέσκου νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας

$\rho_f$  η πυκνότητα του φρέσκου νερού που ισούται με  $1 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$  και

$\rho_s$  η πυκνότητα του θαλασσινού νερού που ισούται με  $1.025 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$

Η παραπάνω εξίσωση πρακτικά μας λέει ότι για κάθε μέτρο υδραυλικού ύψους φρέσκου νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, η διεπιφάνεια του μετώπου της υφαλμύρινσης με τον υπόγειο υδροφορέα ωθείται 40 μέτρα προς τα κάτω. Όμως σε περιπτώσεις που έχουμε να κάνουμε με παραθαλάσσια μέτωπα στα οποία έχουμε έντονη αντλητική δραστηριότητα, δεν ισχύει ο λόγος 40:1. Καθώς η στάθμη του υδροφορέα μειώνεται σημαντικά εξαιτίας της άντλησης, με αποτέλεσμα να έχουμε μεγαλύτερη διείσδυση του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα.



Εικόνα 2.8 Απεικόνιση της θεωρίας της διεπιφάνειας, στο παρακάτω σχήμα έχω  $\xi = z$  για την εξίσωση 2.1. (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

### 2.2.2. Αντιμετώπιση – Αναστροφή του φαινομένου υφαλμύρισης

Όταν αντιμετωπίζουμε την αποκατάσταση διαταραγμένων υδροφορέων σε παράκτιες περιοχές, είναι απαραίτητο να αξιολογηθούν τα εξής:

- Η παρούσα κατάσταση, όσον αφορά τα επίπεδα υπόγειων υδάτων και συγκεκριμένα τα πιεζομετρικά επίπεδα, την κατανομή αλατότητας καθώς και την εκμετάλλευση, δηλαδή την τοποθεσία και το ρυθμό άντλησης.
- Η επιθυμητή κατάσταση μετά την αποκατάσταση, όσον αφορά τη βιώσιμη ποσότητα άντλησης και τις τοποθεσίες στις οποίες θα γίνει. Όπως επίσης τα επίπεδα υπόγειων υδάτων και ο όγκος του γλυκού νερού που θα πρέπει να παραμείνει μόνιμα στους υδροφορείς ως στρατηγικό απόθεμα για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης και την αντιμετώπιση διακυμάνσεων στις περιόδους υψηλής ζήτησης. (Bear, Cheng, Sorek, Ouzar, & Herrera, 1999)

Τα παρακάτω μέτρα μπορούν να ληφθούν για την αντιμετώπιση του φαινομένου υφαλμύρισης:

- a) Έλεγχος αντλήσεων: Αν ελαττωθεί ο ρυθμός άντλησης ή εφαρμοστεί ένα καλύτερο μοντέλο άντλησης, ο υδροφορέας θα έχει την ευκαιρία να ανανεωθεί και να αυξηθεί η στάθμη του, με αποτέλεσμα να σπρώξει το μέτωπο του αλμυρού νερού. Προφανώς μιλάμε για μια μέθοδο αντιμετώπισης η οποία απαιτεί πολλά χρόνια για να παρατηρηθεί κάποιο ουσιαστικό αποτέλεσμα.
- b) Τεχνητός εμπλουτισμός: Σε αυτή τη μέθοδο εμπλουτίζουμε τον υπόγειο υδροφορέα με μεγάλες ποσότητες νερού, οι οποίες προέρχονται από επιφανειακές πηγές ή από άλλα υδροφόρα στρώματα. Έτσι ώστε να έχουμε διαθέσιμες ποσότητες νερού τις εποχές όπου παρατηρείται έλλειψη, λόγω της υψηλής ζήτησης. Οι δύο πλέον γνωστές μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού είναι:
  1. Επιφανειακή κατάκλιση: Το ύδωρ συγκεντρώνεται σε λεκάνες που έχουν εκσκαφθεί σε συγκεκριμένη περιοχή και από εκεί διηθείται σε βαθύτερα εδαφικά στρώματα.

2. Επιφανειακή πλημμύρα: Καθορίζεται μια περιοχή, η οποία πλημμυρίζεται και στην συνέχεια, αναμένεται το ύδωρ να διεισδύσει μέσω του υπεδάφους στον υπόγειο υδροφόρο.
3. Τάφροι και αυλάκια: Σε περιοχές με κατάλληλα τοπογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιείται μια σειρά από αυλάκια τα οποία συνήθως καταλήγουν σε μία μεγαλύτερη τάφρο, όπου και διηθείται το ύδωρ. Το ύδωρ που δεν μπορεί να διηθηθεί μεταφέρεται και πάλι μέσω αυλακιών και έτσι αποφεύγεται η συσσώρευση αδρανούς υλικού.
4. Φρεάτια εμπλουτισμού: Αυτή η λύση είναι κατάλληλη για περιορισμένους υδροφορείς και επιτυγχάνεται ο άμεσος εμπλουτισμός του υδροφόρου με ύδωρ.
5. Φρεάτια άντλησης – εμπλουτισμού: Πρόκειται για ένα υβριδικό σύστημα πηγαδιών άντλησης και εμπλουτισμού ανάλογα με τις εποχιακές διακυμάνσεις για να επιτευχθεί η κατάλληλη αντίσταση εντός του υδροφόρου ενάντια το μέτωπο του αλμυρού νερού
6. Υπόγεια φράγματα: Πρόκειται για μια παράκτια κατασκευή η οποία χωρίζει το μέτωπο του αλμυρού νερού με τον υπόγειο υδροφόρο.
7. Διευθετήσεις στις κοίτες των χειμάρρων: Πρόκειται για ένα σύστημα μικρών πολλαπλών φραγμάτων κατά μήκος των χειμάρρων όπου συσσωρεύονται ποσότητες ύδατος. Αυλάκια πλησίον της κοίτης μεταφέρουν το νερό στις περιοχές που το έχουν ανάγκη στις οποίες και διηθείται. (Bear, Cheng, Sorek, Ouzar, & Herrera, 1999)

## 2.3. Μαθηματικό υπόβαθρο

### 2.3.1. Παράμετροι υδροφόρων

Οι υδροφορείς μπορεί να χαρακτηρίζονται από την ικανότητα του να συγκρατούν και να μετακινούν ύδωρ. (Καρατζάς, 2005) Οι ιδιότητες που τους χαρακτηρίζουν είναι:

1. Πορώδες (Porosity) [n, ε]: Πορώδες είναι η ιδιότητα των πετρωμάτων ( και εδαφών) να περιέχουν κενά διαστήματα μεταξύ των στερεών υλικών που τα αποτελούν. Ο βαθμός και η ένταση με τα οποία παρουσιάζονται τα κενά αυτά, εκφράζεται με τον όρο ολικό πορώδες και προσδιορίζεται από το λόγο του όγκου όλων των κενών ενός πετρώματος, δια του ολικού όγκου του πετρώματος (στερεάς και αέριας φάσης). Με τον όρο ενεργό πορώδες, προσδιορίζεται το τμήμα του ολικού πορώδους που αντιστοιχεί στο ελεύθερο νερό, δηλαδή στο νερό που περιέχεται μέσα στα πετρώματα και κινείται από τη βαρύτητα, ενώ πορώδες κατακράτησης είναι το τμήμα του ολικού πορώδους που αντιστοιχεί στο νερό κατακράτησης, δηλαδή στο νερό που περιέχεται μέσα στα πετρώματα και δεν υπακούει στη βαρύτητα.

(Βαβίζος & Μερτζάνης, 2003)

Πορώδες:  $n = \frac{V_v}{V_o}$

Όπου:

$V_v$ , ο όγκος των κενών.

$V_o$ , ο συνολικός όγκος του δείγματος.

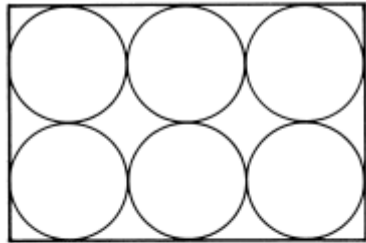
Ενεργό πορώδες:  $n_e = \frac{V_g}{V_o}$

Όπου:

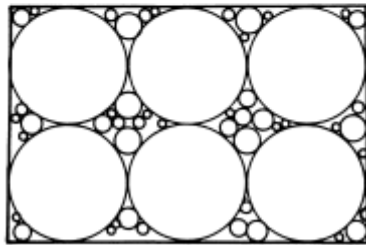
$V_v$ , ο όγκος νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων.  
 $V_o$ , ο συνολικός όγκος του εδάφους. (Βαβίζος & Μερτζάνης, 2003)

Οι παράγοντες που επηρεάζουν το πορώδες είναι:

- i. Κοκκομετρική σύνθεση (grain – size distribution)



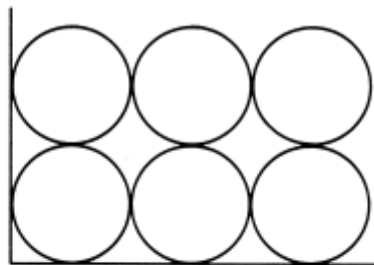
A



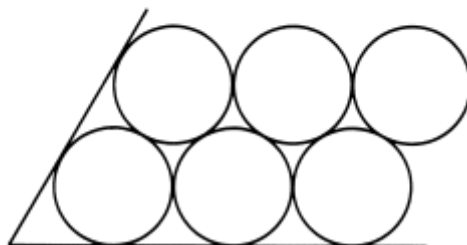
B

Εικόνα 2.9 (C.W. Fetter, 2014)

- ii. Η διάταξη των κόκκων (Packing):



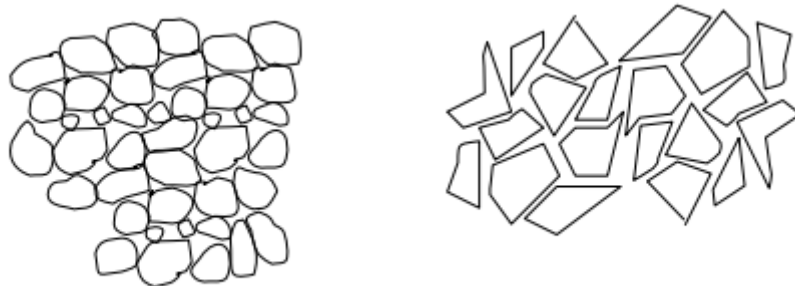
A



B

Εικόνα 2.10 (C.W. Fetter, 2014)

- iii. Σχήμα των κόκκων (Shape of the grains):



Εικόνα 2.11 (Καρατζάς, 2005)

2. Ειδική παροχή (specific discharge) [q]: είναι ο όγκος του νερού που ρέει διά μέσου μια μονάδας επιφάνειας εδάφους ανά μονάδα χρόνου και δίνεται από τη σχέση:  $q = \frac{Q}{A} \left[ \frac{L}{T} \right]$

Όπου:

Q είναι ο ρυθμός παροχής του νερού και

A είναι η επιφάνεια του εδάφους

Η ειδική παροχή έχει μονάδες ταχύτητας και στη βιβλιογραφία ονομάζεται συχνά και ταχύτητα του Darcy.

3. Ενέργεια και πιεζομετρικό φορτίο: Η ροή του νερού σε ένα πορώδες μέσο οφείλεται σε ακανόνιστες κατανομές της μηχανικής ενέργειας του νερού. Το νερό πάντα ρέει από περιοχές με μεγαλύτερη μηχανική ενέργεια προς περιοχές με μικρότερη μηχανική ενέργεια. Στη διαδρομή του το νερό χάνει ένα ποσοστό της μηχανικής ενέργειας λόγω της ιξώδους τριβής, η οποία μετατρέπεται σε θερμότητα. Η μηχανική ενέργεια,  $E_m$ , στο νερό έχει τρεις συνιστώσες (υψόμετρο, ταχύτητα και πίεση), οι οποίες έχουν προσδιοριστεί στη θεμελιώδη εξίσωση του Bernoulli:

$$E_m = m_w g z + \frac{1}{2} m_w U^2 + m_w \int_{P_o}^P \frac{V_w}{m_w} dP$$

Όπου:

$m_w$  είναι η μάζα του νερού [M]

$V_w$  ο όγκος του νερού [ $L^3$ ]

g η επιτάχυνση βαρύτητας [ $L/T^2$ ]

z το υψόμετρο (η κατακόρυφη απόσταση ενός σημείου μέσα στο πορώδες από ένα οριζόντιο πεδίο αναφοράς) [L]

$P_o$  η υδροστατική πίεση που ασκεί το νερό στους πόρους του πορώδους μέσου στο επίπεδο αναφοράς ( $z=0$ ) [ $M^*L/T^2$ ]

P η υδροστατική πίεση σε κάποιο προκαθορισμένο σημείο του πορώδους μέσου [ $M^*L/T^2$ ]

U η ταχύτητα του νερού [L/T]

Βασισμένη στην εξίσωση Bernoulli, ο Hubbert (1940) τροποποίησε τη σχέση μηχανικής ενέργειας ( εξίσωση του Bernoulli) σε μηχανική ενέργεια ανά μονάδα μάζας,  $\Phi$ , η οποία είναι γνωστή ως το δυναμικό της ροής και δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi = g z + \frac{U^2}{2} + \int_{P_o}^P \frac{dP}{\rho_w(P)}$$

Όπου:

$\rho_w$  είναι η πυκνότητα του νερού ( $V_w / m_w = 1/\rho_w$ )

Επειδή οι ταχύτητες διήθησης σε πορώδες μέσα είναι μικρές, ο όρος της ταχύτητας είναι αμελητέος και μπορεί να αγνοηθεί. Επίσης για ασυμπίεστα ρευστά η πυκνότητα είναι σταθερή και δεν είναι συνάρτηση της πίεσης. Άρα η σχέση του δυναμικού της ροής απλουστεύεται ως εξής:

$$\Phi = gz + \frac{P - P_0}{\rho_w}$$

Στην υδρογεωλογία χρησιμοποιείται το πιεζομετρικό φορτίο ή πιεζομετρικό ύψος (hydraulic head) το οποίο περιγράφει τη μηχανική ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Το πιεζομετρικό φορτίο είναι μια αριθμητική ποσότητα ίση με το άθροισμα του φορτίου πίεσης και του φορτίου θέσης. Το πιεζομετρικό φορτίο μετράται σε μονάδες μήκους και δίνεται από την εξής σχέση:

$$h = \frac{P}{\gamma_w} + z \text{ [L]}$$

Όπου:

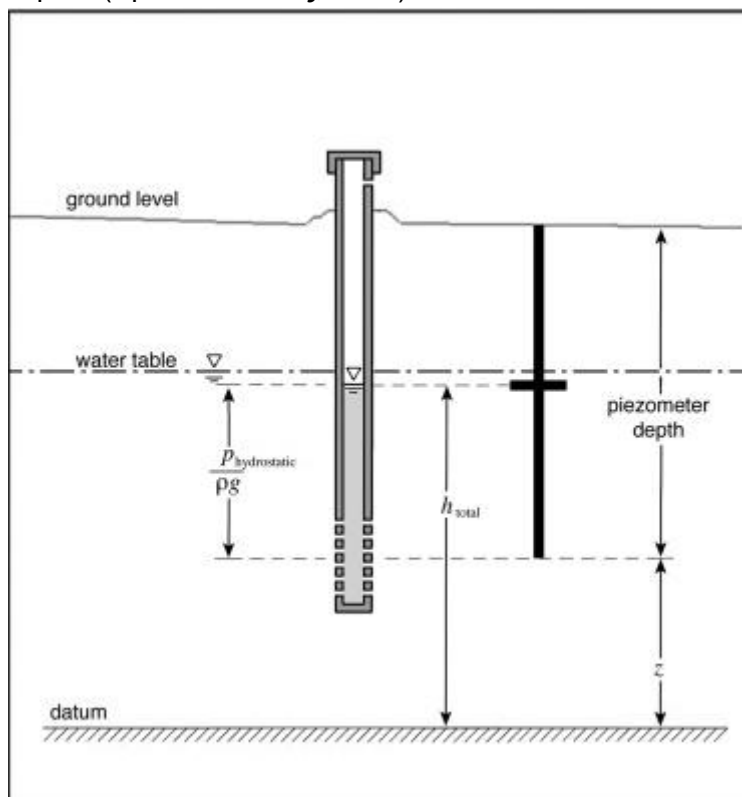
$\gamma_w$  το ειδικό βάρος του νερού ( $\gamma_w = \rho_w * g$ ),  $[M/L^2 * T^2]$

$h$  είναι το πιεζομετρικό φορτίο [L]

$z$  το φορτίο θέσης και έχει θετικές τιμές πάνω από τον άξονα αναφοράς [L]

$P/\gamma_w$  είναι το φορτίο πίεσης και είναι θετικό (μεγαλύτερο της ατμοσφαιρικής πίεσης) εάν το πορώδες είναι κορεσμένο με νερό και αρνητικό (μικρότερο της ατμοσφαιρικής πίεσης) εάν το πορώδες είναι μη κορεσμένο.

Όλα τα σημεία σε ένα υπόγειο υδροφορέα στα οποία το πιεζομετρικό φορτίο είναι ίσο με την ατμοσφαιρική πίεση καθορίζουν την ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού. (Χρυσικόπουλος, 2020)



Εικόνα 2.12 Σχήμα απεικόνισης του πιεζομετρικού φορτίου (Bleam, 2012)



### 2.3.2. Νόμος του Darcy

Το 1856, ο Γάλλος υδραυλικός μηχανικός, Henry Darcy ανέπτυξε μια εμπειρική σχέση για τη ροή του νερού μέσω ενός πορώδους μέσου. Ανακάλυψε ότι η ειδική παροχή ήταν ευθέως ανάλογη της κινούσας δύναμης ( της υδραυλικής κλίσης) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση: (Schnoor, 2021)

$$v_x = \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (2.2)$$

Όπου:

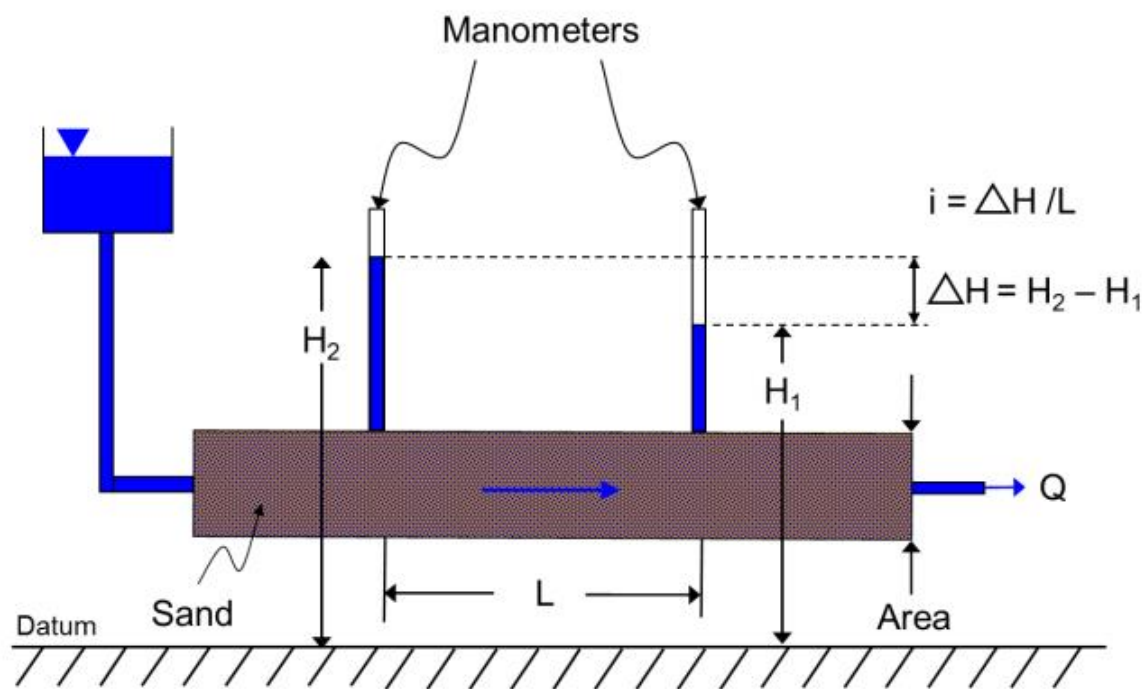
$v_x$  η ειδική παροχή στη διεύθυνση  $x$ , ( $\frac{L}{T}$ )

$\Delta h$  η μεταβολή της στάθμης μεταξύ των σημείων 1 και 2, (L)

$\Delta x$  η απόσταση μεταξύ των σημείων 1 και 2, (L)

$\frac{\Delta h}{\Delta x}$  η υδραυλική κλίση στη διεύθυνση  $x$ , αδιάστατη

Δίνεται μια σχηματική απεικόνιση του νόμου του Darcy.



Εικόνα 2.13 Σχηματική απεικόνιση του Darcy για ροή μέσα από πορώδες μέσο, η οποία είναι ανάλογη της υδραυλικής κλίσης, όπου  $L = x$ . (Department of Enviromental Quality, 2024)

Ο Darcy βρήκε ότι διπλασιάζοντας την υδραυλική κλίση,  $\frac{\Delta h}{\Delta x}$ , ανυψώνοντας τη δεξαμενή, διπλασιαζόταν και η ειδική παροχή. Αλλά η εξίσωση (2.2) χρειαζόταν ένα συντελεστή ώστε να είναι συμβατές οι μονάδες:

$$v_x = -K_x \frac{dh}{dx} \quad (2.3)$$

Όπου:  $K_x$  η κορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα στη διεύθυνση  $x$ , ( $L * T^{-1}$ )

Το αρνητικό πρόσημο στην εξίσωση (2.3) δηλώνει ότι το νερό ρέει από περιοχές υψηλού προς περιοχές χαμηλού δυναμικού (αρνητική υδραυλική κλίση). Για να είναι θετική η τιμή της  $v_x$ , απαιτείται αρνητική κλίση. Η υδραυλική αγωγιμότητα  $K_x$ , είναι μέτρο των ιδιοτήτων τόσο του ρευστού όσο και του πορώδους μέσου που αποτελεί τον υδροφορέα, και μεγιστοποιείται για τη χοντρή άμμο και το χαλίκι.

*Πίνακας 2-1 Τυπικές Υδρογεωλογικές Παράμετροι για Διάφορες Μονάδες Υδροφόρων και Υλικών*

Υλικό	Πορώδες %	$n$ , Ειδική απόδοση, %	Υδραυλική αγωγιμότητα, $K$ , $cm*s^{-1}$	Διαπερατότητα, $k$ , $cm^2$
<b>Μη ενοποιημένα ιζήματα</b>				
Χαλίκι	25-35	25-35	1-100	$10^{-5}$ - $10^{-3}$
Άμμος	30-45	25-40	$10^{-4}$ - $10^{-1}$	$10^{-9}$ - $10^{-6}$
Λάσπη	35-45	20-35	$10^{-6}$ - $10^{-4}$	$10^{-11}$ - $10^{-9}$
Άργιλος	40-55	2-10	$10^{-9}$ - $10^{-6}$	$10^{-14}$ - $10^{-11}$
<b>Πετρώματα</b>				
Καρστικός ασβεστόλιθος	15-40	10-35	$10^{-4}$ - $10^{-1}$	$10^{-8}$ - $10^{-6}$
Μη καρστικός ασβεστόλιθος	5-15	2-10	$10^{-6}$ - $10^{-4}$	$10^{-11}$ - $10^{-9}$
Αμμόλιθος	10-25	5-15	$10^{-7}$ - $10^{-4}$	$10^{-12}$ - $10^{-9}$
Σχιστόλιθος	0-10	0-5	$10^{-11}$ - $10^{-7}$	$10^{-16}$ - $10^{-13}$
Κρυσταλλική πέτρα (συμπαγής)	1-10	1-10	$10^{-6}$ - $10^{-4}$	$10^{-11}$ - $10^{-9}$
Κρυσταλλική πέτρα (μη συμπαγής)	0-2	0-1	$10^{-11}$ - $10^{-9}$	$10^{-16}$ - $10^{-14}$

Η ειδική παροχή  $v_x$  ή επιφανειακή ταχύτητα ή ταχύτητα Darcy, δεν είναι η πραγματική με την οποία κινείται το νερό μέσα στον υδροφορέα. Καθώς πρέπει να λάβουμε υπόψη το πορώδες, με το οποίο διαιρούμε τη ταχύτητα, επομένως η πραγματική ταχύτητα βγαίνει μεγαλύτερη, αφού το νερό πιέζεται όταν περνάει από το στενό χώρο των πόρων. Άρα έχουμε:

$$u_x = \frac{v_x}{n} \text{ ή } \frac{v_x}{n_e} \quad (2.4)$$

Όπου:  $u_x$  η πραγματική ταχύτητα ρευστού, ( $L * T^{-1}$ )

$n$  το πορώδες, ή κενός όγκος/ ολικός όγκος, αδιάστατο

$n_e$  ενεργό πορώδες

Σε ενοποιημένους υδροφορείς το ενεργό πορώδες μπορεί να είναι μικρότερο από το ολικό (κενός όγκος/ ολικός όγκος). Το ενεργό πορώδες αντικατοπτρίζει τον όγκο των συνδεδεμένων πόρων μέσω των οποίων μπορεί να κινηθεί το νερό και είναι πιο κατάλληλη παράμετρος για την εξίσωση (2.4).



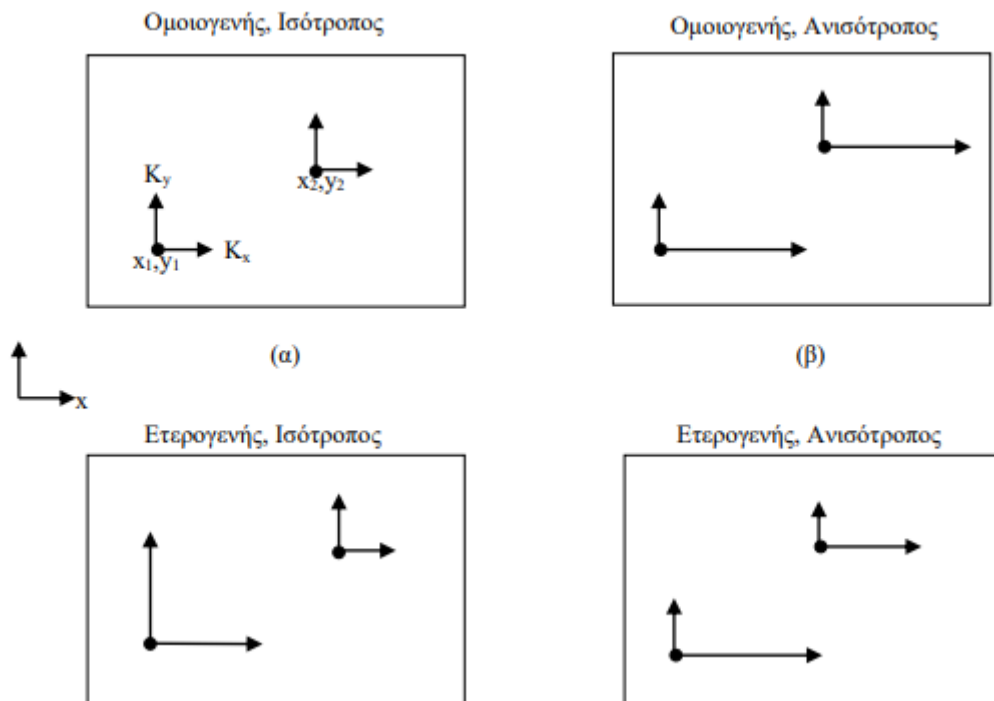
Ο νόμος του Darcy είναι εφαρμόσιμος και για τις τρεις διαστάσεις (για οριζόντια και κατακόρυφη ροή σε υδροφορείς), αλλά είναι εμπειρική σχέση με κάποιους περιορισμούς. Όταν έχουμε λεπτόκοκκα υλικά και πολύ χαμηλές ταχύτητες, μπορεί να υπάρξει μια τιμή της υδραυλικής κλίσης υπό την οποία δεν υπάρχει ροή. Αντίστοιχα σε πολύ υψηλές ταχύτητες (τυρβώδης ροή), ο όρος της κινητικής ενέργειας καθιστά τη σχέση μεταξύ ειδικής παροχής και υδραυλικής κλίσης μη- γραμμική. Στα υπόγεια νερά, σπάνια έχουμε περιπτώσεις μη- γραμμικής ροής, αλλά η ροή μέσα από διερρηγμένα πετρώματα μπορεί να είναι ταχεία. Δίνονται οι εξισώσεις Darcy στις τρεις διαστάσεις:

Κατά μήκος:  $v_x = -K_x \frac{dh}{dx}$

Εγκάρσια:  $v_y = -K_y \frac{dh}{dx}$

Κατακόρυφα:  $v_z = -K_z \frac{dh}{dz}$

Όταν η  $K_x$  διαφέρει από τις υπόλοιπες, σε κάποιο σημείο του υδροφορέα, η ροή τότε χαρακτηρίζεται ως ανισότροπη. Όταν έχω μεταβαλλόμενη υδραυλική αγωγιμότητα μέσα στον υδροφορέα, τότε γίνεται λόγος για μη- ομοιογενείς συνθήκες, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Συχνά μπορούν να υποτεθούν ομοιογενείς, ανισοτροπικές συνθήκες για οριζόντια διαστρωματωμένες ιζηματικές μονάδες και αμμώδη/ χαλικιώδη ιζήματα. Επειδή συνήθως προτιμάται η οριζόντια από την κατακόρυφη ροή, ισχύει  $K_x = K_y > K_z$  (Schnoor, 2021)



Εικόνα 2.14 Χαρακτηριστικές περιπτώσεις ομοιογένειας και ανισοτροπίας (Freeze & Cherry, 1979)

### 2.3.3. Θεωρήσεις της υπόγειας ροής

Οι Theim, Theis και Jacob ανέπτυξαν μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την αναλυτική περιγραφή της ροής των υπόγειων υδάτων προς τα αντλούμενα πηγάδια. Στο πλαίσιο αυτό, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφοροποιήσεις μιας εξίσωσης που περιγράφει τα υπόγεια υδρολογικά συστήματα, θεωρούμε ότι η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται οριζόντια εντός των υδροφορέων και κάθετα μέσα από τα περιοριστικά στρώματα. Η μεταβιβασιμότητα υπολογίζεται μέσω του ολοκληρώματος της διαπερατότητας κατά την κατακόρυφη διάσταση και ισούται με το γινόμενο της διαπερατότητας επί το πάχος της κορεσμένης ζώνης. Σε έναν περιορισμένο υδροφορέα με σταθερό πάχος και ομοιογενή χαρακτηριστικά, η μεταβιβασιμότητα παραμένει σταθερή, ενώ σε έναν ελεύθερο υδροφορέα μεταβάλλεται. Ωστόσο, για να απλουστευτούν οι αναλυτικές λύσεις, οι παράμετροι της διαπερατότητας και της μεταβιβασιμότητας συνήθως θεωρούνται σταθερές. (Καρτεράκης, 2005)

Με τη χρήση αυτών των προσεγγίσεων, μπορούν να προσομοιωθούν δισδιάστατα συστήματα ροής τόσο σε περιορισμένους όσο και σε ελεύθερους υδροφορείς. Στην περίπτωση των περιορισμένων υδροφορέων όπου εμφανίζεται διαρροή, χρησιμοποιείται μια προσεγγιστική μέθοδος που προσομοιώνει την τρισδιάστατη ροή. Σε αυτήν, η κάθετη μετακίνηση του νερού μέσω των περιοριστικών στρωμάτων λαμβάνεται υπόψη μέσω ενός όρου διαρροής, ο οποίος είτε προσθέτει είτε αφαιρεί νερό από τους υπερκείμενους περιορισμένους υδροφορείς, ανάλογα με την εκάστοτε συνθήκη. Το μέγεθος της διαρροής εξαρτάται από την υδραυλική κλίση του υδροφορέα, καθώς και από τις φυσικές ιδιότητες του περιοριστικού στρώματος, όπως το πάχος και η κάθετη διαπερατότητά του. Η μαθηματική εξίσωση που περιγράφει τη συγκεκριμένη θεώρηση του υδροφορέα έχει την εξής μορφή:

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

Όπου:

$$L = K'_z \frac{h_{source} - h}{b'}$$

$$T_x = K_x h \text{ \& } T_y = K_y h$$

$h$  το υδραυλικό ύψος

$T_x$  &  $T_y$  οι συνιστώσες μεταβιβασιμότητας

$S$  ο συντελεστής αποθηκευτικότητας

$R$  ο όρος εμπλουτισμού ή άντλησης (Αν λαμβάνει χώρα άντληση με ρυθμό  $W$ , τότε στην εξίσωση θα θέσουμε  $R = -W$ )

$L$  η διαρροή από ένα περιοριστικό στρώμα

$K'_z$  η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα

$b'$  το πάχος υδροφορέα

$h_{\text{source}}$  το υδραυλικό ύψος στο στρώμα που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του περιοριστικού στρώματος

Η εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης σε ελεύθερο υδροφορέα, πρέπει να γίνει με εφαρμογή των παραδοχών Dupuit:

1. Οι γραμμές ροής να είναι οριζόντιες και αντίστοιχα οι ισοδυναμικές κάθετες
2. Η υδραυλική κλίση να είναι ίση με την κλίση του υδροφόρου ορίζοντα και ανεξάρτητη του βάθους.

