



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΤΙΤΛΟΣ: «ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟΝ
ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΟΙΡΩΝ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PRINCETON
TRANSPORT CODE (PTC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2005-2050 ΚΑΙ
ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ RCP4.5 ΚΑΙ RCP8.5 .»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΗΣ
ΑΝΝΑΣ ΝΟΜΙΚΟΥ**

ΧΑΝΙΑ 2024



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Χημικών Μηχανικών
και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Κατεύθυνση: Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΤΙΤΛΟΣ: «ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΟΝ
ΥΠΟΓΕΙΟ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΟΙΡΩΝ ΤΥΜΠΑΚΙΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PRINCETON
TRANSPORT CODE (PTC) ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2005-2050 ΚΑΙ
ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ RCP4.5 ΚΑΙ RCP8.5 .»**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΗΣ
ΑΝΝΑΣ ΝΟΜΙΚΟΥ**

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ
Καθηγητής Γεώργιος Καρατζάς
Καθηγητής Νικόλαος Νικολαΐδης
Καθηγητής Νικόλαος Παρανυχιανάκης

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

Στόχος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της επίδρασης της κλιματικής κρίσης στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής των Μοιρών-Τυμπακίου Ηρακλείου Κρήτης. Η κατάσταση του υδροφορέα εκτιμήθηκε με χρήση του υπολογιστικού μοντέλου Princeton Transport Code (PTC) για μια χρονική περίοδο 45 ετών, στο περιβάλλον του προγράμματος Argus One. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί τις μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, με σκοπό την επίλυση χωρικά μεταβαλλόμενων εξισώσεων που αφορούν την υπόγεια ροή. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη του υδροφορέα και των υδραυλικών υψών γίνεται για την χρονική περίοδο 2005-2050, λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα βροχόπτωσης για την περιοχή και χρησιμοποιώντας το μοντέλο PTC εξετάζοντας δύο ενδεχόμενα κλιματικά σενάρια, RCP 4.5 και RCP 8.5.

Στην περιοχή μελέτης, η οποία αποτελεί κέντρο αγροτικών δραστηριοτήτων, ελλοχεύει ο κίνδυνος της ερημοποίησης λόγω της εκτεταμένης εκμετάλλευσης του υπόγειου υδροφορέα, η οποία οδηγεί σταδιακά στην πτώση της στάθμης αυτού. Αρχικά, γίνεται σύντομη περιγραφή της περιοχής, λαμβάνοντας υπόψιν τα μετεωρολογικά, εδαφολογικά και υδρολογικά χαρακτηριστικά της, επιπλέον γίνεται περιγραφή και ανάλυση του υδροφορέα, του φαινομένου της υπαλμύρισης αλλά και των μοντέλων προσομοίωσης υπόγειας ροής. Σημαντική αναφορά γίνεται και στην κλιματική κρίση, τις παρατηρούμενες και τις πιθανές επιπτώσεις αυτής στους υδατικούς πόρους αλλά και στην ασφάλεια του νερού. Αφότου αναλυθεί το θεωρητικό υπόβαθρο του υπολογιστικού μοντέλου PTC και οι διαφορικές εξισώσεις που επιλύει, παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα που ακολουθήθηκαν. Η διαδικασία στησίματος του μοντέλου πραγματοποιείται δύο φορές ακολουθώντας τα ίδια βήματα, μία φορά για κάθε σενάριο. Η παράμετρος που διαφοροποιείται είναι η βροχόπτωση. Η διαδικασία ξεκινά με τον καθορισμό των 90 χρονικών περιόδων, των 3 εδαφικών επιπέδων και των οριακών συνθηκών τους. Ο αριθμός των πηγαδιών άντλησης στην περιοχή ανέρχεται στα 58. Τα δεδομένα βροχόπτωσης που εισήχθησαν στο μοντέλο, αφορούσαν ημερήσια επίπεδα βροχόπτωσης για το χρονικό διάστημα 2005-2050, τα οποία μετατράπηκαν σε μηνιαία και ομαδοποιήθηκαν αναλόγως για κάθε υγρή και κάθε ξηρή περίοδο. Μετά το τρέξιμο του μοντέλου δημιουργείται ένα πλέγμα από το οποίο επιλέγονται 4 κόμβοι και τα αποτελέσματα για τα υδραυλικά ύψη αυτών εισάγονται σε περιβάλλον MATLAB. Τελικά, εξάγονται τα τελικά αποτελέσματα των υδραυλικών υψών στις τέσσερις αυτές θέσεις για κάθε ένα κλιματικό σενάριο και παρατίθενται συμπεράσματα για την κατάσταση του υδροφορέα.

Τα αποτελέσματα της εν λόγω μελέτης με βάση τα σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5, παρατίθενται σε μορφή διαγράμματος για κάθε κόμβο ξεχωριστά και αποδεικνύουν ότι η στάθμη του υδροφορέα της περιοχής παραμένει σε ικανοποιητικά επίπεδα, παρόλο που παρουσιάζονται μικρές διακυμάνσεις.

ABSTRACT

This thesis's aim is the research of the impact of climate change on groundwater levels of the region of Moires - Timpakion Heraklion, Crete. The current situation of the groundwater aquifer was assessed by the numerical model Princeton Transport Code (PTC) for a 45year period, which was implemented in Argus One program. This model uses the numerical methods of finite elements and finite differences, in order to solve the spatially varying equations of the system. Specifically, the modelling of the aquifer and hydraulic heads takes place for the time period of 2005-2050, taking into account the rainfall data for this region and using PTC considering two different climate scenarios, RCP 4.5 and RCP 8.5.

The study area, that plays an important role in agricultural activities, is facing the great danger of desertification, due to the extreme exploitation of the groundwater aquifer, which leads to the decrease of groundwater levels. In this thesis there is a description of the study area, considering the meteorological, hydrological and soil data, a description of the aquifer and its characteristics and an analysis of the saltwater intrusion phenomenon and the groundwater flow models. There is also a significant reference to climate change, the observed and the possible effects of it in groundwater levels, water resources and water safety. The theoretical background of the model PTC is explained and the exact steps that were followed. The modelling takes place twice, due to the different scenarios, but follows the same steps. The parameter that varies is the rainfall. At first, the 90time stresses are set, the 3 different layers are defined and also their boundary conditions. The data that are processed are those from 58 pumping wells in the area. Regarding the rainfall data that were used for modelling, the initial data were daily rainfall data for the time period of 2005-2050, that were converted in monthly data and grouped in order to be summed for wet and dry seasons accordingly. Ultimately, the model runs and creates a mesh, from which 4 nodes are selected in order to further process their hydraulic heads' in MATLAB. Eventually the final results on the hydraulic heads are presented for each climate scenario alongside comments on them and conclusions.

The results of this thesis according to the climate scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 are presented in the form of diagrams for each node and they prove the groundwater levels to be stable enough through the years of modelling, despite some minor fluctuations for each selected node.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Γεώργιο Καρατζά, για την πολύτιμή βοήθεια του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας. Τα σχόλια, η επιστημονική καθοδήγηση και το ενδιαφέρον του, με οδήγησαν όχι μόνο στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και στην αποκόμιση σημαντικών γνώσεων.

Επιπλέον θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κύριο Νικόλαο Νικολαΐδη και στον κύριο Νικόλαο Παρανυχιανάκη για την συμμετοχή τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Πίνακας περιεχομένων

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1	Υδάτινοι Πόροι- Υδατικό Ισοζύγιο	9
1.2	Παγκόσμια κατανομή νερού	10
1.3	Υδρολογικές Παράμετροι	11
1.4	Υδατικό Ισοζύγιο.....	11
1.5	Υπόγεια ύδατα	12
2.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	14
2.1	ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	14
2.1.1	Παρατηρούμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα υδατικά συστήματα και στην ασφάλεια του νερού.....	14
2.1.2	Πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα υδατικά συστήματα και στην ασφάλεια του νερού	15
2.1.3	Κλιματικά σενάρια	17
2.2	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ.....	26
2.2.1	Το φαινόμενο και η προέλευση του	26
2.2.2	Ο μηχανισμός της υφαλμύρινης.....	26
2.2.3	Αντιμετώπιση της υφαλμύρινης.....	28
2.3	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΘΕΩΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ	29
2.3.1	Θεώρηση υδροφορέα	29
2.3.2	Θεώρηση συστήματος ροής.....	30
2.3.3	Γενική εξίσωση υπόγειας ροής	30
2.4	ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ.....	32
2.4.1	Μοντέλα Πεπερασμένων Διαφορών	33
2.4.2	Μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων.....	33
2.5	ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PRINCETON STRANSPORT CODE (PTC).....	34
2.5.1	Οι βασικές εξισώσεις του PTC	34
2.5.2	Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC.....	34
2.5.3	Τρισδιάστατη Ροή Υπογείων Υδάτων	35
2.5.3.1	Βασική εξίσωση	35
2.5.3.2	Οριακές Συνθήκες.....	36
3.	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	37
3.1	Κάλυψη Γης και Δραστηριότητες.....	38
3.2	Γεωλογία της περιοχής.....	41
3.3	Υδρολογία της περιοχής και λεκάνη απορροής	46
3.4	Μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής.....	48
4.	ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	51
4.1	Αρχικές Ρυθμίσεις Παραμέτρων Μοντέλου	54

4.2 Οριακές Συνθήκες Μοντέλου και Γεωτρήσεις.....	57
4.3 Παράμετρος Βροχόπτωσης.....	59
4.4 Δημιουργία πλέγματος και τρέξιμο μοντέλου	59
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	63
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	68
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	69

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Υδάτινοι Πόροι- Υδατικό Ισοζύγιο

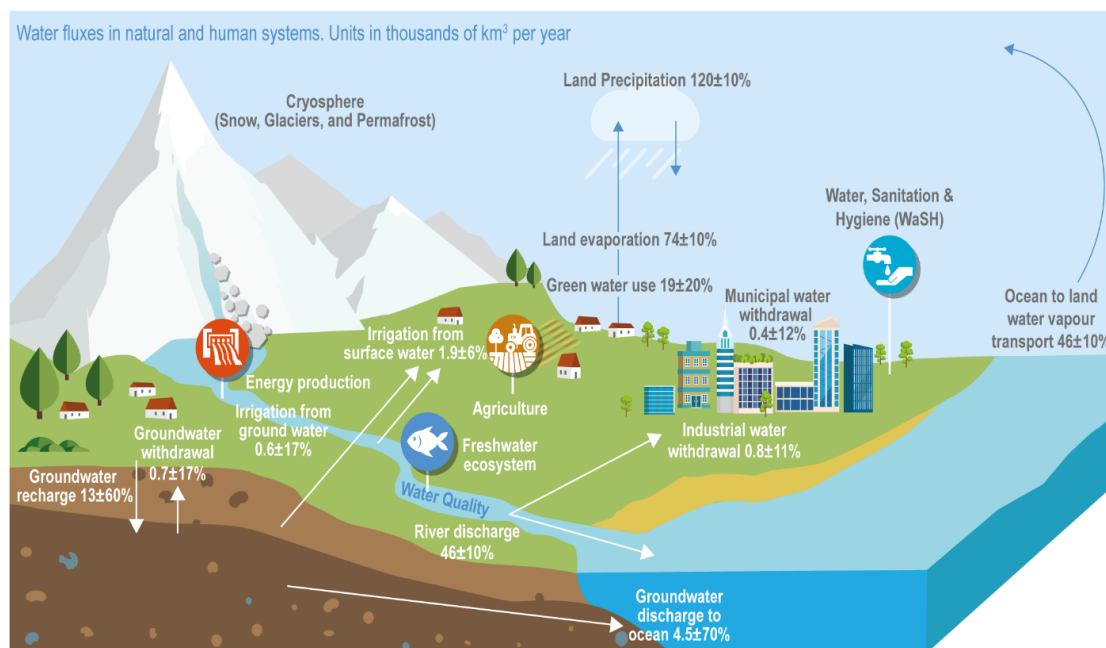
Υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος αφορά την κίνηση του νερού στην φύση, συγκεκριμένα στους ωκεανούς, στην ατμόσφαιρα αλλά και στα χερσαία οικοσυστήματα καθώς και την μεταβλητότητα της κατάστασης του, δηλαδή τις εναλλαγές του μεταξύ της υγρής, αέριας και την στερεής φάσης.

Ο υδρολογικός κύκλος συντελεί ένα περίπλοκο και τεράστιο σύστημα το οποίο είναι υπεύθυνο για την ανακυκλοφορία του νερού ανά τον πλανήτη. Η ηλιακή ακτινοβολία παράγει την απαιτούμενη ενέργεια με σκοπό την τροφοδότηση του συστήματος, οδηγώντας έτσι στην εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια των ωκεανών. Η ποσότητα του νερού έπειτα ατμοποιείται και σχηματίζει μεγάλες μάζες σύννεφων. Τα σύννεφα αυτά λόγω της κίνησης του ανέμου μετακινούνται και έπειτα υπό τις κατάλληλες συνθήκες, το νερό που μεταφέρουν κατακρημνίζεται υπό την μορφή βροχόπτωσης, χιονιού ή χαλαζιού. Ένα μέρος του νερού που φτάνει στο έδαφος, συγκρατείται από την βλάστηση και εξατμίζεται ή διαπνέεται από τα φυτά, καθώς και μια μικρή ποσότητα αυτού διηθείται προς τα κατώτερα στρώματα του εδάφους συνεισφέροντας στον υδροφορέα ως υπόγειο νερό. Τέλος, ένα μέρος του νερού πέφτει στην επιφάνεια του εδάφους και σχηματίζει ρυάκια και ποτάμια τα οποία τελικώς καταλήγουν πίσω στην θάλασσα, από όπου και η διαδικασία ξεκινά από την αρχή.

Ωστόσο, δεν συνεισφέρει όλη η ποσότητα της βροχόπτωσης στην ροή των ποταμών και των ρεμάτων, καθώς ένα μέρος αυτής επιστρέφει στην ατμόσφαιρα είτε μέσω της εξάτμισης που συμβαίνει στα επιφανειακά υδατικά σώματα, όπως οι λίμνες ή οι ποταμοί, είτε μέσω της εξάτμισης λόγω της υγρασίας του εδάφους και της διαπνοής των φυτών. (Brassington, 1998)

The water cycle, including direct human interventions



Εικόνα 1.1 Ο υδρολογικός κύκλος συμπεριλαμβανομένων των ανθρωπογενών παρεμβάσεων (Πηγή: IPCC Sixth Assessment Report, 2022)

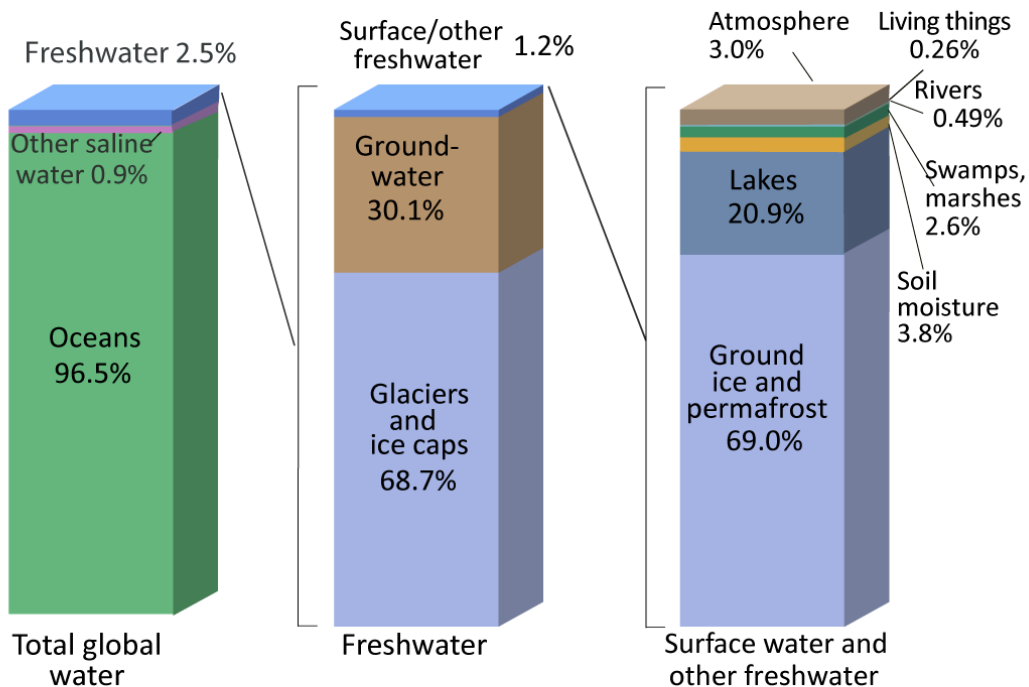
1.2 Παγκόσμια κατανομή νερού

Το νερό αποτελεί ένα από τα πιο βασικά αγαθά που προσφέρει η φύση με σκοπό την διατήρηση της ανθρώπινης ζωής και όχι μόνο. Όλοι οι έμβιοι οργανισμοί, άνθρωποι, ζώα και φυτά, εξαρτώνται από αυτό.

Το νερό στον πλανήτη μας διακρίνεται στα επιφανειακά νερά και στα υπόγεια νερά. Τα επιφανειακά νερά περιλαμβάνουν τα νερά στους ωκεανούς, τα αλμυρά νερά σε λίμνες, τα γλυκά νερά σε λίμνες και ποταμούς, τους παγετώνες αλλά και την ποσότητα νερού που εμπεριέχεται στη βιομάζα. Τα υπόγεια νερά αφορούν το νερό στην ακόρεστη και κορεσμένη ζώνη μέχρι και βάθος 800-4000 μέτρων.

Έπειτα από επικαιροποιημένες μετρήσεις έχει βρεθεί ότι η συνολική ποσότητα νερού που υπάρχει στον πλανήτη Γη είναι περίπου 1370 εκατομμύρια κυβικά χιλιόμετρα, με το μεγαλύτερο μέρος αυτής να αναλογεί στους ωκεανούς, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν το 97,3% του συνολικού όγκου του νερού. Το νερό αυτό είναι και δεν καθίσταται πόσιμο και έτσι απαιτεί διεργασίες με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για οικιακές, αγροτικές και αρδευτικές ανάγκες. Ένα ποσοστό περίπου 2.15% έχει αποδειχθεί ότι είναι αποθηκευμένο σε μορφή παγετώνων και άρα δεν είναι εκμεταλλεύσιμο. Η υπόλοιπη ποσότητα νερού στον πλανήτη Γη λοιπόν αντιστοιχεί στις ποσότητες νερού των ποταμών, των ρυακιών, των λιμνών, των πάγων, των υπογείων υδάτων αλλά και σε μικρά ποσοστά υδρατμών στην ατμόσφαιρα, στην βιομάζα και στην υγρασία των εδαφών. (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018)

Where is Earth's Water?



Source: Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources. (Numbers are rounded).

Εικόνα 1.2 Παγκόσμια κατανομή νερού

1.3 Υδρολογικές Παράμετροι

Είναι αναγκαίο, προτού παρουσιαστεί το υδατικό ισοζύγιο, να αναφερθούν οι υδρολογικές παράμετροι που συμμετέχουν σε αυτό. Η κατακρήμνιση, η εξάτμιση, η διαπνοή, η διήθηση και η απορροή (επιφανειακή και υπόγεια) είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες οι οποίοι χρησιμεύουν στην έκφραση του υδατικού ισοζυγίου.

Η κατακρήμνιση P ή αλλιώς βροχόπτωση, μπορεί να λάβει διάφορες μορφές καθώς αυτό εξαρτάται από τις υπόλοιπες ατμοσφαιρικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή. Υπάρχουν οι βροχοπτώσεις λόγω κινήσεων θερμών και ψυχρών μαζών, οι βροχοπτώσεις λόγω φαινομένων μεταφοράς θερμότητας και οι βροχοπτώσεις λόγω ορεογραφικών επιδράσεων. Η κατακρήμνιση μελετάται ως προς το ύψος, την ένταση και την διάρκεια της και αποτελεί μια σημαντική παράμετρο του υδρολογικού κύκλου.

Η εξάτμιση E , αφορά την εξάτμιση του ποσοστού της υγρασίας, λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία θερμαίνει τα ύδατα και την ατμόσφαιρα. Εξίσου σημαντική παράμετρος, όσο η κατακρήμνιση, για τον υδρολογικό κύκλο, με την διαφορά ότι κυρίως μελετάται ο ρυθμός αυτής.

Η διαπνοή T , ορίζεται ως η μεταβολή φάσης του νερού καθώς αυτό περνά από την υγρή στην αέρια φάση, δηλαδή αυτή των ατμών, λόγω της πεπτικής διαδικασίας των φυτών, του μεταβολισμού τους. Η εξάτμιση και η διαπνοή συνήθως λαμβάνονται υπόψιν από κοινού καθώς μαζί αποτελούν τις υδρολογικές απώλειες, δηλαδή την ποσότητα της κατακρήμνισης η οποία δεν αποθηκεύεται στα υπόγεια ύδατα και άρα δεν είναι εκμεταλλεύσιμη.

Η απορροή, και πιο συγκεκριμένα η επιφανειακή απορροή R και η υπόγεια G , αποτελούν τις ποσότητες ύδατος που κατακρημνίζονται και αποθηκεύονται είτε επιφανειακά σε ωκεανούς, λίμνες και ποταμούς είτε υπόγεια, συνεισφέροντας στον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων. Η απορροή μελετάται ως προς τον όγκο και την παροχή και αποτελεί χαρακτηριστική διεργασία του υδρολογικού κύκλου.