Στη δεύτερη θεώρηση του συστήματος ροής, δίνεται έμφαση στην ερμηνεία της τρισδιάστατης κατανομής της ροής, της υδραυλικής αγωγιμότητας, των ιδιοτήτων της αποθηκευτικότητας και των περιοριστικών στρωμάτων. Η θεώρηση επιτρέπει τόσο οριζόντιες όσο και κάθετες συνιστώσες ροής στο σύστημα και κατ' επέκταση επιτρέπει την προσομοίωση της ροής είτε σε δύο είτε σε τρεις διαστάσεις. Η μορφή της εξίσωσης είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (2.5)$$

Όπου:

$K_x, K_y, K_z$  οι συνιστώσες της υδραυλικής διαπερατότητας

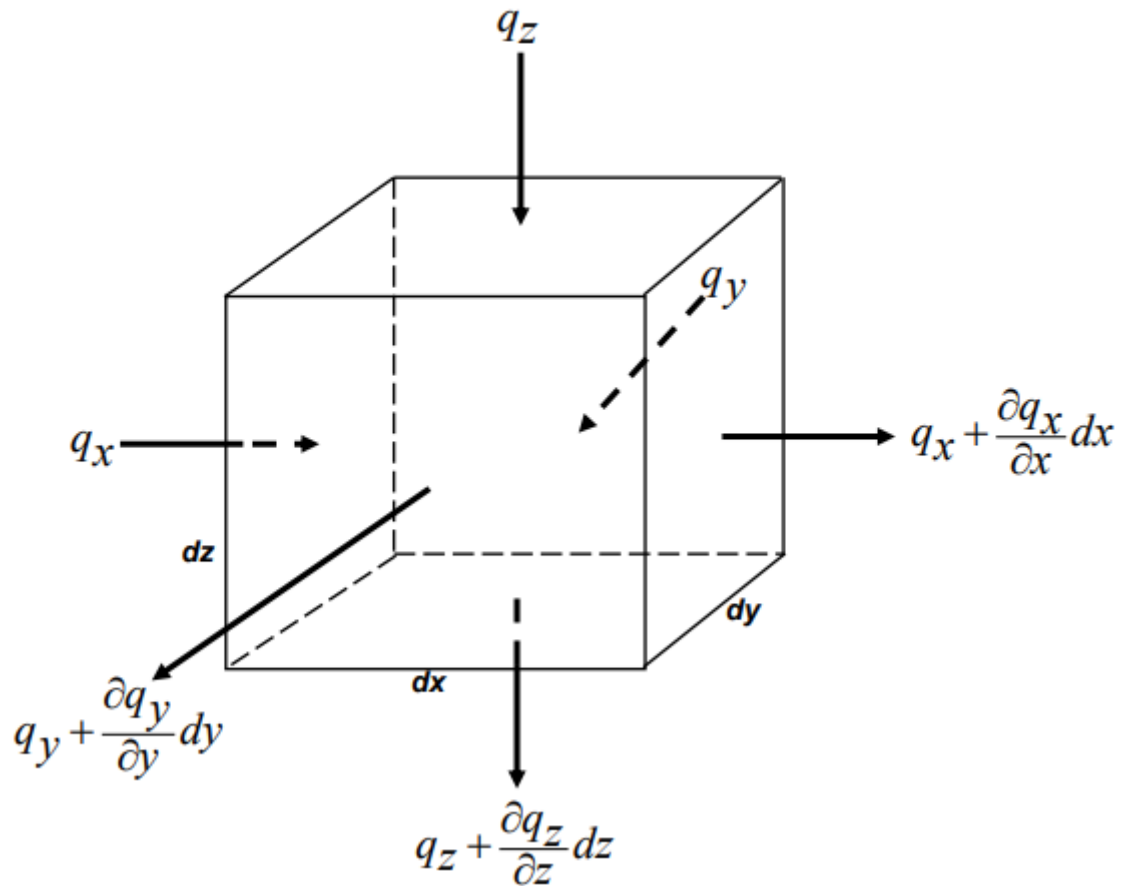
$S_s$  η ειδική αποθηκευτικότητα

$R^*$  ο γενικός όρος εμπλουτισμού ή άντλησης που στην εξίσωση θεωρείται θετικός (εμπλουτισμός) και δηλώνει την εισροή στο σύστημα ανά μονάδα όγκου υδροφορέα ανά μονάδα χρόνου.

(Καρτεράκης, 2005)

#### 2.3.4. Γενικές Εξισώσεις ροής

Σύμφωνα με το Νόμο Διατήρησης της Μάζας αν θεωρήσουμε ένα μικρό μοναδιαίο όγκο κορεσμένου πορώδους υλικού, τότε δεν υπάρχει μεταβολή στη μάζα ενός ρευστού. (Καρατζάς, 2005)



Εικόνα 2.15 Μοναδιαίος όγκος κορεσμένου πορώδους υλικού (Καρατζάς, 2005)

Το ισοζύγιο ροής έχει ως εξής: Ροή(in) – Ροή(out) = 0

Όπου:

- a) **Ροή in:**  $q_x dz dy$   
 $q_x dx dz$   
 $q_z dy dx$
- b) **Ροή out:**  $(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx) dz dy$   
 $(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy) dx dz$   
 $(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz) dy dx$

Άρα από a) & b) έχουμε:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx dy dz - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy dx dz - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz dx dy = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

Για ισότροπους υδροφορείς ισχύει:

$$\begin{aligned} q_x &= -K \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Από (2.6) & (2.7) έχουμε:

$$-\frac{\partial(-K \frac{\partial h}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial(-K \frac{\partial h}{\partial y})}{\partial y} - \frac{\partial(-K \frac{\partial h}{\partial z})}{\partial z} = 0$$

Ή

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2.8)$$

Ή

$$\nabla^2 h = 0$$

Η εξίσωση (2.8) είναι η γενική εξίσωση μόνιμης ροής (steady state) σε ομοιογενείς και ισότροπους υδροφορείς. (Καρατζάς, 2005)

Για μη σταθερές συνθήκες, η ειδική αποθηκευτικότητα (specific storage) είναι:

$$\begin{aligned} S &= -\frac{\Delta V_w}{\Delta V} = -\frac{\Delta V_w}{\Delta x \Delta y \Delta z} = -\frac{\Delta V_w}{\Delta x \Delta y h} \\ \frac{Sh}{\Delta t} &= -\frac{\frac{\Delta V_w}{\Delta t}}{\Delta x \Delta y} = -\frac{q_w}{\Delta t} \Rightarrow \\ -\frac{q_w}{\Delta t} &= \frac{Sh}{\Delta t} \Rightarrow -\frac{q_w}{\Delta t} = \frac{Sdh}{dt} \quad \Delta t \rightarrow 0 \end{aligned}$$

Εξίσωση ροής για μη σταθερές συνθήκες (unsteady state):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{Sdh}{Tdt}$$

(Καρατζάς, 2005)

### 3. Κεφάλαιο 3 – Μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής

Εκτός από συγκεκριμένες εφαρμογές υδραυλικής πηγαδιών, σε πρακτικές εφαρμογές προτιμώνται οι αριθμητικές λύσεις. Σε αντίθεση με τις αναλυτικές λύσεις και τη μέθοδο των αναλυτικών στοιχείων, μια αριθμητική λύση δεν είναι συνεχής στον χώρο ή στον χρόνο, η πίεση υπολογίζεται σε διακριτά σημεία (κόμβους) στον χώρο και για καθορισμένες χρονικές τιμές. Επίσης τα αριθμητικά μοντέλα μπορούν να επιλύσουν την πλήρη, μεταβατική, τρισδιάστατη, ετερογενή και ανισοτροπική κυβερνώσα εξίσωση (2.5) υπό οριακές και αρχικές συνθήκες. Στην προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιούνται οι παρακάτω κατηγορίες μοντέλων: (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

1. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών
2. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων
3. Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών
4. Η μέθοδος ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης
5. Η μέθοδος των αναλυτικών στοιχείων

Οι πιο εδραιωμένες και αποδεκτές για την επίλυση των προβλημάτων ροής είναι οι μέθοδοι των πεπερασμένων διαφορών και στοιχείων. Για τις μεθόδους αυτές γίνεται η χρήση ενός προγράμματος υπολογιστή, το οποίο λύνει μια ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων που δημιουργούνται για να προσεγγιστούν οι διαφορικές εξισώσεις (εξισώσεις συστήματος, οριακές συνθήκες, αρχικές συνθήκες) οι οποίες αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο. Οι τεχνικές προσέγγισης των πεπερασμένων διαφορών και στοιχείων εφαρμόζονται στο εν λόγω μαθηματικό μοντέλο και το μετατρέπουν σε μια μορφή που μπορεί να λυθεί γρήγορα από τον υπολογιστή. (Τριχάκης, 2004)

Η κυριότερη διαφορά μεταξύ των πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών είναι ότι, στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών οι κόμβοι τοποθετούνται σε τρισδιάστατο χώρο χρησιμοποιώντας δείκτες  $(i,j,k)$  για να καθοριστούν οι σχετικές θέσεις μέσα σε ένα ορθογώνιο ή τριγωνικό πλέγμα. Ενώ στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, οι θέσεις των κόμβων καθορίζονται μέσω συντεταγμένων  $(x,y,z)$  σε ένα πλέγμα. Και οι δύο μέθοδοι δίνουν τα ίδια αποτελέσματα, εφόσον η απόσταση μεταξύ των κόμβων είναι επαρκώς μικρή. Έτσι, παρόλο που οι μέθοδοι διαφέρουν σε επίπεδο σύλληψης, δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

#### 3.1. Μοντέλο Πεπερασμένων Διαφορών

Στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, οι κόμβοι χαρακτηρίζονται από τους δείκτες  $i,j,k$ , οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τη στήλη, τη γραμμή και το επίπεδο ενός κόμβου στον τρισδιάστατο χώρο (εικόνα 3.1). Η απόσταση μεταξύ των κόμβων κατά μήκος των γραμμών υποδεικνύεται με  $\Delta x$ , κατά μήκος των στηλών με  $\Delta y$ , ενώ η απόσταση μεταξύ των επιπέδων είναι  $\Delta z$ . Ο κόμβος βρίσκεται μέσα σε ένα κελί ή μπλοκ πεπερασμένων διαφορών (εικόνα 3.1 b & c). Οι υδραυλικές πιέσεις (heads) ορίζονται μόνο στους κόμβους, και η πίεση σε έναν κόμβο αντιπροσωπεύει τη μέση πίεση στο κελί/μπλοκ. Μια προσεγγιστική μορφή της εξίσωσης γράφεται αντικαθιστώντας τις μερικές παραγώγους στην εξίσωση (2.5) με διαφορές. Για παράδειγμα για έναν αντιπροσωπευτικό κόμβο  $i,j,k$  σε ένα πλέγμα με

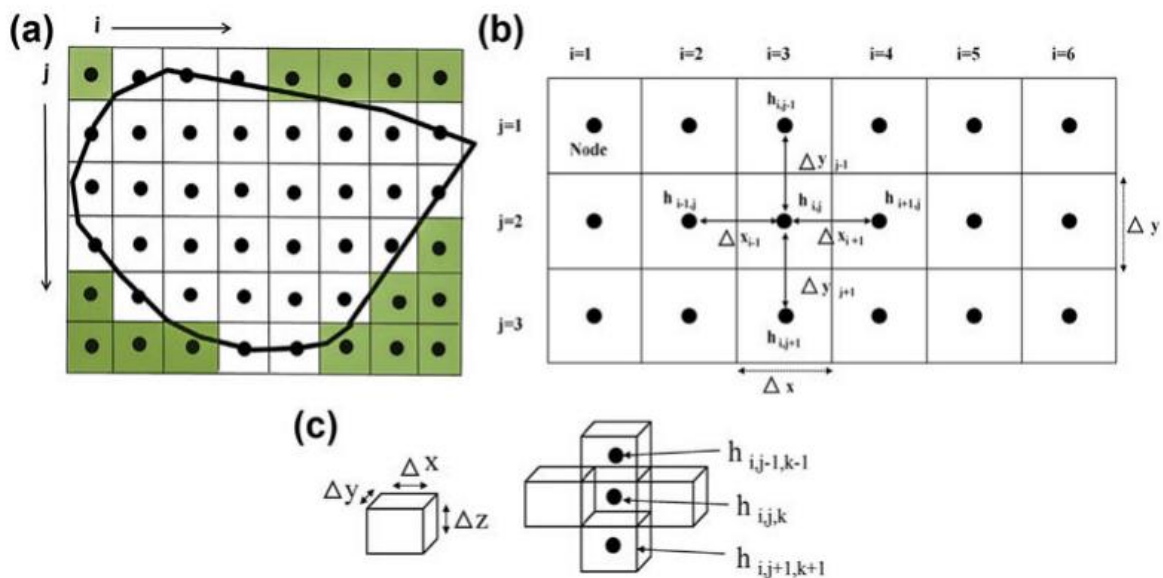
ομοιόμορφη απόσταση κόμβων κατά διεύθυνση  $x$  (όπου  $\Delta x$  είναι σταθερό), η προσέγγιση για την πρώτη παράγωγο της  $h$  ως προς  $x$  είναι:

$$\frac{\partial h}{\partial x} = \frac{h_{i+1,j,k} - h_{i-1,j,k}}{2\Delta x}$$

Όπου:

$\Delta x$  η απόσταση μεταξύ των δύο κόμβων

(Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)



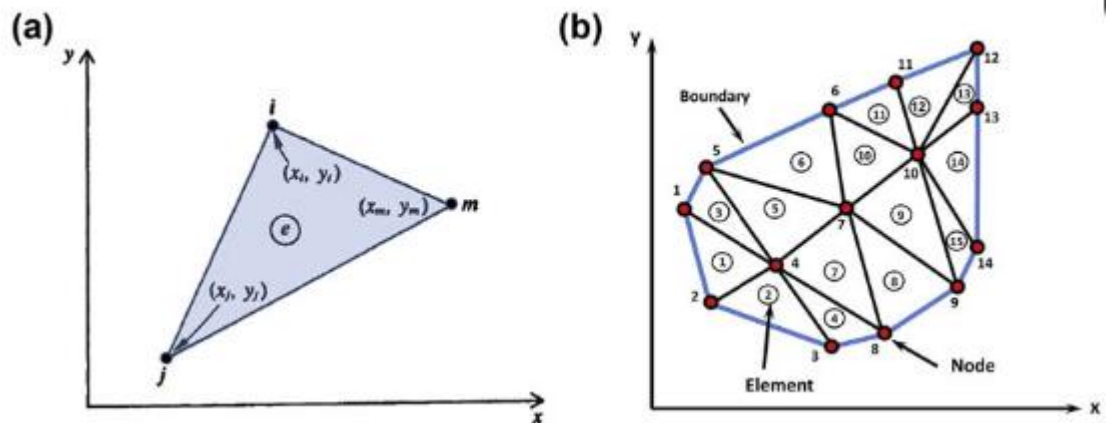
Εικόνα 3.1 Πλέγμα και σημειογραφία πεπερασμένων διαφορών. α) Δισδιάστατο (2D) οριζόντιο πλέγμα πεπερασμένων διαφορών με ομοιόμορφη απόσταση κόμβων ( $i$ =στήλες &  $j$ =γραμμές). β) Δισδιάστατο οριζόντιο πλέγμα με σημειογραφία για την ομάδα των πέντε κόμβων που αποτελούν τη μονάδα υπολογισμού με κέντρο τον κόμβο  $(i,j)$ . γ) Τρισδιάστατη σημειογραφία όπου το  $\Delta z$  αντιπροσωπεύει την κατακόρυφη απόσταση μεταξύ των κόμβων και το  $k$  είναι ο κατακόρυφος δείκτης. Η ομάδα των μπλοκ δεξιά παρουσιάζεται σε δισδιάστατο χώρο. Η ομάδα των επτά κόμβων, συμπεριλαμβανομένου του κόμβου  $(i,j)$  αποτελούν τη μονάδα υπολογισμού πεπερασμένων διαφορών σε τρεις διαστάσεις. (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

### 3.2. Μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι πιο περίπλοκη από αυτή των πεπερασμένων διαφορών, καθώς ο χώρος του προβλήματος υποδιαιρείται σε στοιχεία (εικόνα 3.2α)) που ορίζεται από κόμβους. Η εξαρτημένη μεταβλητή (λ.χ. η υδραυλική πίεση) ορίζεται ως μια συνεχής λύση εντός των στοιχείων (εικόνα 3.3 α)), σε αντίθεση με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, όπου η πίεση ορίζεται μόνο στους κόμβους και θεωρείται σταθερή μεταξύ των κόμβων (εικόνα 3.3 β)). Η λύση στα πεπερασμένα στοιχεία είναι κατά τμήματα συνεχής, καθώς τα επιμέρους στοιχεία ενώνονται κατά μήκος των ακμών τους. Τα πιο συνηθισμένα στοιχεία είναι τα τριγωνικά και τα τετραπλευρικά. Τα στοιχεία είναι γραμμές όταν αναφερόμαστε σε μία διάσταση, επίπεδα σε δύο και πολυγωνικά σε τρεις. Οι θέσεις

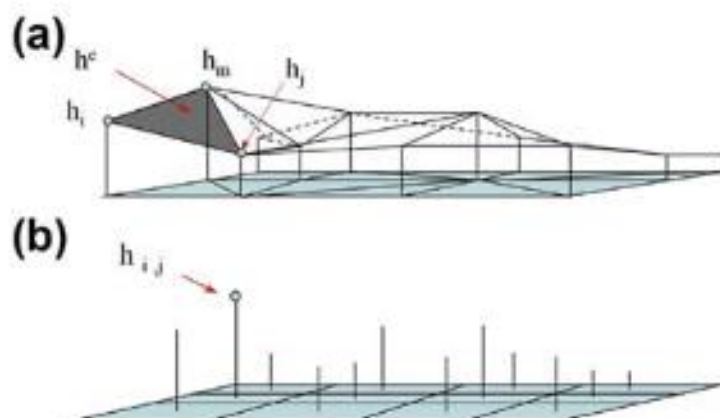
των κόμβων σε ένα πλέγμα καθορίζονται με συντεταγμένες  $(x,y,z)$  (εικόνα 3.2 b)). Τόσο οι κόμβοι όσο και τα στοιχεία αριθμούνται και η θέση κάθε στοιχείου ορίζεται με βάση τους αριθμούς των γύρω κόμβων. Για παράδειγμα στην εικόνα 3.2 b), το στοιχείο αριθμός 5 σχηματίζεται από τους κόμβους 5,7 και 4.

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί περισσότερα δεδομένα για την οργάνωση των θέσεων των κόμβων σε σχέση με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, επειδή εκτός από τη θέση  $x,y,z$  κάθε κόμβου, χρειάζονται και ο αριθμός του στοιχείου και οι αριθμοί των κόμβων που το σχηματίζουν για την εισαγωγή στο πρόγραμμα και τη περαιτέρω δημιουργία του πλέγματος. Η δημιουργία του πλέγματος είναι σημαντική, διότι η ακολουθία αρίθμησης των κόμβων μπορεί να επηρεάσει τη χρήση της μνήμης του υπολογιστή κατά την εκτέλεση του κώδικα. Συνεπώς οι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων συνήθως περιλαμβάνουν λογισμικό για τη δημιουργία του πλέγματος. (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

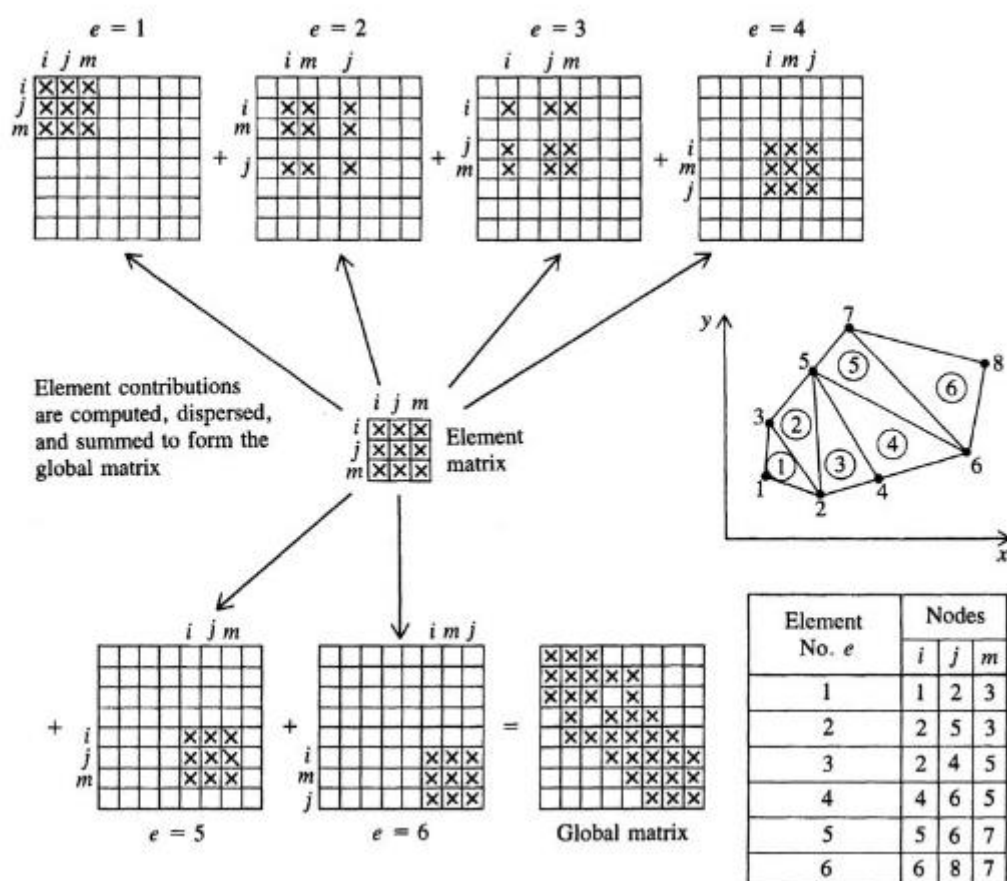


Εικόνα 3.2 Δισδιάστατο οριζόντιο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων με τριγωνικά στοιχεία και σημειογραφία. a) Ένα αντιπροσωπευτικό τρίγωνο στοιχείο με κόμβους  $i, j$  &  $m$ , αριθμημένους κατά τη φορά αντίθετη των δεικτών του ρολογιού, με χωρικές συντεταγμένες  $(x,y)$ . b) Τριγωνικά στοιχεία, με τους αριθμούς των στοιχείων μέσα σε κύκλους, ορίζονται από αριθμημένους κόμβους. (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)





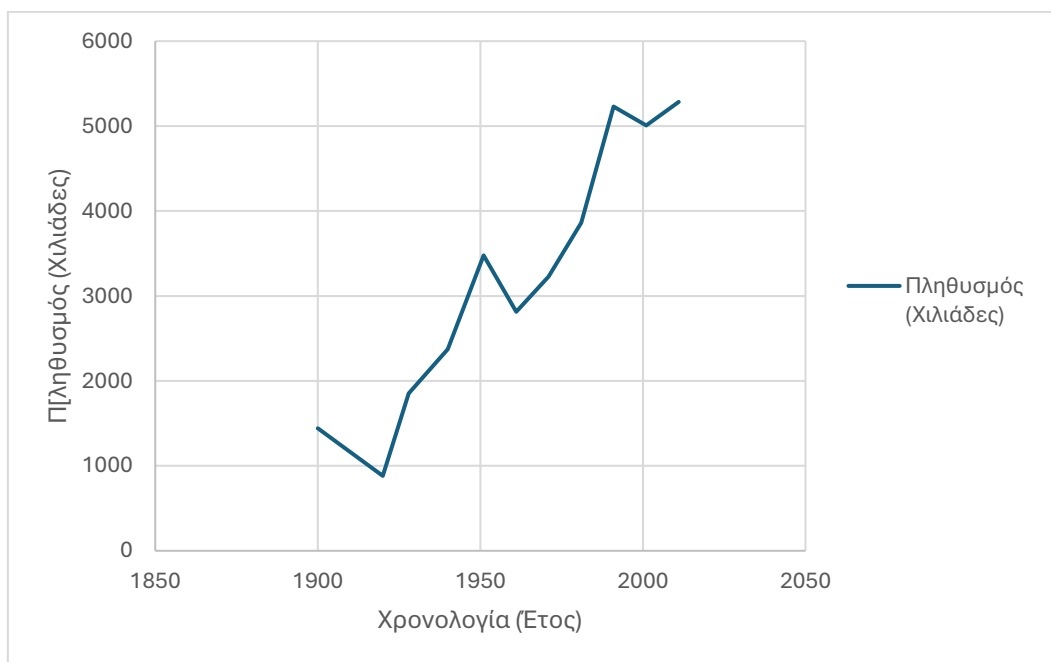
Εικόνα 3.3 Αναπαράσταση της υδραυλικής πίεσης στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. α) Στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, η πίεση είναι μια συνεχής συνάρτηση εντός κάθε στοιχείου. Στο πλέγμα που φαίνεται, τα στοιχεία είναι τριγωνικά με πιέσεις στους κόμβους που υποδεικνύονται ως  $h_i, h_j$  &  $h_m$ . β) Στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, η πίεση  $h_{ij}$  ορίζεται μόνο στον κόμβο. (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)



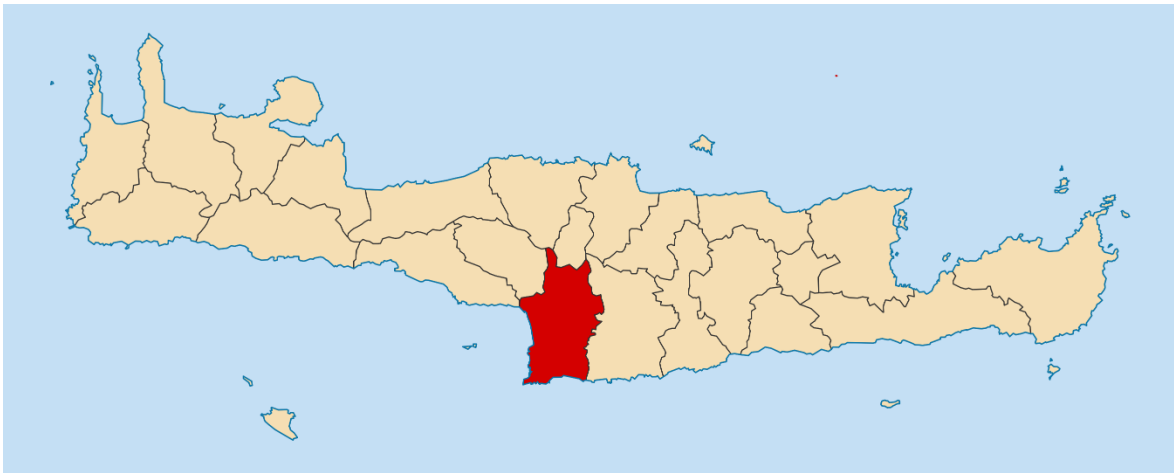
Εικόνα 3.4 Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τη σχέση μητρώων συντελεστών των στοιχείων και τη συναρμολόγηση τους στο συνολικό μητρώο συντελεστών για το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

## 4. Κεφάλαιο 4- Περιοχή Μελέτης

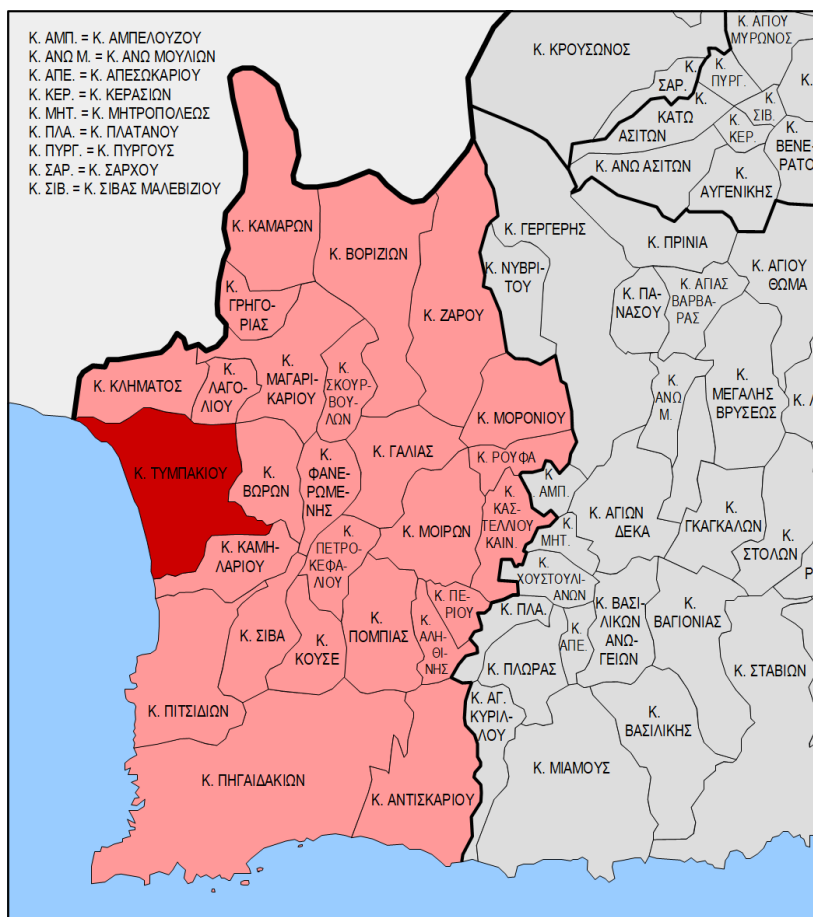
Η περιοχή μελέτης βασίζεται στο Τυμπάκι, ή όπως το αποκαλούν οι ντόπιοι Τυμπάκιον. Είναι μια κωμόπολη, η οποία ανήκει στο Δήμο Φαιστού που υπάγεται στη Περιφερειακή Ενότητα Ηρακλείου Κρήτης. Η απόσταση της περιοχής από το Ηράκλειο υπολογίζεται στα 65.5 χιλιόμετρα, βρίσκεται στο δυτικό άκρο της πεδιάδας της Μεσσαράς και η λεκάνη απορροής του Τυμπακίου περιλαμβάνει το ποταμό Γεροπόταμο μέσω του φαραγγιού της Φαιστού. Οι κύριες ασχολίες των κατοίκων είναι η ελαιοκομία και η καλλιέργεια σπωροκηπευτικών και ανθών. Μετά την αγροτική εξέλιξη της περιοχής ο πληθυσμός του Τυμπακίου αυξήθηκε, και στελεχώνει πλέον 8 εκπαιδευτικές μονάδες, τράπεζες, ταχυδρομικό γραφείο, αθλητικές εγκαταστάσεις και τον πολιτιστικό σύλλογο της περιοχής. (Wikipedia, 2024)



Γράφημα 4.1 Καμπύλη αύξησης πληθυσμού στη κοινότητα Τυμπακίου (Wikipedia, 2024)



Εικόνα 4.1 Δήμος Φαιστού (Wikipedia, 2024)



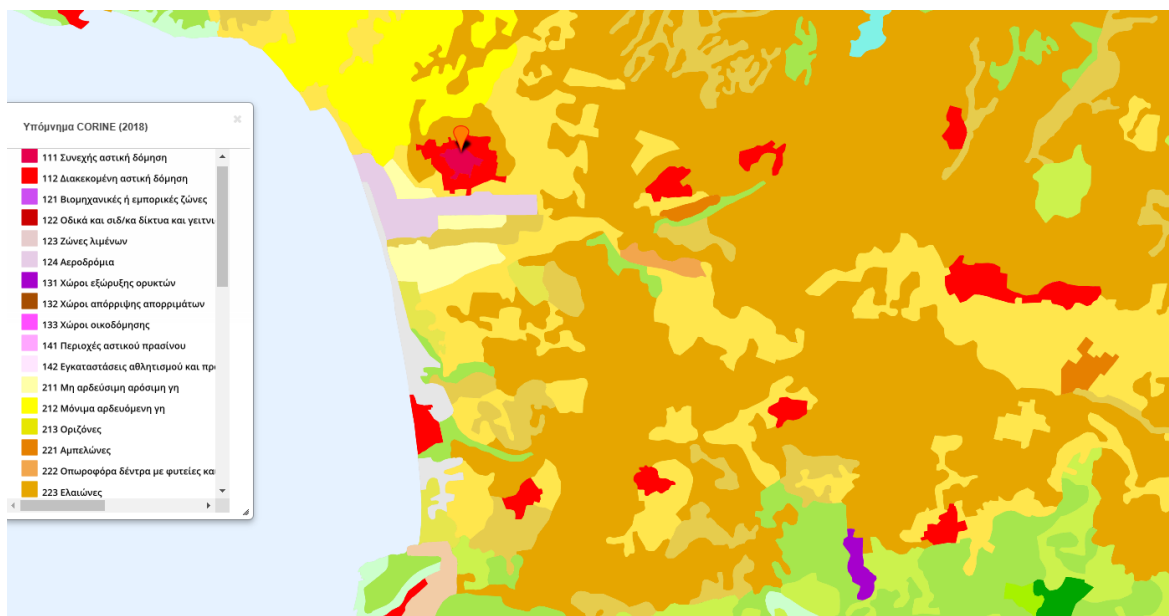
Εικόνα 4.2 Απεικόνιση της επικράτειας του Δήμου Φαιστού και με σκούρο κόκκινο η Κοινότητα Τυρπακίου (Wikipedia, 2024)

Στη περιοχή του Τυμπακίου με βάση τη παρακάτω εικόνα παρατηρούμε ότι υπάρχει περιοχή ΖΕΠ(Ζώνη ειδικής προστασίας) επιφάνειας 7km<sup>2</sup>. Η ζώνη αυτή ανήκει στο πρόγραμμα Natura 2000 και προστατεύονται 18 είδη πτηνών. (European Enviromental Agency, 2019)



*Εικόνα 4.3 Χάρτης Natura 2000 (ΖΕΠ) για τη περιοχή του Τυμπακίου (Οικοσκόπιο, 2024)*

Σύμφωνα με το χάρτη χρήσης γης, η περιοχή καλύπτεται κυρίως από αμπελώνες, ελαιώνες, οπωροφόρα δέντρα με φυτείες και γενικός καλλιεργήσιμη γης. Σε ελάχιστα σημεία παρατηρούνται και μερικές περιοχές αραιής βλάστησης και θάμνων.