(Μιμίκου και Μπαλάς, 2018)

1.4 Υδατικό Ισοζύγιο

Το υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής αποτελεί μια μαθηματική έκφραση του υδρολογικού της κύκλου. Ουσιαστικά, ο λόγος της μεταβολής της αποθήκευσης νερού ΔS στη λεκάνη απορροής προς το χρονικό διάστημα Δt , ισούται με την διαφορά μεταξύ εισροής και εκροής στην λεκάνη.

$$\frac{\Delta S}{\Delta t} = \bar{I} - \bar{O}$$

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

Αν η λεκάνη απορροής θεωρηθεί ως ένα σύστημα, με γνωστές μεταβλητές μόνο αυτές της εισροής και της εκροής και άγνωστες αυτές των εσωτερικών μεταβλητών, τότε το υδρολογικό ισοζύγιο μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

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

Ο δείκτης 1 αντιστοιχεί στην αρχική τιμή της εκάστοτε μεταβλητής και ο δείκτης 2 στην τελική τιμή. Αν οι μεταβλητές I και O μεταβάλλονται συνεχώς με τον χρόνο t, τότε η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\frac{dS(t)}{dt} = I(t) - O(t)$$

Σε μια λεκάνη απορροής, το ποσοστό ύδατος που εισρέει προέρχεται από βροχόπτωση, χιονόπτωση, χαλάζι και άλλες μορφές κατακρήμνισης. Το νερό που εισέρχεται στη λεκάνη, έχει την δυνατότητα να εκρέει ή να αποθηκεύεται. Η εκροή κυρίως συμβαίνει λόγω της απορροής. Η απορροή διακρίνεται σε επιφανειακή απορροή, ενδιάμεση απορροή και υπόγεια απορροή. Άλλοι παράγοντες εκροής του νερού είναι η εξάτμιση, η διαπνοή και η διήθηση. Ομοίως, η ικανότητα αποθήκευσης της λεκάνης διακρίνεται από διάφορες συνιστώσες, την επιφανειακή αποθήκευση (η οποία συμβαίνει στο έδαφος και συμπεριλαμβάνει και την αποθήκευση σε ταμιευτήρες ή ρέματα), την υπεδάφια αποθήκευση (η οποία λαμβάνει χώρα μέσα στη ριζική ζώνη), την υπόγεια αποθήκευση (η οποία λαμβάνει χώρα μέσα στους υδροφορείς) και την παρεμπόδιση (η οποία συμβαίνει λόγω βλάστησης, κτιριακών υποδομών και άλλα). Συνοψίζοντας, η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου λαμβάνοντας όλες τις παραπάνω μεταβλητές υπόψιν, είναι η εξής:

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

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, η μεταβολή της αποθηκευτικότητας μιας λεκάνης απορροής ισούται με την ποσότητα ύδατος που κατακρημνίζεται P, μείον την ποσότητα ύδατος που απορρέει επιφανειακά R, μείον την ποσότητα που απορρέει υπόγεια G, μείον την ποσότητα που εξατμίζεται E, μείον την ποσότητα που διαπνέεται από την βλάστηση T. (Μιμίκου και Μπαλτάς, 2018)

1.5 Υπόγεια ύδατα

Περίπου 1.7% του νερού που βρίσκεται στον πλανήτη αντιστοιχεί στα υπόγεια νερά και περίπου 30% του φρέσκου νερού στον πλανήτη εμφανίζεται με την μορφή υπόγειου ύδατος. Ο συνολικός όγκος των υπογείων υδάτων είναι 23.400.400 κυβικά χιλιόμετρα, με το 54% αυτού να είναι αλμυρό νερό και το υπόλοιπο 46%, δηλαδή 10.530.000 κυβικά χιλιόμετρα, να είναι φρέσκο. Μεγάλο ποσοστό των υδάτων αυτών βρίσκονται σε μεγάλα βάθη και συνεπώς η άντληση τους καθίσταται δύσκολη και ενεργοβόρα. Σε περιπτώσεις ρηχών υδροφορέων όμως, η άντληση φρέσκου νερού είναι δυνατή. (US Geological survey)

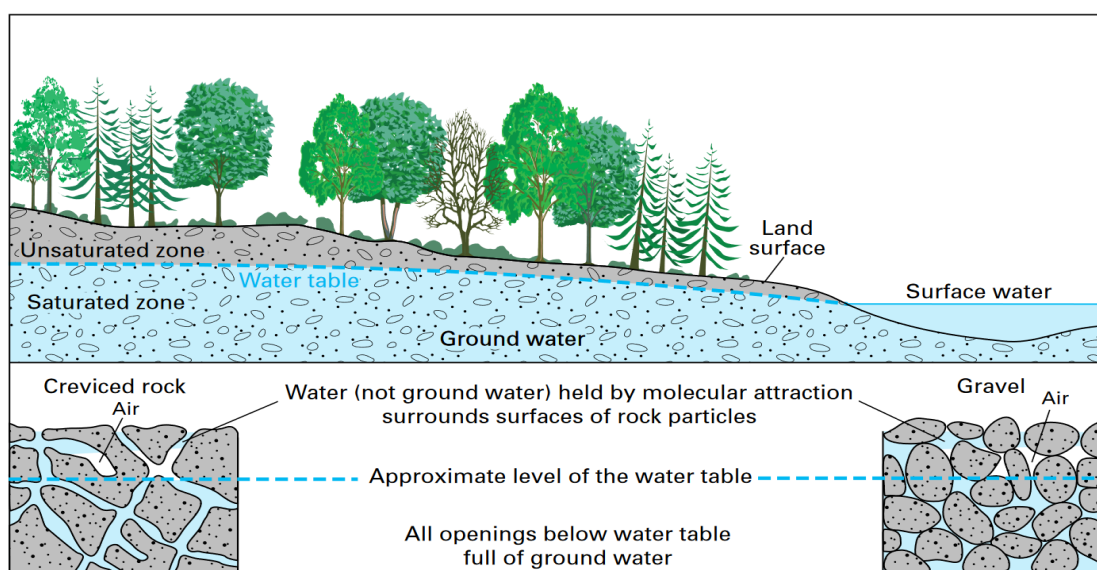
Πίνακας 1.1 Ποσοστά υπογείων υδάτων

Υδάτινη πηγή	Υδάτινος όγκος σε κυβικά μίλια	Υδάτινος όγκος σε κυβικά χιλιόμετρα	Ποσοστό συνολικής ποσότητας ύδατος	Ποσότητα συνολικής ποσότητας φρέσκου νερού
Φρέσκο (Γλυκό) Υπόγειο νερό	2.526.000	10.530,000	0.8%	30.1%
Θαλασσινό (Αλμυρό) Υπόγειο νερό	5.614.000	23.400.000	1.7%	-
Συνολική ποσότητα νερού παγκοσμίως	332.500.000	1.386.000.000	-	-

Πηγή: Gleick, P. H., 1996: *Water resources. In Encyclopedia of Climate and Weather*, ed. by S. H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2, pp.817-823.

Σε παράκτιους υδροφορείς που υπάρχουν και οι οποίοι είναι εκμεταλλεύσιμοι μέσω αντλήσεων για οικιακή, αγροτική και βιομηχανική χρήση, υπάρχει μια σταθερή ζώνη η οποία χωρίζει το αλμυρό από το φρέσκο νερό. Έτσι η εκμετάλλευση του υδροφορέα, μέσω αντλήσεων, αποτελεί μια ασφαλή επιλογή, αν εφαρμόζεται η τήρηση των κανόνων άντλησης.

Ωστόσο, η στάθμη του νερού σε έναν υδροφορέα μπορεί να μεταβληθεί σε βάθος χρόνου, λόγω φυσικών αλλαγών στον υδρολογικό κύκλο, λόγω αλλαγών των ποσοτήτων του υπόγειου νερού που αντλείται, στα μοτίβα της βροχόπτωσης αλλά και στους γεωλογικούς σχηματισμούς. Οι ανθρωπογενείς επεμβάσεις στο τοπίο αλλά και οι υπεραντλήσεις δύνανται να επηρεάσουν αρνητικά την στάθμη του υπόγειου νερού και να προκαλέσουν υφαλμύριση σε παράκτιους υδροφορείς.. Το φαινόμενο θα αναλυθεί περαιτέρω παρακάτω. (US Geological survey)



How ground water occurs in rocks.

Εικόνα 1.5 Κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη, Υπόγεια ύδατα (Πηγή: US Geological Survey)

Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό ότι τα υπόγεια ύδατα αποτελούν σημαντικό κομμάτι της σχέσης του ανθρώπου με το νερό. Η σωστή διαχείριση αυτών κρίνεται αναγκαία και σημαντική. Για αυτόν τον λόγο έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες ελέγχου, εμπλουτισμού και εξυγίανσης αυτών.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

2.1 ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

2.1.1 Παρατηρούμενες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα υδατικά συστήματα και στην ασφάλεια του νερού

Στις μέρες μας, περίπου ο μισός πληθυσμός του πλανήτη βιώνει την έλλειψη νερού για τουλάχιστον ένα μήνα τον χρόνο, λόγω κλιματικών και άλλων παραγόντων. Η κλιματική κρίση η οποία οφείλεται σε ανθρωπογενείς παράγοντες έχει οδηγήσει στην έλλειψη νερού και επιπλέον έχει επιδεινώσει τα ήδη υπάρχοντα προβλήματα διαχείρισης υδατικού δυναμικού στον πλανήτη, τα οποία σχετίζονται με διάφορους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες, λόγω της ανεπαρκούς διαχείρισης των υδατικών πόρων.

Η κλιματική κρίση έχει επηρεάσει τον παγκόσμιο υδρολογικό κύκλο, γεγονός το οποίο επηρεάζει τις κοινωνίες με πολλούς τρόπους. Αξίζει να σημειωθεί ωστόσο ότι οι οικονομικές και κοινωνικές συνέπειες της έλλειψης νερού είναι δυσανάλογες ως προς τον γενικό πληθυσμό του πλανήτη καθώς πλήττουν κυρίως τις χαμηλού βιοτικού επιπέδου χώρες.

Φαινόμενα όπως η ξηρασία και οι πλημμύρες είναι απόρροια της εντατικοποίησης των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων, με εμφανή αρνητικά αποτελέσματα στον τομέα της παραγωγής ενέργειας, την γεωργία και γενικά το απόθεμα των υδατικών πόρων. Επιπλέον, ανά τον κόσμο, έχουν παρατηρηθεί ασυνήθιστα αυξημένα επίπεδα βροχόπτωσης, καθώς η ένταση της βροχόπτωσης έχει αυξηθεί σε πολλές περιοχές από το 1950 και έπειτα. Σχεδόν 709 εκατομμύρια άνθρωποι ζουν σε περιοχές όπου η μέγιστη ετήσια βροχόπτωση έχει αυξηθεί συγκριτικά με περιοχές όπου έχει μειωθεί (86 εκατομμύρια άνθρωποι) μετά το 1950.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, ο παγκόσμιος ρυθμός μείωσης μάζας των παγετώνων, έχει λάβει την μεγαλύτερη τιμή που καταγράφηκε από τότε που ξεκίνησαν οι μετρήσεις για την μάζα των παγετώνων έναν αιώνα πριν. Το λιώσιμο το πάγων, η μείωση του χιονιού και η τήξη του μόνιμου στρώματος πάγου, αποτελούν απειλές για την ανθρώπινη ζωή καθώς μπορούν να οδηγήσουν σε πλημμύρες. Είναι λοιπόν φανερό ότι ο υδρολογικός κύκλος και τα υδατικά συστήματα του πλανήτη βιώνουν έντονες αλλαγές. (IPCC AR6 Technical summary, 2022 Report σελ.49-50)

2.1.2 Πιθανές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στα υδατικά συστήματα και στην ασφάλεια του νερού

Με την πάροδο του χρόνου, ελλοχεύουν πολλοί πιθανοί κίνδυνοι που σχετίζονται με την διαχείριση του νερού για τις κοινωνίες. Ανάλογα με την διακύμανση της θερμοκρασίας του πλανήτη και συγκεκριμένα την αύξηση, η έλλειψη νερού θα γίνει αισθητή σε διάφορα μέρη του πλανήτη. Τα κλιματικά σενάρια δείχνουν ότι προς το τέλος του αιώνα, και δίχως να έχουν παρθεί σοβαρά μέτρα για την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης, η θερμοκρασία θα έχει αυξηθεί στους 4°C οδηγώντας σε μεγάλη αύξηση της ροής του νερού σε περίπου 10% της έκτασης της γης, επηρεάζοντας περισσότερο από 2 εκατομμύρια ανθρώπους. Το λιώσιμο των πάγων και η τήξη του μόνιμου στρώματος των πάγων θα συνεχίσουν να συμβαίνουν καθ' όλη την διάρκεια του 21^{ου} αιώνα ακόμη και αν η θερμοκρασία του πλανήτη συγκρατηθεί στο επίπεδο του 1.5°C. (IPCC AR6 Technical summary, 2022 Report)

Οι αλλαγές που πρόκειται να υποστεί ο υδρολογικός κύκλος θα επηρεάσουν όλα τα οικοσυστήματα. Η προβλεπόμενη αύξηση στην ένταση της βροχόπτωσης θα αυξήσει τις τοπικές πλημμύρες. Πυρκαγιές και διάβρωση του εδάφους λόγω αποψίλωσης των δασών ενδέχεται να υποβαθμίσουν τα αποθέματα νερού. Επιπλέον, οι ενδεχόμενες αλλαγές στον υδρολογικό κύκλο, οι οποίες συμπεριλαμβάνουν αύξηση στην εξατμισοδιαπνοή των φυτών και στην βροχόπτωση, αλλοιωμένα χωρικά μοτίβα και μεταβολές στον εμπλουτισμό των υπογείων υδάτων, της απορροής και της ροής, θα επιδράσουν αρνητικά στα χερσαία και στα παράκτια οικοσυστήματα αλλά και στα οικοσυστήματα φρέσκου νερού.

Η διακυβερνητική σύνοδος για το κλίμα (IPCC) κατά την πέμπτη της συνάντηση (AR5) συμπέρανε ότι το εύρος των προβλεπόμενων αλλαγών της κλιματικής κρίσης στα υπόγεια ύδατα θα είναι μεγάλο, συμπεριλαμβανομένων ωστόσο σημαντικών αστοχιών λόγω διαφόρων αβεβαιοτήτων στα υπάρχοντα μοντέλα. Στην έκτη της συνεδρίαση (AR6), η σύνοδος κατέληξε με ισχυρή βεβαιότητα, ότι η αύξηση στα υπόγεια αποθέματα του νερού δεν μπορεί να διασφαλιστεί μόνο με βάση τις προβλεπόμενες αυξήσεις στα επίπεδα της βροχόπτωσης, εκτός αν οι ήδη μη βιώσιμες εφαρμοζόμενες πρακτικές διαχείρισης υπογείων νερών ανατραπούν.

Οι προβλεπόμενες επιπτώσεις της κλιματικής κρίσης στα υπόγεια υδατικά συστήματα προσομοιώνονται συνήθως μέσω μοντέλων τοπικής ή παγκόσμιας κλίμακας. Πιο συγκεκριμένα, παγκοσμίως το σύνολο των αντλήσεων (Global total) προβλέπεται να αυξηθεί από 952 km³/ χρόνο (2010) σε 1621 km³/ χρόνο (2099) και οι μη ανανεώσιμες αντλήσεις υπογείων υδάτων από 304 km³/ χρόνο (2010) σε 597 km³/ χρόνο (2099) (Bierkens and Wada, 2019). Ταυτόχρονα, η εξάντληση των υπογείων υδατικών αποθεμάτων προβλέπεται να αυξηθεί από 204 (± 30) km³/ χρόνο (2000) σε 427 (± 56) km³/ χρόνο (2099) (Wada, 2016). Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί, ότι μια μελέτη διεθνούς κλίμακας συγκεντρωτικών εφαρμογών μοντέλων, έδειξε τάση μείωσης των φορτίσεων των υπογείων νερών στην κεντρική Αμερική, την Μεσόγειο, την Ανατολική Κίνα και την Βραζιλία ενώ αυξητική τάση στην Βόρεια Ευρώπη και στην Ανατολική Αφρική (Reinecke et al., 2021).

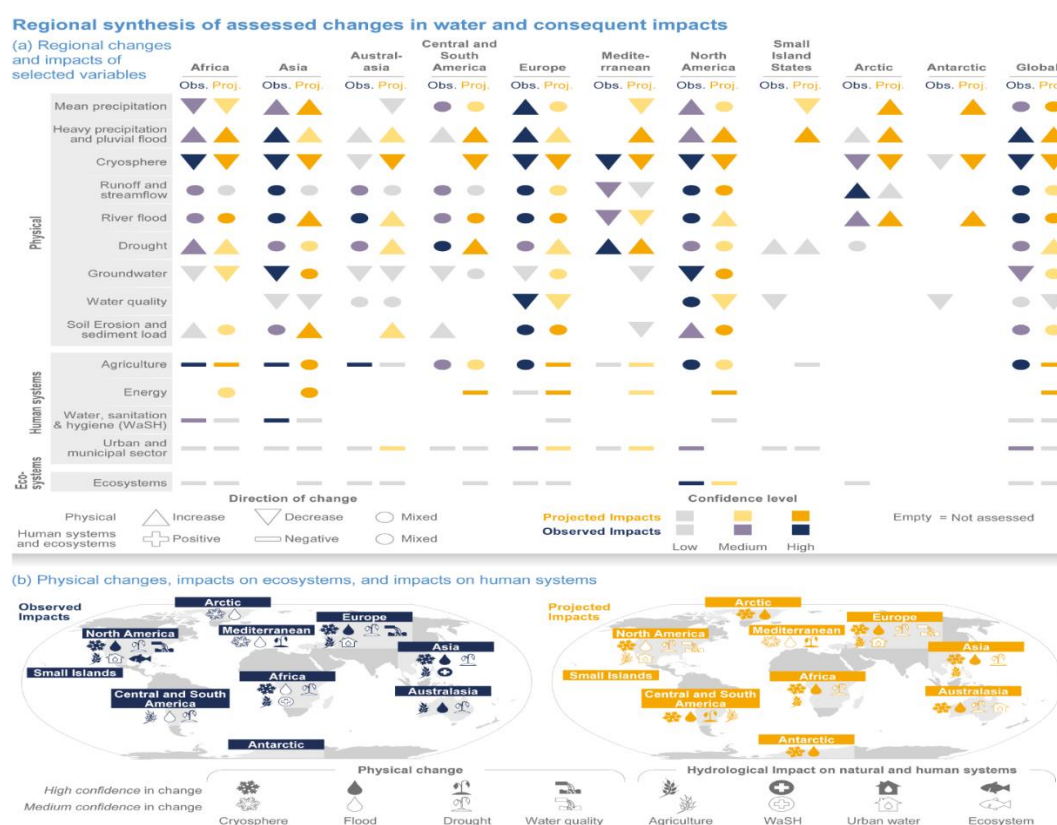
Αξίζει να σημειωθεί ότι εκτός από τα αμιγώς υδατικά συστήματα, η κλιματική αλλαγή δύναται να επηρεάσει αρνητικά και τα οικοσυστήματα που εξαρτώνται από τα υπόγεια ύδατα. Η προβλεπόμενη αύξηση της έντασης των βροχοπτώσεων μπορεί να συμβάλει στην ρύπανση των υδροφορέων συμπαρασύροντας χημικές ενώσεις που

ενυπάρχουν στα λιπάσματα, στα παρασιτοκτόνα αλλά και στα αντιβιοτικά που χρησιμοποιούνται στις καλλιέργειες. Μέχρι το 2050, η κρίσιμη ροή προβλέπεται να έχει επηρεαστεί 42% - 79% στις λεκάνες απορροής του πλανήτη, έχοντας έτσι αρνητικό αντίκτυπο στα οικοσυστήματα φρέσκου νερού και επιβαρύνοντας και άλλο τις λεκάνες οι οποίες εκμεταλλεύονται ήδη. (Amanambu et al., 2020).

Όσον αφορά την στάθμη της θάλασσας, η προβλεπόμενη αύξηση του επιπέδου αυτής, μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα υφαλμύρινσης υδροφορέων σε περιοχές χαμηλού υψομέτρου και νησιά, καθώς επίσης και να απειλήσει παράκτια οικοσυστήματα σε ήδη ευάλωτες χώρες (Befus et al., 2020). Η στάθμη της θάλασσας προβλέπεται να αυξηθεί από 0.57 (± 0.09) mm/χρόνο όπως είχε υπολογιστεί το 2000, σε 0.82 (± 0.13) mm/χρόνο μέχρι το 2050, λόγω της διαρκώς αυξανόμενης τάσης των αντλήσεων των υπογείων υδάτων (Wada, 2017).

Εν κατακλείδι, παρόλο που υπάρχουν αβεβαιότητες ως προς την συμπεριφορά των υπόγειων υδάτων λόγω έλλειψης δεδομένων για τις λιγότερο αναπτυγμένες περιοχές αλλά και αβεβαιοτήτων για τον πιθανό αντίκτυπο του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα και στην εξατμισοδιαπνοή της βλάστησης (Reinecke et al., 2021), τα μοντέλα παρουσιάζουν σοβαρές επιπτώσεις της κλιματικής κρίσης στα υπόγεια νερά.

(IPCC AR6 2022 Report, κεφ.4 , 4.4.6 Projected changes in Groundwater)



Εικόνα 2.1.2 Προβλεπόμενες και παρατηρούμενες αλλαγές στα υδατικά συστήματα λόγω κλιματικής κρίσης (Πηγή: IPCC Sixth Assessment Report, 2022)

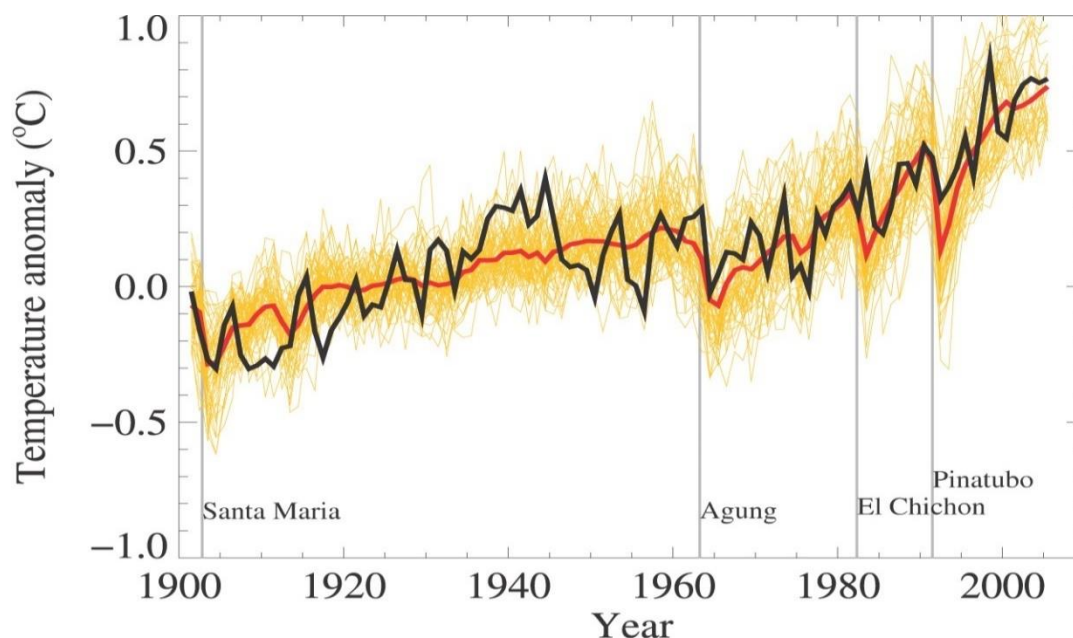
Με σκοπό να διαπιστωθεί η συμπεριφορά του πλανήτη και πιο συγκεκριμένα του κλιματικού συστήματος αυτού, απέναντι στις προκλήσεις που διαρκώς δέχεται, η διεθνής επιστημονική κοινότητα έχει αναπτύξει κλιματικά μοντέλα. Οι παράμετροι που εισάγονται στα μοντέλα αυτά είναι όλες οι μεταβολές των φυσικών παραγόντων αλλά και οι συγκεντρώσεις των αερίων του θερμοκηπίου, καθώς είναι γνωστό και σαφές ότι οι υπάρχουσες και οι μελλοντικές εκπομπές ρύπων του φαινομένου το θερμοκηπίου καθορίζουν την κλιματική ισορροπία. Οι ρύποι αυτοί όπως και τα αερολύματα προέρχονται κυρίως από ανθρωπογενείς δραστηριότητες και έχουν βαρύνουσα σημασία. Είναι αναγκαίος επομένως ο έλεγχος αυτών έτσι ώστε να επιτευχθεί μετριασμός της κατάστασης.

Πιο συγκεκριμένα όσον αφορά τα κλιματικά μοντέλα, για τις προβλέψεις των αλλαγών στο κλιματικό σύστημα του πλανήτη, χρησιμοποιείται μια πληθώρα κλιματικών μοντέλων από πιο απλά μέχρι πιο σύνθετα, μοντέλα μέτριας πολυπλοκότητας, περιεκτικά κλιματικά μοντέλα και μοντέλα συστήματος της γης (Earth System Models (ESMs)).

Τα απλά κλιματικά μοντέλα προσομοιώνουν συγκεκριμένες κλιματικές διεργασίες, ενώ τα σύνθετα είναι αυτά που λαμβάνουν υπόψιν περισσότερες διεργασίες. Τα σύνθετα μοντέλα που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα εξής

- ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΑ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΑ ΩΚΕΑΝΙΑ ΓΕΝΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ (AOGCMs): είναι τα μοντέλα τα οποία έχουν την δυνατότητα να προσομοιώνουν τη γενική συμπεριφορά του κλιματικού συστήματος και την δυναμική των φυσικών χαρακτηριστικών του (ατμόσφαιρα, ωκεανοί, γη και πάγοι). Παρέχουν αξιόπιστες ποσοτικές εκτιμήσεις για τις μελλοντικές αλλαγές λόγω της επίδρασης των αερίων του θερμοκηπίου και των αερολυμάτων, κυρίως χρησιμοποιώντας μεγαλύτερες ή ηπειρωτικές κλίμακες.
- ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΗΣ (ESMs): είναι τα μοντέλα που έχοντας ως βάση τα AOGCMs, επεκτείνονται και στην απεικόνιση των βιογεωχημικών κύκλων (άνθρακας, θείο, άζωτο κ.λπ.). Αποτελούν εργαλεία για την κατανόηση και την προσομοίωση προηγούμενων και μελλοντικών αντιδράσεων του κλιματικού συστήματος ως προς τους εξωγενείς παράγοντες που επιδρούν σε αυτό.
- ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΗΣ ΕΝΔΙΑΜΕΣΗΣ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑΣ (EMICs): είναι τα μοντέλα τα οποία επιχειρούν να συμπεριλάβουν τους φυσικούς παράγοντες του συστήματος της Γης, ωστόσο όμως αποτελούν έναν όχι τόσο ακριβή τρόπο απεικόνισης όπως τα προηγούμενα δύο μοντέλα.
- ΤΟΠΙΚΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ (RCMs): είναι τα μοντέλα που αφορούν περιορισμένη έκταση. Λαμβάνουν υπόψιν τις κλιματικές διεργασίες όπως και τα AOGCMs, ωστόσο «τρέχουν» χωρίς να δίνουν πληροφορίες για τους ωκεανούς και τους πάγους. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τις προσομοιώσεις των παγκόσμιων μοντέλων, δίνουν αποτελέσματα για την επίδραση της κλιματικής κρίσης σε τοπικό επίπεδο, μέσω του υποβιβασμού της κλίμακας (downscaling method). Με άλλα λόγια, μετατρέπουν την παγκόσμια κλίμακα σε τοπική με σκοπό να παράσχουν λεπτομερείς πληροφορίες για την εν λόγω περιοχή.

Στις παραπάνω κατηγορίες ανήκουν δεκάδες άλλα μοντέλα που στόχο έχουν να προσομοιώνουν τις κλιματικές αλλαγές βασιζόμενα σε ένα σύστημα σεναρίων ανθρωπογενών επεμβάσεων. (Flato et al., Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)



Εικόνα 2.1.3.1 Παγκόσμια μέση θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια κατά την διάρκεια του 20^{ου} αιώνα απεικονιζόμενη από παρατηρήσεις (μαύρη γραμμή) και όπως έχει ληφθεί από 58 προσομοιώσεις 14 διαφορετικών κλιματικών μοντέλων λαμβάνοντας υπόψιν φυσικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες (κίτρινη γραμμή). Η μέση τιμή των παραπάνω επίσης απεικονίζεται (κόκκινη γραμμή). Οι θερμοκρασιακές ανωμαλίες μεταξύ 1901 και 1950 εμφανίζονται σχετικά ως προς τη μέση τιμή. Οι κάθετες γραμμές (γκρι γραμμή) υποδηλώνουν τις χρονικές στιγμές όπου εκδηλώθηκαν ηφαιστειακές εκρήξεις. (Πηγή: Technical Summary. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change)

Ένα νέο σύστημα σεναρίων, το Representative Concentration Pathways (RCPs), χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις των νέων κλιματικών μοντέλων, το οποίο εισάχθηκε υπό το πλαίσιο του Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) του παγκόσμιου προγράμματος κλιματικής έρευνας (World Climate Research Programme). Τα σενάρια RCPs αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας Integrated Assessment Models (IAMs) τα οποία συνήθως περιλαμβάνουν οικονομικούς και δημογραφικούς δείκτες, στοιχεία που αφορούν την ενέργεια και ένα απλό μοντέλο το οποίο μπορεί να παραγάγει διαγράμματα συγκέντρωσης των ρύπων του φαινομένου του θερμοκηπίου αναλογικά με τον χρόνο. Οι χρονικές περίοδοι των ρύπων έπεται από τα RCPs μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα μοντέλα ESMs, τα οποία περιλαμβάνουν στοιχεία βιοχημείας που αφορούν τον κύκλο του άνθρακα στα υδατικά και χερσαία οικοσυστήματα.

Τα κλιματικά σενάρια αυτά (RCPs) αντικατοπτρίζουν 4 διαφορετικά μονοπάτια εξέλιξης των αερίων του θερμοκηπίου και των συγκεντρώσεών τους, των αερίων ρύπων αλλά και των χρήσεων γης καθ' όλη την διάρκεια του 21^{ου} αιώνα. Αποτελούν ένα ευρύτερο σύνολο σεναρίων μετριασμού (mitigation scenarios) της κλιματικής

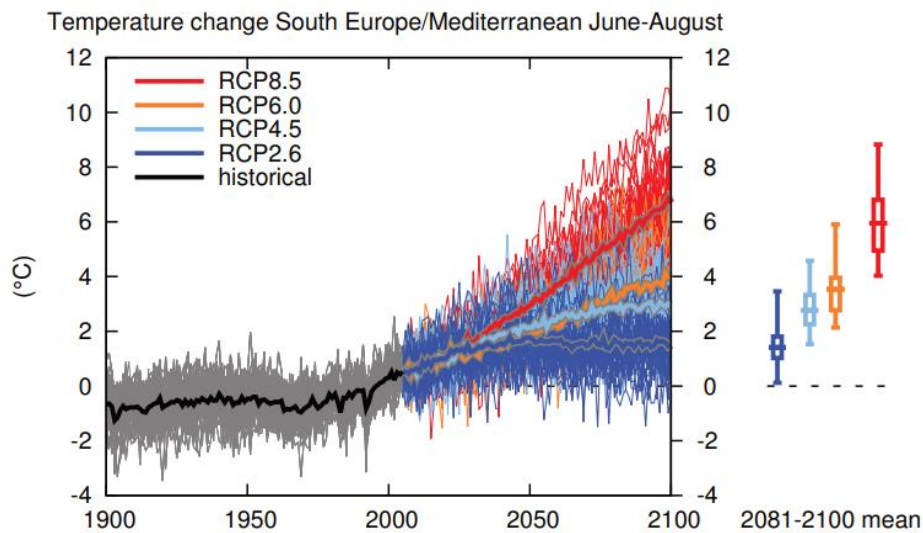
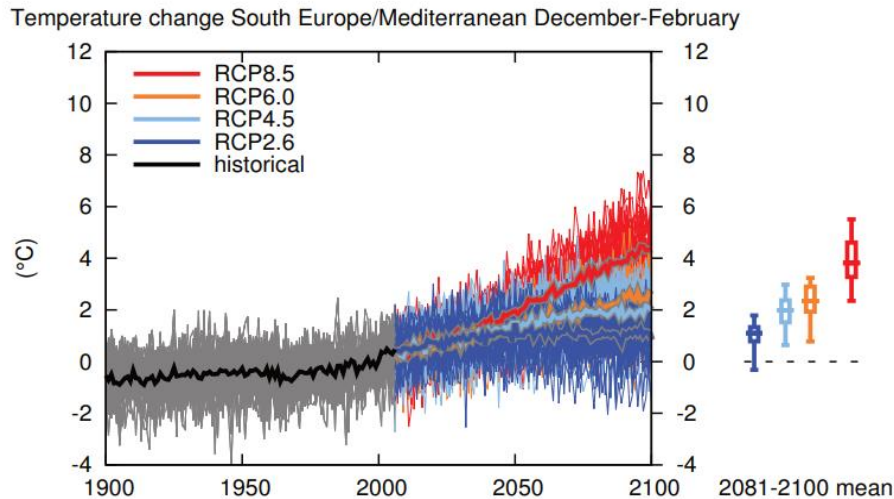
κρίσης και έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να αφορούν διαφορετικές τιμές ενεργειακού εξαναγκασμού (radiative forcing) μέχρι το 2100. Τα σενάρια αυτά συμπεριλαμβάνουν ένα ήπιο σενάριο μετριασμού (RCP2.6), δύο ενδιάμεσα σενάρια (RCP4.5 and RCP6) και ένα σενάριο υψηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (RCP8.5). Με άλλα λόγια, τα σενάρια αφορούν τις τιμές 2.6, 4.5, 6.0 και 8.5 W/m².

Με βάση την αναφορά που συντάχτηκε από το επιστημονικό προσωπικό στην διάσκεψη για το κλίμα το 2007 (IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report), η παράμετρος του ενεργειακού εξαναγκασμού (Radiative forcing) αποτελεί έναν τρόπο μέτρησης της επιρροής που έχει ένας οποιοδήποτε παράγοντας, ο οποίος αλλοιώνει την ισορροπία της εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας, στο σύστημα Γης-Ατμόσφαιρας. Επιπλέον, είναι ένας δείκτης της σημασίας που έχει ο εν λόγω παράγοντας ως πιθανός μηχανισμός της κλιματικής κρίσης και εκφράζεται σε W/m².

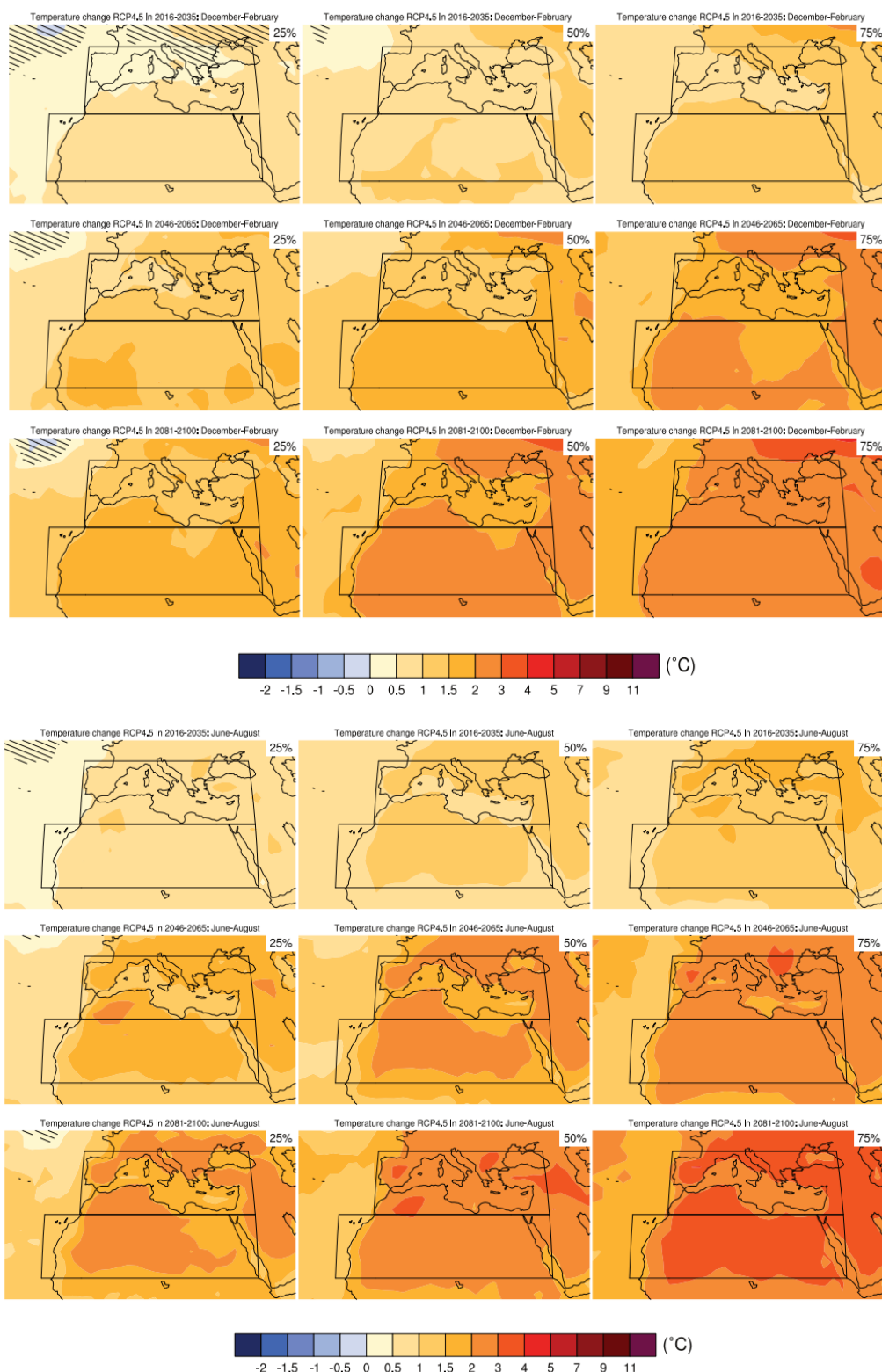
Όσον αφορά τις προβλεπόμενες μακροχρόνιες αλλαγές στον υδρολογικό κύκλο, οι αλλαγές όσον αφορά τις βροχοπτώσεις δεν θα είναι γραμμικές και ομοιόμορφες για όλο τον πλανήτη. Έχει βρεθεί ότι υπό το κλιματικό σενάριο RCP8.5, θα υπάρξουν σοβαρές αλλαγές που αφορούν την μέση βροχόπτωση στα πιο θερμά κλίματα. Η τιμή της μέσης βροχόπτωσης παγκοσμίως, θα αυξηθεί με ρυθμό ανά βαθμό Κελσίου μικρότερο από τον ρυθμό της εξάτμισης των υδατικών μαζών στην ατμόσφαιρα. Είναι πιθανό να αυξηθεί 1-3% °C⁻¹ με βάση όλα τα κλιματικά σενάρια εκτός του RCP2.6.

Ορισμένες περιοχές θα βιώσουν σοβαρή αύξηση βροχόπτωσης ενώ άλλες δεν θα υποστούν καμία σημαντική αλλαγή. Λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη, η παράμετρος της ετήσιας μέσης βροχόπτωσης θα παρουσιάσει αύξηση καθώς η εναλλαγή μεταξύ ξηρής και υγρής περιόδου θα ενταθεί. Το γενικό μοτίβο των αλλαγών αυτών, υπό το σενάριο RCP8.5, υποδηλώνει ότι οι περιοχές υψηλού υψομέτρου καθώς και οι περιοχές που βρίσκονται στον Ισημερινό, είναι περισσότερο πιθανό να βιώσουν επεισόδια δυνατών βροχοπτώσεων μέχρι το τέλος του αιώνα, λόγω αυξημένων επιπέδων υγρασίας στην τροπόσφαιρα αλλά και λόγω αυξημένης μεταφοράς μάζας νερού η οποία εξατμίζεται στις τροπικές ζώνες. Περιοχές μεσαίου υψομέτρου, μερικώς τροπικές και μερικώς ξηρές είναι πιθανό να βιώσουν λιγότερο έντονα επεισόδια βροχόπτωσης υπό το σενάριο RCP8.5. Ωστόσο τα αυξημένα επίπεδα βροχοπτώσεων θα ενταθούν αισθητά μετά το 2050.

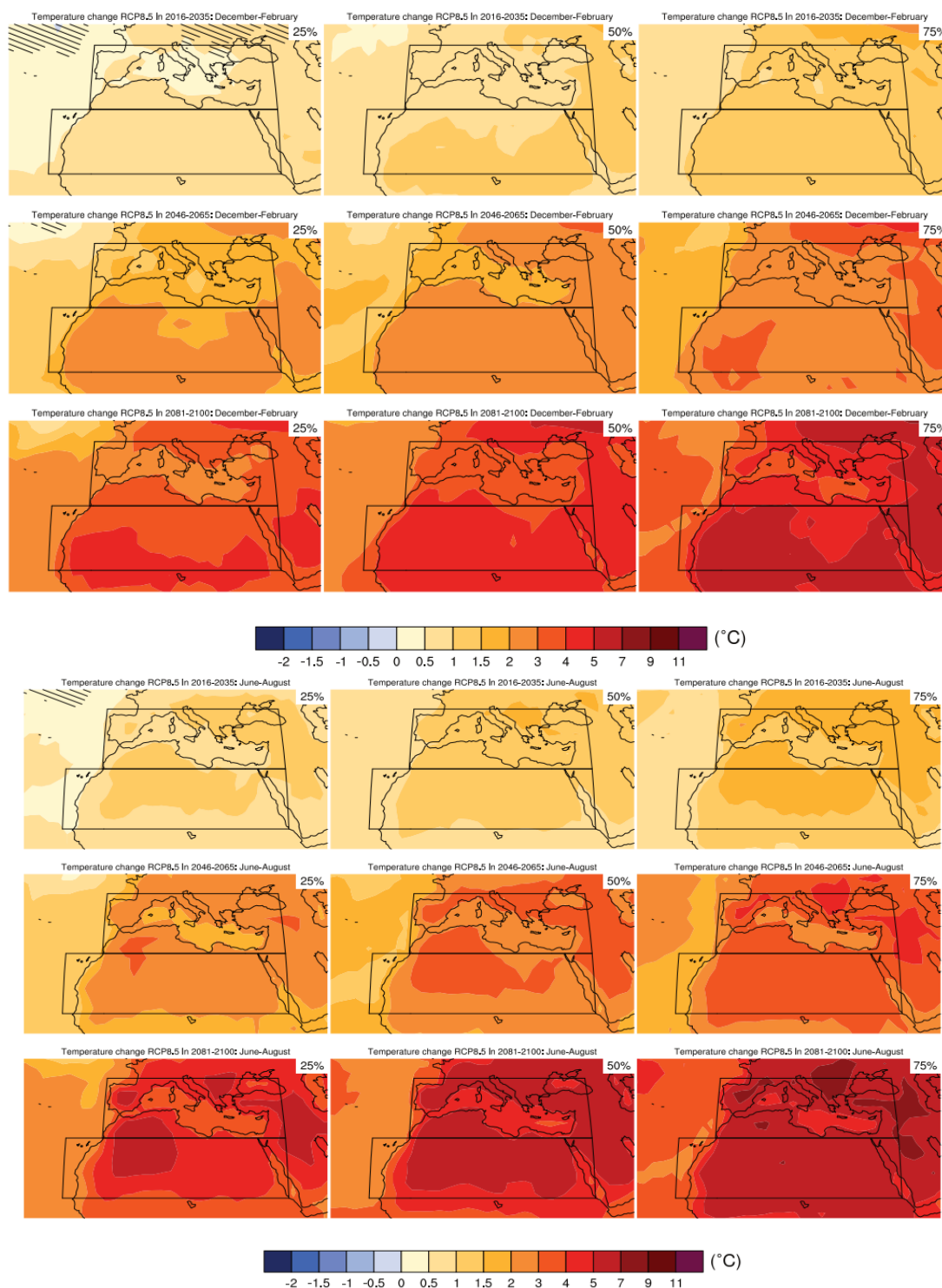
(Πηγή: IPCC WG1AR5_TS_FINAL Report)