Εικόνα 4.4 Χάρτης χρήσεων γης για τη περιοχή Τυμπακίου μέσω του συστήματος CORINE (2018) (Οικοσκόπιο, 2024)

#### 4.1. Υδρογεωλογία της περιοχής μελέτης

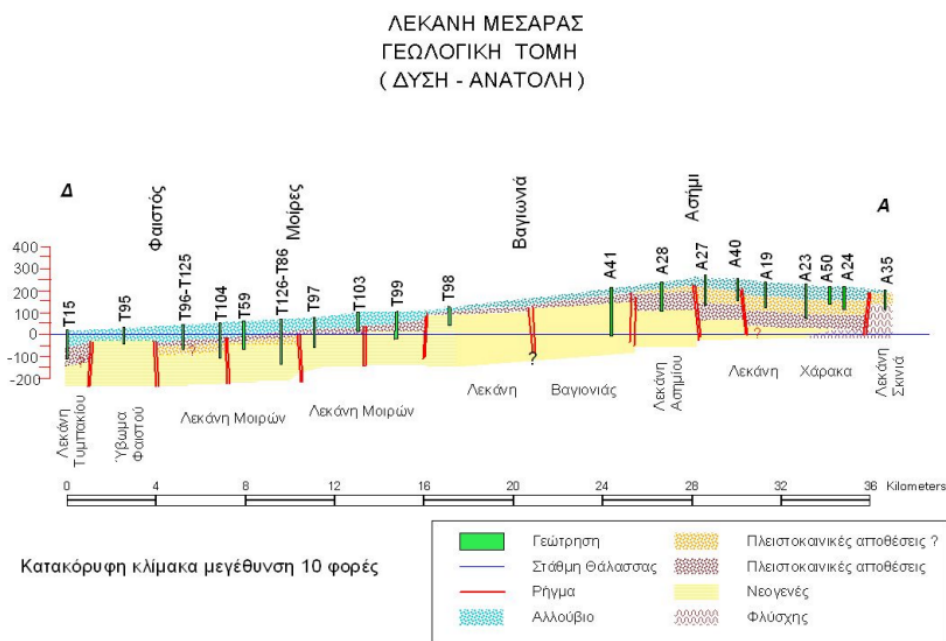
Η περιοχή λόγω της αγροτικής ανάπτυξης και των εκτάσεων που καταλαμβάνουν τα θερμοκήπια και οι ελιές, θεωρείται μια από τις πιο σημαντικές αγροτικές περιοχές της Κρήτης. Με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγάλες ανάγκες σε νερό οι οποίες καλύπτονται κυρίως από αντλήσεις υπόγειων υδάτων. Οι υπόγειοι υδροφορείς αναπληρώνονται μέσω των ποταμών που διασχίζουν τη περιοχή, όπως για παράδειγμα ο ποταμός Ληθαίος και Μάγειρας. Καθώς οι επιφανειακές εισροές από τις κατακρημνίσεις τις χειμερινές περιόδους δεν επαρκούν για την αναπλήρωση των υπόγειων υδάτων. (ΚΟΥΤΡΙΜΠΙΑΝΟΣ, 2020)

Λόγω των τεράστιων αναγκών σε νερό, ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες όπου υπάρχουν φαινόμενα ξηρασίας σε συνδυασμό με το τουριστικό φόρτο που υπόκειται η περιοχή, δημιουργούνται καταστάσεις υπεράντλησης και υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων νερών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την πτώση στάθμης των υπόγειων νερών με επακόλουθο την εισχώρηση του θαλασσινού νερού στον υπόγειο υδροφόρο, δημιουργώντας το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Το πρόβλημα αυτό έχει επιδεινωθεί εξαιτίας των επιπρόσθετων παράνομων γεωτρήσεων που λειτουργούν στη περιοχή. Η διοίκηση της περιοχής έχει επιχειρήσει να εντοπίσει τις παράνομες γεωτρήσεις και να τις κλείσει, σε συνδυασμό με τη κατασκευή μιας τεχνητής λίμνης και του φράγματος της Φανερωμένης. Όστε να καλυφθεί η ανάγκη των αγροτών σε άρδευση και να προμηθευτούν οι πόλεις πόσιμο νερό. (ΚΟΥΤΡΙΜΠΙΑΝΟΣ, 2020)

Το υδροφόρο σύστημα της λεκάνης Τυμπακίου αποτελείται από δύο κύριους υδροφορείς, τον αλλουβιακό και τον πλειστοκαινικό. Ο αλλουβιακός υδροφορέας βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης Μεσαράς, έχει επιμήκες σχήμα και αποτελείται από σύγχρονες ποταμολιμναίες αποθέσεις αμμών, ιλυολίθων και αργίλων. Παρόλο που ο υδροφορέας αποτελείται από ποικιλόμορφες υδρογεωλογικές ιδιότητες, συνήθως αντιμετωπίζεται ως ενιαίος. (ΜΑΓΔΑΛΗ, 2012)

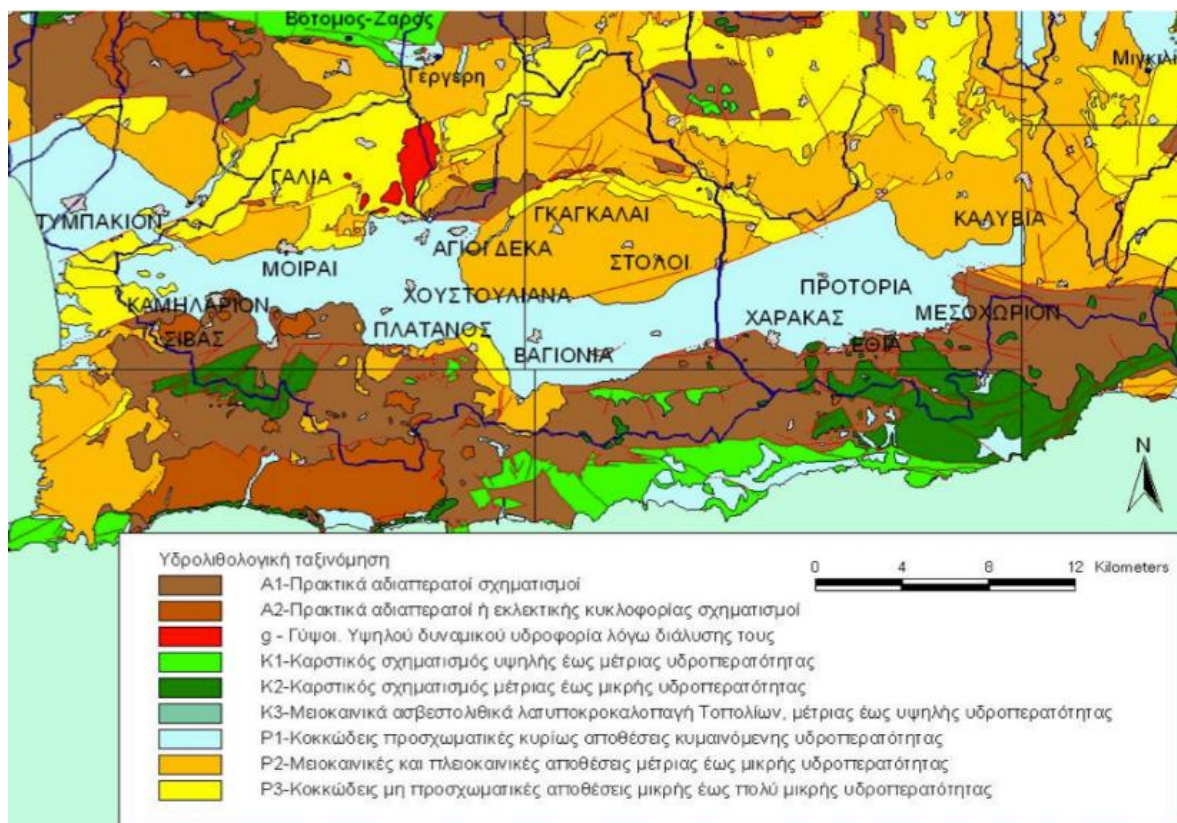
Κατά την Πλειστόκαινο εποχή (πλειστοκαινικός υδροφορέας), τα ιζήματα εναποτέθηκαν σε ρήγματα νεογενών σχηματισμών κάτω από ηπειρωτικές συνθήκες (ποταμολιμναία φάση, δηλαδή περιβάλλον όπου το νερό προέρχεται από ποτάμια και λίμνες), τα ιζήματα αυτά διατηρούνται σε διαφορετικό βαθμό ανάλογα με το υψόμετρο του ρήγματος. Στα χαμηλά υψόμετρα, όπως στη λεκάνη των Μοιρών και του Χάρακα, ο σχηματισμός έχει διατηρηθεί σε καλή κατάσταση, αντιθέτως στα ανώτερα υψόμετρα, όπως στη λεκάνη του Βαγιονιά, τα ιζήματα έχουν διαβρωθεί. Επιφανειακά, οι πλειστοκαινικοί σχηματισμοί εντοπίζονται κυρίως στις περιοχές της Καλυβιανής και των Γκαγκαλών. Επειδή η στάθμη της θάλασσας μετά την εναπόθεση των σχηματισμών ήταν χαμηλότερη από τη σημερινή, είχε ως αποτέλεσμα τη διάβρωση των σχηματισμών αυτών από τα κύρια υδάτινα ρεύματα της περιοχής, όπως ο Γεροπόταμος, ο Λιθαίος και ο Αναποδάρης. Αυτή η διάβρωση οδήγησε στη δημιουργία βαθιών τάφρων, με τη μεγαλύτερη καταγεγραμμένη να φτάνει σε 75 μέτρα βάθος κάτω από τη στάθμη της θάλασσας στην περιοχή των Μοιρών και τα 80 μέτρα στην περιοχή Πλατύ, κοντά στο Τυμπάκι. (Χρονοπούλου, 2019)

Τέλος ο αλλουβιακός και ο πλειστοκαινικός υδροφορέας έχουν έκταση περίπου 35 χιλιόμετρα και δέχονται μέσο ύψος βροχής λιγότερο από 500mm. Λόγω της τοποθεσίας τους δίπλα στη θάλασσα, ο υδροφορέας στο παράκτιο τμήμα του Κόκκινου Πύργου έχει υποστεί υφαλμύριση. (ΚΡΙΤΣΩΤΑΚΗΣ & ΠΑΥΛΙΔΟΥ, 2013)

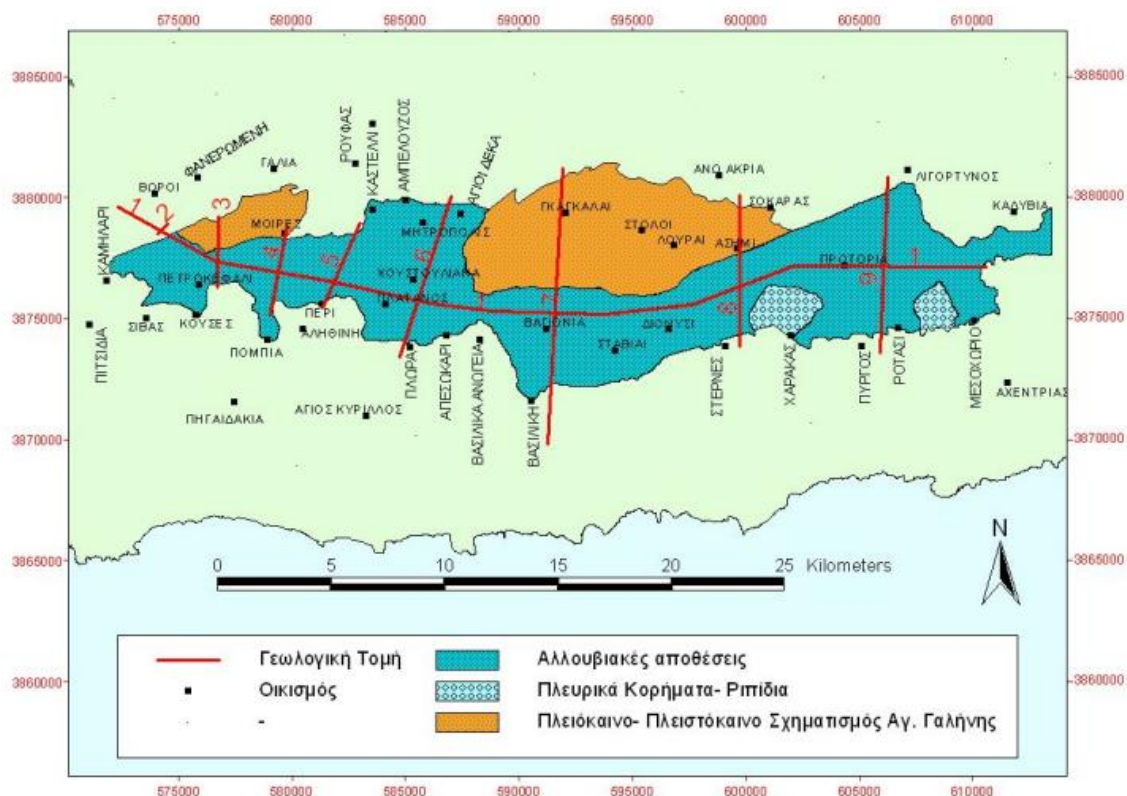


Εικόνα 4.5 Υδρογεωλογική τομή λεκάνης Μεσσαράς (ΚΡΙΤΣΩΤΑΚΗΣ Μ. Ν., 2009)





Εικόνα 4.6 Υδρολιθολογικός χάρτης λεκάνης Μεσσαράς (Γιαννακάκος, 2013)



Εικόνα 4.7 Αλλουβιακός και Πλειστοκαινικός Υδροφορέας στη λεκάνη Μεσσαράς (ΚΡΙΤΣΩΤΑΚΗΣ Μ. Ν., 2009)

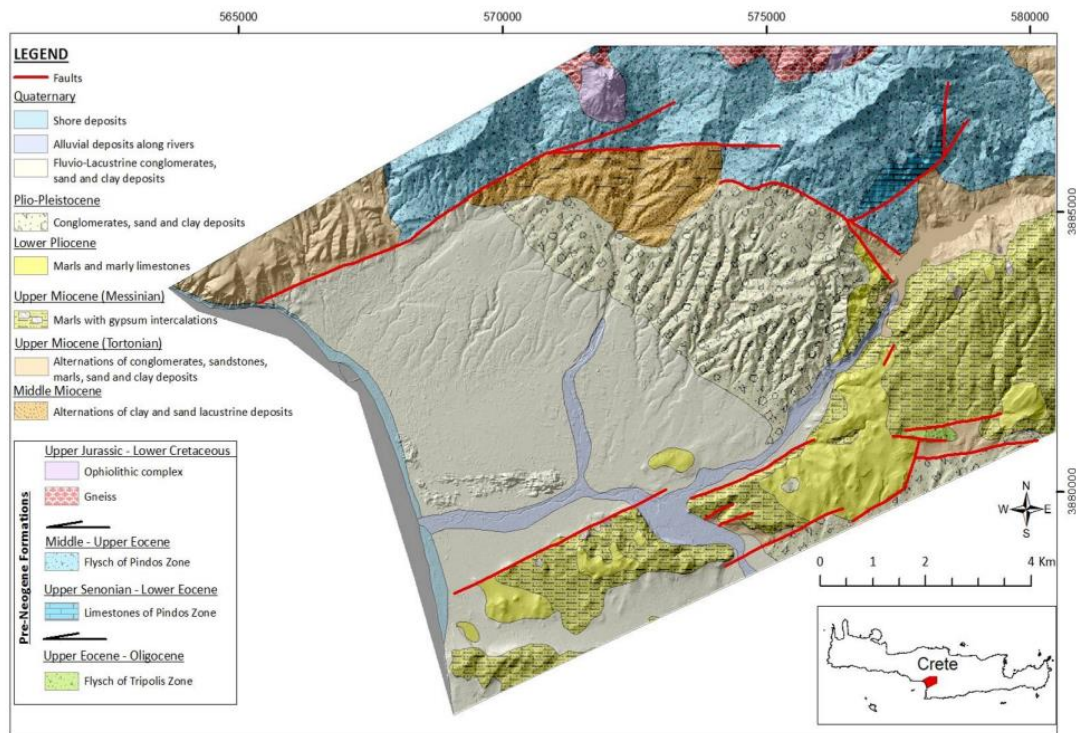


#### 4.2. Γεωλογία της περιοχής

Η περιοχή του Τυμπακίου χαρακτηρίζεται από τους εξής γεωλογικούς σχηματισμούς:

- a) Παράκτιες αποθέσεις του Τεταρτογενούς (Ολόκαινο) που αποτελούνται από άμμο συγκολλημένη με κροκάλες και ψαμμίτες.
- b) Κροκαλοπαγή, δηλαδή ιζήματα που αποτελούνται από μεγάλους κόκκους, κυρίως κροκάλες και χαλίκια, άμμοι και άργιλοι του Πλειο – Πλειστόκαινου. Τα οποία είναι τύποι ιζημάτων που σχηματίστηκαν κατά τη γεωλογική περίοδο του Πλειοκαίνου και Πλειστόκαινου.
- c) Θαλάσσιες αποθέσεις του κατώτερου Πλειόκαινου, που περιλαμβάνουν λευκές μάργες και λευκούς μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, καστανωπές φυλλώδεις μάργες, άμμους, κροκαλοπαγή και στα ανώτερα μέρη κλαστικούς ασβεστόλιθους.
- d) Σχηματισμούς Αποστόλων του Μεσσηνίου. Αποτελείται από κυανές, τέφρες και θαλάσσιες μάργες, με βάση συνήθως από κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και άμμους πλούσιους σε ασβεστόλιθους.
- e) Ακανόνιστες εναλλαγές από αποθέσεις υφάλμυρων και γλυκών νερών, με ενδιαστρώσεις υφαλογενών ασβεστόλιθων. Ειδικότερα εμφανίζονται κροκαλοπαγή, ψαμμίτες, άμμοι, άργιλοι, λιγνίτες και ασβεστόλιθοι, μαλάκια γλυκού νερού και υπολείμματα φυτών.
- f) Τέλος παρατηρούμε Λατυποπαγή, λιμναίες και θαλάσσιες αποθέσεις του Μέσο και Ανώτερου Μειόκαινου.

(Γιαννακάκος, 2013)



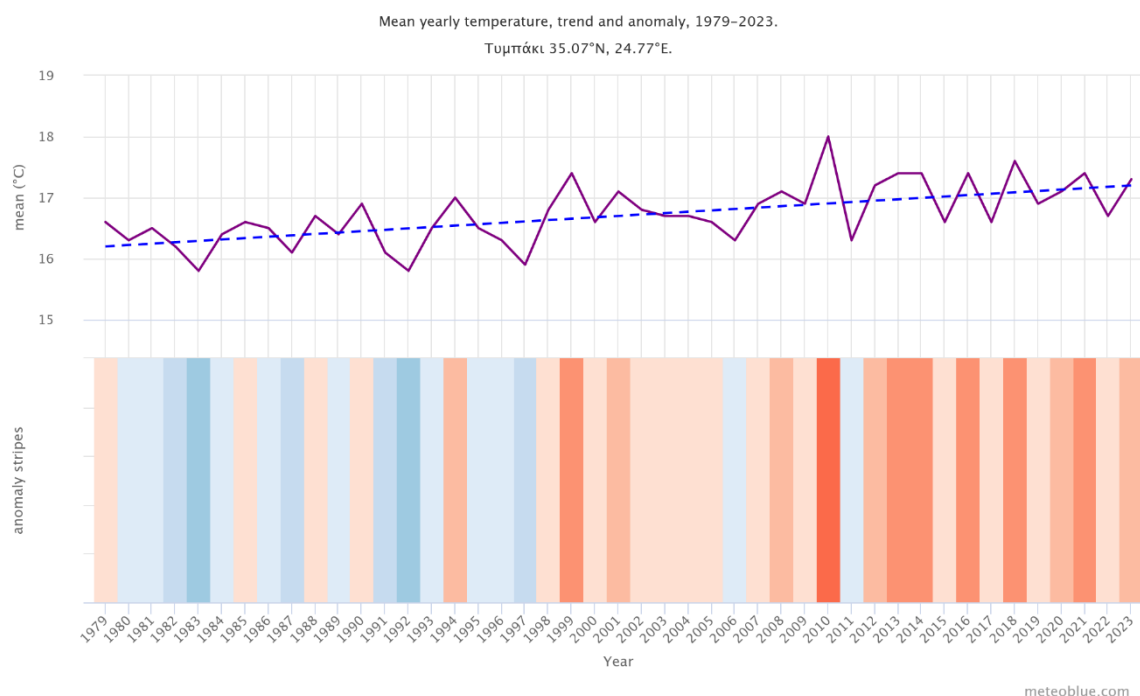
Εικόνα 4.8 Γεωλογικός Χάρτης περιοχής Τυμπακίου (Γιαννακάκος, 2013)

#### 4.3. Κλιματικά δεδομένα της περιοχής

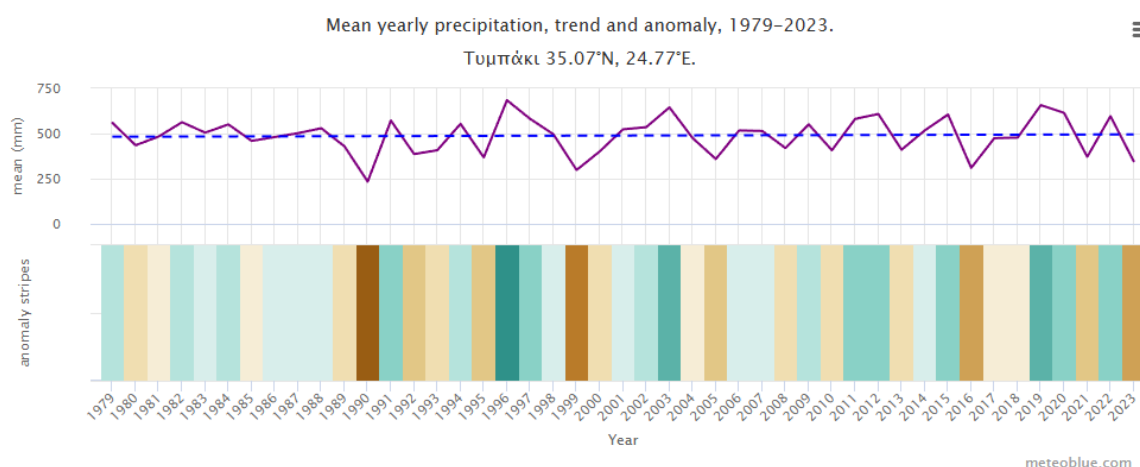
Στο παρακάτω διάγραμμα (εικόνα 4.9) παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας στο Τυμπάκι από το 1979 έως το 2023. Καταλήγουμε στα εξής βασικά σημεία και συμπεράσματα:

- Ανοδική τάση θερμοκρασίας: Η μπλε διακεκομμένη γραμμή δείχνει μια σαφή ανοδική τάση στη μέση θερμοκρασία, επομένως η θερμοκρασία αυξάνεται σταδιακά, κάτι που υποδεικνύει τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη περιοχή.
- Ετήσιες διακυμάνσεις: Η μοβ γραμμή δείχνει τη διακύμανση της θερμοκρασίας για κάθε έτος, παρατηρούμε κάποιες φυσιολογικές αυξομειώσεις, αλλά ο γενικός ρυθμός είναι ανοδικός.
- Ανωμαλίες (Anomaly stripes): Στο κάτω μέρος του διαγράμματος, οι χρωματικές λωρίδες δείχνουν την απόκλιση της θερμοκρασίας κάθε έτους από το μέσο όρο. Στα πρώτα χρόνια (τέλη 1970-αρχές 1980), κυριαρχούν οι μπλε αποχρώσεις, κάτι που υποδεικνύει χαμηλότερες θερμοκρασίες από το μέσο όρο. Από τη δεκαετία του 2000 και έπειτα, οι περισσότερες λωρίδες είναι κόκκινες, υποδεικνύοντας υψηλότερες θερμοκρασίες από τον μέσο όρο.
- Περίοδοι μεγάλης θερμοκρασιακής αύξησης: Η μεγαλύτερη αύξηση στη θερμοκρασία παρατηρείται γύρω από το 2010 και συνεχίζει ανοδικά. Αυτή η τάση συνδέεται με τις αλλαγές που οφείλονται στη κλιματική αλλαγή

Επομένως, τα δεδομένα μας δείχνουν μια συνεχιζόμενη τάση αύξησης της θερμοκρασίας στο Τυμπάκι, ιδιαίτερα μετά το 2000, κάτι που συνδέεται με τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής. Η αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να έχει σημαντικές συνέπειες για το τοπικό κλίμα, τη γεωργία και άλλες πτυχές του οικοσυστήματος. (meteoblue, 2024)



Εικόνα 4.9 Ετήσια αλλαγή θερμοκρασίας στο Τυμπάκι (meteoblue, 2024)



Εικόνα 4.10 Ετήσια μεταβολή βροχοπτώσεων στο Τυμπάκι (meteoblue, 2024)

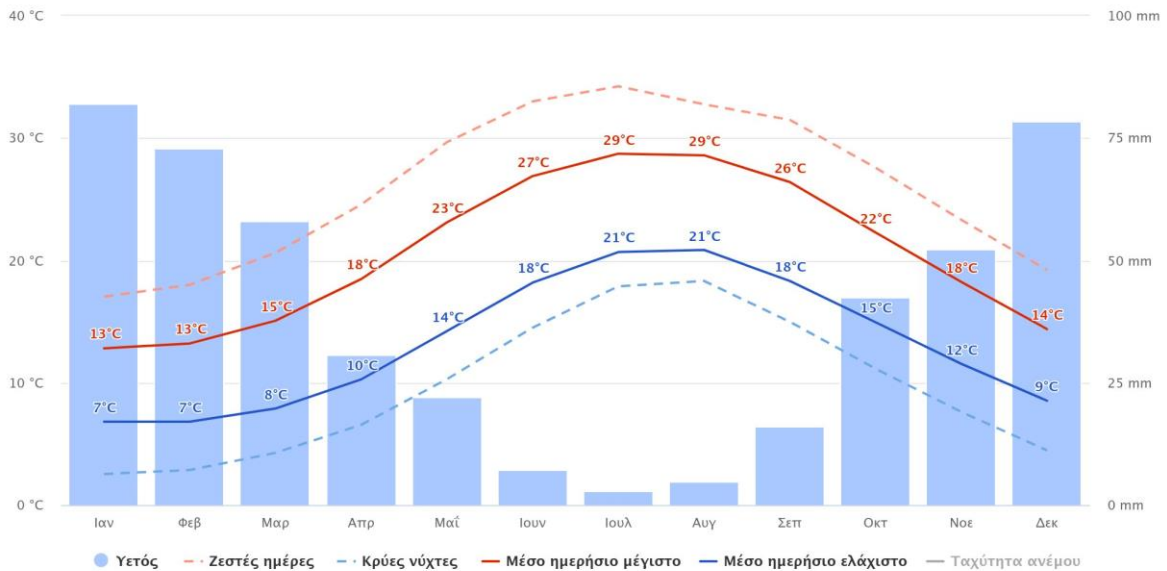
Στην εικόνα 4.10 παρατηρούμε το διάγραμμα της ετήσιας βροχής στην περιοχή του Τυμπακίου, από το 1970 έως το 2023, και εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

- Μέση τάση βροχόπτωσης: Η μπλε διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά τη μέση τάση της βροχόπτωσης και φαίνεται ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι σταθερή, χωρίς μεγάλες μεταβολές κατά την πάροδο των ετών.
- Μεταβολές στην ετήσια βροχόπτωση: Η μωβ γραμμή περιγράφει την ετήσια βροχόπτωση και παρατηρούμαι σημαντικές διακυμάνσεις από χρόνια σε χρόνια, χωρίς ωστόσο να αποκλίνει σημαντικά από το μέσο όρο.
- Ανωμαλίες: Οι χρωματικές λωρίδες στο κάτω μέρος του γραφήματος μας δείχνει ανωμαλίες στη βροχόπτωση. Οι χρωματισμοί ακολουθούν ένα μοτίβο που φαίνεται

να επαναλαμβάνεται, χωρίς όμως να παρατηρείται κάποια μακροχρόνια μεταβολή προς ένα πιο ξηρό ή πιο υγρό κλίμα.

#### Τυμπάκι

35.07°N, 24.77°E (25 μ. υψ.).  
Μοντέλο: ERA5T.



Εικόνα 4.11 Μέσος όρος θερμοκρασιών και βροχοπτώσεων (meteoblue, 2024)

Από το διάγραμμα της εικόνας 4.11 εξάγουμε τα εξής:

- Μέγιστες θερμοκρασίες (κόκκινη γραμμή): Η μέγιστη θερμοκρασία ξεκινάει από τους 13°C τον Ιανουάριο και αυξάνεται σταδιακά φτάνοντας στο μέγιστο στους 29 °C τον Ιούλιο και Αύγουστο, πριν αρχίσει να πέφτει ξανά προς το τέλος του έτους.
- Ελάχιστες θερμοκρασίες (μπλε γραμμή): Η ελάχιστη θερμοκρασία κυμαίνεται από 7 °C τον Ιανουάριο και ανεβαίνει σταδιακά φτάνοντας στους 21 °C τον Ιούλιο και τον Αύγουστο. Οι νύχτες παρατηρούνται να είναι δροσερές καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, ειδικά το χειμώνα.
- Η καλοκαιρινή περίοδος: Χαρακτηρίζεται ως θερμή, με μέγιστες θερμοκρασίες πάνω από 25°C και ελάχιστες γύρω στους 20 °C, ενώ ο χειμώνας είναι σχετικά ήπιος με ελάχιστες θερμοκρασίες γύρω στους 7-10 °C
- Βροχόπτωση(μπλε μπάρες): Οι βροχοπτώσεις είναι πιο έντονες κατά τους χειμερινούς μήνες, με τον Ιανουάριο και τον Δεκέμβριο να εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές βροχόπτωσης (περίπου 75mm). Το καλοκαίρι από τον Ιούνιο έως τον Αύγουστο έχουμε ξηρασία με σχεδόν μηδενική βροχόπτωση.
- Ταχύτητα ανέμου(γκρι γραμμή): Η ταχύτητα του ανέμου φαίνεται να είναι σχετικά σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, χωρίς ιδιαίτερες διακυμάνσεις.

## 5. Κεφάλαιο 5 – Μοντελοποίηση με χρήση Η/Υ: PTC

### 5.1. Το πρόγραμμα Argus one

Το Argus ONE είναι ένα σύμπλεγμα γενικής χρήσης γραφικών εργαλείων για προ επεξεργασία (pre-processing) και μετεπεξεργασία (post processing) αριθμητικών μοντέλων. Το Argus Open Numerical Environments (Argus ONE) είναι βασισμένο είτε στη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (finite elements) είτε στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (finite difference). Το Argus ONE χρησιμοποιείται με τρεις τρόπους:

1. Ως ένα γενικό περιβάλλον για αριθμητικούς μοντελιστές: Δίνει τη δυνατότητα στον μοντελιστή να προετοιμάσει και να στείλει δεδομένα σε οποιοδήποτε αριθμητικό μοντέλο.
2. Ως μια εξειδικευμένη ολοκληρωμένη εφαρμογή: Χρησιμοποιώντας μοντέλα που έχουν πλήρως ενσωματωθεί στο Argus ONE ως PIEs (Plug In Extensions).
3. Ως περιβάλλον ανάπτυξης εφαρμογών: Δίνει τη δυνατότητα σε προγραμματιστές μοντέλων να δημιουργήσουν γραφικές διεπαφές χρήστη (Graphical User Interfaces) για τα μοντέλα τους.

Το Argus ONE χρησιμοποιείται ευρέως από μηχανικούς στους παρακάτω τομείς:

- Μοντελοποίηση υπόγειων υδάτων
- Μοντελοποίηση επιφανειακών υδάτων
- Περιβαλλοντική ανάπτυξη
- Μηχανική πετρελαϊκών κοιτασμάτων
- Φυσική ωκεανογραφίας
- Μηχανική παράκτιας και θαλάσσιας περιοχής
- Πολιτική μηχανική
- Μηχανική εξόρυξης μεταλλευμάτων

Ορισμένα μοντέλα είναι διαθέσιμα ως πλήρως ενσωματωμένα PIEs, όπως: MODFLOW/MOC3D, HST3D, SUTRA, NAPL, LandUse Analyst και το PTC.

(Civil Engineering Software Database, 2020)

### 5.2. Οι βασικές εξισώσεις του PTC

Το PTC χρησιμοποιεί το παρακάτω σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για να αναπαραστήσει τη ροή υπόγειων υδάτων, όπως περιγράφεται από την υδραυλική στάθμη  $h$ :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (5.1)$$

Οι συνιστώσες των ταχυτήτων της υπόγειας ροής, είναι:

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}, V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (5.2)$$

Και τέλος η εξίσωση μεταφοράς ρύπων, όπως περιγράφεται από τη συγκέντρωση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right] - \left[ V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right] + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left( \frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \quad (5.3)$$

Αυτές οι εξισώσεις προκύπτουν από την αρχή διατήρησης της μάζας και τον νόμο του Darcy.

Οι ορισμοί των διάφορων παραμέτρων που αναφέρθηκαν παραπάνω θα εξηγηθούν παρακάτω. Η επίλυση αυτών των εξισώσεων ακολουθεί την παρακάτω ακολουθία:

1. Πρώτα, επιλύεται η υδραυλική στάθμη  $h$  από την εξίσωση (5.1)
2. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ταχύτητες του Darcy  $V_x, V_y, V_z$  από την εξίσωση (5.2)
3. Τέλος, επιλύεται η εξίσωση (5.3) για τη συγκέντρωση του ρύπου  $c$  (Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997)

### 5.3. Αλγόριθμος επίλυσης του PTC

Η επίλυση του συστήματος εξισώσεων (5.1) και (5.3) για πολύπλοκα φυσικά συστήματα απαιτεί γενικά την εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για συστήματα σε κλίμακα πεδίου, η υπολογιστική δύναμη που απαιτείται για την επίλυση μια αριθμητικής διακριτοποίησης αυτών των τρισδιάστατων εξισώσεων είναι μεγάλη. Επομένως το PTC χρησιμοποιεί έναν μοναδικό αλγόριθμο διάσπασης για την επίλυση των πλήρως τρισδιάστατων εξισώσεων, ο οποίος μειώνει σημαντικά το υπολογιστικό φορτίο.

Ο αλγόριθμος περιλαμβάνει τη διακριτοποίηση του πεδίου σε περίπου παράλληλα οριζόντια στρώματα. Σε κάθε στρώμα χρησιμοποιείται μια διακριτοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, που επιτρέπει την ακριβή αναπαράσταση ακανόνιστων περιοχών. Τα στρώματα συνδέονται κατακόρυφα μέσω διακριτοποίησης με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Αυτός ο υβριδικός συνδυασμός των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής της διαδικασίας διάσπασης. Σε κάθε χρονική επανάληψη, όλοι οι υπολογισμοί χωρίζονται σε δύο βήματα:

1. Στο πρώτο βήμα, όλες οι οριζόντιες διακριτοποιήσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων επιλύονται ανεξάρτητα η μία από την άλλη.
2. Στο δεύτερο βήμα, επιλύονται οι κατακόρυφες εξισώσεις που συνδέουν τα στρώματα. (Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997)

### 5.4. Τρισδιάστατη ροή υπόγειων υδάτων

#### 5.4.1. Βασική εξίσωση

Το PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά ροής ενός υπόγειου υδροφόρου συστήματος επιλύοντας τη δυναμική πίεση (hydraulic head) μέσω της ακόλουθης μερικής διαφορικής εξίσωσης:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (5.4)$$

Όπου:

$h$  είναι η υδραυλική πίεση (hydraulic head), [L]

$K_{xx}$  η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια διεύθυνση  $x$ , [ $LT^{-1}$ ]



$K_{yy}$  η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια διεύθυνση  $y$ , [ $LT^{-1}$ ]

$K_{zz}$  η υδραυλική αγωγιμότητα στην κατακόρυφη διεύθυνση  $z$ , [ $LT^{-1}$ ]

$S$  ο ειδικός συντελεστής αποθήκευσης (specific storage coefficient), [ $L^{-1}$ ]

$Q_i$  ο όρος πηγής/ απορροής στη θέση  $i$ , [ $L^3T^{-1}$ ]

$\delta$  η συνάρτηση δέλτα του Dirac

$r$  ο αριθμός των πηγών

Για ευκολία, ο τελευταίος όρος στην εξίσωση (5.4) θα συντομευθεί σε  $Q$ . Η θεμελιώδης εξίσωση (5.4) επιλύεται αριθμητικά από το PTC με τη χρήση των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. (Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997)

#### 5.4.2. Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Το διαχωριστικό πλάνο ενεργειών που χρησιμοποιείται από το PTC για την επίλυση της εξίσωσης (5.4) περιλαμβάνει την προσέγγιση των όρων της (5.4) που περιέχουν παραγώγους ως προς  $x$  &  $y$  χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα πεπερασμένα στοιχεία στο οριζόντιο επίπεδο χρησιμοποιούνται ευρέως. (Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997)

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων υποθέτει ότι υπάρχει άπειρο άθροισμα συναρτήσεων που μπορεί να αναπαραστήσει ακριβώς τη λύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει τη ροή υπόγειου νερού. Μια πεπερασμένη προσεγγιστική μορφή της σειράς δίνεται από τη σχέση:

$$h \sim \hat{h} = \sum_{i=1}^N h_i(z, t) w_i(x, y) \quad (5.5)$$

Όπου:

$h$  το υδραυλικό φορτίο, [ $L$ ]

$\hat{h}$  η προσεγγιστική μορφή της σειράς για το  $h$ , [ $L$ ]

$h_i$  είναι ένας ακαθόριστος συντελεστής, [ $L$ ]

$w_i$  είναι μια βασική (ή παρεμβλλόμενη) συνάρτηση (χωρίς μονάδες) και

$N$  ο αριθμός των κόμβων στο πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων

Η προσεγγιστική σειρά (5.5) παρέχει μια ακριβή αναπαράσταση όταν το  $N$  πλησιάζει το άπειρο ( $\hat{h}$  προσεγγίζει το  $h$ ). Με κατάλληλη επιλογή βασικών συναρτήσεων  $w_i$ , οι ακαθόριστοι συντελεστές  $h_i$  αντιστοιχούν στις τιμές του φορτίου στους κόμβους με συντεταγμένες  $(x, y, z)$ . Ένα βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση τοπικών, κομμάτι προς κομμάτι συνεχών βασικών συναρτήσεων, που είναι μηδενικές εκτός μιας μικρής υποπεριοχής του συνολικού χώρου. Παρότι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί τύποι βασικών συναρτήσεων, το PTC χρησιμοποιεί κομμάτι προς κομμάτι γραμμικές βασικές συναρτήσεις μεταξύ γειτονικών κόμβων.

Η μέθοδος προχωρά σημειώνοντας ότι ενώ ο διαφορικός τελεστής  $L$  (π.χ. εξίσωση 5.4) που εφαρμόζεται στο  $h$  είναι ίσος με το μηδέν, όταν εφαρμόζεται στη προσεγγιστική συνάρτηση, εισάγεται σφάλμα. Μαθηματικά επαναδιατυπώνεται ως:

$$L(h) = 0 \quad (5.6)$$

Ενώ:

$$L(\hat{h}) = R \quad (5.7)$$

Όπου R είναι το υπολειμματικό σφάλμα.

Για να επιλυθεί η (5.5) με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε το σφάλμα R. Το πετυχαίνουμε εξετάζοντας ένα πλήρες σύνολο συναρτήσεων  $w_j$ . Εάν εξαναγκάσουμε το R να είναι ορθογώνιο προς όλες τις πιθανές τιμές του  $w_j$ , στην ουσία εξαναγκάζουμε το R να γίνει μηδέν, και έτσι βρίσκουμε λύση για την (5.5). Αυτό εκφράζεται ως:

$$L(\hat{h}) = L(h) \text{ όταν } R = 0 \quad (5.8)$$

Το PTC χρησιμοποιεί το ίδιο σύνολο συναρτήσεων για τις συναρτήσεις βάρους  $w_i$  όπως για τις βασικές συναρτήσεις  $w_i$ , η διαδικασία ονομάζεται μέθοδος του Galerkin. Έτσι τα  $w_j$  και  $w_i$  χρησιμοποιούνται εναλλακτικά στο υπόλοιπο της ανάλυσης.

Ωστόσο η συνθήκη (5.8) μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν το N πλησιάζει το άπειρο, ενώ οι υπολογιστές μπορούν να χειριστούν μόνο πεπερασμένα σύνολα αριθμών. Συνεπώς εξετάζουμε ένα πεπερασμένο υποσύνολο τιμών  $w_i, i = 1, 2, \dots, N$ , που καθιστά τη λύση μας προσεγγιστική αντί για ακριβή. Ανακαλώντας τον ορισμό των ορθογώνιων συναρτήσεων, αυτές οι N συνθήκες μπορούν να εκφραστούν ως:

$$\iint_{\Omega} L(\hat{h}) w_i dx dy = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (5.9)$$

Όπου ο χώρος ολοκλήρωσης καλύπτει ολόκληρη την οριζόντια διατομή της περιοχής ροής. Εισάγοντας τον ορισμό της εξίσωσης (5.5), προκύπτει για κάθε συνάρτηση βάρους  $w_i$ :

$$\iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial \hat{h}}{\partial z} \right) - S \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} + Q \right] w_i dx dy = 0 \quad (5.10)$$

Ακολουθώντας την καθιερωμένη διαδικασία ολοκλήρωσης στη δισδιάστατη περίπτωση, οι όροι x & y της εξίσωσης (5.9) μπορούν να ολοκληρωθούν χρησιμοποιώντας το Θεώρημα του Green, παράγοντας:

$$\begin{aligned} & \iint_{\Omega} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \frac{\partial w_i}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} \frac{\partial w_i}{\partial y} \right] dx dy - \int_{\sigma} \left[ K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y \right] w_i d\sigma - \\ & \iint_{\Omega} \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} \right) \right] w_i dx dy + \iint_{\Omega} \left[ S \frac{\partial \hat{h}}{\partial t} - Q \right] w_i dx dy = 0 \quad (5.11) \end{aligned}$$

Όπου:

$l_x$  &  $l_y$  είναι οι συνημίτονες διευθύνσεις μεταξύ της κάθετης στην οριακή γραμμή της διατομής σ (όπου dσ αντιπροσωπεύει ένα μικρό μέρος κατά μήκος αυτού του ορίου) και των αξόνων x και y αντίστοιχα.

Η αντικατάσταση της εξίσωσης (5.5) στην εξίσωση (5.11) ολοκληρώνει τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για τη διακριτοποίηση της (5.4).

(Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997)



#### 5.4.3. Εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών

Εισάγοντας τη συμβολή των πινάκων, όπου τα κεφαλαία έντονα γράμματα αντιπροσωπεύουν τετραγωνικούς πίνακες και τα πεζά έντονα γράμματα αντιπροσωπεύουν διανύσματα στήλης, αναδιατυπώνουμε την εξίσωση (5.11) σε μορφή πίνακα:

$$\mathbf{A}\mathbf{h} + \mathbf{B} \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t} - \mathbf{v} + \mathbf{f} = 0 \quad (5.12)$$

Όπου τα  $\mathbf{A}$  και  $\mathbf{B}$  είναι πίνακες διάστασης  $N \times N$ , και τα  $\mathbf{h}$ ,  $\frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}$ ,  $\mathbf{v}$  και  $\mathbf{f}$  είναι διανύσματα στήλης μήκους  $N$ . Τα στοιχεία  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{v}$  δίνονται από τύπους, ενώ το  $\mathbf{f}$  περιλαμβάνει, τις γνωστές οριακές συνθήκες. (Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997)

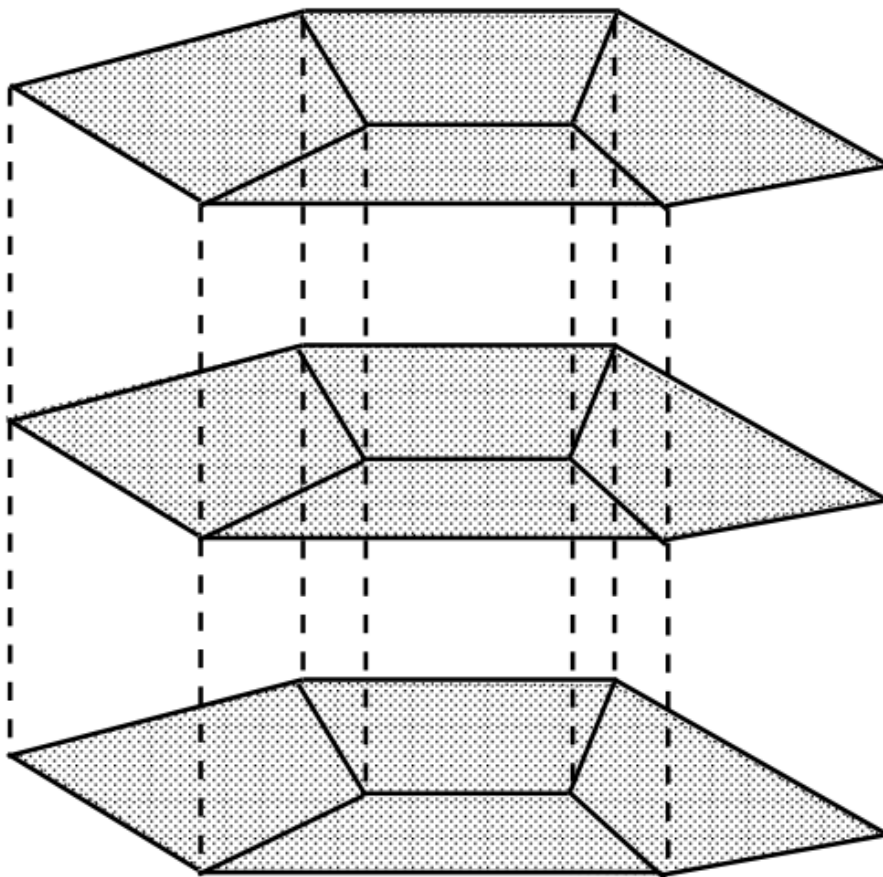
##### Η κάθετη παράγωγος

Το βασικό στοιχείο αυτού του κώδικα είναι η χρήση ενός κεντρικού σχεδίου διαχωρισμού των χωρικών παραγώγων στην κατεύθυνση  $z$ . Ο κάθετος διαχωρισμός επιτυγχάνεται με την απαίτηση ότι τα οριζόντια πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να επαναλαμβάνονται σε στρώματα με κόμβους στοιβαγμένους τον έναν πάνω στον άλλον όπως φαίνεται στην εικόνα (5.1). Αυτό σημαίνει ότι στην κάθετη διεύθυνση μια μονοδιάστατη εξίσωση πεπερασμένων διαφορών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσεγγίσει το  $\mathbf{v}$ .

##### Παράγωγος του χρόνου

Η εμπειρία μας δείχνει ότι μια έμμεση προσέγγιση με οπίσθια διαφορά για την παράγωγο ως προς το χρόνο παρέχει την πιο ακριβή λύση σε προβλήματα ροής υπόγειου νερού για ένα δεδομένο κόστος. Στην αναπαράσταση με οπίσθια διαφορά, χρησιμοποιείται ένα σχήμα πρώτης τάξης ορθότητας για την προσέγγιση της παραγώγου ως προς το χρόνο, και οι χωρικές παράγωγοι εκφράζονται στο νέο χρονικό επίπεδο.

Εφαρμόζοντας αυτό το σύστημα για κάθε επίπεδο παράγεται ένας πλήρης διαχωρισμός της (5.4), και λαμβάνεται ένα σύστημα  $M \times N$  εξισώσεων με  $N$  αγνώστους στην (5.5) για κάθε ένα από τα  $M$  επίπεδα. (Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997) (Τριχάκης, 2004)



Εικόνα 5.1 Σχέδιο οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε στοίβες, παράγοντας τρισδιάστατο διαχωρισμό. (Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997)

#### 5.4.4. Οριακές συνθήκες

Το μοντέλο PTC υποστηρίζει τρεις τύπους συνοριακών συνθηκών για την εξίσωση ροής. Οι τρεις τύποι είναι οι Dirichlet (καθορισμένη στάθμη), Neumann (καθορισμένη ροή) και ο τρίτος τύπος που είναι η διαρροή. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να τροποποιηθούν από τον χρήστη κατά τη διάρκεια μιας προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι η μηδενική ροή. Αυτό υποδηλώνει έναν περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέραστο πυθμένα και πλευρές. Επιλέγοντας εναλλακτικές οριακές συνθήκες, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει άλλες υδρολογικές συνθήκες. (Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997)

### Καθορισμένο υδραυλικό ύψος

Τα όρια σταθερής στάθμης ορίζονται καθορίζοντας σταθερές τιμές στάθμης σε όλους τους κόμβους. Ο κώδικας τότε αφαιρεί αυτόματα τις αντίστοιχες γραμμές και στήλες στον πίνακα συντελεστών που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους. Δεδομένου ότι οι κόμβοι σταθερής στάθμης εξαλείφονται ουσιαστικά από την εξίσωση του πίνακα μας, απομένουν  $(N-M-N_c)$  εξισώσεις για  $(N-M-N_c)$  αγνώστους, όπου  $N_c$  είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων σταθερής στάθμης στο πεδίο ροής.

### Καθορισμένη ροή

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων παρέχει έναν πολύ απλό τρόπο καθορισμού οριακών συνθηκών ροής. Με την εφαρμογή του θεωρήματος Green στην εξίσωση (5.11), προκύπτει ένας συνοριακός όρος. Ο όρος αυτός μπορεί να ξαναγραφεί ως:

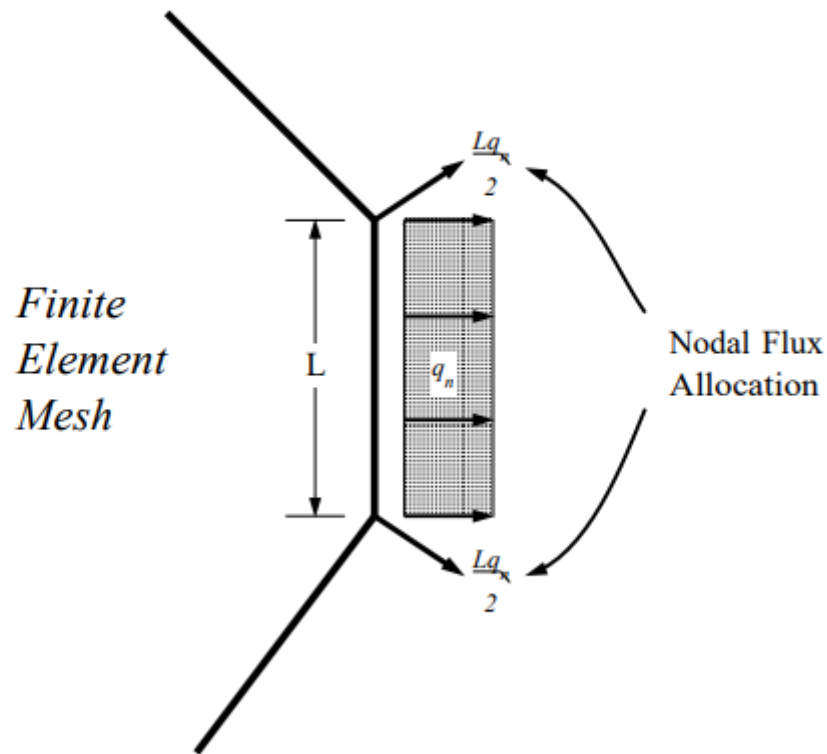
$$-\int_{\sigma} [K_{xx} \frac{\partial \hat{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \hat{h}}{\partial y} l_y] w_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n w_i d\sigma \quad (5.13)$$

Όπου:

$q_n$  είναι η κάθετη ροή ανά μονάδα επιφάνειας (μήκος x ύψος) του κάθετου ορίου  $\sigma$ .

Όταν η ροή  $q_n$  θεωρείται σταθερή κατά μήκος μιας πλευράς στοιχείου με μήκος  $L$ , η ολοκλήρωση της εξίσωσης (5.13) θα δώσει κατανομές στους κόμβους που φαίνονται στην εικόνα 5.2.

Έτσι ο χρήστης χρειάζεται μόνο να καθορίσει τη ροή όγκου σε έναν κόμβο για να αναπαραστήσει τη ροή κατά μήκος ενός ορίου. Δηλαδή ο χρήστης καθορίζει μια ροή όγκου σε έναν κόμβο. Για να διευκολυνθεί η εισαγωγή ομοιόμορφης διήθησης, ο κώδικας επιτρέπει στο χρήστη τον καθορισμό μιας ροής διήθησης στους κόμβους. Η εμβαδομετρική ολοκλήρωση για τον υπολογισμό της ροής όγκου πραγματοποιείται αυτόματα από το πρόγραμμα.



Εικόνα 5.2 Κατανομή της ροής  $q$  στους κόμβους κατά μήκος ενός στοιχείου με μήκος  $L$ . Για γραμμικά στοιχεία, κάθε κόμβος έχει ίσο βάρος. (Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997)

#### Διαρροή

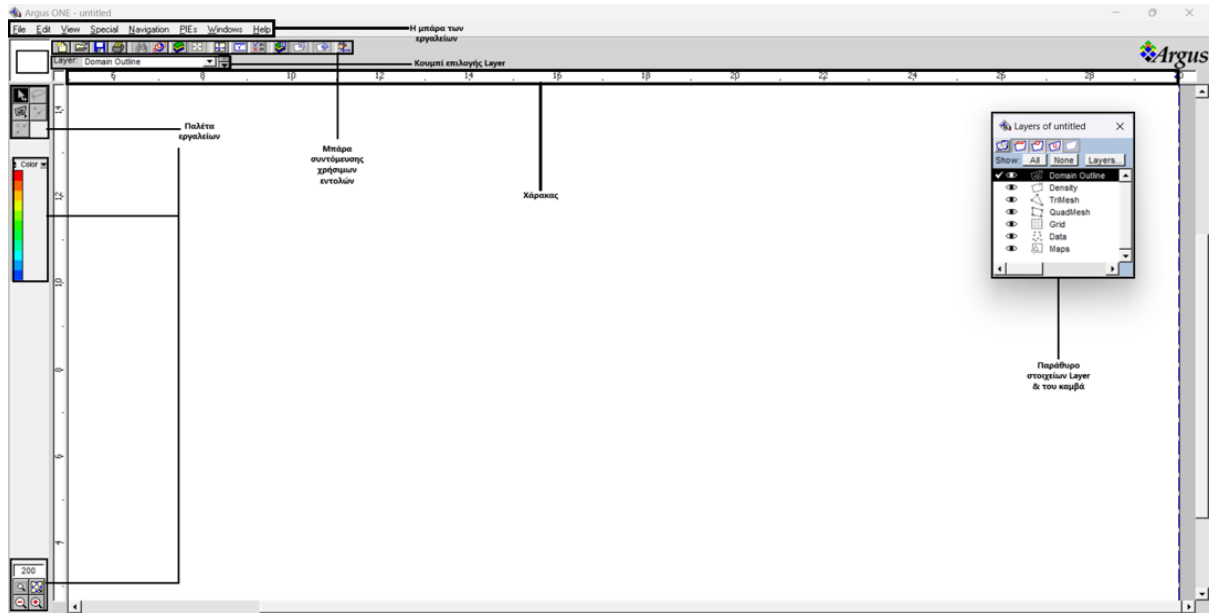
Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται μέσω αντικατάστασης των εξισώσεων του συστήματος. Ο όρος της αγωγιμότητας ενσωματώνεται στην επιφάνεια και συνεπώς αντιπροσωπεύει έμμεσα κάθετη διαρροή. Ωστόσο, με κατάλληλο ορισμό της σταθεράς που καθορίζεται από το χρήστη,  $k_L$ , μπορεί να καθοριστεί διαρροή σε οποιαδήποτε κατεύθυνση.

(Babu, Pinder, Niemi, Ahlfeld, & Stothoff, 1997)

## 6. Κεφάλαιο 6- Χρήση του λογισμικού ArgusONE & Επεξεργασία αρχικών δεδομένων

### 6.1. Βασικά στοιχεία και επεξήγηση UI

Για να γίνει εύκολη η κατανόηση των βημάτων που πραγματοποιήθηκαν θα εξηγηθούν τα βασικά στοιχεία της διεπαφής χρήστη του προγράμματος ή διαφορετικά (User Interface).



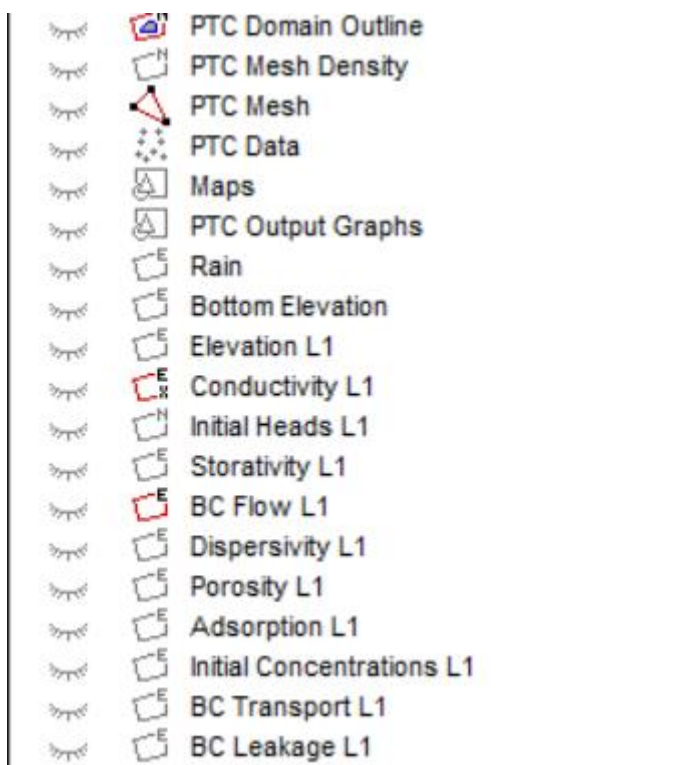
Εικόνα 6.1 Βασικό Παράθυρο του προγράμματος Argus One

Στη παραπάνω εικόνα βλέπουμε το παράθυρο που εμφανίζεται με το άνοιγμα του προγράμματος Argus One. Το παράθυρο αυτό εμπεριέχει όλα τα εργαλεία και τις εντολές που θα χρειαστούμε για να φτιάξουμε το μοντέλο μας, επίσης είναι και το παράθυρο στο οποίο θα οπτικοποιήσουμε τη περιοχή μελέτης και τη ροή του υπόγειου υδροφόρου. Τα αριθμητικά αποτελέσματα εξάγονται σε μορφή αναγνώσιμου αρχείου εκτός του προγράμματος σε ένα φάκελο της επιλογής μας στον υπολογιστή. Ενώ ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στο τρόπο που εισάγουμε τα δεδομένα μας στο πρόγραμμα καθώς πρέπει να πληρούν μερικές συγκεκριμένες προϋποθέσεις όσον αφορά το compatibility (τη συμβατότητα) και το format (τύπο αρχείου) των αρχείων.

Ακολουθεί μια σύντομη εξήγηση του κάθε βασικού στοιχείου της εικόνας 6.1:

- Μπάρα εργαλείων: Στη μπάρα εργαλείων βρίσκονται οι εντολές που θα χρησιμοποιήσουμε κατά την διάρκεια εργασίας μας στο Argus One.
- Μπάρα συντόμευσης εντολών: Η μπάρα αυτή μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη θέση του ποντικιού, πληροφορίες για αντικείμενα (κόμβους, στοιχεία, κλπ), καθώς επίσης περιλαμβάνει ορισμένες χρήσιμες συντομεύσεις όπως την αποθήκευση του project.
- Παλέτα εργαλείων: Η παλέτα περιλαμβάνει τα εργαλεία που θα χρησιμοποιήσουμε πιο συχνά κατά τη χρήση του Argus One, επίσης διαθέτει μια χρωματική λωρίδα η οποία χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια οπτικοποίησης αποτελεσμάτων και τέλος υπάρχουν δύο κουμπιά zoom in/out.

- Χάρακας: Ο χάρακας μας προσδιορίζει στο σημείο του καμβά που βρισκόμαστε και μας δείχνει τη κλίμακα.
- Παράθυρο στοιχείων Layer: Το συγκεκριμένο παράθυρο ανοίγει αφού αρχίσουμε ένα καινούριο PTC project και είναι το παράθυρο στο οποίο περιλαμβάνονται όλα τα στοιχεία του καμβά μας. (Argus Holdings Limited, 1994-1997)



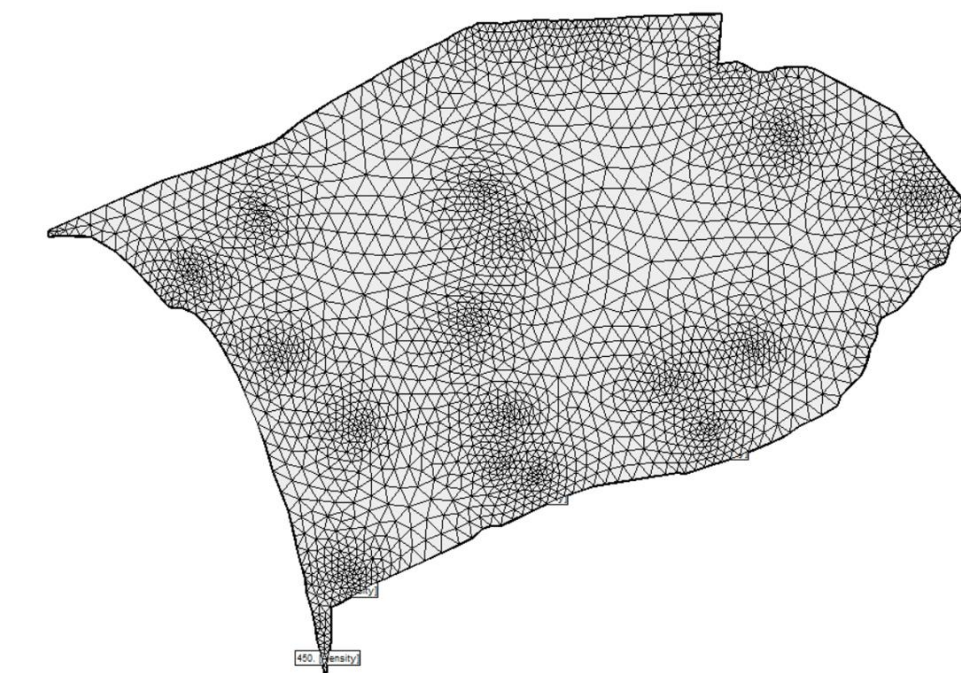
Εικόνα 6.2 Παράθυρο στοιχείων Layers

Στη συνέχεια θα εξηγήσουμε τα Layers που προκύπτουν και θα μας απασχολήσουν κατά τη δημιουργία του PTC project:

- PTC Domain Outline: Πρόκειται για το Layer στο οποίο έχουμε μια απεικόνιση της περιοχής μελέτης μας, οποία αποτελείται από γραμμές και συνήθως είναι ένα κλειστό πολύγωνο. Επίσης είναι το Layer στο οποίο εισάγουμε τις πυκνότητες των στοιχείων του καμβά. Όπου πυκνότητα είναι το πλήθος των στοιχείων που έχουμε στο πλέγμα γύρω ή εντός της περιοχής που μας ενδιαφέρει.
- PTC Mesh: Είναι ένα πλέγμα το οποίο αποτελείται είτε από τριγωνικά είτε από τετραγωνικά πεπερασμένα στοιχεία. Κάθε κόμβος και στοιχείο είναι ένα δυναμικό αντικείμενο τα οποία μπορούμε να επεξεργαστούμε και να τροποποιήσουμε. Το πλέγμα που δημιουργείται έχει τεράστιο αντίκτυπο στη λύση του αριθμητικού

μοντέλου, τόσο όσον αφορά την ακρίβεια όσο και τους υπολογιστικούς πόρους που απαιτούνται.

- PTC Data: Το συγκεκριμένο Layer χρησιμοποιείται για την εισαγωγή των δεδομένων που χρειαζόμαστε στο πρόγραμμα.
- PTC Output Graphs: Πρόκειται για το Layer που δημιουργεί γραφικές παραστάσεις για την απεικόνιση της ταχύτητας του νερού, των υδραυλικών υψών και των ρύπων. Βοηθάει στην οπτικοποίηση των αριθμητικών αποτελεσμάτων που λαμβάνουμε.
- Rain: Είναι το Layer στο οποίο εισάγουμε τα δεδομένα βροχής που έχουμε για την περιοχή μελέτης, καθώς η βροχή είναι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή των υπόγειων νερών επομένως πρέπει να ληφθεί υπόψη.
- Bottom Elevation: Είναι το υψόμετρο που θέτουμε στην κατώτατη στρώση εδάφους.
- Elevation Ln: Το υψόμετρο που θέτουμε σε κάθε στρώση εδάφους, όπου n ο αριθμός της στρώσης.
- Conductivity Ln: Η υδραυλική αγωγιμότητα που θέτουμε σε κάθε στρώση.
- Initial Heads Ln: Σε αυτό το Layer θέτουμε μια τιμή για το αρχικό υδραυλικό ύψος σε κάθε στρώση.
- BC Flow Ln: Στο layer αυτό θέτουμε τις οριακές συνθήκες για τα διάφορα αντικείμενα που έχουμε στον όγκο ελέγχου μας (πηγάδια, πηγή ρύπανσης, κλπ.). Στη συνέχεια πρέπει να επιλέξουμε μία από τις δύο επιλογές οριακής συνθήκης Type 1 ή Type 2 ανάλογα με το εάν θέλουμε σταθερό υδραυλικό ύψος ή σταθερές παροχές και τέλος στο Stress (y), όπου y= η περίοδος, θέτουμε τι τιμή της συνθήκης μας για κάθε περίοδο.
- Porosity Ln: Εδώ θέτουμε το πορώδες της κάθε στρώσης.
- Dispersivity Ln: Εδώ καθορίζουμε τη διασπορά της κάθε στρώσης.  
(Argus Holdings Limited, 1994-1997)



Εικόνα 6.3 Απεικόνιση Τριγωνικού Πλέγματος της Περιοχής του Τυμπακίου



## 6.2. Αρχικές ρυθμίσεις και εισαγωγή δεδομένων

Κατά τη δημιουργία του καινούριου PTC project πρέπει να εισάγουμε μερικές αρχικές παραμέτρους.

The screenshot shows the 'PTC Configuration' dialog box with the 'General' tab selected. The 'Project title' is 'Timpaki'. Under 'Mesh type', 'Triangular' is selected. Under 'Physical properties', 'Molecular diffusion' is 0.0001 and 'Upstream weight' is 1. 'Steady state criterion' is 0.1. The 'Use water table' checkbox is unchecked, with 'Number of iterations for watertable' at 50 and 'Convergence criterion' at 0.01. 'Number of layers' is 3. A table lists layer numbers 1, 2, and 3, with layer 1 selected. 'Insert Layer' and 'Delete Layer' buttons are present. The 'Output Control' section has all checkboxes checked: Echo nodal coordinates, Echo interface elevations, Echo boundary conditions, Echo material properties, Echo incidence list, Echo infiltration flux, Echo initial heads, and Echo initial concentrations. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom right.

Layer number
1
2
3

Εικόνα 6.4 Παράθυρο Διαμόρφωσης του PTC (γενικές ρυθμίσεις).