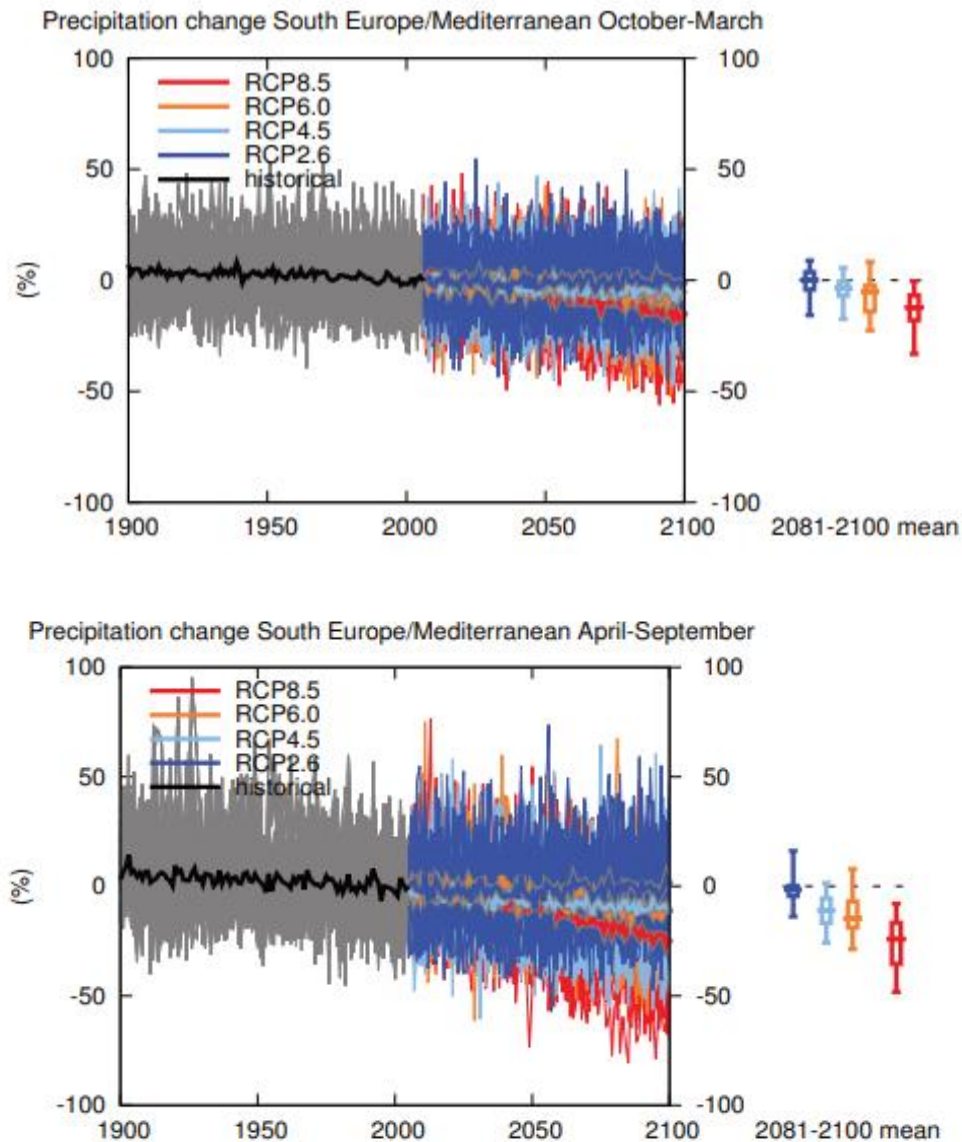
Εικόνα 2.1.3.2 Μεταβολή θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου για την περιοχή της Νότιας Ευρώπης/Μεσόγειος (από 30°N σε 45°N, από 10°W σε 40°E) για τους μήνες Δεκέμβρη-Φλεβάρη με βάση τα ιστορικά δεδομένα 1986-2005. **Εικόνα 2.1.3.3** Μεταβολή θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου για την περιοχή της Νότιας Ευρώπης/Μεσόγειος (από 30°N σε 45°N, από 10°W σε 40°E) για τους μήνες Ιούνιο-Αύγουστο με βάση τα ιστορικά δεδομένα 1986-2005. (Πηγή: IPCC WG1AR5_AnnexI_FINAL-1)



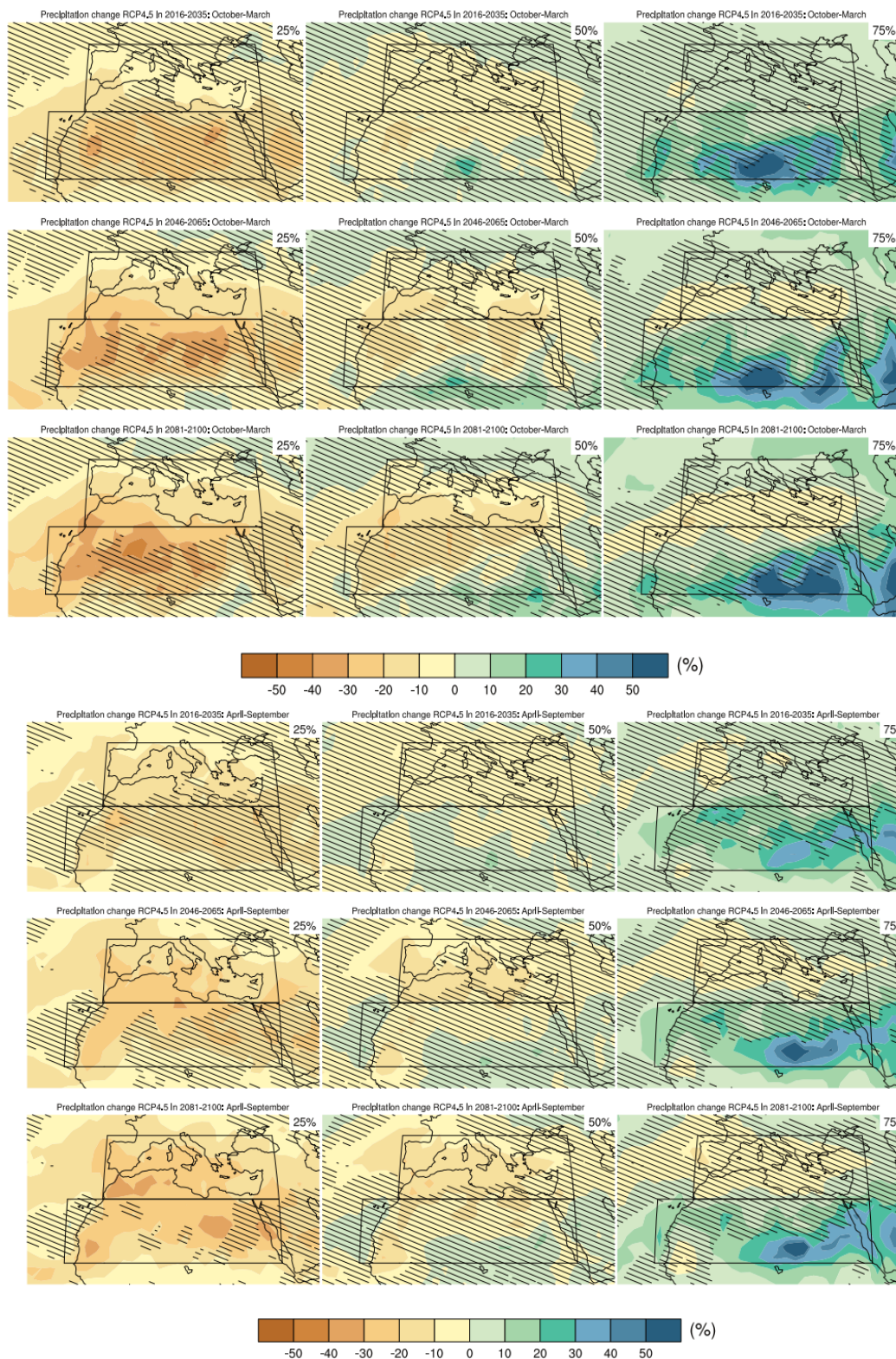
Εικόνα 2.1.3.4 Χάρτες θερμοκρασιακών μεταβολών για τους μήνες Δεκέμβρη-Φλεβάρη των χρονικών περιόδων 2016-2035, 2046-2065 και 2081-2100 με βάση τα ιστορικά δεδομένα της περιόδου 1986-2005 και το **κλιματικό σενάριο RCP4.5**. **Εικόνα 2.1.3.5** Χάρτες θερμοκρασιακών μεταβολών για τους μήνες Ιούνιο-Αύγουστο των χρονικών περιόδων 2016-2035, 2046-2065 και 2081-2100 με βάση τα ιστορικά δεδομένα της περιόδου 1986-2005 και το **κλιματικό σενάριο RCP4.5**. (Πηγή: IPCC WG1AR5_AnnexI_FINAL-1)



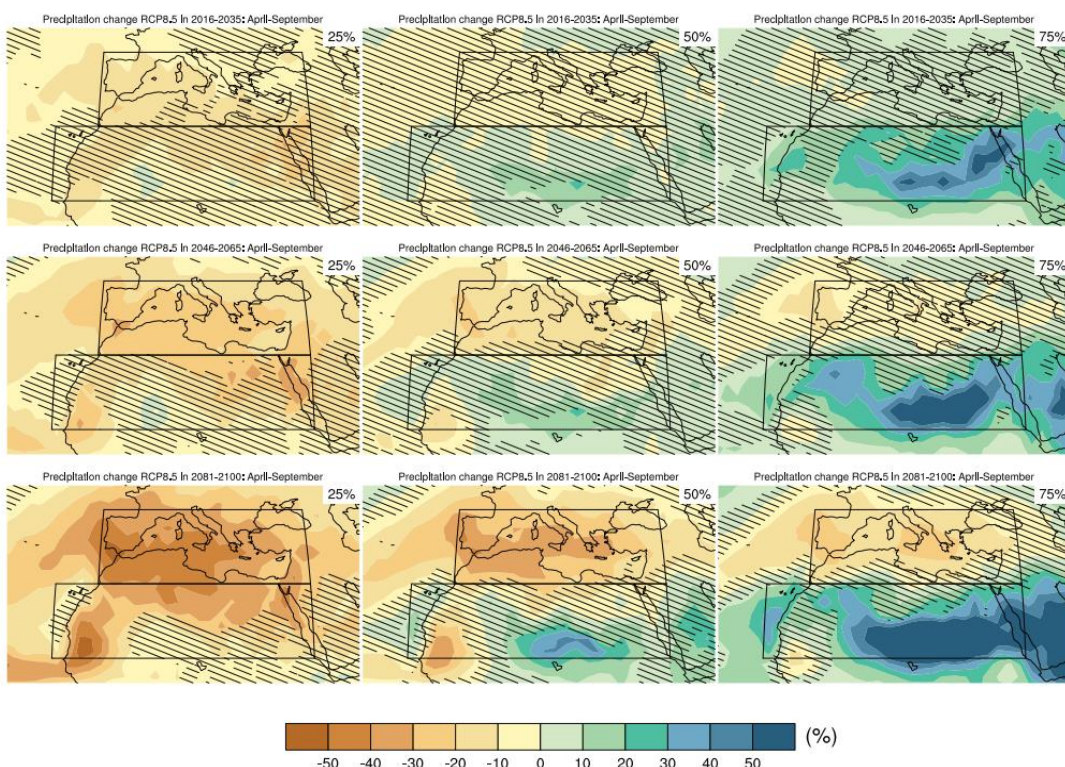
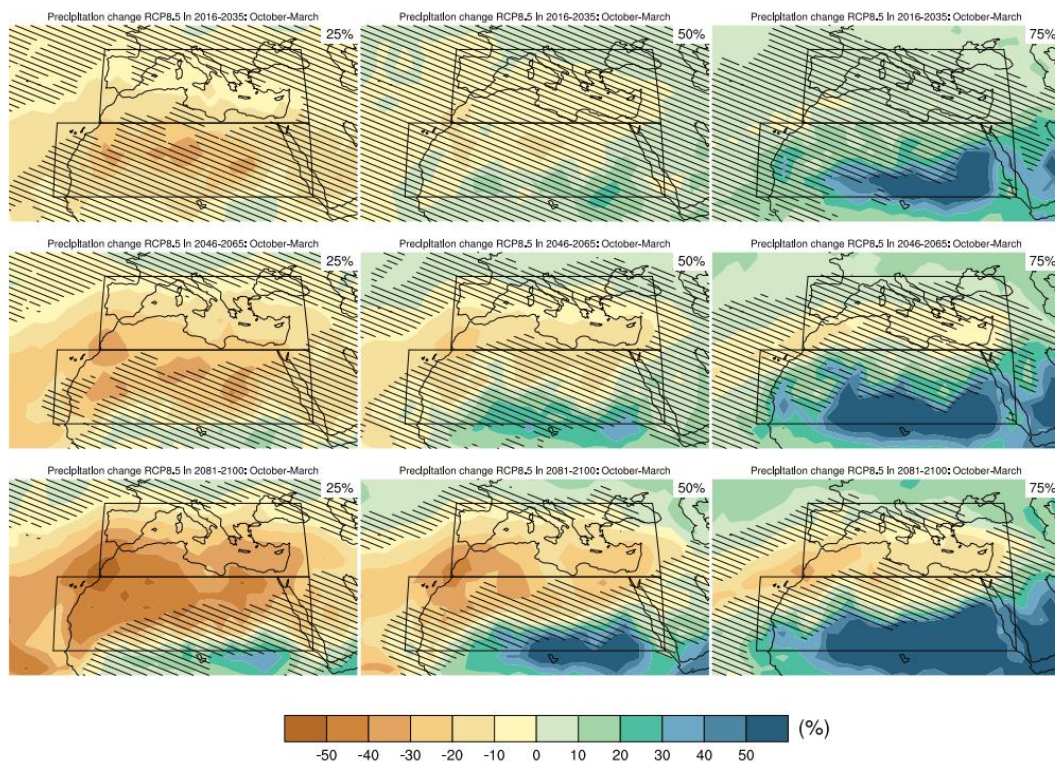
Εικόνα 2.1.3.6 Χάρτες θερμοκρασιακών μεταβολών για τους μήνες Δεκέμβρη-Φλεβάρη των χρονικών περιόδων 2016-2035, 2046-2065 και 2081-2100 με βάση τα ιστορικά δεδομένα της περιόδου 1986-2005 και το **κλιματικό σενάριο RCP8.5**. **Εικόνα 2.1.3.7** Χάρτες θερμοκρασιακών μεταβολών για τους μήνες Ιούνιο-Αύγουστο των χρονικών περιόδων 2016-2035, 2046-2065 και 2081-2100 με βάση τα ιστορικά δεδομένα της περιόδου 1986-2005 και το **κλιματικό σενάριο RCP8.5**. (Πηγή: IPCC WG1AR5_AnnexI_FINAL-1)



Εικόνα 2.1.3.8 Μεταβολή θερμοκρασίας με την πάροδο του χρόνου για την περιοχή της Νότιας Ευρώπης/Μεσόγειος (από 30°N σε 45°N, από 10°W σε 40°E) για τους μήνες Οκτώβρη-Μάρτιο με βάση τα ιστορικά δεδομένα 1986-2005. **Εικόνα 2.1.3.9** Μεταβολή βροχόπτωσης με την πάροδο του χρόνου για την περιοχή της Νότιας Ευρώπης/Μεσόγειος (από 30°N σε 45°N, από 10°W σε 40°E) για τους μήνες Απρίλη-Σεπτέμβριο με βάση τα ιστορικά δεδομένα 1986-2005. (Πηγή: IPCC WG1AR5_AnnexI_FINAL-1)



Εικόνα 2.1.3.10 Χάρτες μεταβολών βροχόπτωσης για τους μήνες Οκτώβρη-Μάρτιο των χρονικών περιόδων 2016-2035, 2046-2065 και 2081-2100 με βάση τα ιστορικά δεδομένα της περιόδου 1986-2005 και το **κλιματικό σενάριο RCP4.5**. **Εικόνα 2.1.3.11** Χάρτες μεταβολών βροχόπτωσης για τους μήνες Απρίλη-Σεπτέμβριο των χρονικών περιόδων 2016-2035, 2046-2065 και 2081-2100 με βάση τα ιστορικά δεδομένα της περιόδου 1986-2005 και το **κλιματικό σενάριο RCP4.5**. (Πηγή: IPCC WG1AR5_AnnexI_FINAL-1)



Εικόνα 2.1.3.12 Χάρτες μεταβολών βροχόπτωσης για τους μήνες Οκτώβρη-Μάρτιο των χρονικών περιόδων 2016-2035, 2046-2065 και 2081-2100 με βάση τα ιστορικά δεδομένα της περιόδου 1986-2005 και το **κλιματικό σενάριο RCP8.5**. **Εικόνα 2.1.3.13** Χάρτες μεταβολών βροχόπτωσης για τους μήνες Απρίλη-Σεπτέμβριο των χρονικών περιόδων 2016-

2.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

2.2.1 Το φαινόμενο και η προέλευση του

Το φαινόμενο της υφαλμύρινσης είναι ένα φυσικό φαινόμενο που αφορά κυρίως παράκτιους υδροφορείς και μπορεί να προκληθεί είτε από φυσικούς παράγοντες είτε από ανθρωπογενείς. Με τον όρο αυτό, εννοείται η εισροή αλμυρού νερού στους υπόγειους υδροφορείς με ταυτόχρονη αύξηση της αλατότητας τους. Συνεπώς, η ποσότητα του ύδατος που μπορεί να αντληθεί από τους υδροφορείς αυτούς καθίσταται μη πόσιμη και άρα μη κατάλληλη για αρδευτικούς και γεωργικούς σκοπούς εν γένει.

Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ποσότητες φρέσκου νερού βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τα φυσικά σώματα αλμυρού υπόγειου νερού και από τη θάλασσα γενικά. Στους ρηχούς υδροφορείς είναι σύνηθες το αλμυρό νερό να εισχωρεί στο φρέσκο, με αποτέλεσμα την δημιουργία υφάλμυρου νερού.

Οι κύριες αιτίες αυτής της εισχώρησης είναι:

- Πλημμύρες με αποτέλεσμα την είσοδο του αλμυρού νερού στις παράκτιες περιοχές.

- Φυσικοί γεωλογικοί σχηματισμοί οι οποίοι φέρουν άλατα τα οποία με τη σειρά τους διαλύονται στο νερό.

- Ελαφρά συμπυκνωμένες ποσότητες αλμυρού νερού λόγω εξάτμισης σε παλιρροιακές λιμνοθάλασσες και άλλες περικλεισμένες περιοχές.

- Απόρριψη διαφόρων ποσοτήτων αποβλήτων από τον άνθρωπο που περιέχουν άλατα.

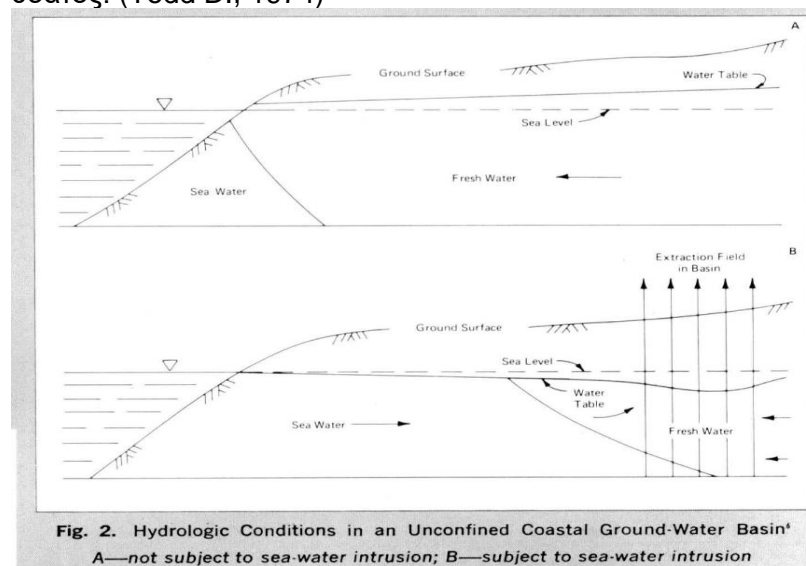
- Η υπεράντληση μέσω γεωτρήσεων έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της στάθμης του νερού και συνεπώς την μείωση της αντίστασης διείσδυσης του θαλασσινού νερού καθώς ο αφαιρούμενος όγκος υπόγειου ύδατος είναι μεγάλος. (Todd D., 1974)

2.2.2 Ο μηχανισμός της υφαλμύρινσης

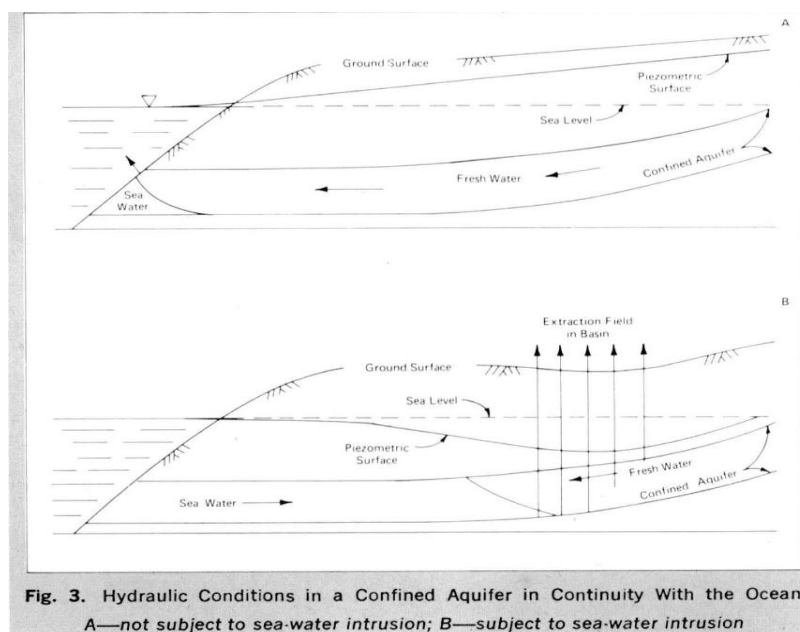
Επειδή το φρέσκο νερό είναι λιγότερο πυκνό από το θαλασσινό αλμυρό νερό, το φρέσκο θα επιπλέει πάνω από το αλμυρό στρώμα ύδατος. Έτσι, η διεπιφάνεια μεταξύ αλμυρού και φρέσκου νερού παρουσιάζει μια παραβολική μορφή με το αλμυρό νερό να τείνει να παρακάμπτει το λιγότερο πυκνό φρέσκο νερό. Οι πιέσεις μεταξύ των δύο υγρών αυξάνουν με το βάθος και λόγω αυτού η εισχώρηση του αλμυρού νερού είναι βαθύτερη σε μεγαλύτερα βάθη.

Η παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2.2.2.1) παρουσιάζει την περίπτωση Α, μια κατάσταση ισορροπίας η οποία έχει δημιουργηθεί μεταξύ του φρέσκου νερού που τείνει προς τη θάλασσα, και του θαλασσινού νερού και την περίπτωση Β, την εισχώρηση του

αλμυρού νερού στον υδροφορέα με το φρέσκο νερό, έπειτα από την μείωση της στάθμης του νερού λόγω άντλησης. Παρόμοιες καταστάσεις απεικονίζονται και στην δεύτερη εικόνα (Εικόνα 2.2.2.2), η οποία αφορά περιορισμένο υδροφορέα. Όπως είναι φανερό, έχοντας οποιαδήποτε περίπτωση ροής υπόψιν, μια δυναμική κατάσταση ισορροπίας τείνει να σχηματιστεί. Έχει αποδειχθεί ότι το μήκος της σφήνας του θαλασσινού νερού που παρεισφρύνει, ποικίλλει σημαντικά ανάλογα με την ποσότητα ύδατος φρέσκου νερού που ρέει προς τη θάλασσα. Έτσι, ακόμα και μια μικρή μείωση στην ροή του φρέσκου νερού είναι δυνατόν να προκαλέσει την εισχώρηση αλμυρού ύδατος. (Todd D., 1974)



Εικόνα 2.2.2.1 Υδραυλικές συνθήκες σε ελεύθερο παράκτιο υδροφορέα λεκάνης, Α) ο οποίος δεν υπόκειται σε υφαλμύριση και Β) ο οποίος υπόκειται σε υφαλμύριση
Πηγή: (Todd D., 1974)



Εικόνα 2.2.2.2 Υδραυλικές συνθήκες σε περιορισμένο παράκτιο υδροφορέα εν συνεχεία του ωκεανού, Α) ο οποίος δεν υπόκειται σε υφαλμύριση και Β) ο οποίος υπόκειται σε υφαλμύριση.
Πηγή: (Todd D., 1974)

Με σκοπό την εύρεση της διεπιφάνειας του υφάλμυρου νερού, χρησιμοποιείται ευρέως η σχέση Ghyben-Herzberg :

$$\xi = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} h_f \approx 40 h_f$$

όπου

ξ η θέση της διεπιφάνειας κάτω από τη στάθμη της θάλασσας

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

ρ_f η πυκνότητα του φρέσκου νερού (1 g/cm³)

ρ_s η πυκνότητα του θαλασσινού νερού (1,025 g/cm³)

Η πρακτική σημασία της παραπάνω σχέσης συνοψίζεται στο ότι για κάθε μέτρο υδραυλικού ύψους του φρέσκου νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, η διεπιφάνεια του μετώπου της υφαλμύρινης με τον υπόγειο υδροφόρο αγωγό περνάει περίπου 40 μέτρα προς τα κάτω.

2.2.3 Αντιμετώπιση της υφαλμύρισης

Το πρόβλημα της υφαλμύρισης δύναται να επιδεινωθεί σε παράκτιες περιοχές οι οποίες έχουν δεχτεί ανθρωπογενείς παρεμβάσεις. Για αυτόν τον λόγο απαιτούνται ενέργειες με σκοπό να επιλυθεί το εν λόγω πρόβλημα.

Οι ανθρώπινες δραστηριότητες και επεμβάσεις, παρουσιάζουν σοβαρές επιδράσεις στο φαινόμενο της υφαλμύρισης των παράκτιων υδροφορέων. Με άλλα λόγια, οι ανθρώπινες αυτές διεργασίες έχουν ως άμεσο αποτέλεσμα την πτώση της πιεζομετρικής στάθμης του υπόγειου ύδατος, φαινόμενο το οποίο δεν γίνεται συχνά αμέσως αντιληπτό, καθώς είναι μια διαδικασία η οποία συντελείται σε βάθος χρόνου.

Οι δύο πιο βασικές μέθοδοι ως προς την αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρισης είναι οι εξής:

1. Έλεγχος άντλησης

Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει την μείωση του ρυθμού άντλησης νερού των κοντινών φρεάτων τα οποία αντλούν από κοντινό παράκτιο υδροφόρο ή την μετατόπιση της θέσης άντλησης τους με σκοπό η στάθμη του υδροφόρου να ανέλθει ξανά και η κίνηση του νερού προς τη θάλασσα να μειωθεί, αποτρέποντας έτσι την επιδείνωση του φαινομένου.

2. Τεχνητός εμπλουτισμός

Η μέθοδος αυτή αποτελεί έναν τρόπο ενίσχυσης της εισροής ύδατος στα υδροφόρα στρώματα του εδάφους. Η πρόσθετη ποσότητα του νερού αυτού, μπορεί να είναι επιφανειακό φυσικό νερό για την ενίσχυση των ελεύθερων υδροφορέων ή νερό που προέρχεται από παρακείμενο υδροφόρο στρώμα και νερό από φρέατα εμπλουτισμού για τους περιορισμένους υδροφορείς. Ποσότητες υδάτων οι οποίες προέρχονται από την τριτοβάθμια εκροή μιας μονάδας επεξεργασίας λυμάτων και άρα έχουν απολυμανθεί, μπορούν επίσης να φανούν χρήσιμες στα φρέατα εμπλουτισμού. (Todd D., 1974)

Για την μελέτη ενός συστήματος υπογείων υδάτων αναγκαία είναι η θεώρηση ενός υδροφορέα και ενός συστήματος ροής.

2.3.1 Θεώρηση υδροφορέα

Ως υδροφορέας ορίζεται ένας υπεδάφιος σχηματισμός που περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών κορεσμένων με νερό. Οι υδροφορείς εμπλουτίζουν πηγάδια και πηγές με ύδωρ και συνήθως καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις. Διακρίνονται σε περιορισμένους και ελεύθερους, με βάση την θέση του υδροφόρου ορίζοντα. Ο υδροφορέας αποτελείται από πορώδες υλικό και διακρίνεται από δυνατότητα αποθήκευσης και μεταφοράς σημαντικών ποσοτήτων ύδατος σε πηγάδια. Ο περιορισμένος υδροφορέας περιέχει νερό υπό πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περιορίζεται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέραστα στρώματα ενώ ο ελεύθερος έχει ως ανώτερη επιφάνεια του τον υδροφόρο ορίζοντα.

Αυτή η προσέγγιση εφαρμόζεται με επιτυχία στην περίπτωση ανάλυσης της ροής προς πηγάδια άντλησης και αποτελεί τη βάση για πολλές αναλυτικές λύσεις όπως εκείνες των Thiem, Theis και Jacob. Η ροή του υπόγειου ύδατος θεωρείται οριζόντια μεταξύ των υδροφορέων και κάθετη μεταξύ των περιοριστικών στρωμάτων.

Η μεταβιβασιμότητα ενός περιορισμένου ομογενούς και σταθερού πάχους υδροφορέα είναι σταθερή ενώ αυτή ενός ελεύθερου υδροφορέα είναι πάντα μεταβλητή χωρικά αφού το πάχος της κορεσμένης ζώνης εξαρτάται από το υδραυλικό ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Παρόλο που στις αναλυτικές μαθηματικές λύσεις, η μεταβιβασιμότητα T και η ειδική διαπερατότητα k του υδροφορέα θεωρούνται σταθερές, στην πραγματικότητα είναι μεταβλητές καθώς οι περισσότεροι υδροφορείς είναι ετερογενείς.

Η γενική μορφή της εξίσωσης του συστήματος για την θεώρηση του υδροφορέα δίνεται ως εξής

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

Όπου

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

h υδραυλικό ύψος

T_x και 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 πρέπει να τεθεί $R = -W$)

L η διαρροή από ένα περιοριστικό στρώμα

K'_z η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητά

b' το πάχος υδροφορέα

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

Σημειώνεται ότι ισχύει $T_x = K_x h$ και $T_y = K_y h$, όπου h είναι η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα από τον πυθμένα του υδροφορέα, δηλαδή το κορεσμένο πάχος, και μπορεί να μεταβάλλεται τόσο χωρικά όσο και χρονικά.

Κατά την εφαρμογή της παραπάνω εξίσωσης σε ελεύθερο υδροφορέα γίνονται οι παραδοχές Dupuit:

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

2.3.2 Θεώρηση συστήματος ροής

Στην περίπτωση αυτή δίνεται έμφαση στην ερμηνεία της τρισδιάστατης κατανομής της ροής, της υδραυλικής αγωγιμότητας και των ιδιοτήτων της αποθηκευτικότητας σε κάθε σημείο του συστήματος και όχι στη μελέτη των ίδιων των υδροφορέων και των περιοριστικών στρωμάτων. Η θεώρηση αυτή 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. Μια γενική μορφή της εξίσωσης του συστήματος είναι:

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

Όπου

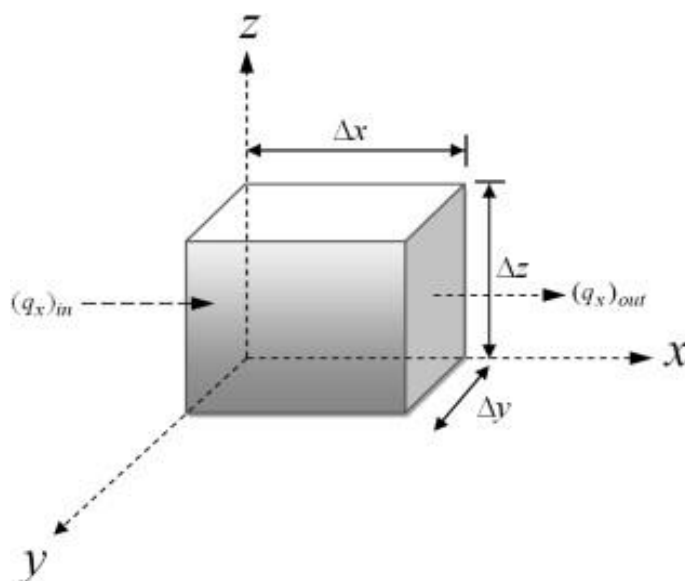
K_x, K_y, K_z οι συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας

S_s η ειδική αποθηκευτικότητα

R^* ένας όρος εμπλουτισμού ή άντλησης

2.3.3 Γενική εξίσωση υπόγειας ροής

Σύμφωνα με τον Νόμο Διατήρησης της Μάζας αν θεωρηθεί ένας μικρός μοναδιαίος όγκος κορεσμένου πορώδους υλικού, τότε δεν μεταβάλλεται η μάζα μιας ρευστής ουσίας.



Σχήμα 2.3.3 Μοναδιαίος όγκος κορεσμένου πορώδους υλικού

Σύμφωνα με το υδατικό ισοζύγιο που εκφράζει την αρχή της διατήρησης της μάζας ισχύει: ΕΙΣΟΔΟΣ- ΕΞΟΔΟΣ=0 ή αλλιώς Ροή(in) - Ροή(out) =0.

Η ροή του ύδατος στην είσοδο εκφράζεται από τις συνιστώσες

$$q_x d_x d_y$$

$$q_y d_x d_z$$

$$q_z d_y d_z$$

Ενώ η ροή του ύδατος στην έξοδο εκφράζεται από τις συνιστώσες

$$(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} d_x) d_z d_y$$

$$(q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} d_y) d_x d_z$$

$$(q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} d_z) d_y d_x$$

Επομένως,

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} d_x d_y d_z - \frac{\partial q_y}{\partial y} d_y d_x d_z - \frac{\partial q_z}{\partial z} d_z d_x d_y = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Όπου για ισότροπους υδροφορείς,

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

$$q_y = -K \frac{\partial h}{\partial y} \quad (2)$$

$$q_z = -K \frac{\partial h}{\partial z}$$

Από (1) και (2) είναι

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

Ή

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (3)$$

Η εξίσωση (3) είναι η **γενική εξίσωση μόνιμης ροής (steady state)** σε ομοιογενείς και ισότροπους υδροφορείς.

Για μη σταθερές συνθήκες, η ειδική αποθηκευτικότητα, η οποία ορίζεται ως ο όγκος αποθηκευμένου νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής υδραυλικού ύψους και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα, είναι:

$$S = -\frac{\Delta V_w}{\Delta V} = -\frac{\Delta V_w}{\Delta x \Delta y \Delta z} = -\frac{\Delta V_w}{\Delta x \Delta y h}$$

$$\frac{S h}{\Delta t} = -\frac{\Delta V_w}{\frac{\Delta x \Delta y}{\Delta t}} = -\frac{q_w}{\Delta t} \Rightarrow -\frac{q_w}{\Delta t} = \frac{S h}{\Delta t} \Rightarrow -\frac{q_w}{\Delta t} = S \frac{dh}{dt} \quad \Delta t \rightarrow 0$$

Άρα, **η εξίσωση ροής για μη σταθερές συνθήκες (unsteady state)** είναι:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}$$

(Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Καρατζάς Γ., 2021)

2.4 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ

Εκτός από τις εφαρμογές σε υδραυλική πηγαδιών, οι αναλυτικές λύσεις δε χρησιμοποιούνται σε πρακτικές εφαρμογές. Οι αριθμητικές λύσεις προτιμώνται καθώς είναι πιο ευπροσάρμοστες και μέσω των υπολογιστών πιο εύκολες στη χρήση από τις πιο σύνθετες αναλυτικές λύσεις. Στην προσομοίωση υπόγειου υδροφορέα χρησιμοποιούνται συνήθως οι παρακάτω πέντε κατηγορίες μοντέλων:

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 πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία είναι οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι για επίλυση προβλημάτων ροής. Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών είναι στενά συνδεδεμένη με εκείνη των πεπερασμένων στοιχείων, ενώ η μέθοδος της ολοκληρωμένης οριακής εξίσωσης και των αναλυτικών στοιχείων, είναι σχετικά νέες τεχνικές και όχι ευρέως διαδεδομένες.

Για τις πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία, ένα πρόγραμμα υπολογιστή, λύνει μία ομάδα αλγεβρικών εξισώσεων που δημιουργούνται από προσέγγιση των μερικών διαφορικών εξισώσεων (εξίσωση του συστήματος, οριακές συνθήκες και αρχικές συνθήκες) οι οποίες αποτελούν το μαθηματικό μοντέλο. Οι τεχνικές προσέγγισης όπως στις πεπερασμένες διαφορές και τα πεπερασμένα στοιχεία ενεργούν στο μαθηματικό μοντέλο και το μετατρέπουν σε μια μορφή που να μπορεί να λυθεί γρήγορα από έναν υπολογιστή. (Τριχάκης, 2004)

Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών υπολογίζουν μια τιμή για το υδραυλικό ύψος σε κάθε κόμβο που είναι επίσης και το μέσο υδραυλικό ύψος του κελιού γύρω από τον κόμβο αυτό. Αντίθετα, τα πεπερασμένα στοιχεία ορίζουν ακριβώς τη μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε ένα στοιχείο με τη βοήθεια πολλαπλασιαστικών συναρτήσεων. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται για ευκολία από τους κόμβους, αλλά το υδραυλικό ύψος ορίζεται παντού μέσω βασικών συναρτήσεων.

2.4.1 Μοντέλα Πεπερασμένων Διαφορών

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών, οι ροές κατά μήκος του υδροφόρου ορίζοντα αναπαριστούν έναν όγκο ύδατος που εφαρμόζεται στην άνω περιοχή του κελιού ανά μονάδα χρόνου. Το μοντέλο μπορεί να έχει έναν χωριστό πίνακα για τον παράγοντα του εμπλουτισμού ή μπορεί ο εμπλουτισμός να προσομοιώνεται μέσω πηγαδιών. Στις τρισδιάστατες προσομοιώσεις, η διαχείριση του εμπλουτισμού γίνεται πιο εύκολη όταν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται στο ανώτερο στρώμα του μοντέλου. Έτσι, το ανώτερο στρώμα θεωρείται ως ελεύθερο και ένας πίνακας ρυθμού εμπλουτισμού/ άντλησης δημιουργείται για αυτό. Όταν ο υδροφόρος ορίζοντας διαρρέει περισσότερα στρώματα, τότε είναι αναγκαία η χρήση μιας άλλης τεχνικής προσέγγισης. Μία εναλλακτική είναι η τοποθέτηση ενός κόμβου εμπλουτισμού υπό την μορφή πηγαδιού τροφοδοσίας σε κάθε κόμβο του υδροφόρου ορίζοντα. Ωστόσο είναι πιθανό να δημιουργηθούν ορισμένα προβλήματα, διότι τα μοντέλα αυτά δεν διασφαλίζουν ότι το υδραυλικό ύψος ισούται με το ύψος του νερού στον υδροφόρο ορίζοντα. Για παράδειγμα, αν υποτεθεί ότι ο χρήστης καθορίζει τη θέση του υδροφόρου ορίζοντα καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης, το μοντέλο θα συνεχίσει να εφαρμόζει τον εμπλουτισμό στους καθορισμένους κόμβους του υδροφόρου ορίζοντα ακόμα και αν αυτό προκαλέσει αύξηση του υδραυλικού ύψους τόσο ώστε να υπερβεί το ανώτερο στρώμα. Ωστόσο για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων έχουν αναπτυχθεί κάποια πακέτα μοντέλων όπως το MODFLOW's Recharge Package Deal, τα οποία μπορούν να ακολουθήσουν την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. (Anderson, Woessner 1992)

2.4.2 Μοντέλα Πεπερασμένων Στοιχείων

Τα περισσότερα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, επιτρέπουν στον χρήστη να προσδιορίσει μία συγκεκριμένη πηγή όπως αυτή ενός εμπλουτισμού σε ένα στοιχείο αλλά και σημειακές πηγές και καταβόθρες σε έναν κόμβο. Με σκοπό να εφαρμοστεί η εξίσωση του πίνακα μέσα στον κόμβο, απαιτείται οι κατανεμημένες πηγές και καταβόθρες να αναδιανεμηθούν σε κόμβους. Ο κώδικας πολλαπλασιάζει τις καθορισμένες σημειακές ροές που έχει λάβει από τον χρήστη επί την επιφάνεια του στοιχείου και έτσι το νερό έπειτα κατανέμεται σε κάθε κόμβο του στοιχείου. Κάποιοι κώδικες πεπερασμένων στοιχείων όπως ο AQUIFEM-N περιλαμβάνουν έναν μεταβλητό υδροφόρο ορίζοντα μέσω της παραμόρφωσης των ανώτερων στρωμάτων του πλέγματος έτσι ώστε να διασφαλίσουν ότι το υδραυλικό ύψος στις κατευθύνσεις x και y να ισούται με το ύψος του νερού επίσης στις κατευθύνσεις x και y των κόμβων του υδροφορέα. Βέβαια ο χρήστης πρέπει να φροντίσει για την κατασκευή του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη την κίνηση του υδροφόρου ορίζοντα, έτσι ώστε η παραμόρφωση των στοιχείων να μην αυξήσει τον λόγο των δύο διαστάσεων πέραν του επιτρεπόμενου ορίου. (Anderson, Woessner 1992)

2.5 ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ PRINCETON STRANSPORT CODE (PTC)

2.5.1 Οι βασικές εξισώσεις του PTC

Το PTC ακολουθεί το εξής σύστημα μερικών διαφορικών εξισώσεων για να αναπαράσχει την ροή των υπογείων υδάτων ανάλογα με το υδραυλικό ύψος h

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + Q = 0 \quad (1.1)$$

Με τα στοιχεία ταχύτητας,

$$V_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}, \quad V_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad \text{και} \quad V_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (1.2)$$

Και μεταφορά ρύπου που περιγράφεται από την συγκέντρωση του ρύπου c ,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(D_{xx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{xz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_{yx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{yy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{yz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{zx} \frac{\partial c}{\partial x} + D_{zy} \frac{\partial c}{\partial y} + D_{zz} \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \left(V_x \frac{\partial c}{\partial x} + V_y \frac{\partial c}{\partial y} + V_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \\ + Q(c^w - c) - \theta[1 + E(c)] \left(\frac{\partial c}{\partial t} \right) = 0 \end{aligned} \quad (1.3)$$