PTC Configuration

General Stresses

Stress	Flow	Velocity	Transport	Length
1	1	1	0	210
2	1	1	0	150
3	1	1	0	210
4	1	1	0	150
5	1	1	0	210

Insert Modify Delete

General control

☒ Do flow  
☒ Do velocity  
☐ Do transport  
☒ Use memory  
☒ Do mass balance

Time control

Total number of time steps: 210  
No. of flow time-steps reset: 20  
No. of flow time-steps no-change: 1  
No. of conc. time-steps per flow: 2  
Time-step multiplier: 1  
Total time: 210

Graphs control

Time step of first flow output: 210  
Output period flow: 210  
Time step of first conc. output: 300  
Output period conc.: 300

Number of stress periods: 90  
Total simulation time: 16200

Graphics filenames for heads: heads  
Graphics filenames for concentrations: concs

OK Cancel

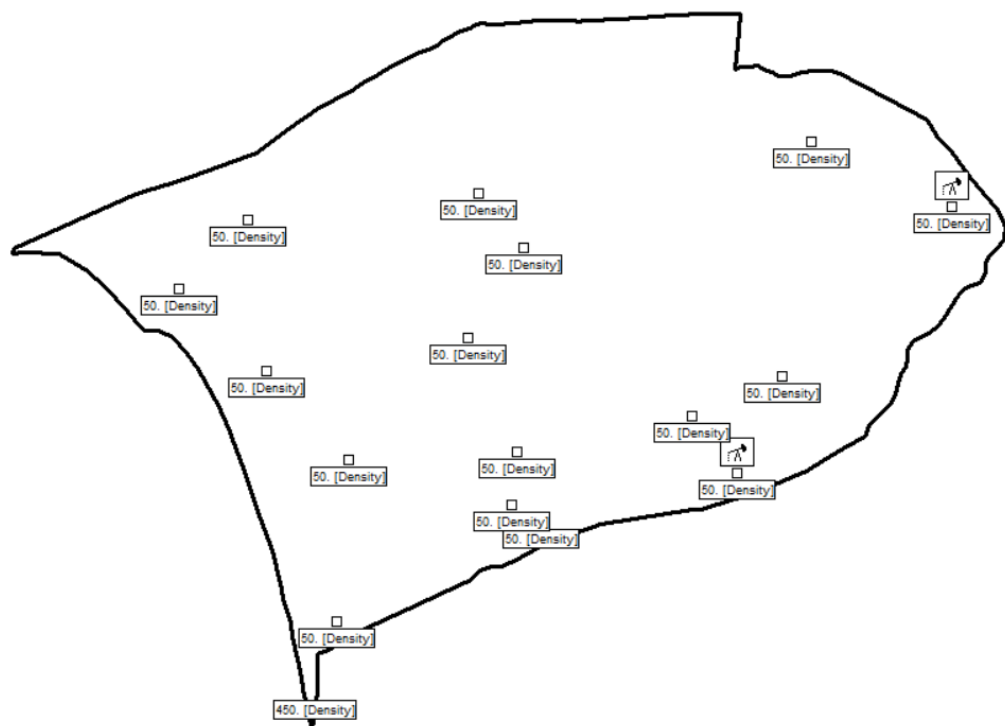
Εικόνα 6.5 Παράθυρο Διαμόρφωσης του PTC ( ρυθμίσεις περιόδων).

Το μοντέλο μας αποτελείται από τρεις στρώσεις, όπου κάθε στρώση έχει ένα καθορισμένο ύψος (Elevation 1: -30m, Elevation 2: 0m, Bottom Elevation: -230m) εκτός από το Layer 3, όπου για το elevation του χρησιμοποιήσαμε ένα αρχείο shapefile ισοϋψών ανά 10 μέτρα. Στη συνέχεια θέσαμε τιμές για το κριτήριο σύγκλισης και το κριτήριο σταθερής κατάστασης ώστε ταυτόχρονα να ικανοποιείται μια επαρκής ακρίβεια και ταυτόχρονα να μην καταναλώνουμε περισσότερους υπολογιστικούς πόρους απ' ό,τι χρειάζεται, επίσης επιλέξαμε τριγωνικού τύπου πλέγματος, καθώς είναι πιο αποτελεσματικό όταν χρησιμοποιούμε διαφορών ειδών πολύγωνα. Στη καρτέλα stresses καθορίσαμε τις περιόδους, τα βήματα στη κάθε περίοδο και τη χρονική τους διάρκεια. Συγκεκριμένα έχουμε 90 περιόδους, δηλαδή 45 έτη, τα οποία χωρίζονται σε υγρή και ξηρή περίοδο. Η υγρή περίοδος διαρκεί από τον Οκτώβριο έως τον Απρίλιο, 7 μήνες ή 210 μέρες, ενώ η ξηρή περίοδος είναι από τον Μάιο έως το Σεπτέμβριο, δηλαδή διαρκεί 5 μήνες ή 150 μέρες και θέτουμε 210 χρονικά βήματα για κάθε περίοδο. Επιπρόσθετα χωρίζουμε τις 90 περιόδους σε υποπεριόδους των 12, επομένως καταλήγουμε να έχουμε 8 υποπεριόδους για κάθε κλιματικό σενάριο, όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Ακολουθεί μια σύντομη επεξήγηση των υπολοίπων παραμέτρων:

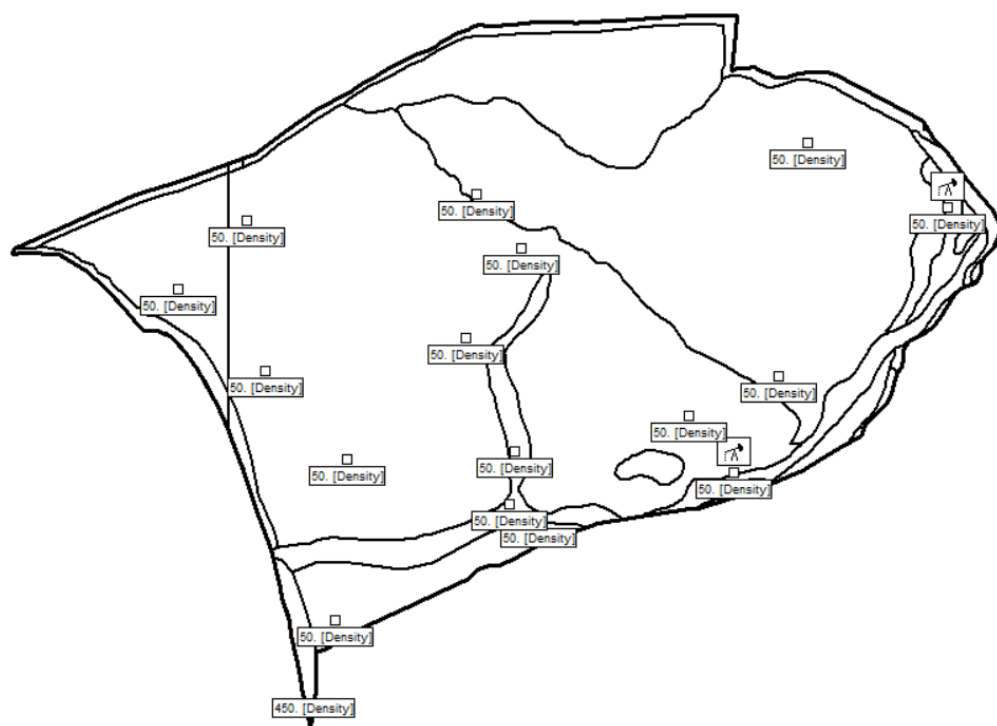
- No. of flow time-steps reset: Η ρύθμιση αυτή μας λέει ότι το πρόγραμμα θα τρέξει κανονικά χωρίς κάποιον πολλαπλασιαστή (multiplier) για ένα σει βημάτων που καθορίσαμε, στη περίπτωση μας 20, ενώ από το 21<sup>ο</sup> βήμα και ύστερα θα εφαρμόζεται ένας πολλαπλασιαστής.

- No. of flow time steps no-change: Η ρύθμιση αυτή σημαίνει ότι ανά ένα βήμα δεν θα αλλάζει η τιμή της ροής. Αν είχα 3, τότε ανά 3 βήματα δεν θα άλλαζε η τιμή της ροής. Δηλαδή ότι ανά ένα βήμα ροής θα εφαρμόζεται το multiplier.
- No. of conc. Time-steps per flow: Η ρύθμιση αυτή μας δείχνει ότι ανά 1 βήμα υπολογίζεται η συγκέντρωση 2 φορές. Δηλαδή ότι μεταξύ ενός διαστήματος βήματος, η εξίσωση της μάζας θα τρέξει 2 φορές. Για παράδειγμα αν είχα 2 και συνολικά είχαμε 100 βήματα, τότε σε κάθε 1 βήμα ροής θα είχα αντίστοιχα 2 βήματα μάζας επομένως θα είχα 200 φορές την εφαρμογή της εξίσωσης μάζας.
- Time-step multiplier: Είναι η τιμή του πολλαπλασιαστή που θέτουμε.

Στο Graphs Control ρυθμίζουμε τα χρονικά βήματα στα οποία θα αρχίζει το πρόγραμμα μας να οπτικοποιεί τα αποτελέσματα της ροής και της συγκέντρωσης σε γραφική παράσταση. Τέλος αξίζει να αναφέρουμε ότι στη γενική καρτέλα, έχουμε αφήσει κενό το πλαίσιο της ρύθμισης Use water table, το οποίο σημαίνει ότι θεωρούμε τον όγκο ελέγχου μας ελεύθερο υδροφορέα. (Argus Holdings Limited, 1994-1997)



Εικόνα 6.6 Πολύγωνο Περιοχής Τυμπακίου με τα σημεία των πηγαδιών και των πυκνοτήτων



Εικόνα 6.7 Γεωλογία της περιοχής του Τυμπακίου



Εικόνα 6.8 Ισοϋψείς του Elevation 3 της Περιοχής του Τυμπακίου ανά 10 μέτρα

Contour Information

**i** Please enter value for this contour:

OK

Cancel

Contour is: One point

Number of vertices: 1

Contour area: 0

Contour length: 0

Contour name:

Icon: **Pumping**

Parameter	Value	Units
BC Type L1	2	1 or 2
BC Stress1	-5473.09	
BC Stress2	-5523.56	
BC Stress3	-5473.09	
BC Stress4	-5523.56	
BC Stress5	-5473.09	

Εικόνα 6.9 Παράδειγμα ενός πηγαδιού άντλησης (BC Flow 1), όπου BC Type 2 η ένδειξη της σταθερής παροχής, και stresses η άντληση ανά περίοδο. Για το συμβολισμό της άντλησης οι τιμές έχουν αρνητικό πρόσημο.

Contour Information

**i** Please enter value for this contour:

OK

Cancel

Contour is: Closed

Number of vertices: 8

Contour area: 28374.9

Contour perimeter: 911.412

Contour name:

Icon: **None**

Parameter	Value	Units
BC Type L1	1	1 or 2
BC Stress1	138	
BC Stress2	138	
BC Stress3	138	
BC Stress4	138	
BC Stress5	138	

Εικόνα 6.10 Παράδειγμα ενός φράγματος (BC Flow 1), όπου χρησιμοποιείται οριακή συνθήκη τύπου 1, δηλαδή σταθερό υδραυλικό ύψος και στα stresses η τιμή του ύψους για κάθε περίοδο.

Contour Information

**i** Please enter value for this contour:

OK

Cancel

Contour is:	Closed
Number of vertices:	16
Contour area:	81003.3
Contour perimeter:	3512.66

Contour name:

Icon:

Parameter	Value	Units
BC Type L3	2	1 or 2
BC Stress1	-35000	
BC Stress2	-30000	
BC Stress3	-35000	
BC Stress4	-30000	
BC Stress5	-35000	

Εικόνα 6.11 Παράδειγμα ενός ρήγματος της περιοχής απ' όπου έχουμε απώλεια νερού, χαρακτηρίζεται από τιμή οριακής συνθήκης 2 και πολύ μεγάλα ποσά απώλειας νερού ανά περίοδο σε σχέση με τα πηγάδια άντλησης.

Αφού εισάγουμε όλα τα δεδομένα το επόμενο βήμα είναι η δημιουργία του τριγωνικού πλέγματος, όπως φαίνεται στην εικόνα 6.3. Πριν όμως χρησιμοποιήσουμε το Magic Wand από τη παλέτα εργαλείων πρέπει να βεβαιωθούμε ότι έχουμε κάνει optimize μέσω της μπάρας εργαλείων έτσι ώστε το πρόγραμμα να υπολογίσει με βέλτιστο τρόπο τις τιμές των παραμέτρων σε κάθε κόμβο του πλέγματος. Αφού βεβαιωθήκαμε ότι κάναμε optimize και φτιάξαμε το πλέγμα, τρέχει το μοντέλο σε ένα παράθυρο cmd και τα αποτελέσματα του αποθηκεύονται σε αναγνώσιμα αρχεία. Τέλος να αναφέρουμε πως οι τιμές, άντλησης των γεωτρήσεων και των οριακών συνθηκών λήφθηκαν από μελέτες μοντελοποίησης του υπόγειου υδροφορέα Τυμπακίου.

(Paritsis, 2005) (Zacharioudakis & Paramastorakis, Conceptual Model and Model idealisation report of Tibaki basin in South Crete) (Zacharioudakis & Paramastorakis, Tibaki basin steady state groundwater flow and model calibration report)

```
C:\WINDOWS\system32\cmd. x + v
completed flow time step number 243
completed flow time step number 244
completed flow time step number 245
completed flow time step number 246
completed flow time step number 247
completed flow time step number 248
completed flow time step number 249
completed flow time step number 250
completed flow time step number 251
completed flow time step number 252
completed flow time step number 253
completed flow time step number 254
completed flow time step number 255
completed flow time step number 256
completed flow time step number 257
```

Εικόνα 6.12 Παράθυρο cmd κατά το τρέξιμο του μοντέλου.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd. x + v
completed flow time step number 16189
completed flow time step number 16190
completed flow time step number 16191
completed flow time step number 16192
completed flow time step number 16193
completed flow time step number 16194
completed flow time step number 16195
completed flow time step number 16196
completed flow time step number 16197
completed flow time step number 16198
completed flow time step number 16199
completed flow time step number 16200
Open unit= 9 file=heads_s90.1
Open unit= 9 file=heads_s90.2
Open unit= 9 file=heads_s90.3
C:\Users\ovard\Downloads\tympaki>pause
Press any key to continue . . . |
```

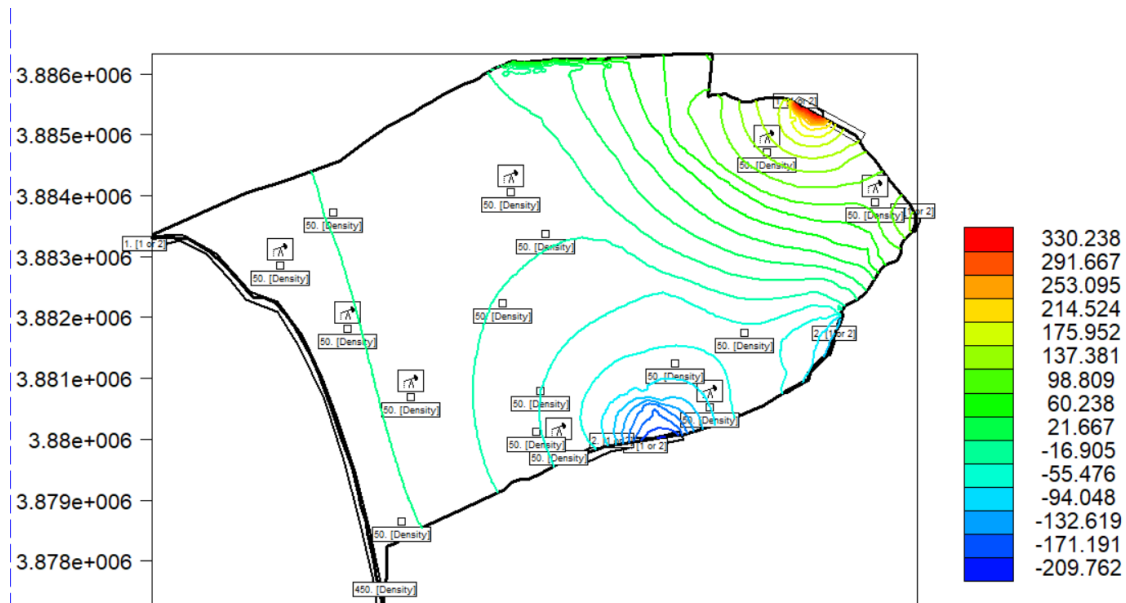
Εικόνα 6.13 Παράθυρο cmd όταν το πρόγραμμα έχει φτάσει στο τέλος της προσομοίωσης. Παρατηρούμε ότι το σύνολο των βημάτων του παραθύρου συμπίπτει με τα συνολικά βήματα που μας εμφάνιζε η καρτέλα των γενικών ρυθμίσεων στην εικόνα 6.5.

1

1	3.86236289E-01
2	0.00000000E+00
3	0.00000000E+00
4	2.97611409E-01
5	6.76337808E-01
6	7.95459227E-01
7	5.67825961E-01
8	0.00000000E+00
9	0.00000000E+00
10	0.00000000E+00
11	2.50381588E-01
12	5.69407942E-01
13	8.87587477E-01
14	1.15164897E+00
15	1.13220551E+00
16	5.89437293E-01
17	1.09717855E+00
18	0.00000000E+00
19	0.00000000E+00
20	0.00000000E+00
21	2.01194151E-01
22	3.90449026E-01
23	4.89283882E-01
24	8.77960183E-01
25	6.94812604E-01
26	1.16001914E+00
27	1.56406523E+00
28	1.59429346E+00
29	1.41991853E+00
30	1.56715654E+00
31	6.19827038E-01
32	1.20615441E+00
33	1.63208533E+00
34	0.00000000E+00
35	0.00000000E+00
36	1.58892375E-01
37	3.43210948E-01

Εικόνα 6.14 Η μορφή που εμφανίζονται τα αποτελέσματα των υδραυλικών υψών σε κάθε κόμβο, αν ανοίξουμε το αρχείο *PTC\_Mesh\_heads\_s1* που είναι για τη πρώτη περίοδο. Οι αριθμοί στα αριστερά(που είναι σε αύξουσα σειρά) είναι οι κόμβοι και οι τιμές στα δεξιά τα υδραυλικά ύψη. Για κάθε περίοδο υπάρχει και ένα αντίστοιχο αρχείο *PTC\_Mesh\_heads\_s(n)* με *n* από 1 έως 90 για τη δικιά μας περίπτωση.





Εικόνα 6.15 Οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων (υδραυλικά ύψη) σε μορφή γραφήματος.

Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε και να αξιοποιήσουμε τα αποτελέσματα των υδραυλικών υψών για κάθε περίοδο, θα χρησιμοποιήσουμε τρία πηγάδια παρατήρησης (M2,M25,NH14) τα οποία βρίσκονται στους κόμβους 2188,1883,1742 αντίστοιχα. Με αυτούς τους κόμβους επίσης θα συγκρίνουμε τις τιμές των υδραυλικών υψών με τα διάφορα κλιματικά σενάρια. (Paritsis, 2005) (Zacharioudakis & Paramastorakis, Conceptual Model and Model idealisation report of Tibaki basin in South Crete) (Zacharioudakis & Paramastorakis, Tibaki basin steady state groundwater flow and model calibration report)

### 6.3. Βαθμονόμηση

Για να διασφαλίσουμε ότι το μοντέλο μας αντιπροσωπεύει όσο το δυνατόν περισσότερο γίνεται τις πραγματικές συνθήκες, το τρέχουμε για χρονολογίες που διαθέτουμε στοιχεία της κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα και μέσω των πηγαδιών παρατήρησης επιβεβαιώνουμε ότι έχουμε τις ίδιες τιμές, λαμβάνοντα υπόψη ένα επιτρεπτό διάστημα σφάλματος. Όταν βεβαιωθούμε ότι το μοντέλο μας συμπεριφέρεται όπως τις πραγματικές συνθήκες του υδροφορέα της περιοχής, τότε συνεχίζουμε στη πρόβλεψη των υδραυλικών υψών του υδροφορέα για τα επόμενα 45 χρόνια. (Zacharioudakis & Paramastorakis, Tibaki basin steady state groundwater flow and model calibration report)

### 6.4. Επεξεργασία δεδομένων βροχόπτωσης με κώδικα Matlab

Για την ανάλυση και επεξεργασία των πολυάριθμων δεδομένων που έχουμε να διαχειριστούμε γίνεται χρήση διαφόρων κωδικών MATLAB που θα αναλυθούν παρακάτω.

Όπως αναφερθήκαμε και παραπάνω το διάστημα της πρόβλεψης του μοντέλου είναι 45 χρόνια, συγκεκριμένα μεταξύ 2025 και 2070. Επομένως πρέπει να εισάγουμε στο PTC τη παράμετρο της βροχόπτωσης.

Για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 & 8.5 διαθέτουμε δεδομένα βροχής μεταξύ 1976 έως το 2098 από 6 διαφορετικά μοντέλα για το κάθε κλιματικό σενάριο έκαστος, επομένως πρέπει να διαχωρίσουμε τα δεδομένα που χρειαζόμαστε και να τα ταξινομήσουμε σε υγρή και ξηρή περίοδο. Επομένως δημιουργήσαμε ένα κώδικα MATLAB για να κάνει το διαχωρισμό αυτόματα και να μετατρέπει τα δεδομένα στις σωστές μονάδες και στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε και ένα δεύτερο κώδικα έτσι ώστε να μας δίνει τα αποτελέσματα με ένα τρόπο όπου θα μπορέσουμε να κατασκευάσουμε τις γραφικές παραστάσεις των βροχοπτώσεων κάθε μοντέλου για κάθε σενάριο έτσι ώστε να επιλέξουμε ένα μοντέλο για κάθε κλιματικό σενάριο, με κριτήριο να εξετάσουμε το worst case scenario για κάθε περίπτωση.