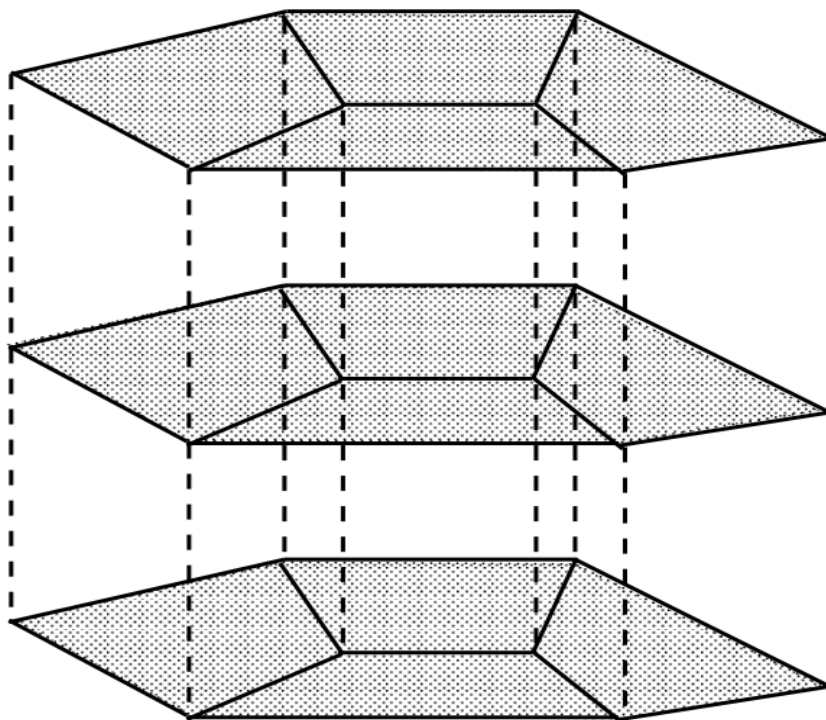
Οι παραπάνω εξισώσεις προέρχονται από την αρχή διατήρησης της μάζας και τον νόμο του Darcy. Η επίλυση των εξισώσεων αυτών γίνεται με την εξής σειρά:

- Υπολογισμός υδραυλικών υψών h από την (1)
- Υπολογισμός ταχυτήτων Darcy V_x , V_y , V_z από την (2)
- Επίλυση της (3) με σκοπό την εύρεση της συγκέντρωσης c του ρύπου

2.5.2 Ο αλγόριθμος επίλυσης του PTC

Η επίλυση του συστήματος των εξισώσεων (1)-(3) για πολύπλοκα φυσικά συστήματα συνήθως απαιτεί εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων. Για συστήματα κλίμακας πεδίου, ο υπολογισμός που χρειάζεται να λάβει χώρα με σκοπό την επίλυση των τρισδιάστατων εξισώσεων είναι σύνθετος. Το PTC χρησιμοποιεί έναν μοναδικό διαχωριστικό αλγόριθμο για την επίλυση των πλήρως τρισδιάστατων εξισώσεων, ο οποίος μειώνει τον υπολογιστικό φόρτο. Ο αλγόριθμος εμπεριέχει τον διαχωρισμό της μελετώμενης περιοχής σε περίπου παράλληλα οριζόντια στρώματα. Μέσα σε κάθε ένα στρώμα από αυτά χρησιμοποιείται η διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων δίνοντας έτσι στον χρήστη ακριβή απεικόνιση ασυνήθιστων περιοχών (Pinder and Gray, 1977). Τα στρώματα συνδέονται κάθετα με την διακριτοποίηση των πεπερασμένων διαφορών. Αυτή η υβριδική μίξη τόσο της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων όσο και των πεπερασμένων διαφορών, προσφέρει στον χρήστη την δυνατότητα εφαρμογής της διαχωριστικής διαδικασίας. Κατά την διάρκεια μιας επανάληψης συγκεκριμένου χρόνου, όλες οι υπολογιστικές πράξεις είναι χωρισμένες σε δύο βήματα. Στο πρώτο βήμα, όλοι οι οριζόντιοι διαχωρισμοί πεπερασμένων

στοιχείων επιλύονται ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο. Στο δεύτερο βήμα, επιλύονται οι κάθετες εξισώσεις οι οποίες θα συνδέσουν τα στρώματα. (PTC Manual)



Σχήμα 2.5.2 Σχηματική απεικόνιση των οριζόντιων πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων διαστρωματωμένα, παράγοντας τον τρισδιάστατο διαχωρισμό.

2.5.3 Τρισδιάστατη Ροή Υπογείων Υδάτων

2.5.3.1 Βασική εξίσωση

Το PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά της ροής ενός υπόγειου συστήματος, βρίσκοντας το υδραυλικό ύψος μέσω της παρακάτω μερικής διαφορικής εξίσωσης:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0 \quad (2.1)$$

όπου,

h το υδραυλικό ύψος [L],

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

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

K_{zz} η υδραυλική αγωγιμότητα στην z (κάθετη) διεύθυνση [LT⁻¹],

S ο συντελεστής ειδικής αποθήκευσης [L⁻¹],

Q_i ένας όρος πηγής/καταβόθρας στη θέση i [L³T⁻¹] (π.χ. αντλία – θετικές τιμές υποδηλώνουν εμπλουτισμό),

δ η συνάρτηση δέλτα του Dirac,
r ο αριθμός των σημείων που έχουν πηγή ή καταβόθρα

Για λόγους ευκολίας, ο τελευταίος όρος της (2.1) θα γράφεται συντετμημένα ως Q. Η εξίσωση του συστήματος (2.1) λύνεται αριθμητικά από το PTC με τη χρήση μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών.

2.5.3.2 Οριακές Συνθήκες

Το PTC υποστηρίζει τρεις τύπους οριακών συνθηκών στην βασική εξίσωση ροής. Οι τρεις αυτοί τύποι είναι οι συνθήκες Dirichlet (καθορισμένο υδραυλικό ύψος), Neumann (καθορισμένη ροή) και η διαρροή. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να μεταβληθούν κατά την διάρκεια μιας προσομοίωσης από τον χρήστη. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι μηδενική ροή. Αυτό υπονοεί έναν περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο τόσο τον πυθμένα του όσο και τα τοιχώματα. Επιλέγοντας εναλλακτικές οριακές συνθήκες κατά μήκος της περιοχής ενδιαφέροντος, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει οποιαδήποτε άλλη υδρολογική συνθήκη.

-ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΟ ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΥΨΟΣ

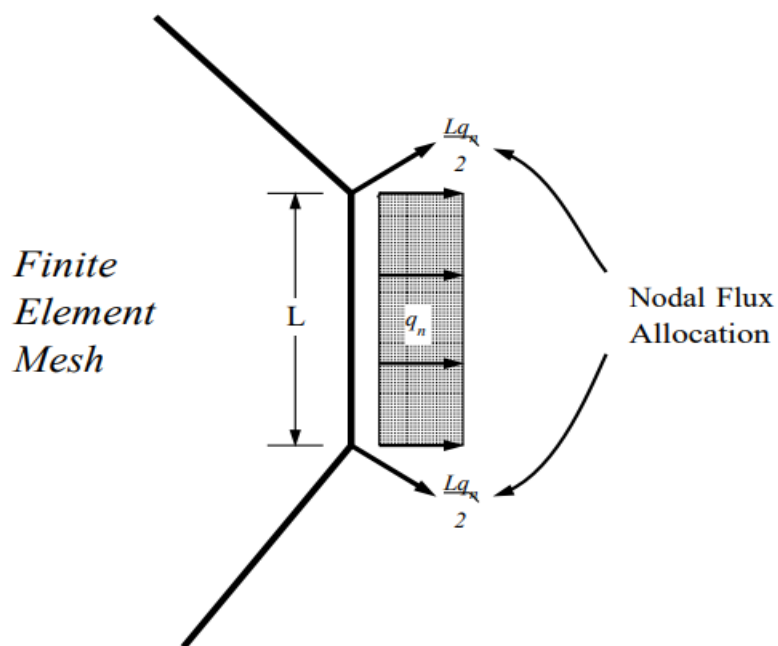
Τα όρια σταθερού υδραυλικού ύψους καθορίζονται από συγκεκριμένους κόμβους και την τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε έναν από τους κόμβους αυτούς. Ο κώδικας αυτόματα αποκλείει τις σειρές και τις στήλες του πίνακα που είναι συνδεδεμένες με τους κόμβους αυτούς ως σταθερούς όρους. Έτσι, οι κόμβοι με σταθερό υδραυλικό ύψος αποκλείονται από την εξίσωση, και οι όροι που μένουν είναι $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις, με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, όπου N_c ο ολικός αριθμός κόμβων με σταθερό υδραυλικό ύψος στην περιοχή ενδιαφέροντος.

-ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΗ ΡΟΗ

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί έναν απλό τρόπο καθορισμού των οριακών συνθηκών καθορισμένης ροής. Όταν η ροή q θεωρηθεί συνεχής κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L , η ολοκλήρωση των μαθηματικών σχέσεων δίνει τις κομβικές κατανομές (Σχήμα 2.2). Με αυτόν τον τρόπο, το μόνο που απαιτείται από τον χρήστη είναι να καθορίσει την ογκομετρική ροή σε έναν κόμβο για να αναπαραστήσει την ροή κατά μήκος του ορίου. Η ροή λόγω των αντλήσεων εισάγεται μαθηματικά ξανά με τον καθορισμό της ογκομετρικής ροής σε έναν κόμβο. Για διευκόλυνση της ομοιόμορφης διήθησης ο κώδικας επιτρέπει τον καθορισμό μιας κομβικής ροής διήθησης και επιπλέον για ανάκτηση της ογκομετρικής ροής εκτελείται αυτόματα χωρική ολοκλήρωση.

-ΔΙΑΡΡΟΗ

Οι οριακές συνθήκες διαρροής εισάγονται μετατρέποντας τις εξισώσεις του συστήματος. Εισάγεται ένας όρος αγωγιμότητας διαρροής, ο οποίος ολοκληρώνεται στην περιοχή και αναπαριστά την κάθετη διαρροή. Παρ' όλα αυτά, με κατάλληλο προσδιορισμό από τον χρήστη, μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε διαρροή.

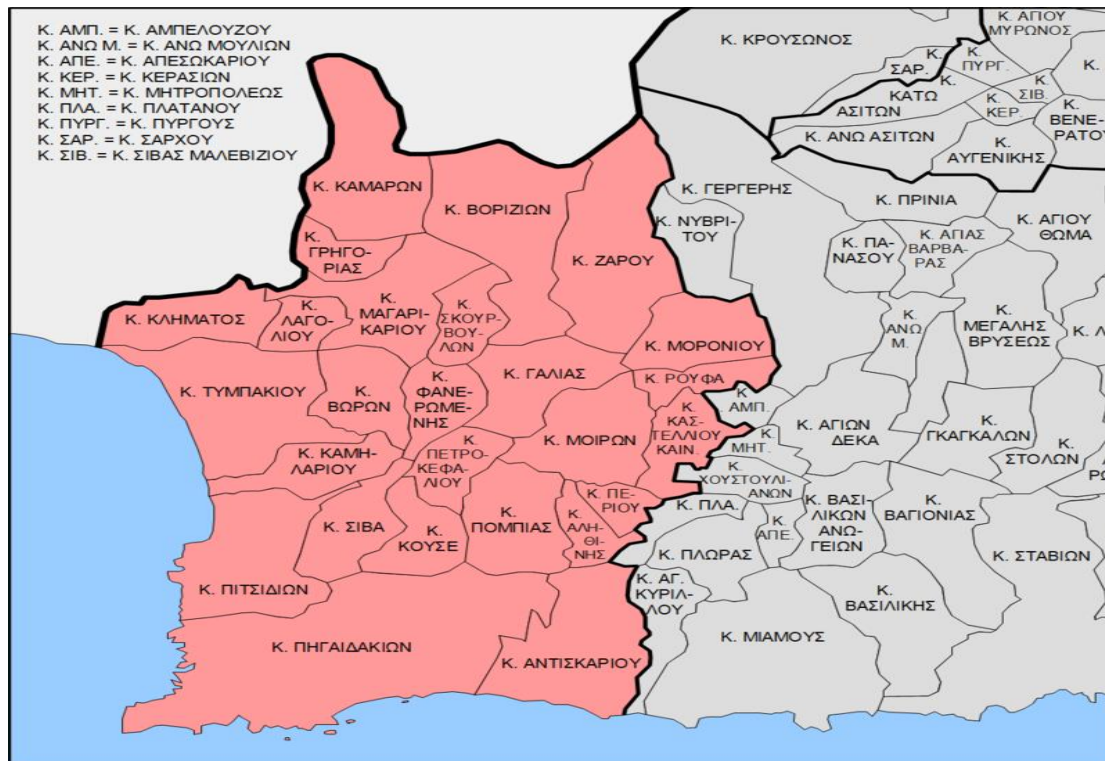


Σχήμα 2.5.3.4 Κομβική κατανομή της ροής q κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L .

3. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Οι Μοίρες Ηρακλείου βρίσκονται στο νότιο κομμάτι της Κρήτης και υπάγονται στον Δήμο Φαιστού της Περιφερειακής Ενότητας Ηρακλείου. Ο δήμος αυτός αποτελείται από 26 κοινότητες, οι οποίες με την σειρά τους υπάγονται σε 3 Δημοτικές Ενότητες, αυτές του Ζάρου, των Μοιρών και του Τυμπακίου. Με βάση την απογραφή του 2011, οι μόνιμοι κάτοικοι των Μοιρών ανέρχονται στους 6.379.

Οι Μοίρες απέχουν περίπου 40 χιλιόμετρα από την πόλη του Ηρακλείου και πιο συγκεκριμένα βρίσκονται νότια αυτής, στην πεδιάδα της Μεσσαράς, την οποία και διαρρέει ο ποταμός Γεροπόταμος. Το υψόμετρο των Μοιρών κυμαίνεται στα 87 μέτρα. (Μοίρες Ηρακλείου, Βικιπαίδεια)

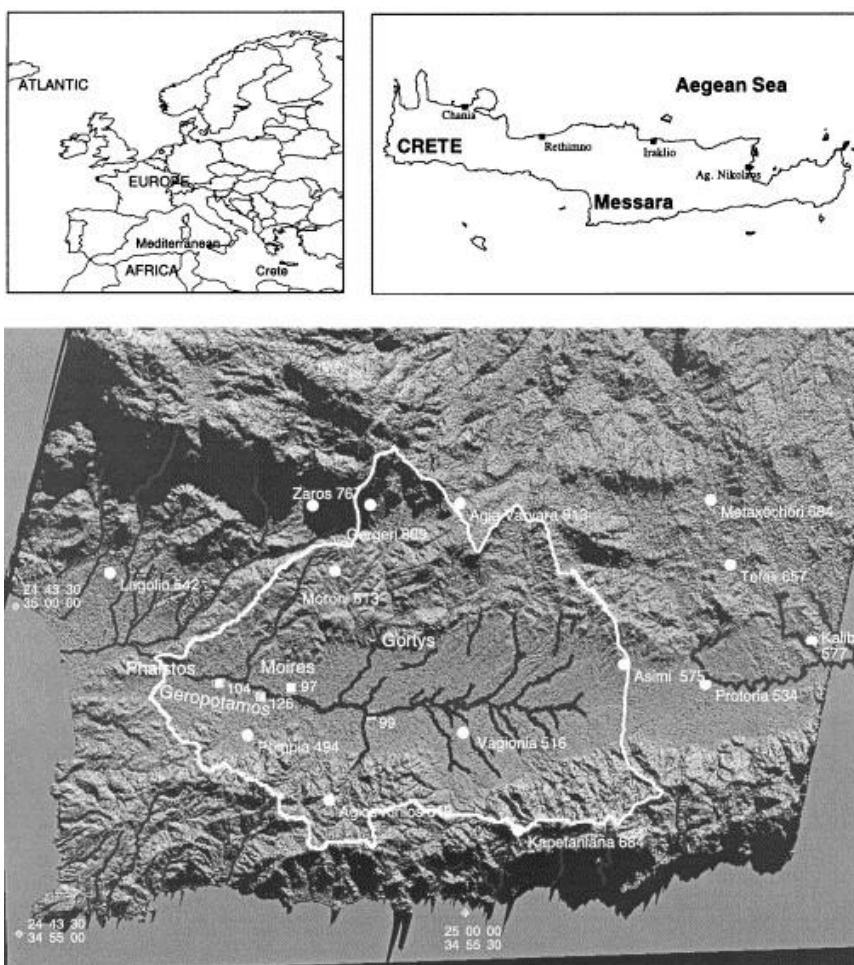


Εικόνα 3.1 Δημοτικές ενότητες και κοινότητες του Δήμου Ζαρού
 (Πηγή: Δήμος Φαιστού, Βικιπαίδεια)

Η πεδιάδα της Μεσσαράς καλύπτει μια έκταση των 398 τετραγωνικών χιλιομέτρων και βρίσκεται περίπου 50 χιλιόμετρα νότια της πόλης του Ηρακλείου. Η πεδιάδα αυτή είναι περιοχή σημαντικού αγροτικού ενδιαφέροντος για όλη την Κρήτη.

3.1 Κάλυψη Γης και Δραστηριότητες

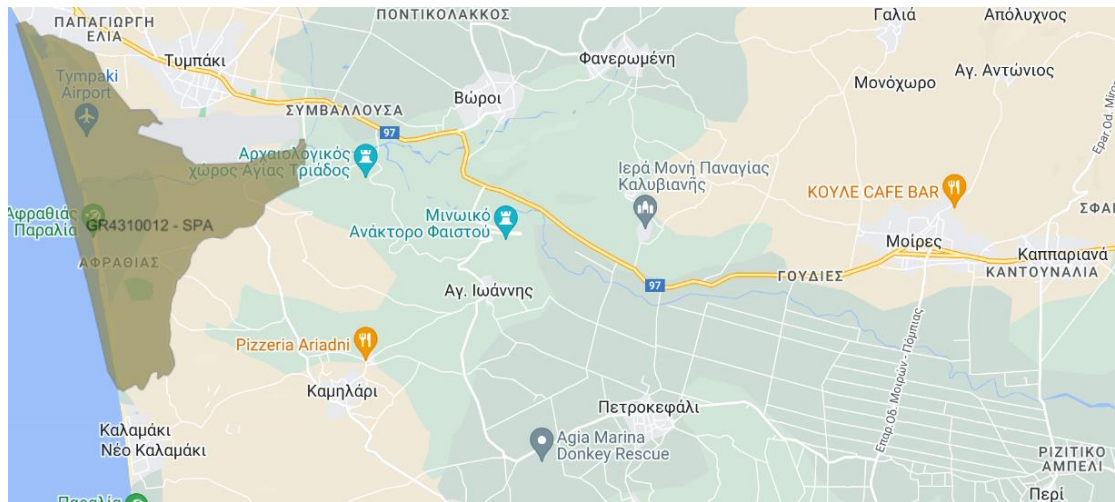
Η περιοχή που μελετάται ανήκει στην ευρύτερη περιοχή της πεδιάδας της Μεσσαράς. Η πεδιάδα της Μεσσαράς, από την οποία διέρχεται ο Γεροπόταμος, απαρτίζεται από περίπου 40.000 κατοίκους ενώ παραμένει κατά βάση αγροτικής φύσεως περιοχή.



Εικόνα 3.1.1 Η πεδιάδα της Μεσσαράς. Στον χάρτη παρατίθενται τα σημεία των βροχομετρικών σταθμών με το όνομα του σταθμού να ακολουθείται από την μέση ετήσια τιμή βροχόπτωσης. Η εκροή του ποταμού της περιοχής βρίσκεται δυτικά της εικονιζόμενης περιοχής, πιο συγκεκριμένα στην περιοχή του δήμου Φαιστού όπου και ανήκει η πεδινή περιοχή του Τυμπακίου. (Vardavas, 1996)

Περίπου 250 τετραγωνικά χιλιόμετρα της πεδιάδας της Μεσσαράς είναι καλλιεργήσιμη έκταση καθώς η υπόλοιπη περιοχή χρησιμοποιείται για κτηνοτροφικές χρήσεις. Οι βασικές χρήσεις γης στην περιοχή είναι η καλλιέργεια ελαιών (175 τ. Χλμ.) και αμπελώνων (40 τ. Χλμ.) ενώ η εναπομένουσα έκταση χρησιμοποιείται για καλλιέργεια λαχανικών, εσπεριδοειδών και σιταριών. Το έδαφος της πεδιάδας είναι εύφορο και λόγω αυτού η καλλιέργεια αμπελώνων καθίσταται γόνιμη και προσοδοφόρα. Για την καλλιέργεια όμως όλων αυτών των ειδών, απαιτούνται μεγάλες ποσότητες ύδατος. Οι ανάγκες αυτές καλύπτονται από το νερό που προέρχεται από αντλήσεις υπόγειων υδάτων μέσω γεωτρήσεων που έχουν αδειοδοτηθεί σε συγκεκριμένα σημεία της περιοχής προς αρδευτικούς και οικιακούς σκοπούς. (Tsanis I. et al., 2006)

Ωστόσο, λόγω της αυξημένης πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα, στην περιοχή ελλοχεύει ο κίνδυνος της ερημοποίησης.



Εικόνα 3.1.4 Ζώνη Ειδικής Προστασίας, Natura 2000 (Πηγή: Oikoskopio.gr)

3.2 Γεωλογία της περιοχής

Η κατώτερη τεκτονική ενότητα στην Κρήτη, αποτελείται από ένα αυτόχθονο σύστημα πετρωμάτων το οποίο περιλαμβάνει την ημιμεταμορφωμένη ενότητα των πλακωδών ασβεστόλιθων και τους υποκείμενους ασβεστόλιθους, τους δολομίτες και τους σχιστόλιθους. Σειρά έχει ένα αλλόχθονο σύστημα πετρωμάτων το οποίο εμπεριέχει τα εξής τεκτονικά καλύμματα (τα οποία βρίσκονται το ένα επάνω στο άλλο):

- Ανθρακικό κάλυμμα Ομαλού – Τρυπαλίου
- Τεκτονικό κάλυμμα Φυλλιτών – Χαλαζιτών
- Ζώνη Τρίπολης
- Ζώνη Πίνδου
- Πελαγονική ζώνη
- Οφιοιθικό κάλυμμα

Η περιοχή μελέτης, οι Μοίρες, ανήκουν στην ευρύτερη περιοχή της πεδιάδας της Μεσσαράς, η οποία αποτελεί την μεγαλύτερη εύφορη πεδιάδα της νήσου Κρήτης. Διαιρείται σε δύο τμήματα, το ανατολικό το οποίο διατρέχεται από τον ποταμό Αναποδάρη και το δυτικό το οποίο διατρέχεται από τον ποταμό Γεροπόταμο.

Η πεδιάδα της Μεσσαράς καλύπτεται κυρίως από Τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις αργίλου, άμμο, ιλύες και χαλίκια των οποίων το μέγεθος κυμαίνεται από μερικά μέτρα μέχρι περίπου 100 μέτρα. Ωστόσο, η πεδιάδα χαρακτηρίζεται από ανομοιογένεια των αποθέσεων καθώς νότια αυτής βρίσκονται κυρίως σχιστόλιθοι και ασβεστόλιθοι μεσοζωικής περιόδου ενώ βορειότερα συναντώνται κυρίως αμμώδεις νεογενείς σχηματισμοί. (Vardavas, 1997)

Η περιοχή μελέτης, η οποία υπάγεται στην λεκάνη της Μεσσαράς, αποτελεί το νότιο τμήμα της λεκάνης του Ηρακλείου. Η λεκάνη αυτή αποτελεί μια τεκτονική τάφρο που ορίζεται από τις ρηξιγενείς ζώνες Μαλεβυζίου – Καμαρών – Γέργερης (δυτικά), από τα ρήγματα Καστελίου – Χερσονήσου – Ξενιάκου (ανατολικά) και των Αστερουσίων ορέων (νότια). Αναλυτικότερα, η περιοχή μελέτης διακρίνεται σε δύο επιμέρους τεκτονικές ενότητες. Στην πρώτη ανήκουν οι Τεταρτογενείς και οι Νεογενείς σχηματισμοί της λεκάνης της Μεσσαράς ενώ στην δεύτερη ανήκουν οι Προνεογενείς σχηματισμοί των οροσειρών του Ψηλορείτη, της Δίκτης και των Αστερουσίων ορέων, οι οποίες εκτείνονται μέχρι τα όρια της λεκάνης (Κριτσωτάκης, 2009).

Προγεογενείς σχηματισμοί

Το νότιο τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς, συνίσταται από Μεσοζωικά πετρώματα με κυριότερους σχηματισμούς αυτούς του φλύσχη και των ανθρακικών της Ζώνης Τρίπολης. Στο τμήμα αυτό υπάρχουν και αποθέσεις έντονα ρηγματωμένων και ελαφρά καρστικοποιημένων ασβεστόλιθων της ζώνης Πίνδου. Καθώς αυξάνεται το υψόμετρο, τα πετρώματα που συναντώνται είναι αυτά που ανήκουν στις εσωτερικές ζώνες. Το βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης της Μεσσαράς, συνίσταται από Μεσοζωικά πετρώματα της ζώνης Τρίπολης (ασβεστόλιθοι, φλύσχη), πετρώματα της ζώνης Φυλλιτών-Χαλαζιτών αλλά και πετρώματα του αυτόχθονου συστήματος, πλακώδεις ασβεστόλιθοι και ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι.

Νεογενείς σχηματισμοί

Κατά το κατώτερο Μειόκαινο, μετά τις επωθήσεις των διαφόρων πετρωμάτων του αυτόχθονου συστήματος, δημιουργήθηκαν πεδία τάσεων τα οποία είχαν ως αποτέλεσμα την δημιουργία μεγάλων ρηγμάτων. Συνεπώς, δημιουργήθηκαν βυθίσματα στα οποία άρχισαν να αποτίθενται τα υλικά της διάβρωσης των πετρωμάτων που είχαν αναδυθεί. Μία από τις κύριες Νεογενείς λεκάνες είναι αυτή του Ηρακλείου- Μεσσαράς. Οι Νεογενείς αποθέσεις (Πλειοκαινικές και Μειοκαινικές) αναπτύσσονται σε μεγάλες εκτάσεις σε όλο το σύνολο του νησιού και αποτελούνται από ιζήματα χερσαίας, ποτάμιας και υφάλμυρης φάσης. Διακρίνονται σε διάφορες ενότητες καθώς διαφέρουν ως προς την ηλικία όσο και την λιθολογία τους.

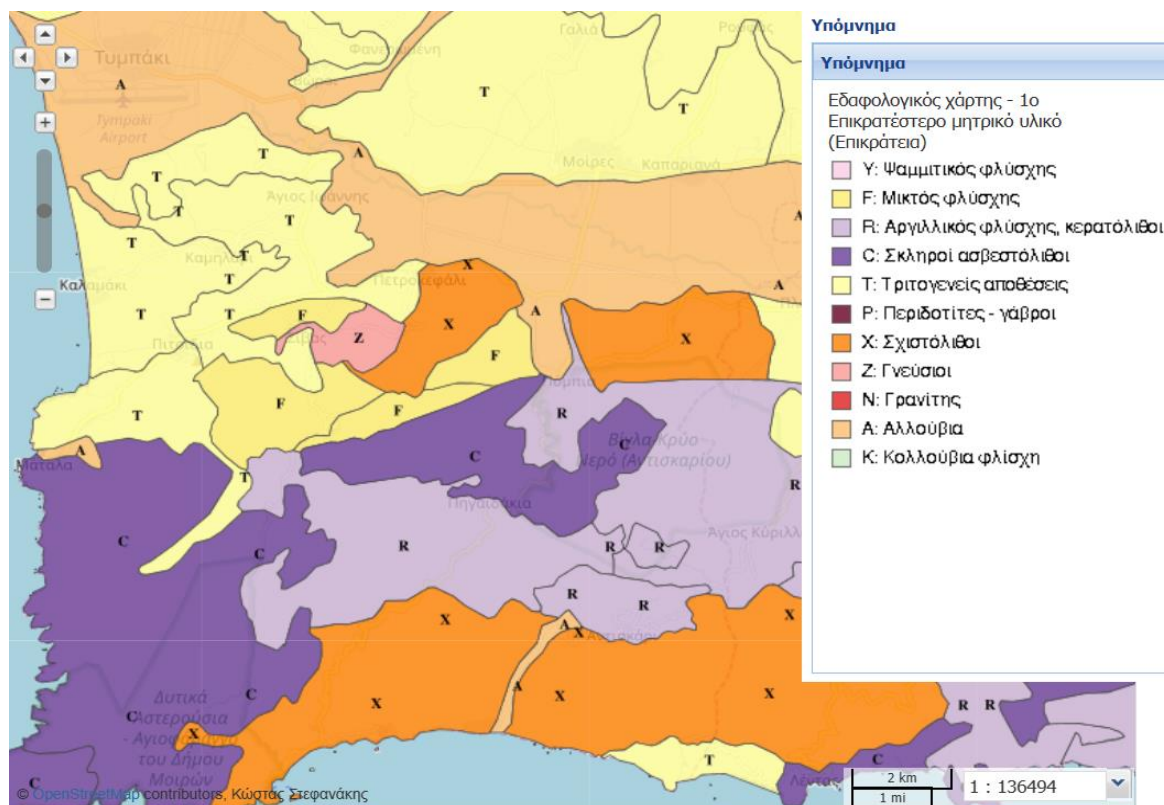
Τεταρτογενείς σχηματισμοί

Οι σχηματισμοί αυτοί είναι ιζήματα τα οποία βρίσκονται πάνω από τους σχηματισμούς του αλπικού υποβάθρου αλλά και από τους νεογενείς σχηματισμούς και αποτελούνται κυρίως από χερσαίες ή θαλάσσιες αποθέσεις άμμων, κροκάλων, χαλικιών και αργίλου. Στους σχηματισμούς αυτούς ανήκουν οι παράκτιες και οι αλλουβιακές αποθέσεις, πλευρικά κορήματα λόφων και πρανών, χερσαία κροκαλοπαγή και υλικά θαλάσσιων αναβαθμίδων.

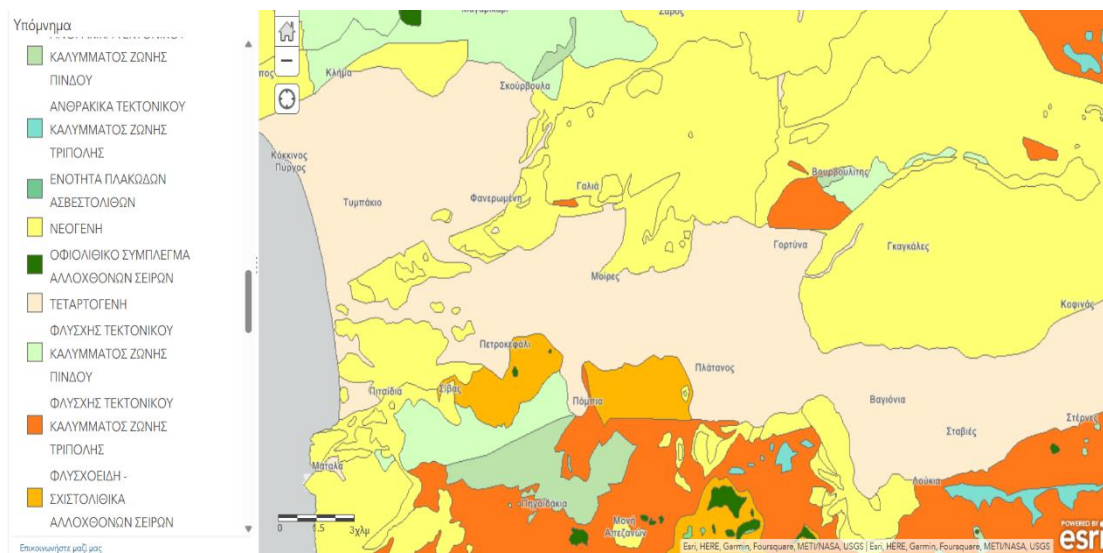
Ο κυριότερος υδροφορέας στην περιοχή των Μοιρών και άρα και στην υπολεκάνη αυτή είναι ο

- **Αλλουβιακός υδροφορέας**

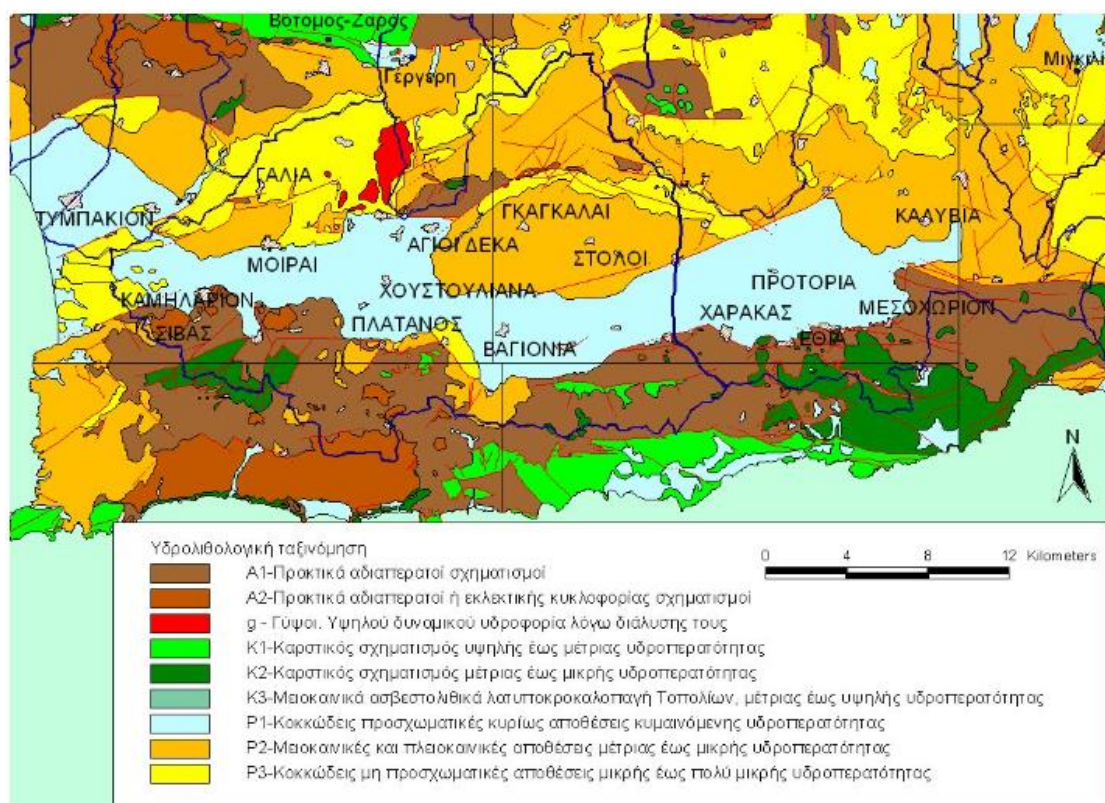
Ο αλλουβιακός υδροφορέας έχει επίμηκες σχήμα, καταλαμβάνει το κεντρικό πεδινό τμήμα της υπολεκάνης των Μοιρών και αποτελείται από νέες αποθέσεις κροκαλοπαγών, άμμων, ιλυόλιθων και αργίλων που έχουν προέλθει από την ποταμολιμναία φάση. Αξίζει να αναφερθεί ότι παρόλο που ο υδροφορέας θεωρείται ενιαίος, οι αποθέσεις που τον συνιστούν, παρουσιάζουν διαφορές ως προς τις υδρογεωλογικές τους ιδιότητες (τύπος, σύσταση και στρωματογραφική ηλικία). Η λεκάνη των Μοιρών καλύπτεται από τον αλλουβιακό υδροφορέα με το μεγαλύτερο πάχος των αποθέσεων αυτού να βρίσκεται σε μία ζώνη κατά μήκος του Γεροποτάμου και του Λιθαίου ποταμού με έκταση 13,6 τετραγωνικά χιλιόμετρα με τον υδροφορέα εισέρχεται στη στένωση της Φαιστού στο δυτικό άκρο της λεκάνης.



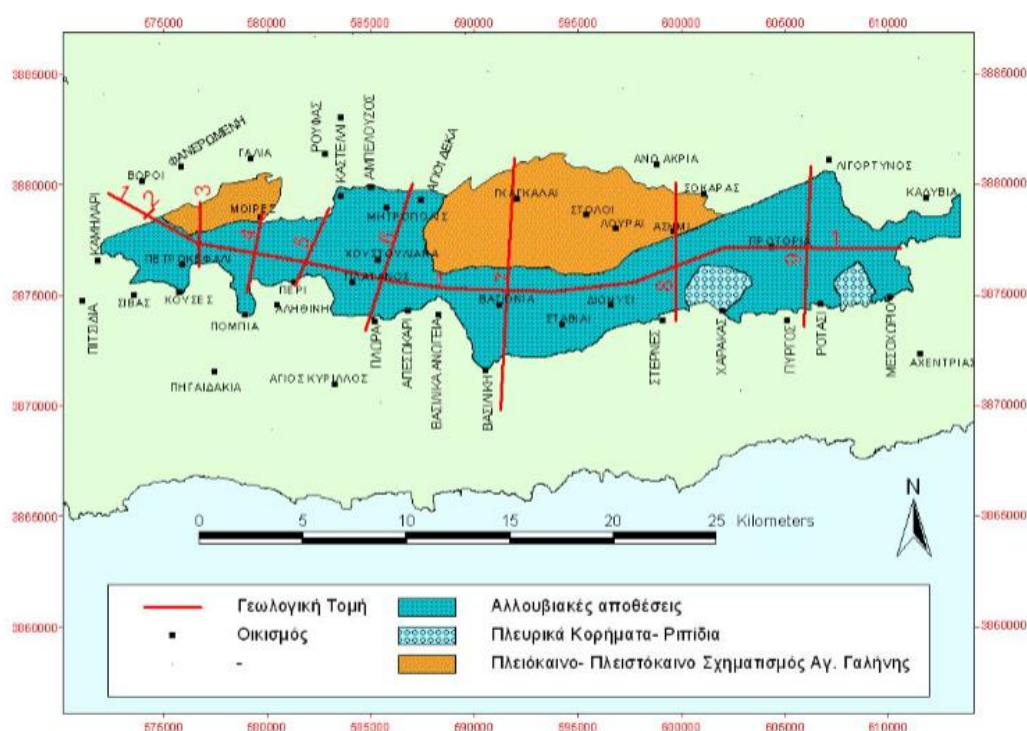
Εικόνα 3.2.1 Εδαφολογικός χάρτης μελετώμενης περιοχής (Πηγή: Γενική Διεύθυνση Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης και Γεωχωρικών Πληροφοριών, Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος)



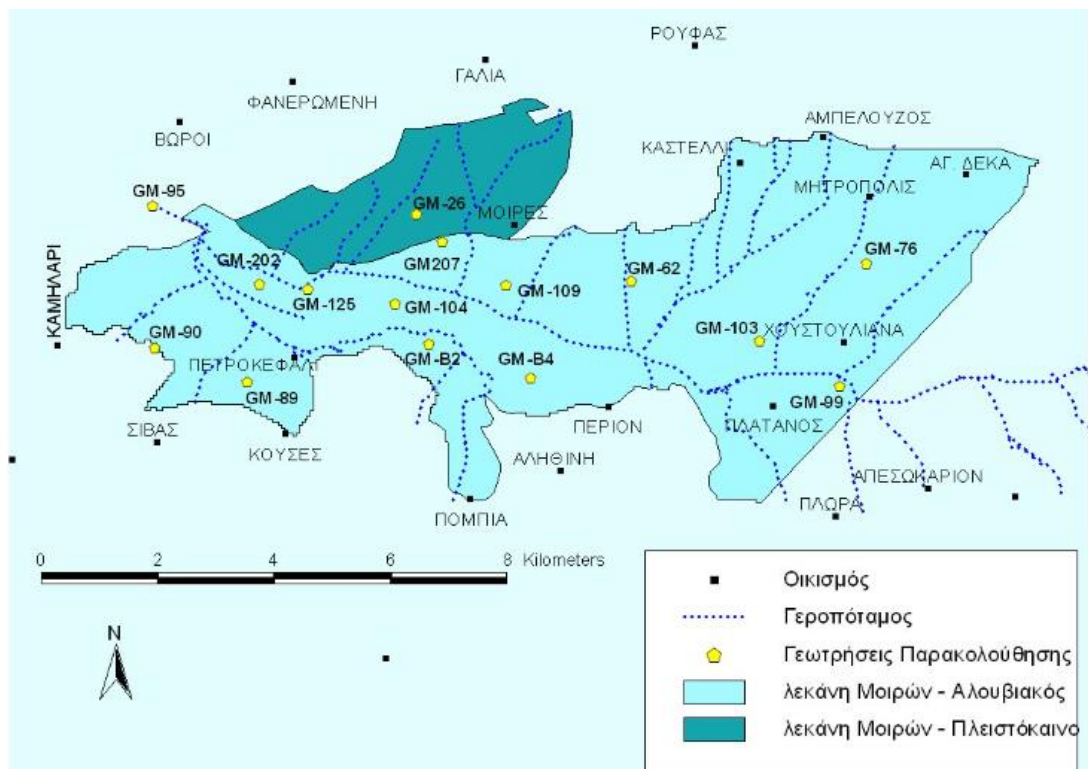
Εικόνα 3.2.2 Γεωλογικός χάρτης μελετώμενης περιοχής (Πηγή: Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης)



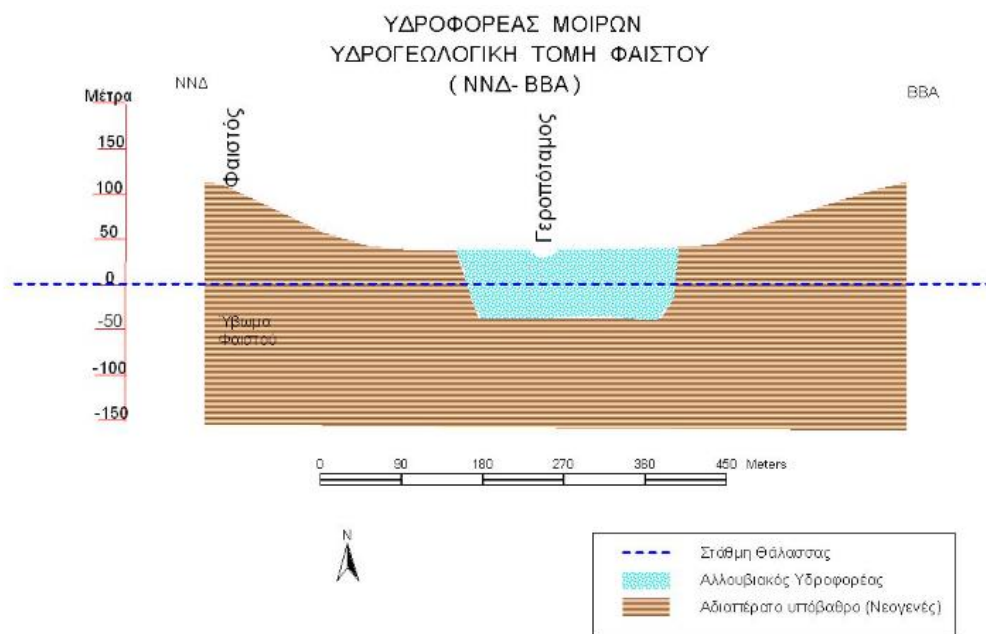
Εικόνα 3.2.3 Υδρολιθολογικός χάρτης μελετώμενης περιοχής (Πηγή: Κριτσωτάκης, 2009)



Εικόνα 3.2.4 Λεκάνη Μεσσαράς (αλλουβιακός και πλειστοκαινικός υδροφορέας) (Πηγή: Κριτσωτάκης, 2009)



Εικόνα 3.2.5 Λεκάνη Μοιρών (αλλουβιακός και πλειστοκαινικός υδροφορέας) (Πηγή: Κριτσωτάκης, 2009)