```

1  clc;
2  clear;
3
4  % Ορισμός αρχείου και φύλλου
5  filename = 'Δεδομένα βροχόπτωσης κλιματικών μοντέλων_RCP8.5.xlsx';
6  sheet = 'Sheet17';
7  data = readtable(filename, 'Sheet', sheet);
8
9  start_year = 2025;
10 end_year = 2070;
11
12 % Ανάγνωση δεδομένων
13 dates = data(:, 1); % Στήλη με ημερομηνίες
14 values = data(:, 2); % Στήλη με τιμές βροχόπτωσης (mm)
15
16 % Έλεγχος αν οι ημερομηνίες είναι αριθμοί Excel
17 if isnumeric(dates)
18     dates = datetime(dates, 'ConvertFrom', 'excel', 'Format', 'dd/MM/yyyy');
19 end
20
21 % Φιλτράρισμα δεδομένων μόνο για το διάστημα 2025-2070
22 valid_idx = dates >= datetime(start_year, 1, 1) & dates <= datetime(end_year, 12, 31);
23 dates = dates(valid_idx);
24 values = values(valid_idx);
25
26 % Προετοιμασία αποτελεσμάτων
27 wet_totals = []; % Αθροίσματα για υγρή περίοδο
28 dry_totals = []; % Αθροίσματα για ξηρή περίοδο
29 wet_avg = []; % Μέσος όρος για υγρή περίοδο
30 dry_avg = []; % Μέσος όρος για ξηρή περίοδο
31 period_count = 0; % Μετρητής περιόδων
32
33 % Επαναληπτική διαδικασία για κάθε έτος
34 for year = start_year:end_year
35     % Υπολογισμός των χρονικών περιόδων
36     wet_start = datetime(year - 1, 10, 1); % 1 Οκτωβρίου του προηγούμενου έτους
37     wet_end = datetime(year, 4, 30); % 30 Απριλίου του τρέχοντος έτους
38     dry_start = datetime(year, 5, 1); % 1 Μαΐου του τρέχοντος έτους
39     dry_end = datetime(year, 9, 30); % 30 Σεπτεμβρίου του τρέχοντος έτους
40
41     % Επιλογή δεδομένων για κάθε περίοδο
42     wet_period = values(dates >= wet_start & dates <= wet_end);
43     dry_period = values(dates >= dry_start & dates <= dry_end);
44
45     % Έλεγχος αν τα δεδομένα της περιόδου είναι σωστά
46     if ~isempty(wet_period)
47         % Υπολογισμός για υγρή περίοδο
48         wet_sum = sum(wet_period) / 1000; % mm -> m
49         wet_days = days(wet_end - wet_start) + 1; % Πλήθος ημερών στην υγρή περίοδο
50         wet_mean = wet_sum / wet_days; % Μέσος όρος
51         wet_totals = [wet_totals; wet_sum];
52         wet_avg = [wet_avg; wet_mean];
53         period_count = period_count + 1;
54     end
55
56     if ~isempty(dry_period)
57         % Υπολογισμός για ξηρή περίοδο
58         dry_sum = sum(dry_period) / 1000; % mm -> m
59         dry_days = days(dry_end - dry_start) + 1; % Πλήθος ημερών στην ξηρή περίοδο
60         dry_mean = dry_sum / dry_days; % Μέσος όρος
61         dry_totals = [dry_totals; dry_sum];

```

Εικόνα 6.16 Κώδικας Matlab διαχωρισμού χρήσιμων δεδομένων και ταξινόμησης αυτών σε υγρή και ξηρή περίοδο

Εικόνα 6.17 Συνέχεια του παραπάνω κώδικα

Εικόνα 6.18 Αποτελέσματα του κώδικα (εικόνα 6.17), όπου Sheet #η το κάθε μοντέλο για το εκάστοτε κλιματικό σενάριο. Τα δεδομένα μας δεν βρίσκονται ακόμα σε μια μορφή που μπορούν να παραχθούν οι γραφικές των βροχοπτώσεων.

Εικόνα 6.19 Κώδικας MATLAB για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων ώστε να μπορούν να παραχθούν οι γραφικές παραστάσεις των βροχοπτώσεων

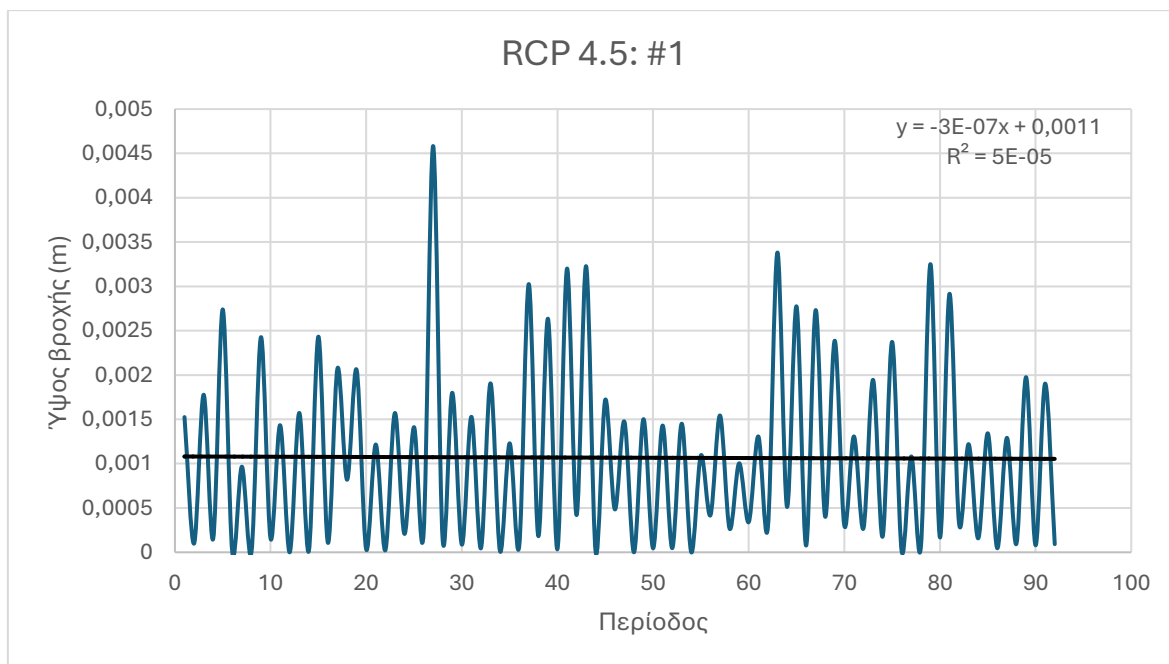
final_data1	final_data2	final_data3	final_data4	final_data5	final_data6	final_data7	final_data8	final_data9	final_data10	final_data11	final_data12
0.001325044	0.000809005	0.001075291	0.001471048	0.001495748	0.0006417	0.001554373	0.000434846	0.001266899	0.00091322	0.001772037	0.000893197
9.85155E-05	1.20078E-05	0.000340988	3.80403E-05	6.78417E-05	0	5.79823E-05	0.000143201	0	5.36998E-05	0.000277779	0.000217
0.001778093	0.001625174	0.002045546	0.001998996	0.002232115	0.001902018	0.002109606	0.003220418	0.0013917	0.001321993	0.002704249	0.001361931
0.000152483	1.76647E-05	0.000237315	0.00059164	0.000127665	8.65653E-06	5.16346E-05	0	5.64122E-05	5.17453E-05	0.000190508	0.000119565
0.002740194	0.001889038	0.003715018	0.001839238	0.003319566	0.002248265	0.002841476	0.00196344	0.001696288	0.001456719	0.002290648	0.001912254
0	0.000116033	0.000114908	8.3833E-06	0.000152912	8.09645E-05	1.50576E-05	0.000140564	0.000149198	2.68347E-05	0.001317483	0.001209454
0.000963895	0.001939659	0.000867917	0.002144192	0.001885224	0.002202933	0.001183767	0.001426767	0.002619125	0.00191134	0.00111884	0.001984109
0	0.000209167	5.81521E-05	1.62532E-05	4.40534E-06	0.000174096	0	6.7954E-05	0.000171931	0.000176303	0.00080855	8.80307E-05
0.002427168	0.001809938	0.00155356	0.000613955	0.001724398	0.001326806	0.003196086	0.001137663	0.002091609	0.001553841	0.002868732	0.00258179
0.000155012	2.18504E-05	0.00033113	7.18028E-05	0.000345911	6.68639E-05	1.43285E-05	4.10163E-06	7.113E-05	2.47453E-05	6.91168E-05	7.14389E-06
0.001433356	0.00263315	0.00132538	0.002787808	0.00108936	0.00140406	0.002719361	0.000459643	0.001745499	0.002441757	0.002712788	0.001033953
0	0.000151512	0.000227219	0	0	3.40048E-05	8.08839E-05	1.15212E-05	2.01924E-05	3.52903E-05	0.000191022	0.000133289
0.001973493	0.001977961	0.001626217	0.001195561	0.002505621	0.000867216	0.00153137	0.002176058	0.000965788	0.003273646	0.00260980	0.002033624
1.32321E-05	5.99618E-05	0.000978683	0	5.44885E-05	2.98177E-05	0.000285116	8.42343E-06	8.01343E-06	0.000181389	0.000123182	0
0.002432793	0.000991714	0.000975322	0.001317814	0.003524570	0.001747493	0.003212904	0.001295463	0.00230889	0.001905092	0.002790553	0.001466369
0.000106902	1.61371E-05	0.000110631	1.29361E-05	0.000903478	0.000141762	1.07811E-05	3.68685E-05	0.000246832	6.89976E-05	2.8901E-05	8.90188E-05
0.002075529	0.000961049	0.001208094	0.002809681	0.002097869	0.00145324	0.002015748	0.001724827	0.000791327	0.000728013	0.002813806	0.001938344
0.000818134	0.000129248	4.49366E-05	0.00014899	0.000118942	0.00013436	0.00011082	3.74731E-05	0.000171058	5.59394E-05	1.66708E-05	2.80028E-05
0.002057208	0.00135459	0.001484477	0.001808632	0.001746783	0.00152789	0.002349621	0.003055017	0.000705097	0.002203383	0.002847182	0.002259288
3.24096E-05	1.08633E-05	5.31616E-05	0.000206217	6.40607E-05	0	0.0001681	1.2104E-05	0.00013717	6.43472E-05	0.000100796	1.63902E-05
0.001216188	0.001813401	0.002292131	0.00230501	0.001236685	0.0021628212	0.002315782	0.001315664	0.002179608	0.001946709	0.002958943	0.001081512
2.29085E-05	0.0001064	2.20513E-05	4.66817E-05	1.79662E-05	0.000341207	1.65774E-05	1.29848E-05	0	8.34263E-05	6.41999E-05	0
0.001570973	0.001941957	0.001204405	0.001304655	0.002489168	0.001917577	0.002550057	0.002820433	0.001289916	0.004742656	0.00271143	0.00169828
0.000207861	2.48856E-05	0	7.90632E-05	0.000166041	2.734E-05	3.80499E-05	9.46528E-06	0.00011772	2.5688E-05	6.9227E-05	0
0.000141854	0.0002258911	0.001258736	0.000702749	0.00156713	0.000828921	0.001784914	0.001641294	0.001597169	0.001646235	0.002066216	0.000928772
0.000204036	7.05291E-05	0.000149801	1.14698E-05	5.42836E-05	0.000363643	3.74356E-05	7.8473E-05	8.82455E-06	0.000514238	6.85768E-05	5.01044E-05
0.004583029	0.002577538	0.002084812	0.001527112	0.003325925	0.000653568	0.001713751	0.001224009	0.001698419	0.001513042	0.002315347	0.001477466
0.000137707	6.17531E-06	8.45055E-05	2.43466E-05	3.60767E-05	0	0.000179869	7.06322E-05	2.85582E-05	3.67373E-05	6.86897E-05	0
0.001799657	0.002252612	0.003186102	0.001489479	0.001997455	0.00157268	0.002664678	0.00228869	0.0015452	0.001707725	0.002787333	0.001475914
8.72832E-05	8.29996E-05	2.53566E-05	0.000634735	4.07656E-05	6.9510E-05	4.45359E-05	9.2338E-05	8.19883E-05	6.66024E-06	0.000309373	0
0.001528516	0.001710837	0.001003036	0.001513309	0.001827711	0.001021057	0.001397468	0.001855343	0.001317085	0.001442705	0.001653385	0.001652532
4.56402E-05	0	1.61901E-05	6.84232E-05	8.40725E-05	1.49008E-05	8.85271E-05	0.000111333	0.000547178	0.000118647	5.48923E-06	1.75486E-05
0.001905891	0.002046557	0.001480677	0.001393927	0.002412731	0.00123206	0.001045102	0.001223161	0.002180859	0.000818544	0.00209063	0.001285186
1.13596E-05	6.07168E-07	0.007777977	2.52664E-05	0	0	0.000214465	2.54589E-06	8.28278E-06	5.91773E-05	0.000108985	0
0.00129434	0.001320836	0.001463206	0.001903939	0.002318809	0.001918092	0.002887345	0.000979204	0.00167183	0.002000412	0.002898738	0.001767431
6.70027E-05	4.40604E-05	5.02799E-05	2.02502E-05	0.000118986	5.75131E-05	0.000200514	1.02562E-06	0	6.90078E-05	0	0.000249011
0.00302608	0.004075763	0.002260744	0.001159743	0.003022711	0.0013183	0.003441577	0.004021504	0.001299046	0.002091013	0.004312405	0.001320095
0.00018325	7.75643E-05	0.000267646	3.88518E-05	3.90727E-05	0.000135127	0.000145022	0.000164522	0	5.7228E-05	0.000162213	0
0.00263547	0.001873243	0.001260683	0.001561288	0.002387957	0.001556892	0.002157188	0.001373365	0.00191121	0.000798831	0.002429268	0.000943259
3.59384E-05	0.000252731	0.000124248	2.48848E-05	5.42848E-05	3.74478E-05	4.48121E-05	0	0.000100808	8.7346E-05	0.000155552	0
0.001199891	0.001654804	0.002628874	0.000921808	0.00232722	0.001817722	0.002223685	0.001022728	0.00138072	0.000647972	0.00237494	0.000993186
0.000419679	8.02891E-05	0.000305027	9.61192E-05	0.000288317	0	1.81339E-05	0.00020312	0.000213129	0.000373709	2.75449E-05	0
0.002268358	0.001060669	0.001688187	0.00122856	0.000258869	0.001399781	0.002055815	0.001645719	0.000940432	0.000764052	0.002377854	0.001158433
0	5.48038E-06	0	4.832278E-05	8.53303E-05	2.26995E-05	0	3.5123E-05	1.38722E-05	0.001798335	0.000119811	4.59031E-05
0.00172086	0.001120946	0.00379335	0.001817768	0.002087444	0.0024021211	0.000884257	0.002181338	0.00411275	0.001878975	0.001435931	0.001942197
0.000684387	1.52333E-05	5.43952E-06	7.07466E-05	2.86905E-05	2.85848E-05	3.88362E-05	1.89680E-05	0.000138901	8.51114E-05	0.000100952	9.54877E-06
0.001474243	0.002638463	0.001250751	0.001881855	0.002397621	0.001132183	0.002196254	0.001666909	0.001641382	0.002651305	0.002075624	0.00230198
0	0.000151284	0	3.73054E-06	0	9.43801E-06	0	1.96846E-05	9.23032E-05	9.35326E-05	1.56031E-05	0
0.001502093	0.001186029	0.001345485	0.002409339	0.001732003	0.002943257	0.001708077	0.002375837	0.002949469	0.001163326	0.002293194	0.001475967
4.53147E-05	1.29718E-05	0.000222896	1.6781E-05	6.70484E-06	5.80323E-06	0.000523542	0.000168165	0.000211359	1.80799E-05	0.000129578	5.09833E-05
0.004302133	0.0020077	0.00205706	0.00143424	0.002269255	0.001030444	0.001138237	0.001257809	0.002161194	0.001274584	0.0009686	0.002376511
4.62021E-05	5.78842E-06	0.00114399	0	2.59817E-05	0	1.22362E-05	8.69316E-05	0.00020633	4.86303E-05	0.000533189	7.87953E-06
0.001505069	0.001195531	0.001769127	0.001678119	0.002156928	0.001594051	0.003476196	0.00216716	0.000765304	0.001266858	0.002978802	0.002800954
0	3.60544E-05	4.72371E-05	3.59208E-05	7.51051E-05	0	0	2.51296E-05	2.54030E-05	1.49971E-05	0.00163888	0
0.00109372	0.001420327	0.001432526	0.002855418	0.001898766	0.001979185	0.001603713	0.000841485	0.001481871	0.00142142	0.00109078	0.002395426
0.000418621	3.22315E-06	0.0003317	3.3272E-05	0.000117959	1.47246E-05	1.10466E-05	0	0.000203136	0.000239372	5.117E-06	8.02058E-06
0.001243137	0.002379753	0.001569744	0.001398438	0.001836754	0.001529234	0.001325227	0.00296054	0.001186676	0.001221419	0.001540642	0.001046679

**Εικόνα 6.20 Αποτέλεσμα του κώδικα (εικόνα 6.19). Μορφή δεδομένων που μπορούμε πλέον να επεξεργαστούμε.**

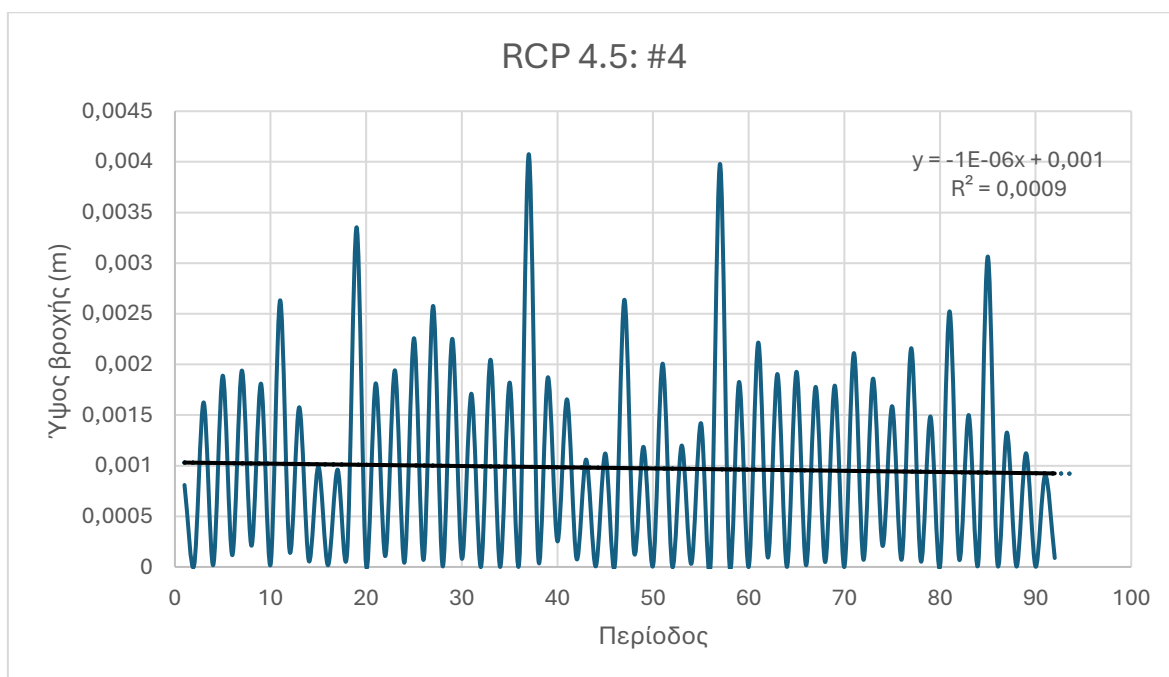
## 6.5. Επιλογή κατάλληλων κλιματικών σεναρίων

Αφού φέραμε τα δεδομένα βροχοπτώωσης στη μορφή που θέλαμε, κατασκευάσαμε 12 γραφικές παραστάσεις για κάθε RCP4.5 και RCP8.5 έτσι ώστε να συγκριθούν και να επιλεγεί ένα μοντέλο για κάθε κλιματικό σενάριο. Το κριτήριο με το οποίο επιλέχθηκε το μοντέλο είναι η κλίση της ευθείας της μέσης τιμής της εκάστοτε γραφικής παράστασης, επιλέχθηκαν τα μοντέλα με την πιο απότομη αρνητική κλίση. Για τη κατασκευή των γραφικών παραστάσεων στον άξονα x επιλέχθηκε να χρησιμοποιήσουμε την ταξινόμηση σε περιόδους, επομένως για κάθε έτος έχουμε μια τιμή βροχοπτώωσης για την υγρή περίοδο και μια τιμή για την ξηρή, ενώ στον άξονα y έχουμε το μέσο ύψος της βροχής για κάθε περίοδο εκφρασμένη σε μέτρα.

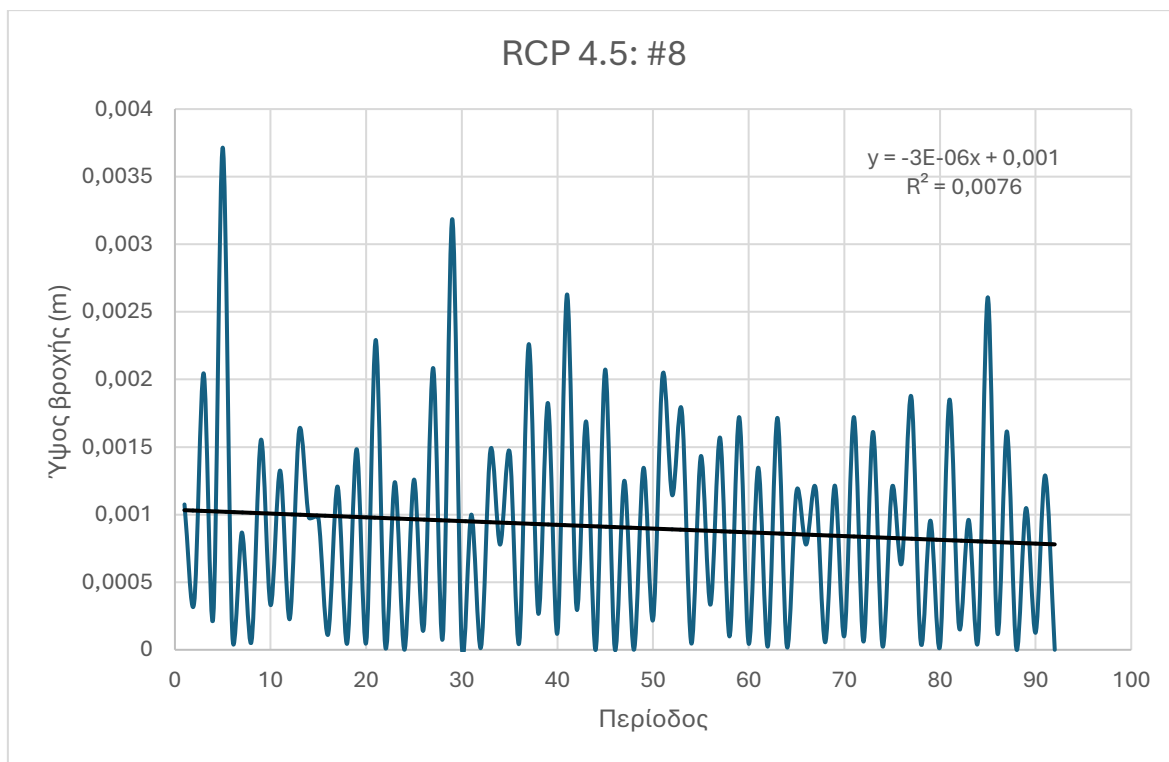




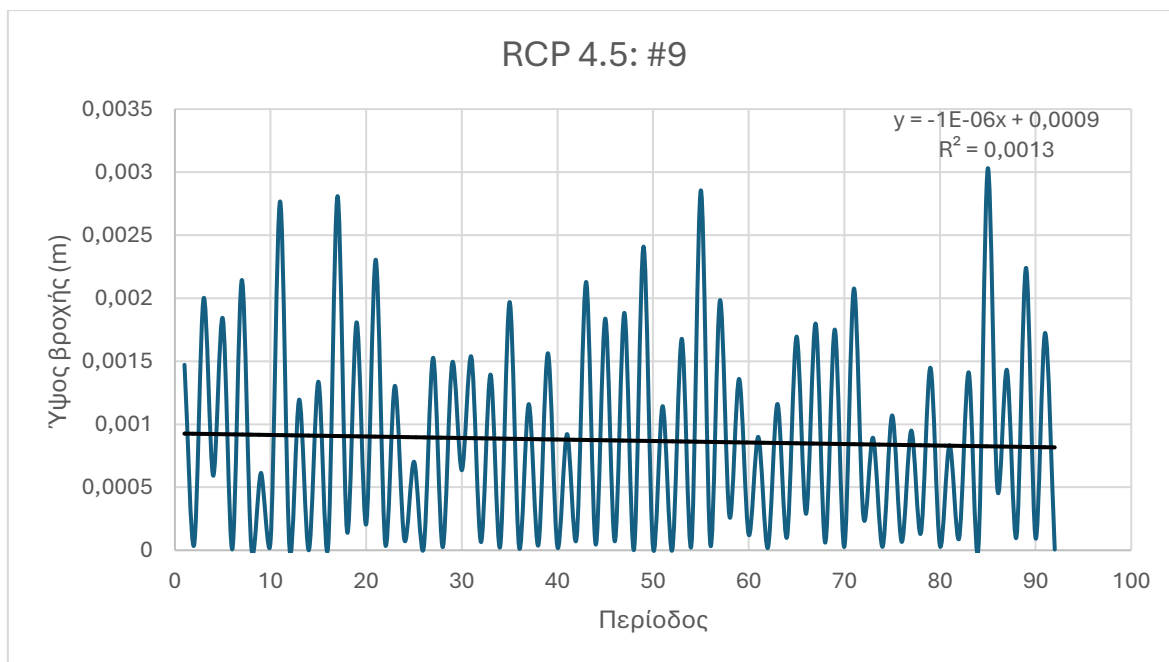
Γράφημα 6.1 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 με χρήση του μοντέλου 1 ('CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_CCLM4\_8\_17').



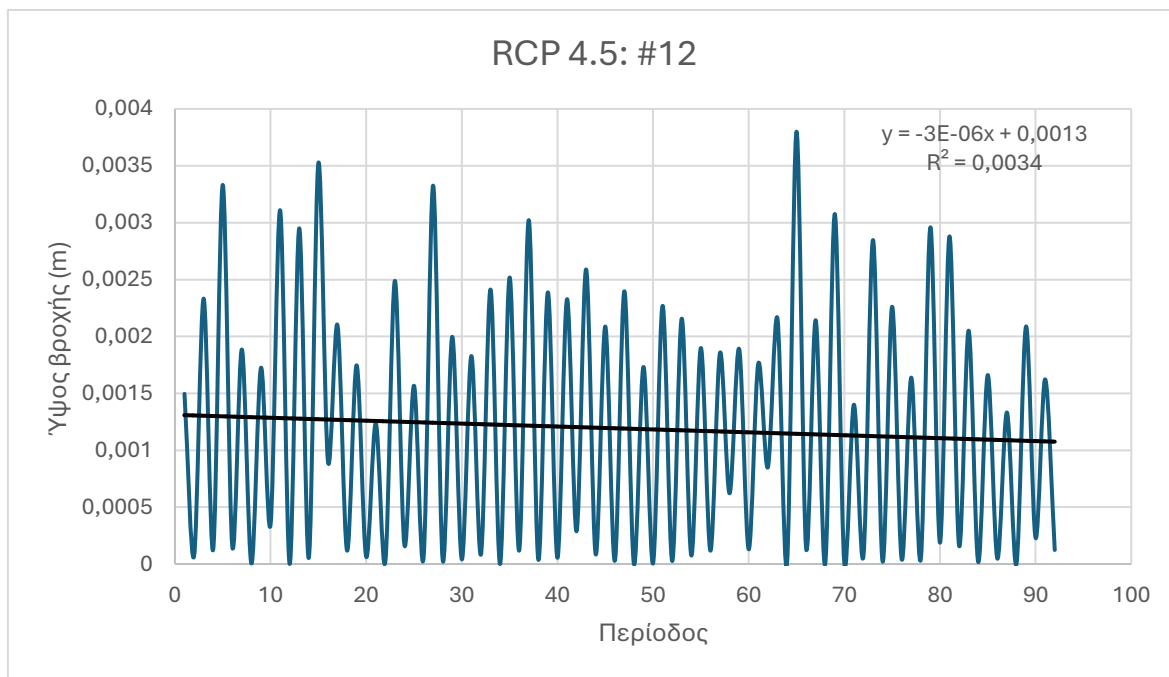
Γράφημα 6.2 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 με χρήση του μοντέλου 4 ('DMI\_HIRHAM5\_NorESM1-M').



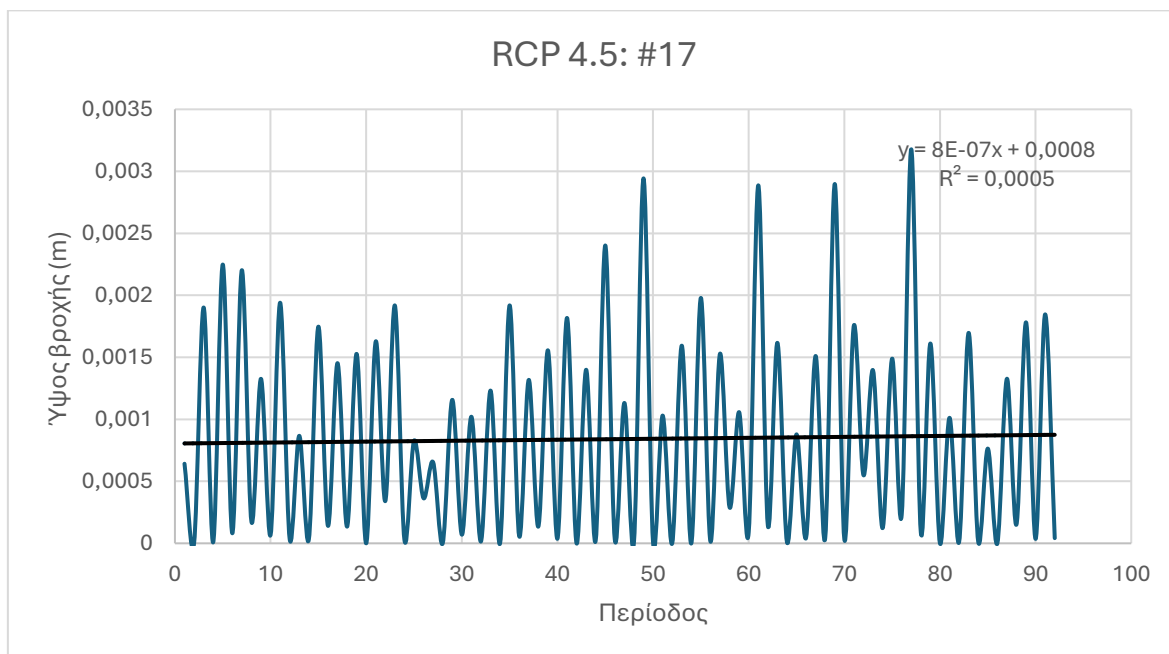
Γράφημα 6.3 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 με χρήση του μοντέλου 8 ('ICHEC\_EC\_EARTH\_HIRHAM5').



Γράφημα 6.4 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 με χρήση του μοντέλου 9 ('IPSL-INERIS\_WRF381P\_IPSL-CM5A-MR').

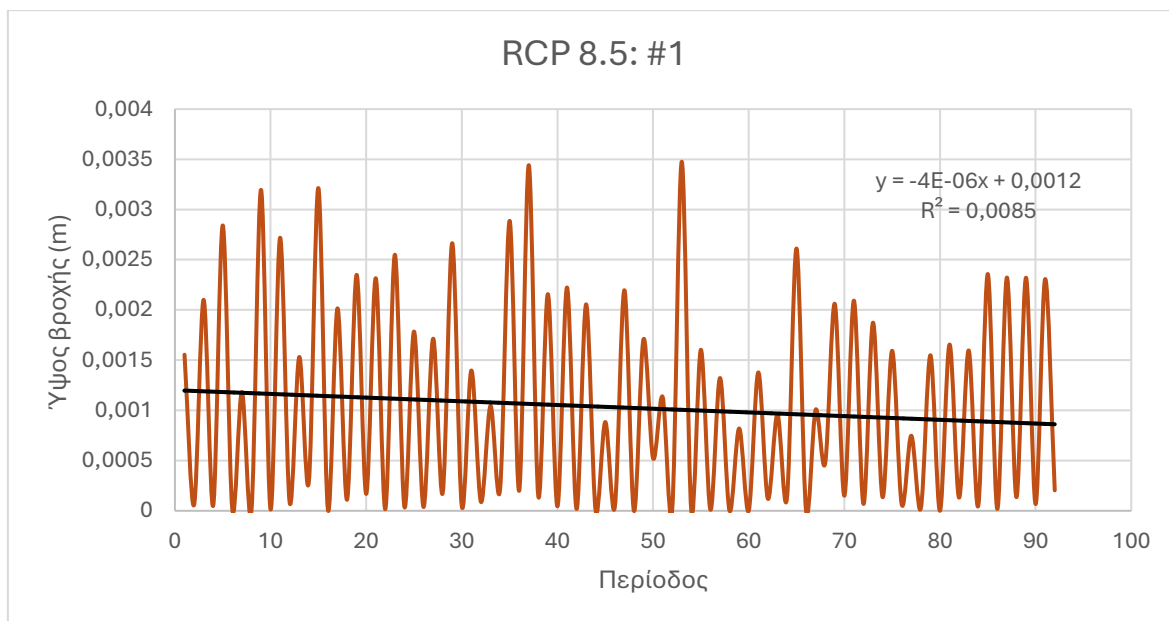


Γράφημα 6.5 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 με χρήση του μοντέλου 12 ('KNMI\_CNRM-CM5').

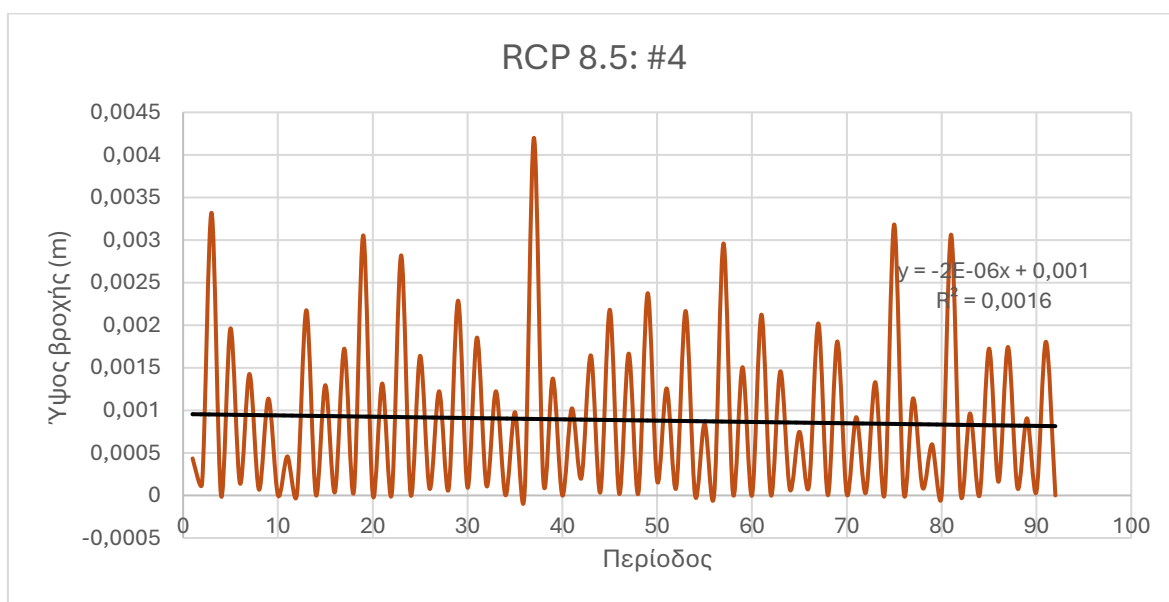


Γράφημα 6.6 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 με χρήση του μοντέλου 17 ('MPI\_M\_MPI\_ESM\_LR\_RCA4').

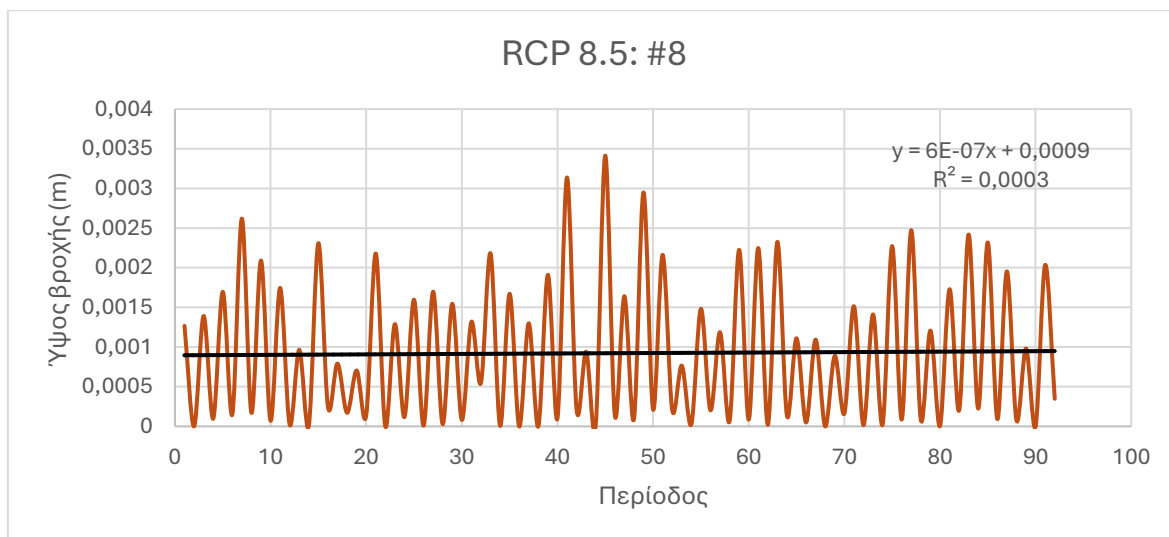




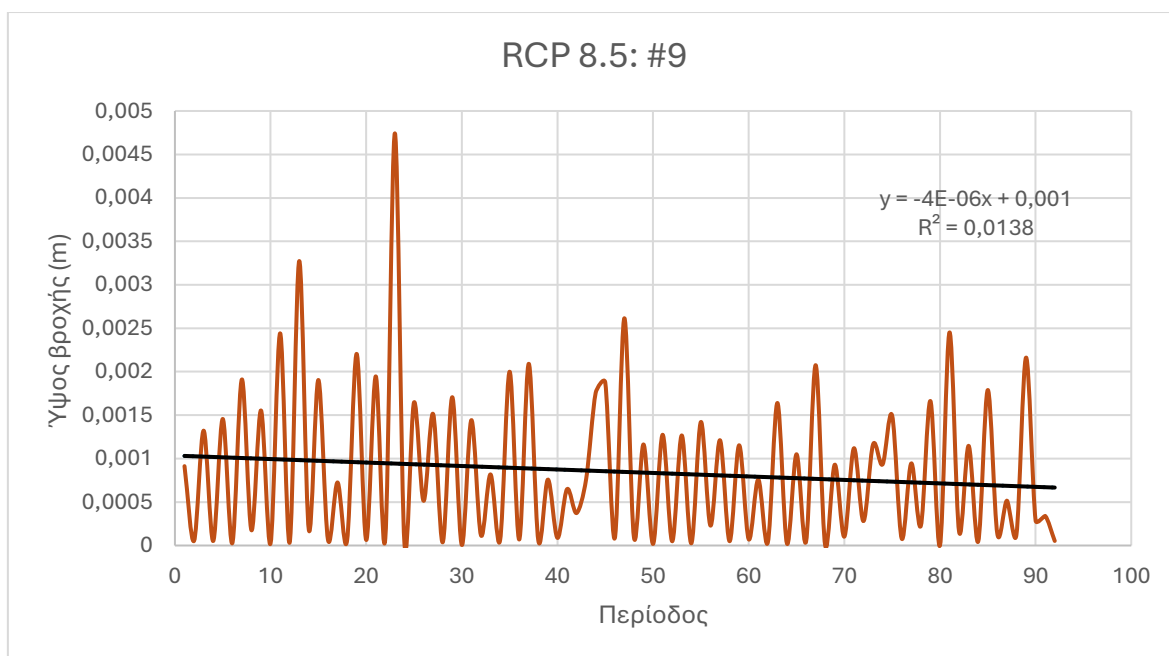
Γράφημα 6.7 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 με χρήση του μοντέλου 1('CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_CCLM4\_8\_17').



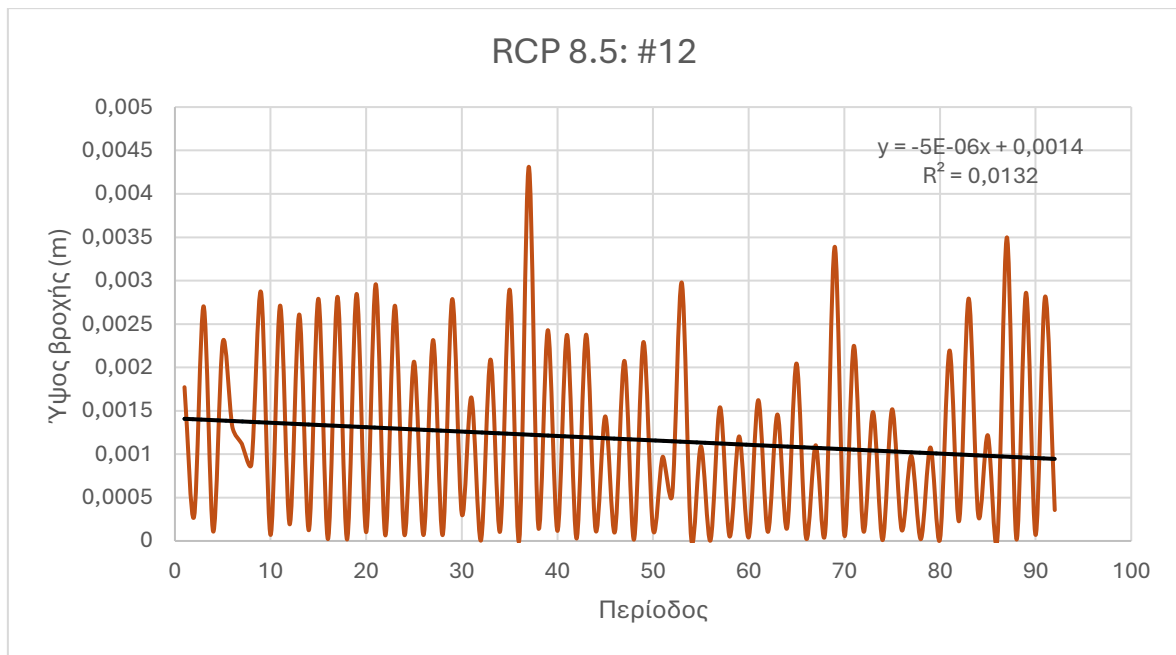
Γράφημα 6.8 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 με χρήση του μοντέλου 4 ('DMI\_HIRHAM5\_NorESM1-M').



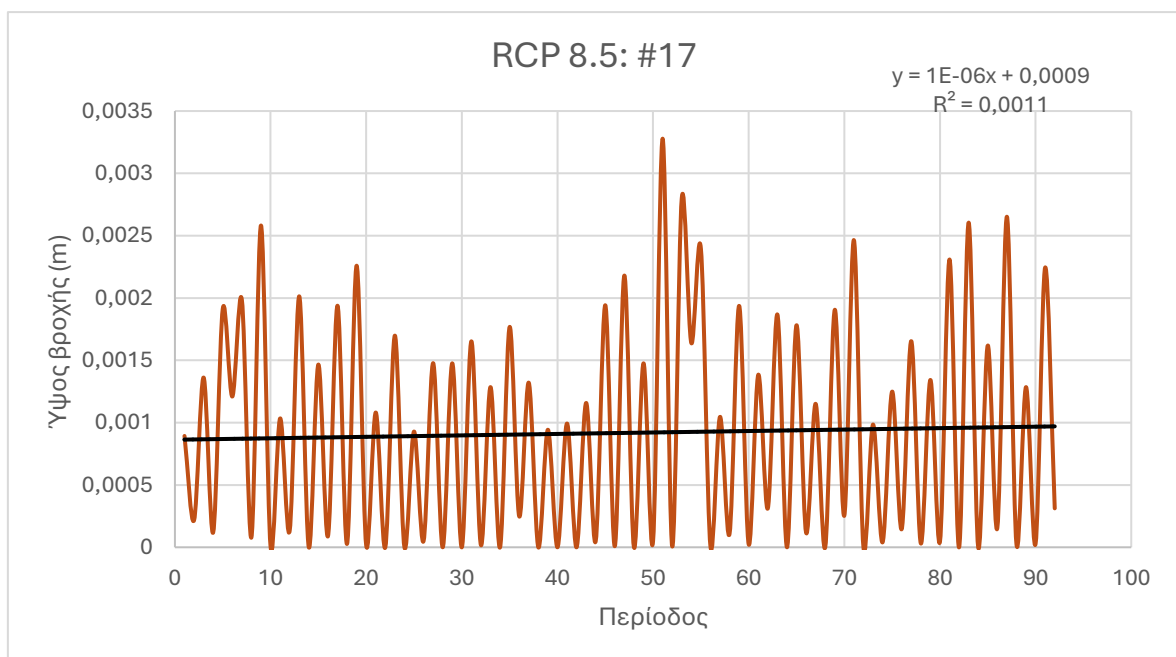
Γράφημα 6.9 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 με χρήση του μοντέλου 8 ('ICHEC\_EC\_EARTH\_HIRHAM5').



Γράφημα 6.10 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 με χρήση του μοντέλου 9 ('IPSL-INERIS\_WRF381P\_IPSL-CM5A-MR').



Γράφημα 6.11 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 με χρήση του μοντέλου 12 ('KNMI\_CNRM-CM5').



Γράφημα 6.12 Γραφική παράσταση ύψους βροχής ως προς τη περίοδο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 με χρήση του μοντέλου 17 ('MPI\_M\_MPI\_ESM\_LR\_RCA4').

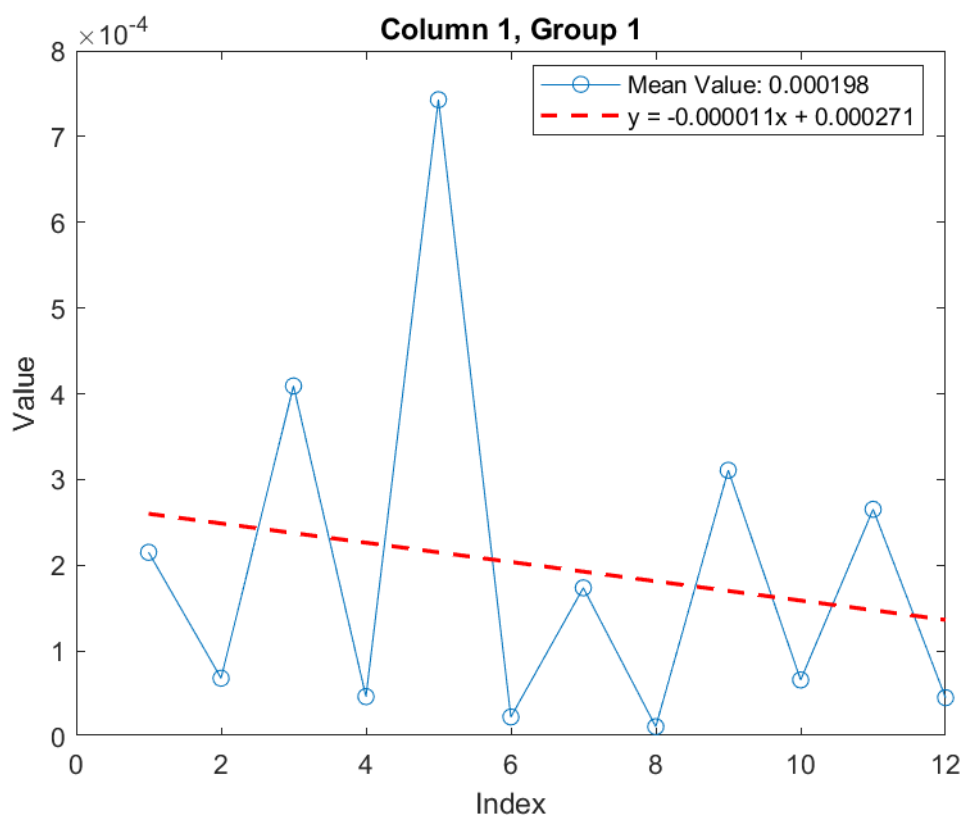
Το μοντέλο που επιλέχθηκε για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 είναι το #8 και για το RCP 8.5 το #12. Επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των τιμών της βροχόπτωσης στο μοντέλο PTC, λαμβάνοντας υπόψη διήθηση 20%.

## 6.6. Προσαρμογή παραμέτρων PTC

Με βάση τα δεδομένα βροχόπτωσης, για το διάστημα των 45 ετών που επιλέξαμε, παρατηρούμε ότι η βροχόπτωση έχει μια φθίνουσα τάση. Επομένως πρέπει να προσαρμόσουμε τις οριακές συνθήκες εισόδου και εξόδου του νερού, καθώς και του ρυθμού άντλησης των γεωτρήσεων του όγκου ελέγχου που εξετάζουμε, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν μπορούμε να έχουμε την ίδια ποσότητα ύδατος το 2025 με το 2045. Επομένως θα υπολογιστεί ένας συντελεστής μεταβολής της βροχόπτωσης με τον οποίο θα πολλαπλασιάσουμε τις τιμές των οριακών συνθηκών και τιμές άντλησης των γεωτρήσεων. Για να βρεθούν οι συντελεστές, θα χρησιμοποιήσουμε ένα κώδικα MATLAB, ο οποίος θα χωρίζει τις γραφικές παραστάσεις των βροχοπτώσεων που επιλέξαμε ανά 12 περιόδους και θα μας εμφανίζει την εξίσωση της γραμμής τάσης. Στη συνέχεια θα πάρουμε τις μέσες τιμές των 8 δωδεκάδων που προκύπτουν για κάθε κλιματικό σενάριο και θα υπολογίσουμε το ρυθμό μεταβολής της βροχόπτωσης για κάθε περίοδο και τέλος θα προσαρμόσουμε τις τιμές των παραμέτρων του PTC ανάλογα. Να σημειωθεί ότι οι τιμές των πρώτων 12 περιόδων παραμένουν σταθερές καθώς αποτελούν τα αρχικά μας δεδομένα, επομένως ο συντελεστής εφαρμόζεται από τη δεύτερη δωδεκάδα τιμών και ύστερα.

```
1  % Διαβάστε το Excel αρχείο
2  filename = 'possible_final_senarios.xlsx'; % Όνομα του αρχείου Excel
3  data = readmatrix(filename);
4
5  % Αφαιρέστε την πρώτη στήλη (περίοδοι)
6  data(:, 1) = [];
7
8  % Επιλογή μόνο δύο στηλών δεδομένων
9  selectedColumns = data(:, 1:2);
10
11 % Διαστάσεις του επιλεγμένου dataset
12 [numRows, numCols] = size(selectedColumns);
13
14 % Αριθμός γραμμών ανά ζεύγος
15 groupSize = 12;
16
17 % Διατρέξτε κάθε στήλη
18 for col = 1:numCols
19     rowIndex = 1;
20     % Διαχωρίστε σε ζεύγη
21     for startRow = 1:groupSize:numRows
22         endRow = min(startRow + groupSize - 1, numRows);
23         group = selectedColumns(startRow:endRow, col);
24
25         % Υπολογισμός της εξίσωσης της κλίσης (linear fit)
26         x = (1:length(group))';
27         p = polyfit(x, group, 1); % p(1) είναι η κλίση
28         slope = p(1);
29         intercept = p(2);
30
31         % Υπολογισμός μέσης τιμής
32         meanValue = mean(group);
33
34         % Δημιουργία γραφικής παράστασης (με υπόμνημα)
35         figure('Visible', 'off');
36         plot(x, group, 'o-');
37         hold on;
38         plot(x, polyval(p, x), 'r--', 'LineWidth', 1.5);
39         legend(sprintf('Mean Value: %.6f', meanValue), sprintf('y = %.6fx + %.6f', slope, intercept), 'Location', 'best');
40         hold off;
41
42         title(sprintf('Column %d, Group %d', col, rowIndex));
43         xlabel('Index');
44         ylabel('Value');
45         saveas(gcf, sprintf('Column_%d_Group_%d.png', col, rowIndex));
46         close;
47
48         rowIndex = rowIndex + 1;
49     end
50 end
51
52 disp('Η διαδικασία ολοκληρώθηκε και δημιουργήθηκαν οι εικόνες με τις γραφικές παραστάσεις.');
```

Εικόνα 6.21 Κώδικας Matlab για το διαχωρισμό των δεδομένων ανά 12 περιόδους και την εύρεση της κλίσης, της εξίσωσης και της μέσης τιμή κάθε γραφικής παράστασης που δημιουργείται.



Εικόνα 6.22 Παράδειγμα μορφής αποτελέσματος προγράμματος Matlab για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, μοντέλου #8 των πρώτων 12 περιόδων. (Εικόνα 6.21).

Πίνακας 6-1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μέσω των τιμών των δωδεκάδων για κάθε σενάριο.

ΔΩΔΕΚΑΔΑ	RCP 4.5 (#8)	RCP 8.5 (#12)
1 <sup>Η</sup>	0.00020	0.00027
2 <sup>Η</sup>	0.00017	0.00029
3 <sup>Η</sup>	0.00019	0.00024
4 <sup>Η</sup>	0.00021	0.00026
5 <sup>Η</sup>	0.00020	0.00018
6 <sup>Η</sup>	0.000157	0.00021
7 <sup>Η</sup>	0.000157	0.00018
8 <sup>Η</sup>	0.00017	0.00027

Επειδή οι κλίσεις των ευθειών των δωδεκάδων δεν είναι σταθερές, χρησιμοποιούμε την απόλυτη τιμή των συντελεστών που βρήκαμε, έτσι ώστε να απλοποιηθούν οι πράξεις.

Πίνακας 6-2 Απόλυτες τιμές συντελεστών βροχόπτωσης κλιματικών σεναρίων.

RCP 4.5	RCP 8.5
0.0130	0.0040
0.0130	0.0132
0.0060	0.0066
0.0044	0.0251
0.0166	0.0120
0.0000	0.0113
0.0069	0.0428

Πίνακας 6-3 Παράδειγμα εφαρμογής του συντελεστή για την προσαρμογή των τιμών της οριακής συνθήκης (2) στο PTC.

ΔΩΔΕΚΑΔΑ	ΟΡΙΑΚΗ ΣΥΝΘΗΚΗ (2)
1 <sup>η</sup>	1000
2 <sup>η</sup>	987
3 <sup>η</sup>	974
4 <sup>η</sup>	968
5 <sup>η</sup>	964
6 <sup>η</sup>	948
7 <sup>η</sup>	948
8 <sup>η</sup>	941

Εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση των παραπάνω τιμών:

- i. Συντελεστής =  $\frac{\bar{n}_i - \bar{n}_{i+1}}{\bar{n}_i * 12}$   
 όπου:  $\bar{n}_i$  η αρχική μέση τιμή  
 $\bar{n}_{i+1}$  η επόμενη μέση τιμή
- ii. Εξίσωση υπολογισμού τιμών οριακών συνθηκών εισόδου και εξόδου νερού:  

$$V_{i+1} = V_i - V_i * \text{Συντελεστής}$$
 όπου:  $V_{i+1}$  η τιμή της οριακής συνθήκης στη δωδεκάδα i+1  
 $V_i$  η τιμή της οριακής συνθήκης στη δωδεκάδα i
- iii. Εξίσωση υπολογισμού ρυθμού μεταβολής άντλησης πηγαδιών:  

$$Q_{i+1} = Q_i - Q_i * 0.2$$
 όπου θεωρώ ένα σταθερό ρυθμό μείωσης της άντλησης 20% ανά 12 άδα.

## 6.7. Επεξεργασία αρχικών αποτελεσμάτων PTC

Έχοντας ολοκληρώσει την εισαγωγή των δεδομένων και των παραμέτρων στο μοντέλο PTC, ακολουθεί το τρέξιμο του προγράμματος και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα έχουν την μορφή της εικόνας 6.14 και θα πρέπει να συλλέξουμε τις τιμές των υδραυλικών υψών μόνο για τα πηγάδια παρατήρησης (M2, M25 & NH14). Επομένως θα χρησιμοποιήσουμε μερικούς κώδικες Matlab, με τους οποίους θα απομονώνουμε τις τιμές

των κόμβων που μας ενδιαφέρουν για κάθε περίοδο και στη συνέχεια βρίσκοντας τη μέση τιμή του υδραυλικού ύψους του κάθε κόμβου για κάθε περίοδο θα φτιάξουμε τις αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις, το οποίο θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο, και να ερμηνεύσουμε τα αποτελέσματα.

Για την εκτέλεση του κώδικα (6.23), πρέπει αρχικά να φορτώσουμε όλα τα αρχεία PTC\_Mesh\_heads\_sn, τα οποία αποτελούν τα δεδομένα των υδραυλικών υψών που προκύπτουν από την εκτέλεση του PTC.

```

1      clear all;
2      myFolder = pwd;
3      filePattern = fullfile(myFolder, '*.fin');
4      theFiles = dir(filePattern);
5      theFiles = natsortfiles(theFiles);
6
7      prompt = "Layer:";
8      layer = input(prompt);
9      n = input('Enter the value of nodes:');
10
11     % Καθαρισμός του αρχείου values.txt
12     fileID = fopen('values.txt', 'w');
13     fclose(fileID);
14
15     FileID = fopen('value.txt', 'w');
16     fprintf(FileID, '6s %d\n', 'Layer:', layer);
17
18     for i = 1:n
19         variableName = strcat('node', num2str(i));
20         value = input(sprintf('Enter the value of %s:', variableName));
21         fprintf(FileID, '%s = %d\n', variableName, value);
22         for j = 1:length(theFiles)
23             fileID = fopen(theFiles(j).name, 'r');
24             formatSpec = '%f';
25             A = fscanf(fileID, formatSpec);
26             if ((value == 1) && (layer == 1))
27                 var = find(A == value);
28                 values1(j) = A(var(2) + 1);
29             elseif ((value == 1) && (layer == 2))
30                 var = find(A == value);
31                 values1(j) = A(var(4) + 1);
32             else
33                 var = find(A == value);
34                 values1(j) = A(var(layer) + 1);
35             end
36             fclose(fileID);
37         end
38
39         % Γράψιμο στο αρχείο values.txt
40         fileID = fopen('values.txt', 'a');
41         fprintf(fileID, 'Layer: %d, Node: %s\n', layer, variableName); % Εμφάνιση layer και node
42         fprintf(fileID, '%6s %12s\n', 'File Name', 'Node Value');
43         for k = 1:length(theFiles)
44             fprintf(fileID, ' %s %f\n', theFiles(k).name, values1(k));
45         end
46         fprintf(fileID, '\n');
47         fclose(fileID);
48     end
49
50     fclose(FileID);
51

```

Εικόνα 6.23 Κώδικας Matlab για την εύρεση των υδραυλικών υψών των πηγαδιών παρατήρησης μέσω των αποτελεσμάτων που εξάγει το PTC στο τέλος του τρεξίματος.



```

1 function sortedFiles = natsortfiles(files)
2     % NATURAL SORT FILES - Sort filenames in a natural, human-readable order
3     % Input:
4     %   files - struct array returned by dir() or similar
5     % Output:
6     %   sortedFiles - struct array with files sorted naturally
7
8     % Extract filenames
9     filenames = {files.name};
10
11     % Apply natural sorting
12     [sortedFilenames, idx] = natsort(filenames);
13
14     % Reorder the struct array based on sorted indices
15     sortedFiles = files(idx);
16 end
17
18

```

Εικόνα 6.24 Function `natsortfiles` για να μπορέσει ο κώδικας, της εικόνας (6.23), να τρέξει.

```

1 function [sortedArray, idx] = natsort(strings)
2     % NATURAL SORT - Perform natural order sorting for cell arrays of strings
3     % Input:
4     %   strings - Cell array of strings
5     % Output:
6     %   sortedArray - Sorted array of strings
7     %   idx - Indices of sorted elements
8
9     % Ensure all strings are valid
10    strings = strings(:); % Convert to column cell array
11    if isempty(strings)
12        sortedArray = strings;
13        idx = [];
14        return;
15    end
16
17    % Extract tokens of numbers and text
18    splitStr = regexp(strings, '(\d+)|(\D+)', 'tokens');
19
20    % Convert into numerical or text groups
21    tokens = cellfun(@(x) cellfun(@(y) convertToNumber(y), ...
22                                [x{:}], 'UniformOutput', false), splitStr, 'UniformOutput', false);
23
24    % Handle cases where tokens are empty
25    maxTokens = max(cellfun(@numel, tokens));
26    tokens = cellfun(@(x) padTokens(x, maxTokens), tokens, 'UniformOutput', false);
27
28    % Create sorting keys
29    sortingKeys = vertcat(tokens{:});
30
31    % Sort based on keys
32    [~, idx] = sortrows(sortingKeys);
33
34    % Return sorted strings
35    sortedArray = strings(idx);
36 end
37
38 function out = convertToNumber(str)
39     % Convert string to number if possible, otherwise keep it as is
40     num = str2double(str);
41     if isnan(num)
42         out = str;
43     else
44         out = num;
45     end
46 end
47
48 function paddedTokens = padTokens(tokens, maxTokens)
49     % Pad tokens with empty cells to ensure uniform length
50     paddedTokens = [tokens, repmat({''}, 1, maxTokens - numel(tokens))];
51 end
52

```

Εικόνα 6.25 Function `natsort` που χρειάζεται ο κώδικας, στην εικόνα (6.23), για να τρέξει.

Όταν ολοκληρωθεί το τρέξιμο του κώδικα (6.23) θα πρέπει να έχουμε τρία αρχεία values, σε μορφή txt, τρία επειδή τόσα είναι και τα Layers, επομένως αυτός ο αριθμός μπορεί να διαφέρει σε άλλες μελέτες. Στη συνέχεια θα τρέξουμε τον επόμενο κώδικα, ο οποίος θα υπολογίσει τη μέση τιμή των κόμβων παρατήρησης για κάθε περίοδο και θα εξάγει ένα αρχείο txt, με ονομασία averaged values.

```

1 clear all;
2
3 % Ορισμός των αρχείων values
4 fileNames = {'values1.txt', 'values2.txt', 'values3.txt'}; % Ονόματα αρχείων
5 numFiles = length(fileNames);
6
7 % Παράμετροι
8 numPeriods = 90; % Αριθμός περιόδων
9 numNodes = 3; % Αριθμός nodes
10
11 % Αποθήκευση δεδομένων
12 allLayersData = zeros(numPeriods, numNodes, numFiles); % Περίοδοι x Nodes x Layers
13
14 for layerIdx = 1:numFiles
15     % Έλεγχος ύπαρξης αρχείου
16     if ~isfile(fileNames{layerIdx})
17         error('Το αρχείο %s δεν βρέθηκε στον φάκελο: %s', fileNames{layerIdx}, pwd);
18     end
19
20     % Άνοιγμα αρχείου
21     fileID = fopen(fileNames{layerIdx}, 'r');
22     lines = textscan(fileID, '%s', 'Delimiter', '\n'); % Διαβάζουμε όλες τις γραμμές
23     fclose(fileID);
24     lines = lines{1}; % Αποσυμπίεση αποτελέσματος
25
26     % Αποθήκευση δεδομένων για κάθε node
27     nodeData = zeros(numPeriods, numNodes); % Δεδομένα για 3 nodes
28
29     for nodeIdx = 1:numNodes
30         % Εντοπισμός γραμμής με πληροφορίες για το node
31         nodeHeader = sprintf('Node: node%d', nodeIdx);
32         headerLineIdx = find(contains(lines, nodeHeader), 1); % Εντοπίζουμε τη γραμμή του node
33
34         if isempty(headerLineIdx)
35             error('Το αρχείο %s δεν περιέχει δεδομένα για node %d.', fileNames{layerIdx}, nodeIdx);
36         end
37
38         % Εντοπισμός δεδομένων για το node
39         dataStartIdx = headerLineIdx + 2; % Τα δεδομένα ξεκινούν 2 γραμμές μετά το header
40         for periodIdx = 1:numPeriods
41             valueLine = lines{dataStartIdx + periodIdx - 1};
42             parts = strsplit(strtrim(valueLine)); % Διαχωρισμός της γραμμής σε μέρη
43             value = str2double(parts{end}); % Παίρνουμε την τελευταία στήλη (Node Value)
44             nodeData(periodIdx, nodeIdx) = value; % Αποθήκευση στη μήτρα
45         end
46     end
47 end

```

Εικόνα 6.26 Κώδικας Matlab για τον υπολογισμό της μέσης τιμής των υδραυλικών υψών

```

47
48     % Αποθήκευση layer δεδομένων
49     allLayersData(:, :, layerIdx) = nodeData;
50 end
51
52 % Υπολογισμός μέσου όρου για κάθε node και κάθε περίοδο
53 averageData = mean(allLayersData, 3);
54
55 % Δημιουργία νέου αρχείου εξόδου
56 outputFileName = 'averaged_values.txt';
57 fileID = fopen(outputFileName, 'w');
58
59 % Γράψιμο αποτελεσμάτων στο αρχείο
60 fprintf(fileID, 'Period\tNode1\tNode2\tNode3\n'); % Επικεφαλίδες
61 for periodIdx = 1:numPeriods
62     fprintf(fileID, '%d\t%.4f\t%.4f\t%.4f\n', periodIdx, averageData(periodIdx, :));
63 end
64
65 fclose(fileID);
66
67 fprintf('Η διαδικασία ολοκληρώθηκε. Τα αποτελέσματα αποθηκεύτηκαν στο %s\n', outputFileName);
68

```

Εικόνα 6.27 Συνέχεια προγράμματος (6.26)

Τέλος θα χρησιμοποιήσουμε ένα τελευταίο κώδικα με τον οποίο θα μετατρέπουμε το αρχείο txt, των μέσων τιμών των υδραυλικών υψών, σε ένα αρχείο excel έτσι ώστε να μπορούμε να δημιουργήσουμε τις γραφικές παραστάσεις των υδραυλικών υψών κάθε κόμβου για κάθε κλιματικό σενάριο ως προς τη περίοδο.

```

1 % MATLAB Script: Convert TXT file to Excel
2 % This script reads a text file with numerical data and exports it to an Excel file.
3
4 % Prompt user for the input file
5 [inputFile, inputPath] = uigetfile('*.txt', 'Select the TXT file to convert');
6 if isequal(inputFile, 0)
7     disp('No file selected. Exiting script.');
```

```

8     return;
9 end
10
11 % Full path of the selected file
12 fullInputPath = fullfile(inputPath, inputFile);
13
14 % Initialize an empty cell array to store data
15 cleanedData = {};
16
17 % Open the file and read line by line
18 fid = fopen(fullInputPath, 'r');
19 if fid == -1
20     error('Failed to open the file. Please check the file path.');
```

```

21 end
22
23 lineIdx = 1; % Line counter
24 while ~feof(fid)
25     rawLine = fgetl(fid); % Read a line from the file
26
27     % Replace commas with dots to handle decimal numbers correctly
28     rawLine = strrep(rawLine, ',', '.');
```

```

29
30     % Split the line into parts using spaces or tabs as delimiters
31     parts = regexp(rawLine, '\s+', 'split');
```

```

32
33     % Remove any empty strings caused by irregular spacing
34     parts = parts(~cellfun('isempty', parts));
35
36     % Check if the number of parts matches the expected columns (e.g., 4: Period, Node1, Node2, Node3)
37     if length(parts) ~= 4
38         warning('Line %d is misaligned: %s\nAttempting to fix...', lineIdx, rawLine);
39
40         % Try to fix by combining or splitting incorrectly parsed elements
41         % (For this specific case, adjust logic as needed)
42         if length(parts) > 4
43             % Combine extra parts into the last column
44             parts = [parts(1:3), strjoin(parts(4:end), ' ')];
45         elseif length(parts) < 4
46             % Pad missing columns with NaN
47             parts(end+1:4) = {'NaN'};
48         end
49     end
50
51     % Append cleaned data to the cell array
52     cleanedData = [cleanedData; parts]; %ok<AGROW>
53     lineIdx = lineIdx + 1;
54 end
55

```

Εικόνα 6.28 Κωδικός Matlab μετατροπής αρχείου από txt σε excel.

```

56 fclose(fid);
57
58 % Convert the cell array to a table
59 try
60     data = cell2table(cleanedData, 'VariableNames', {'Period', 'Node1', 'Node2', 'Node3'});
61     % Convert numeric columns from strings to numbers
62     data.Period = str2double(data.Period);
63     data.Node1 = str2double(data.Node1);
64     data.Node2 = str2double(data.Node2);
65     data.Node3 = str2double(data.Node3);
66 catch
67     error('Failed to convert data to table. Please check the data format.');
```

```

68 end
69
70 % Prompt user for the output Excel file name
71 [outputFile, outputPath] = uiputfile('*.xlsx', 'Save as Excel File');
72 if isequal(outputFile, 0)
73     disp('No output file specified. Exiting script.');
```

```

74     return;
75 end
76
77 % Full path of the output file
78 fullOutputPath = fullfile(outputPath, outputFile);
79
80 % Write the table to an Excel file
81 try
82     writetable(data, fullOutputPath);
83     fprintf('Data successfully written to %s\n', fullOutputPath);
84 catch
85     error('Failed to write to Excel file. Please check permissions or file path.');
```

```

86 end
87

```

Εικόνα 6.29 Συνέχεια προγράμματος (6.28)

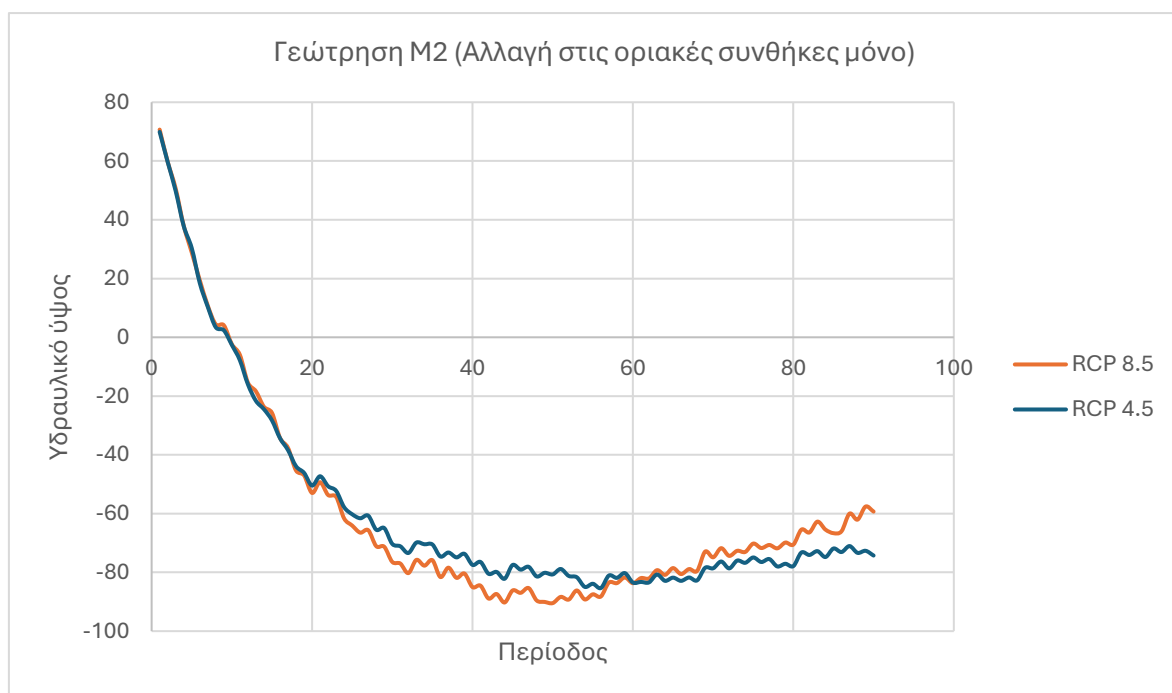
Πίνακας 6-4 Παράδειγμα τελικού πίνακα υδραυλικών υψών πηγαδιών παρατήρησης για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, μοντέλου #8.

Περίοδοι	Πηγάδια παρατήρησης (υδραυλικά ύψη σε m)		
	M2	M25	NH14
1	68.9284	28.2728	94.0456
2	59.1627	12.4014	87.4805
3	47.7553	-4.4535	83.2145
4	37.1082	-15.8739	77.0709
5	26.6275	-29.1463	73.1669
6	17.3130	-39.0924	66.8440
.	“	“	“
.	“	“	“
.	“	“	“
87	-123.2565	-227.7789	12.9462
88	-126.1745	-228.5686	10.2647
89	-127.6680	-229.1116	8.4041
90	-130.0951	-229.9313	5.9786

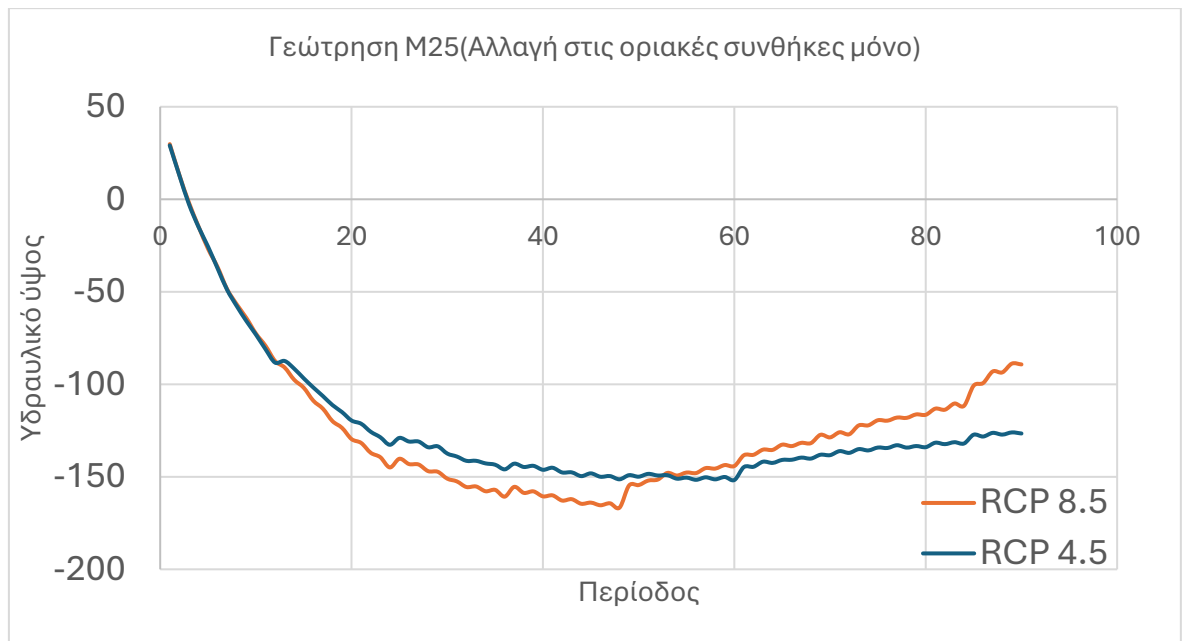
## 7. Κεφάλαιο 7- Αποτελέσματα τελικών δεδομένων & Συζήτηση

Στο κεφάλαιο θα μελετήσουμε την επιρροή της κλιματικής αλλαγής στον υπόγειο υδροφόρα του Τυμπακίου σύμφωνα με τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 & 8.5 με διάφορες παραλλαγές των σεναρίων αυτών έτσι ώστε να μπορέσουμε να αποκτήσουμε μια όσο το δυνατόν γίνεται σφαιρική και ακριβή εικόνα των αποτελεσμάτων. Υπενθυμίζουμε ότι αυτό που θα μελετήσουμε είναι τα υδραυλικά ύψη στις τρεις γεωτρήσεις παρατήρησης που επιλέξαμε M2, M25 & NH14.

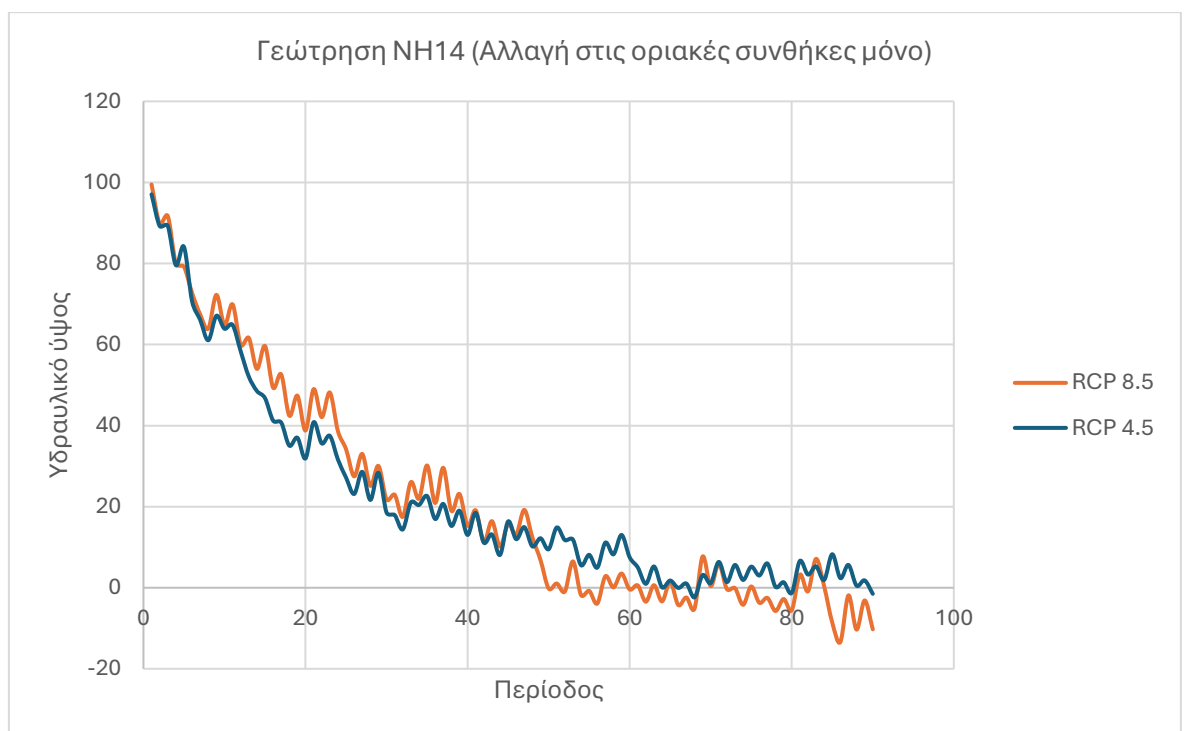
1. Σε αυτό το σενάριο θα αναλύσουμε τις γραφικές παραστάσεις των υψών που προκύπτουν αν έχουμε μεταβάλλει μόνο τις οριακές συνθήκες εισόδου και εξόδου του νερού της περιοχής μελέτης, αν υποθέσουμε ότι έχουμε 100% διήθηση. Δηλαδή ο ρυθμός άντλησης των πηγαδιών για τα 45 χρόνια μελέτης παραμένει σταθερός και όλο το νερό της βροχής καταλήγει στον υπόγειο υδροφόρα, οπότε καταλήγουμε στις εξής γραφικές:



Γράφημα 7.1 Υδραυλικού ύψους γεώτρησης M2 σε συνάρτηση με τη περίοδο, υπό σταθερό ρυθμό άντλησης.



Γράφημα 7.2 Υδραυλικού ύψους γεώτρησης M25 σε συνάρτηση με τη περίοδο, υπό σταθερό ρυθμό άντλησης.



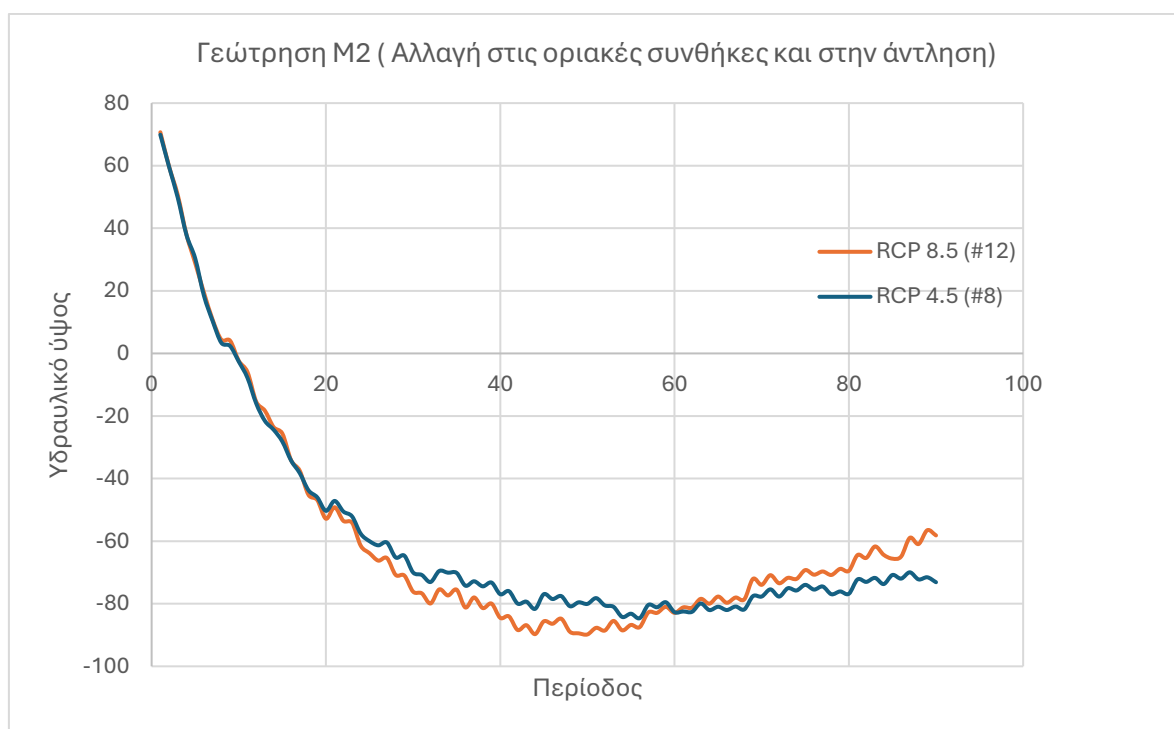
Γράφημα 7.3 Υδραυλικού ύψους γεώτρησης NH14 σε συνάρτηση με τη περίοδο, υπό σταθερό ρυθμό άντλησης.

Με βάση τις γραφικές παραστάσεις, παρατηρούμε ότι για τη γεώτρηση M2 ενώ το υδραυλικό ύψος στην αρχή ξεκινάει από θετικές τιμές, στη συνέχεια έχει μια φθίνουσα τάση και στα δύο σενάρια (RCP 4.5 & 8.5) παρατηρείται απότομη πτώση του υδραυλικού ύψους μέχρι περίπου την 40<sup>η</sup> περίοδο όπου φαίνεται να

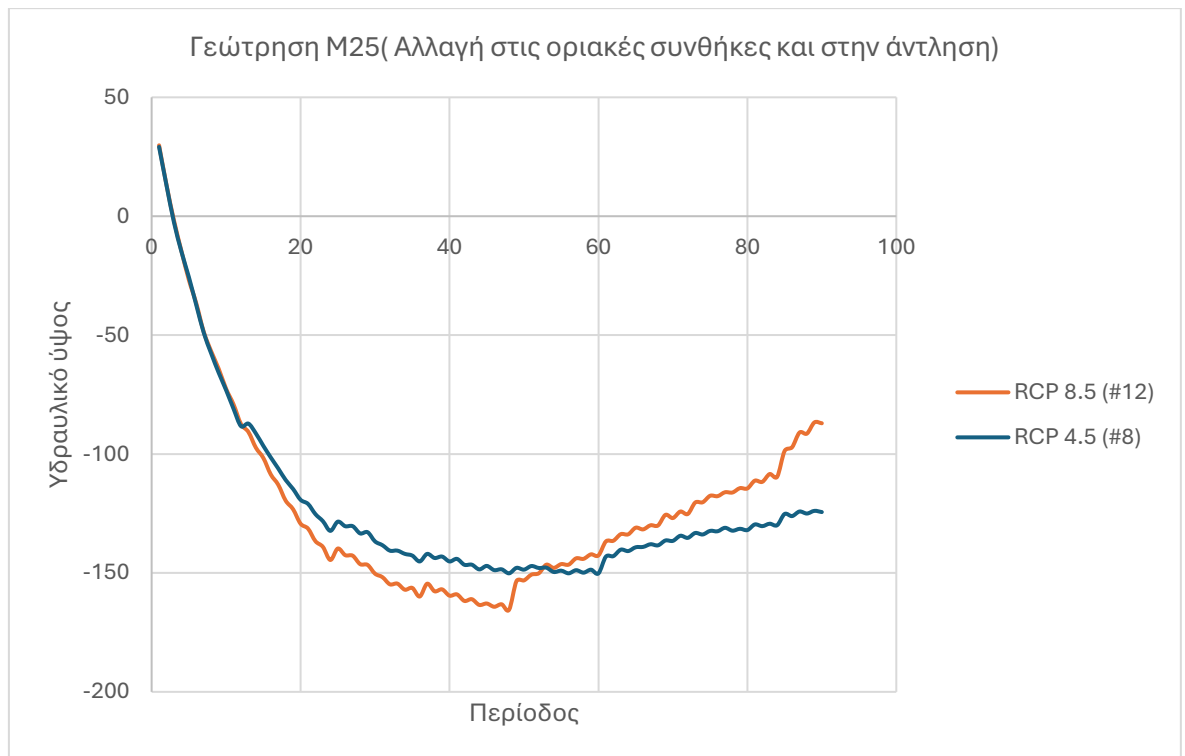


σταθεροποιείται. Από την 60<sup>η</sup> περίοδο και μετά το σενάριο 8.5 παρουσιάζει ανάκαμψη του υδραυλικού ύψους σε σχέση με το σενάριο 4.5 το οποίο φαίνεται να σταθεροποιείται. Στη γεώτρηση M25 έχουμε μεγαλύτερη πτώση του υδραυλικού ύψους σε σχέση με τη γεώτρηση M2, στο σενάριο 8.5 παρουσιάζεται μεγαλύτερη πτώση του υδραυλικού ύψους μέχρι τη περίοδο 54, όπου από κει και μετά έχουμε την ίδια τάση ανάκαμψης του υπόγειου υδροφορέα με πριν. Τέλος στη γεώτρηση NH14 το υδραυλικό ύψος έχει τη μεγαλύτερη τιμή και ακολουθεί μια καθοδική πορεία έως την 90<sup>η</sup> περίοδο, τα κλιματικά σενάρια παρουσιάζουν όμοια συμπεριφορά, με την παρατήρηση ότι το υδραυλικό ύψος στο σενάριο 8.5 παραμένει ελάχιστο μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό του 4.5 έως την 40<sup>η</sup> περίοδο, στη συνέχεια παρουσιάζει μια πιο αισθητή κάθοδο στη τιμή του ύψους, ενώ το 4.5 φαίνεται να σταθεροποιείται στο τέλος.

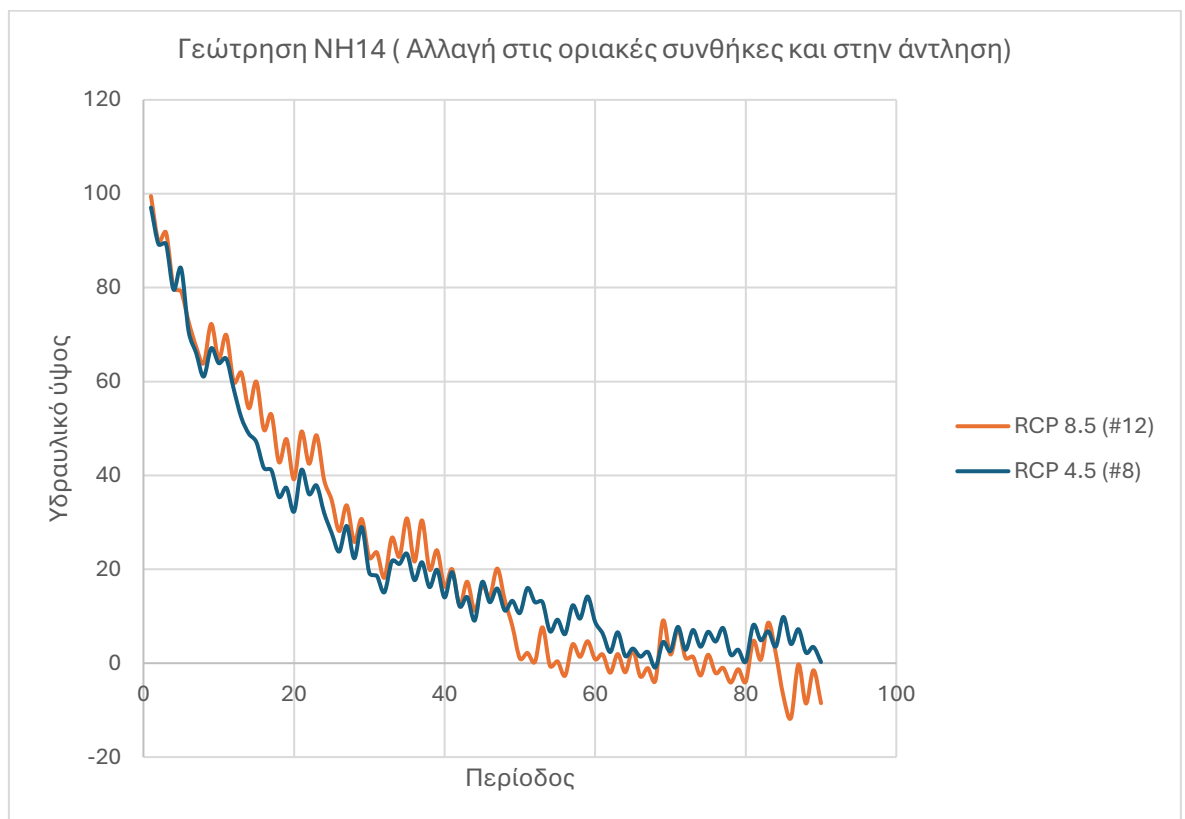
2. Στο δεύτερο σενάριο θα μελετήσουμε την επίδραση του κλίματος στον υπόγειο υδροφορέα λαμβάνοντας υπόψη ξανά ότι έχουμε διήθηση 100%, όμως αυτή τη φορά εκτός από μεταβολή των οριακών συνθηκών έχουμε και μεταβολή του ρυθμού άντλησης.



Γράφημα 7.4 Υδραυλικού ύψους γεώτρησης M2 σε συνάρτηση με τη περίοδο, υπό μεταβαλλόμενο ρυθμό άντλησης και οριακών συνθηκών.



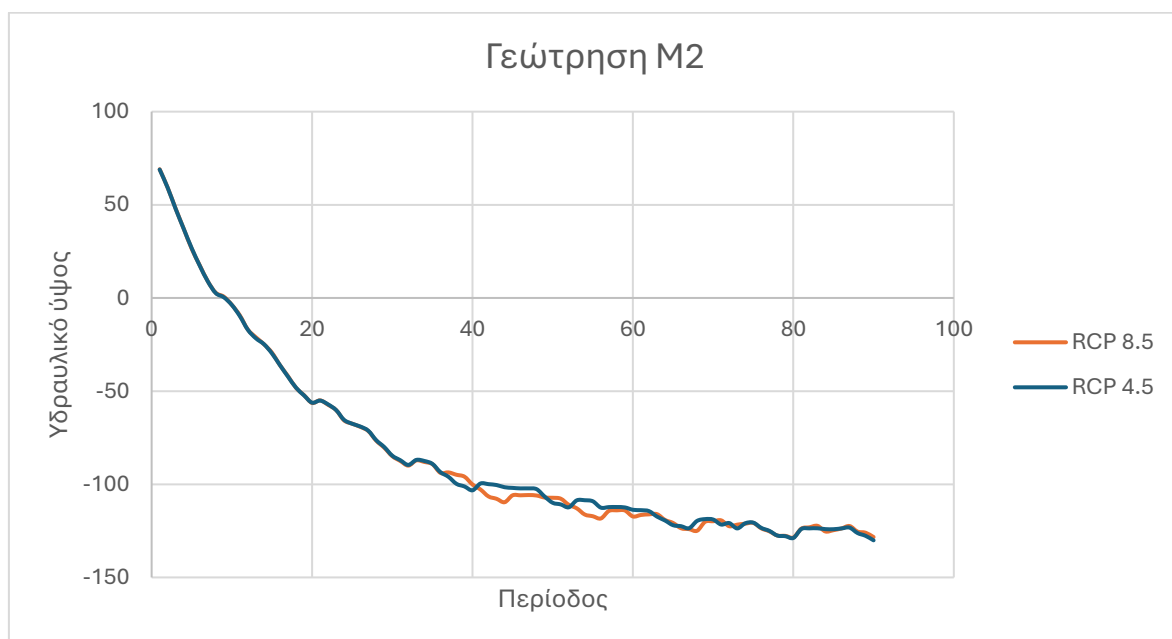
Γράφημα 7.5 Υδραυλικού ύψους γεώτρησης M25 σε συνάρτηση με τη περίοδο, υπό μεταβαλλόμενο ρυθμό άντλησης και οριακών συνθηκών.



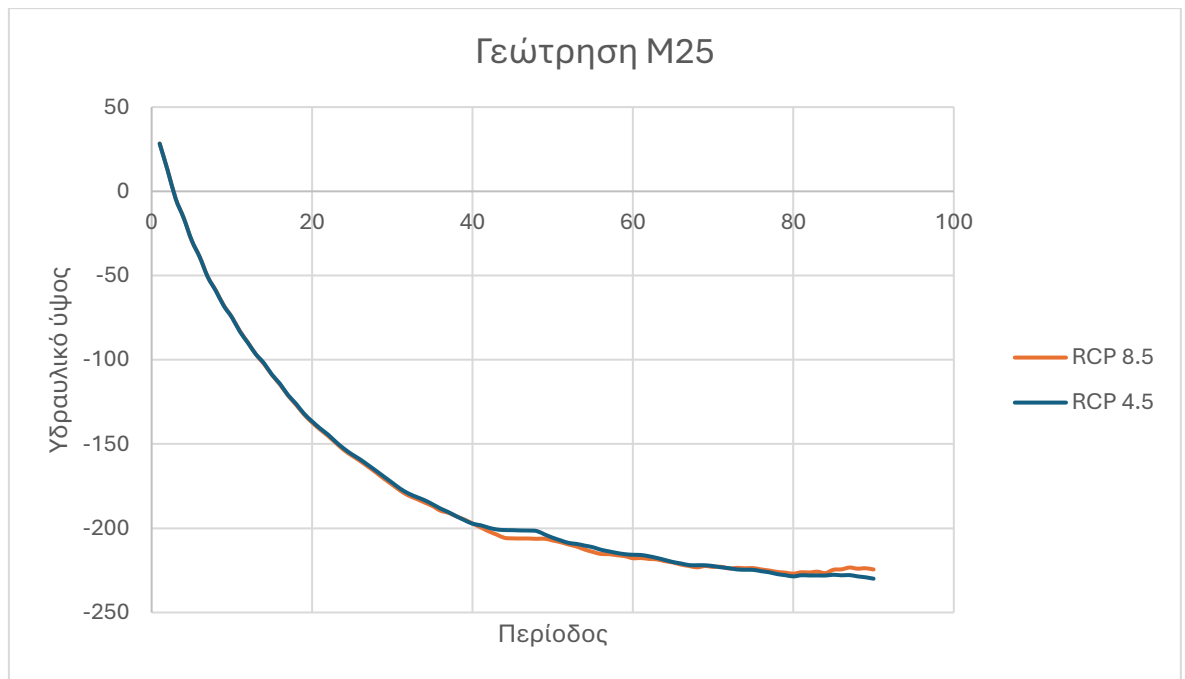
Γράφημα 7.6 Υδραυλικού ύψους γεώτρησης NH14 σε συνάρτηση με τη περίοδο, υπό μεταβαλλόμενο ρυθμό άντλησης και οριακών συνθηκών.

Στη γεώτρηση M2 παρατηρείται όμοια συμπεριφορά με πριν, δηλαδή αρχική απότομη μείωση του υδραυλικού ύψους, μέχρι να σταθεροποιηθεί στη 50<sup>η</sup> περίοδο. Μεταξύ της 20<sup>ης</sup> και 50<sup>ης</sup> περιόδου το σενάριο 8.5 δείχνει χαμηλότερες τιμές στο υδραυλικό ύψος έως την 65<sup>η</sup> περίοδο όπου παρατηρείται μια ανάκαμψη, ενώ το σενάριο 4.5 δείχνει να σταθεροποιείται στις τελευταίες περιόδους. Όσον αφορά τη γεώτρηση M25 στο σενάριο 8.5 έχουμε χαμηλότερες τιμές υδραυλικού ύψους έως το σημείο της 54<sup>ης</sup> περιόδου όπου τέμνονται οι γραφικές μας και στη συνέχεια έχουμε μια σημαντική αύξηση της στάθμης του νερού, κατά το σενάριο 8.5. Τέλος στη γεώτρηση NH14 το υδραυλικό ύψος μειώνεται όπως και στους υπόλοιπους, όμως με μικρότερο ρυθμό, επίσης παρατηρούμε ότι προς τις τελευταίες περιόδους και τα δύο σενάρια έχουν πετύχει μια σχετικά σταθερή ισορροπία καθώς συμπεριφέρονται καθ' όλη τη διάρκεια με όμοιο τρόπο.

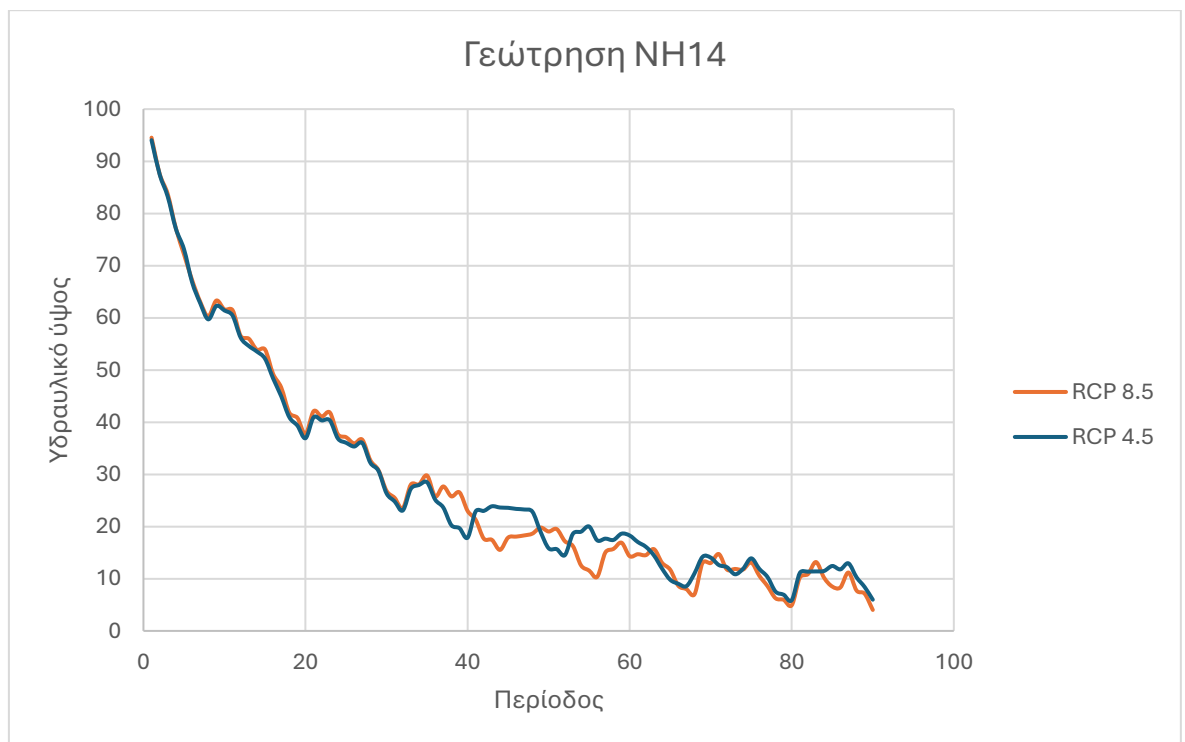
3. Στη τρίτη και τελευταία περίπτωση πέραν του ότι λαμβάνουμε υπόψη τη μεταβολή των οριακών συνθηκών και του ρυθμού άντλησης, λαμβάνουμε επίσης και ποσοστό διήθησης 20%, επομένως έχουμε:



Γράφημα 7.7 Υδραυλικού ύψους γεώτρησης M2 σε συνάρτηση με τη περίοδο, υπό μεταβαλλόμενο ρυθμό άντλησης και οριακών συνθηκών με 20% διήθηση .



Γράφημα 7.8 Υδραυλικού ύψους γεώτρησης M25 σε συνάρτηση με τη περίοδο, υπό μεταβαλλόμενο ρυθμό άντλησης και οριακών συνθηκών με 20% διήθηση.



Γράφημα 7.9 Υδραυλικού ύψους γεώτρησης NH14 σε συνάρτηση με τη περίοδο, υπό μεταβαλλόμενο ρυθμό άντλησης και οριακών συνθηκών με 20% διήθηση.

Από τις γραφικές παραστάσεις που δημιουργήθηκαν μέσω των δεδομένων μας παρατηρούμε μια βασική διαφορά σε σχέση με τα προηγούμενα δύο σενάρια. Παρατηρούμε ότι τα δύο κλιματικά σενάρια για τις γεωτρήσεις M2 και NH14 συμπεριφέρονται με σχεδόν παρόμοιο τρόπο, με ελάχιστες διαφορές στις ενδιάμεσες περιόδους όπου το RCP 8.5 έχει χαμηλότερες υδραυλικές τιμές. Επίσης δεν εμφανίζεται τόσο έντονα το φαινόμενο ανάκαμψης του υδραυλικού ύψους προς το τέλος των γραφικών. Όσον αφορά τη γεώτρηση NH14, οι διαφορές στα υδραυλικά ύψη μεταξύ των δύο κλιματικών σεναρίων έχουν γίνει πιο ήπιες με μικρότερες αυξομειώσεις. Σε γενικές γραμμές στο τρίτο σενάριο τα δύο κλιματικά σενάρια δεν διαφέρουν μεταξύ τους τόσο πολύ, παρόλα αυτά υπάρχουν σημεία στα οποία φαίνεται ξεκάθαρα ότι επικρατούν δυσμενέστερες συνθήκες στο RCP 8.5 μιας και είναι το πιο ακραίο σενάριο από τα δύο.

## 8. Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα που αναλύσαμε είναι φανερό ότι η παράμετρος της βροχής παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο καθορισμό της κατάστασης του υπόγειου υδροφορέα καθώς επηρεάζει έμμεσα και τις υπόλοιπες παραμέτρους της περιοχής μας, δηλαδή τις οριακές συνθήκες και το ρυθμό άντλησης. Ενώ αντιθέτως διατηρώντας σταθερή τη παράμετρο της βροχής, όπως στα πρώτα δύο σενάρια βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα διαφέρουν ελάχιστα μεταξύ τους. Στο τελευταίο σενάριο, το οποίο παρατηρείται και στα προηγούμενα, οι γεωτρήσεις M2 & M25 είναι λιγότερο επιρρεπείς στην αλλαγή του κλίματος. Ενώ το υδραυλικό ύψος μειώνεται σημαντικά, δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική διαφορά μεταξύ των δύο κλιματικών σεναρίων, με εξαίρεση που αποτελεί η ανάκαμψη του υδραυλικού ύψους στα πρώτα δύο σενάρια. Η γεώτρηση NH14 σε σχέση με τους προηγούμενους επηρεάζεται πολύ περισσότερο από τις επιρροές των κλιματικών αλλαγών με αισθητές διαφορές μεταξύ αυτών και στα τρία σενάρια.

Γενικά σε όλα τα σενάρια που αναλύθηκαν παρατηρείται μια τάση μείωσης του υδραυλικού ύψους του υπόγειου υδροφορέα, με δυσμενέστερες τιμές να εμφανίζει το τελευταίο σενάριο. Συγκεκριμένα στα πρώτα δύο σενάρια το υδραυλικό ύψος φαίνεται να υποχωρεί σε τιμές -120m & -160m για τις πρώτες δύο γεωτρήσεις και στα -14m στον NH14, στο τρίτο σενάριο, το υδραυλικό ύψος στις πρώτες δύο γεωτρήσεις υποχωρεί στα -130m & -230m και η τελευταία γεώτρηση στα 6m, την οποία την τοποθετεί σε καλύτερη κατάσταση από τις τιμές του NH14 στα προηγούμενα δύο σενάρια. Αυτή η τεράστια πτώση της τιμής του υδραυλικού ύψους του υπόγειου υδροφορέα οφείλεται στους παρακάτω λόγους.

Αρχικά η περιοχή χαρακτηρίζεται από έντονη μορφολογία και ρήγματα, επομένως λαμβάνοντας υπόψιν ότι τα ρήγματα της περιοχής είναι τεράστιες πηγές απώλειας νερού και ταυτοχρόνως έχουμε συνεχή μείωση της βροχύπτωσης ανά τα χρόνια αυτό δημιουργεί συνθήκες απώλειας νερού, όπως παρατηρούμε στο πηγάδι παρατήρησης M2, το οποίο βρίσκεται πλησίον ρήγματος. Έπειτα τα πολυάριθμα πηγάδια άντλησης, χωρίς να γίνεται συνυπολογισμός των πιθανόν παράνομων, μειώνουν περαιτέρω το υδραυλικό ύψος, ειδικά όταν στις ξηρές περιόδους, όπου οι τιμές άντλησης των πηγαδιών αυξάνονται για την εξυπηρέτηση τουριστικών, αστικών και γεωργικών αναγκών. Το πηγάδι παρατήρησης M25 είναι ένα πηγάδι όπου παρατηρείται υπεράντληση του υδροφορέα μέσω των γεωτρήσεων και ταυτόχρονης επιρροής δύο ρηγμάτων. Το πηγάδι παρατήρησης NH14 αντιθέτως βρίσκεται σε μια τοποθεσία όπου δεν εντοπίζονται ρήγματα γύρω από την ζώνη επιρροής του, ενώ γεωτρήσεις εντοπίζονται σε σχετικά μέτρια απόσταση. Εδώ το φαινόμενο πτώσης του υδροφορέα γίνεται σε πολύ μικρότερο ρυθμό και ένταση, να σημειωθεί όμως ότι πλησίον του πηγαδιού βρίσκεται και μια από τις οριακές συνθήκες εισόδου νερού της περιοχής, που δικαιολογεί το αυξημένο αρχικό υδραυλικό ύψος. Το πηγάδι παρατήρησης NH14 επηρεαζόμενο περισσότερο από κλιματικούς και φυσικούς παράγοντες και λιγότερο από τη γεωλογία και τη γεώτρηση της περιοχής, μας δείχνει τη καθαρή διαφορά μεταξύ των κλιματικών σεναρίων RCP 4.5 & 8.5 καθώς στο ενδεχόμενο του σεναρίου 8.5 υπάρχουν περίοδοι μέσα στα επόμενα 45 χρόνια με αισθητά λιγότερο νερό.

Τέλος έναν από τους παράγοντες που επίσης επηρεάζουν το υπόγειο νερό της περιοχής, είναι το γεγονός ότι το Τυμπάκι είναι παράκτιος οικισμός, επομένως το φαινόμενο υφαλμύρισης που επικρατεί και θα επικρατήσει στο μέλλον λειτουργεί ως αρνητικός πολλαπλασιαστής, με την έννοια πως όσο το πιεζομετρικό ύψος του νερού θα μειώνεται τόσο μεγαλύτερες ποσότητες θαλασσινού νερού θα εισέρχονται βαθύτερα στον υπόγειο

υδροφορέα, προκαλώντας μεγαλύτερες απώλειες φρέσκου νερού και ξηρασία της γόνιμης γης. Τέλος θα πρέπει να συλλογιστούμε και να αναρωτηθούμε για το αν η παρακάτω μελέτη αποτελεί την εξαίρεση ή τον κανόνα, καθώς όλο και πιο συχνά φαινόμενα ερημοποίησης παρατηρούνται και στη χώρα μας αλλά και στις υπόλοιπες χώρες της μεσογείου.



## Βιβλιογραφία

### Ξένη βιβλιογραφία:

- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied Groundwater Modeling (Simulation of Flow and Advective Transport)*. Elsevier Inc.
- Bear, J., Cheng, A. H.-D., Sorek, S., Ouzar, D., & Herrera, I. (1999). *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods and practices*. Kluwer Academic Publishers.
- C.W. Fetter, J. (2014). *Applied Hydrogeology*. Essex: Pearson Education Limited.
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Groundwater*. Ontario, Canada: University of Guelph.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press.
- Maidment, D. R. (1993). *Handbook of Hydrology*.
- Paritsis, S. N. (2005). *SIMULATION OF SEAWATER INTRUSION INTO THE TYMBAKI AQUIFER, SOUTH CENTRAL CRETE, GREECE*. Heraklion, Crete, Greece: Department of Management of Water Resources of the Region of Crete.
- Schneider, S. (1996). *Encyclopedia of Climate and Weather*. New York: Oxford University Press.
- Schnoor, J. L. (2021). *Environmental Modeling, Fate and Transport of Pollutants in Water, Air and Soil, 2nd Edition*. Iowa City: John Wiley & Sons.
- United Nations. (1992). *UNFCC*.
- Zacharioudakis, M. G., & Paramastorakis, M. D. (χ.χ.). *Conceptual Model and Model idealisation report of Tibaki basin in South Crete*. Herakleio Crete: The Section of Water Resources Management.
- Zacharioudakis, M. G., & Paramastorakis, M. D. (χ.χ.). *Tibaki basin steady state groundwater flow and model calibration report*. Herakleio Crete: The Region of Crete, The Section of Water Resources Management.

### Ελληνική βιβλιογραφία:

- Βαβίζος, Γ., & Μερτζάνης, Α. (2003). *Περιβάλλον, Μελέτες Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων*. Αθήνα: Παπασωτηρίου .
- Advanced Enviromental Studies Σύμβουλοι Μηχανικοί Ανώνυμη Μελετητική Εταιρεία. (2020). *Κατάρτιση του Περιφερειακού Σχεδίου για την Προσαρμογή στην Κλιματική Αλλαγή (ΠΕΣΠΚΑ) Περιφέρειας Αττικής*. Αθήνα: Περιφέρεια Αττικής .
- Γιαννακάκος, Ε. (2013). *Τρισδιάστατη γεωλογική μοντελοποίηση της λεκάνης του Τυμπακίου με υποστήριξη γεωτρητικών και γεωφυσικών δεδομένων*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Δαουλάρη, Γ. (2007). *Μοντελοποίηση της υπόγειας ροής και προσδιορισμός υφάλμυρης ζώνης του υπόγειο υδροφορέα περιοχής Φαλάσαρνα Χανίων*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Καρατζάς, Γ. (2005). *Ροή υπόγειων υδάτων και μεταφορά ρύπων*. Ανάκτηση από Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Καρτεράκης, Σ. Μ. (2005). *ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κουκούλη, Π. Γ. (2014). *ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΤΙΣ ΑΝΑΓΚΕΣ ΣΕ ΝΕΡΟ, ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΩΝ ΚΑΛΛΙΕΡΓΕΙΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ*. Θεσσαλονίκη: ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ.
- ΚΟΥΤΡΙΜΠΑΝΟΣ, Α. (2020). *Ανάλυση υδρομετεωρολογικών δεδομένων στην περιοχή Τυμπακίου*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- ΚΡΙΤΣΩΤΑΚΗΣ, Μ. Ν. (2009). *ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΜΕΣΑΡΑΣ ΚΡΗΤΗΣ* . Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- ΚΡΙΤΣΩΤΑΚΗΣ, Μ., & ΠΑΥΛΙΔΟΥ, Σ. (2013). *ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΚΡΗΤΗΣ*. Ηράκλειο: ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΡΗΤΗΣ.
- ΜΑΓΔΑΛΗ, Μ. (2012). *Μοντελοποίηση της Υδρολογίας της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Γεροπόταμου*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Μπαλτάς, Μ. Μ. (2018). *Τεχνική Υδρολογία* . Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Ξανθόπουλος, Δ. Κ. (1999). *Τεχνική Υδρολογία* . Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Στουρνάρας. (2007). *Νερό: Περιβαλλοντική Διάσταση και Διαδρομή*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

- Τράπεζα της Ελλάδος. (2011). *Οι Περιβαλλοντολογικές, Οικονομικές και Κοινωνικές Επιπτώσεις στην Ελλάδα*. Ίδρυμα Εκτύπωσης Τραπεζογραμματίων και Αξιών της Τράπεζας της Ελλάδος.
- Τριχάκης, Ι. (2004). *Προσομοίωση της Υπόγειας Ροής και Προσδιορισμός της Ζώνης Υφαλμύρισης στην Βιομηχανική Περιοχή (ΒΙ.ΠΕ.) Ηρακλείου Κρήτης*. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Τσούτσος, Θ. (2023). *Αειφόρος Ανάπτυξη και Οικονομικά της Κλιματικής Αλλαγής*. Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Χρονοπούλου, Α. (2019). *ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΣΤΗ ΛΕΚΑΝΗ ΤΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΠΙΚΥΡΩΜΕΝΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ*. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Χρυσικόπουλος, Κ. Β. (2020). *Φαινόμενα Μεταφοράς στο Υπέδαφος και σε Περιβαλλοντικά Συστήματα*. Αθήνα: Εκδόσεις Τζιόλα.

### **Διαδικτυακές πηγές:**

[Οικοσκόπιο](#)

[Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο. \(2000\). Οδηγία 2000/60/ΕΚ.](#)

[ΔΕΥΑΕΛ. \(2024\). Παγκόσμια κατανομή νερού](#)

[Wikipedia. \(2024, August 26\). Τυμπάκι](#)

[Wikipedia. \(2024, February 23\). Κοινότητα Τυμπακίου](#)

[Wikipedia. \(2024, March 26\). Δήμος Φαιστού](#)

[Department of Enviromental Quality. \(2024\). Darcy's Law.](#)

[meteoblue](#)

[Pacific Northwest National Laboratory and the University of Maryland](#)

[Goverment of Canada](#)

[European Enviromental Agency](#)

[Civil Enginnering Software Database](#)

[Roser, H. R. \(2020, June\). CO2 emissions](#)

Bayram, H. a. (2014, January). *Global Climate Change, Desertification, and its Consequences in Turkey and the Middle East.*

European Enviromental Agency. (2019, April 22). *Ekvoli Geropotamou Mesaras.*

Bleam, W. F. (2012). *Hydraulic Head*

Argus Holdings Limited. (1994-1997). *Argus ONE User's Guide.*

Babu, D., Pinder, G., Niemi, A., Ahlfeld, D., & Stothoff, S. (1997, June). *PTC Manual.*