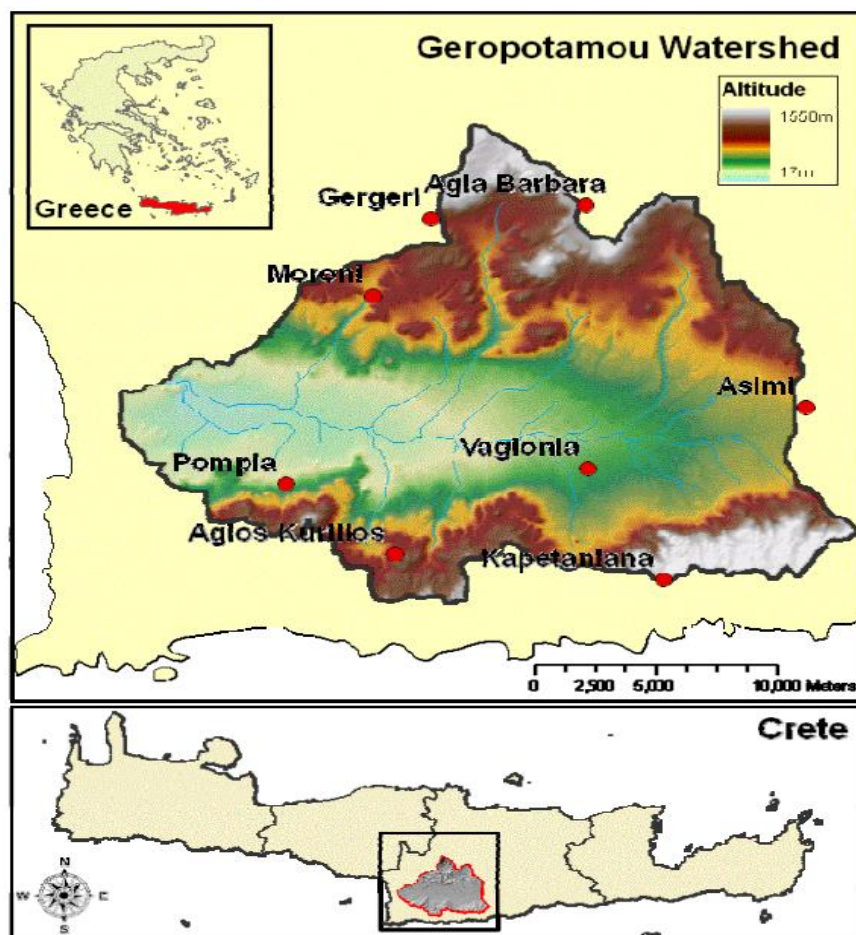


Εικόνα 3.2.6 Υδρογεωλογική τομή Φαιστού (Λεκάνη Μοιρών) (Πηγή: Κριτσωτάκης, 2009)

3.3 Υδρολογία της περιοχής και λεκάνη απορροής

Οι Μοίρες ανήκουν στην λεκάνη απορροής Ρεμάτων Νότιου Τμήματος Χανίων-Ρεθύμνου-Ηρακλείου και πιο συγκεκριμένα στην λεκάνη απορροής του Γεροποτάμου, η οποία βρίσκεται περίπου 40 χιλιόμετρα νότια της πόλης του Ηρακλείου. (Oikoskorpio.gr)

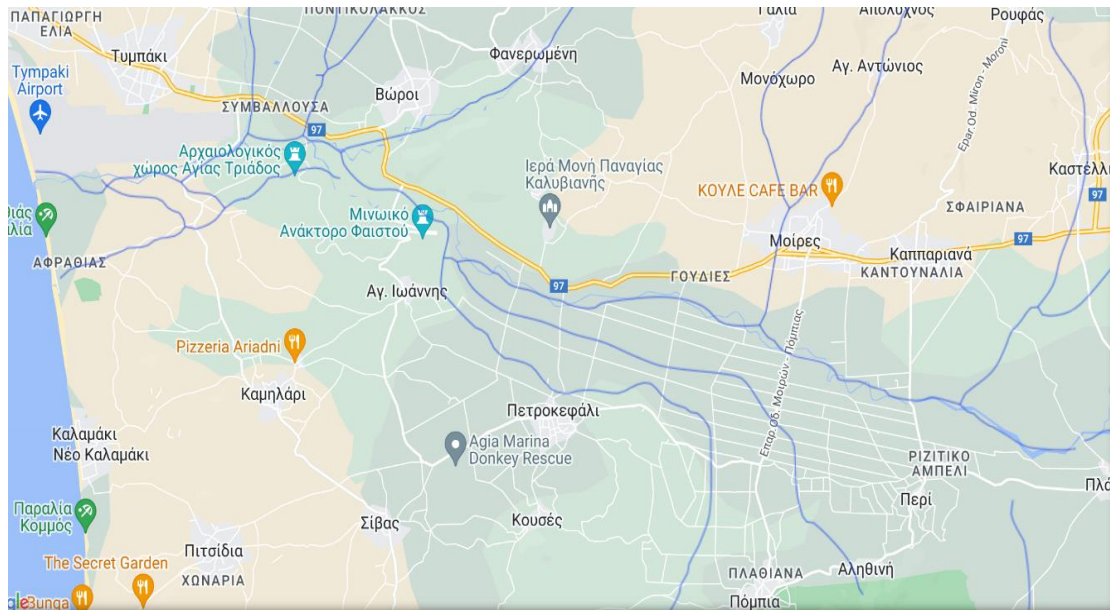
Η συνολική έκταση της λεκάνης απορροής Ρεμάτων Νότιου Τμήματος Χανίων-Ρεθύμνου-Ηρακλείου έχει υπολογιστεί πως καλύπτει περίπου 2.798,2 τετραγωνικά χιλιόμετρα ενώ η υπολεκάνη του Γεροποτάμου καλύπτει μια περιοχή περίπου 600 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Η υπολεκάνη αυτή υπάγεται στη λεκάνη απορροής της Μεσσαράς καθώς η πεδιάδα της Μεσσαράς διαρρέεται από τον Γεροπόταμο.



Εικόνα 3.3.1

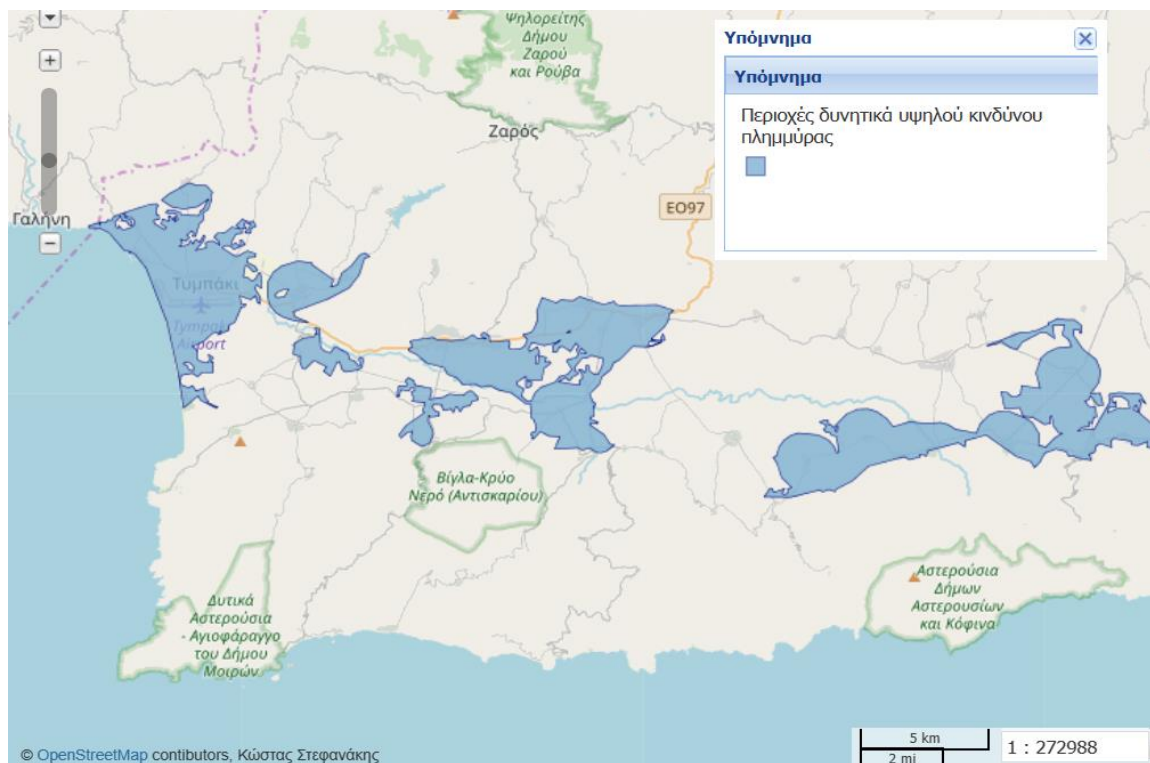
Θέση λεκάνης απορροής Γεροποτάμου (Πηγή: Tsanis I., 2006)

Το υδρολογικό έτος της πεδιάδας της Μεσσαράς διακρίνεται σε ξηρή και υγρή περίοδο. Τα επίπεδα των υπόγειων υδάτων είναι αυξημένα κατά την περίοδο της άνοιξης και έπειτα παρουσιάζουν ύφεση μέχρι να εμπλουτιστούν ξανά από τις βροχοπτώσεις τον χειμώνα. Περίπου το 40% της βροχόπτωσης στην περιοχή εμφανίζεται κατά την διάρκεια του μήνα Δεκέμβρη και Γενάρη, ενώ κατά την διάρκεια των θερινών μηνών, δηλαδή από Ιούνιο μέχρι Αύγουστο, τα επίπεδα βροχόπτωσης είναι αμελητέα. Έχει βρεθεί ότι τα επίπεδα της βροχόπτωσης στη πεδιάδα προσεγγίζουν τα 600 χιλιοστά ανά χρόνο ωστόσο το 65% υπόκειται σε εξατμισοδιαπνοή, το 10% απορρέει στη θάλασσα και έτσι μόνο το 25% καταφέρνει να εισχωρήσει στο έδαφος και να εμπλουτίσει τα υπόγεια νερά. Η πιθανή τιμή εξάτμισης κυμαίνεται στα 1300 χιλιοστά ανά χρόνο (Vardavas I.M. et al., 1997).



Εικόνα 3.3.2 Υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής (Πηγή: Οικοσκοπιο.gr)

Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι η περιοχή που μελετάται, έχει καταταχτεί στις περιοχές δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας (APSFR), οι οποίες προσδιορίστηκαν σε εθνικό επίπεδο στο πλαίσιο υλοποίησης της Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας (2012) και στο πλαίσιο της Προκαταρκτικής Αξιολόγησης Κινδύνων Πλημμύρας ΛΑΠ Έβρου (2013) (Εφαρμογή της Οδηγίας 2007/60/ΕΚ). (Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος)



Εικόνα 3.3.3 Χάρτης περιοχών δυνητικά υψηλού πλημμυρικού κινδύνου (Πηγή: Γενική Διεύθυνση Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης και Γεωχωρικών Πληροφοριών, Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος)

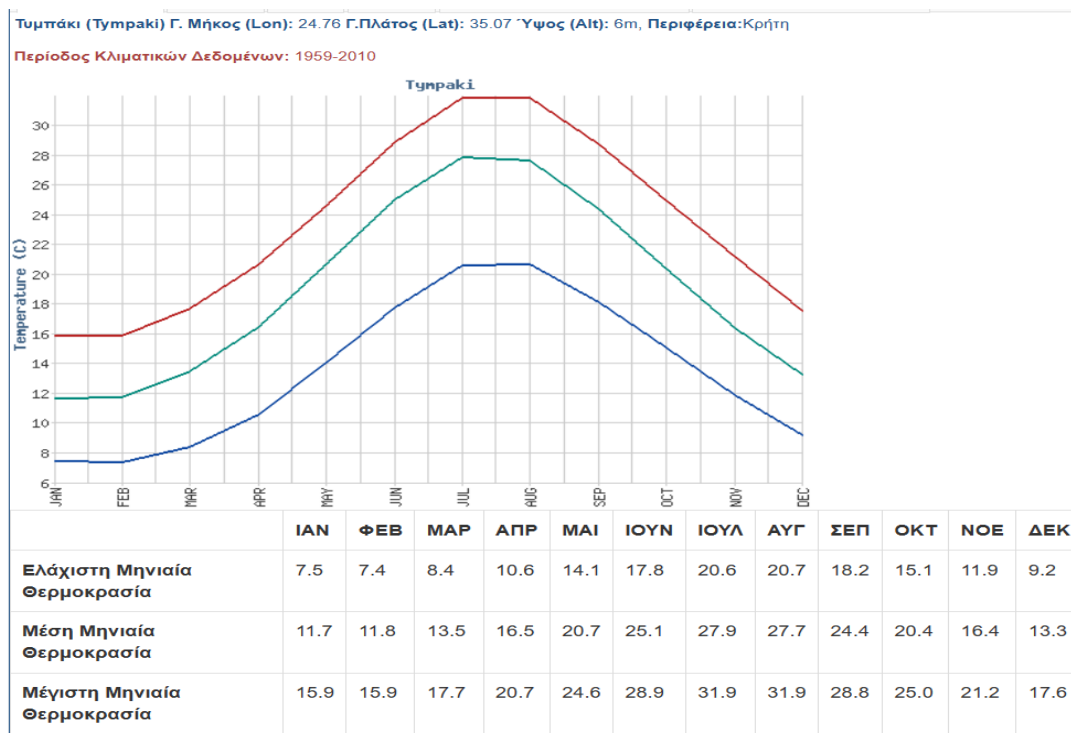
3.4 Μετεωρολογικά δεδομένα της περιοχής

Η παράμετρος της βροχόπτωσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην περιοχή καθώς αυξάνεται ανάλογα με το υψόμετρο. Έχει εκτιμηθεί ότι η συνολική εξάτμιση είναι 1500 ± 300 mm ανά χρόνο και ότι οι άνεμοι που πνέουν στη περιοχή είναι κυρίως δυτικοί. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή έχει υπολογιστεί στα 1300 mm ανά χρόνο και έτσι η αναλογία της μέσης ετήσιας βροχόπτωσης προς την πιθανή εξάτμιση είναι 0.5 (Vardavas, 1997). Με βάση τα δεδομένα αυτά, η περιοχή έχει χαρακτηριστεί ως ημίξηρη με βάση το ορισμό του UNCED (The United Nations Conference on Environment and Development 1994).

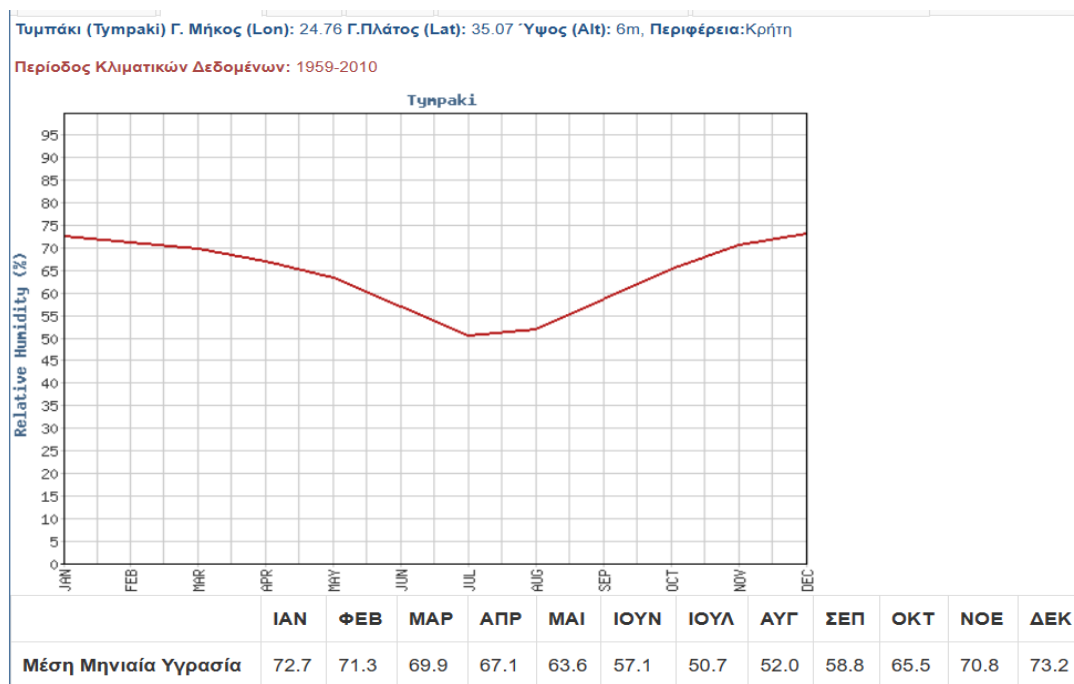
Στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης, οι άνεμοι που πνέουν είναι κυρίως δυτικοί-βορειοδυτικοί. Κατά την διάρκεια της θερινής περιόδου, οι βόρειοι άνεμοι προκαλούν πολύ ξηρές συνθήκες, οι οποίες εντείνονται λόγω της έλλειψης χαμηλών βαρομετρικών στο ανατολικό κομμάτι της Μεσογείου και διακόπτονται μόνο με την εμφάνιση σύντομων παροδικών καταιγίδων. Στα πεδινά σημεία της περιοχής, συνήθως τα φαινόμενα καύσωνα είναι αυξημένης διάρκειας καθώς οι νότιοι άνεμοι προερχόμενοι από την Αφρική συντελούν στην διατήρηση υψηλής θερμοκρασίας.

Το νοτιότερο κομμάτι του νησιού είναι θερμότερο από το βορειότερο και επιπλέον αποτελεί το θερμότερο κομμάτι όλης της χώρας. Κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου, οι θερμοκρασίες παρουσιάζουν αύξηση στις περιοχές με μικρότερα γεωγραφικά πλάτη, ενώ κατά την διάρκεια της ξηρής περιόδου και ειδικότερα τους μήνες Μάιο και Αύγουστο, οι θερμοκρασίες αυξάνονται από τις παράκτιες περιοχές προς τις πεδινές. Θερμοκρασίες κοντά στους 40 βαθμούς Κελσίου είναι πιθανές κατά την διάρκεια του καλοκαιριού ενώ θερμοκρασίες κάτω των 5 βαθμών Κελσίου είναι ιδιαίτερα σπάνιες την διάρκεια του χειμώνα (Tsanis I. et al., 2006). Η μέση θερμοκρασία τον χειμώνα στην πεδιάδα της Μεσσαράς είναι 12°C, ενώ το καλοκαίρι η μέση τιμή της θερμοκρασίας είναι 28°C. Όσον αφορά την σχετική υγρασία, τον χειμώνα είναι περίπου 70% ενώ το καλοκαίρι περίπου 60% (Vardavas I.M. et al., 1997).

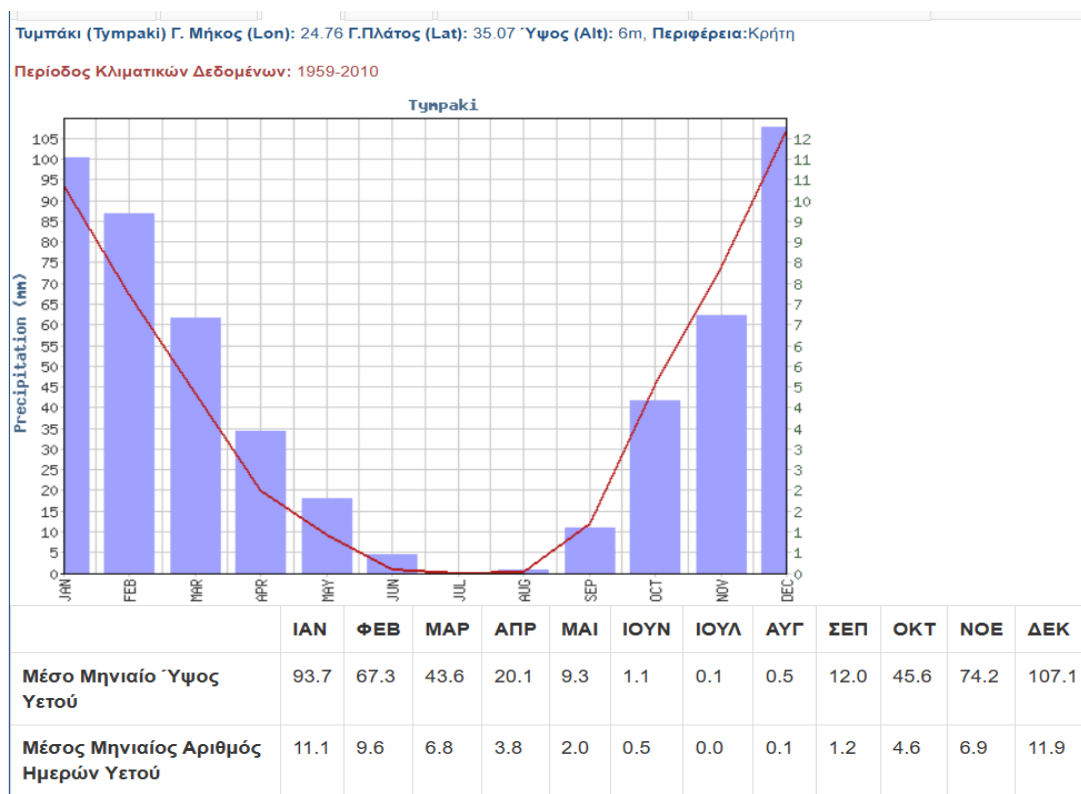
Παρακάτω παρουσιάζονται μετεωρολογικά δεδομένα σε μορφή διαγραμμάτων τα οποία έχουν συλλεχτεί από τους μετεωρολογικούς σταθμούς στην περιοχή του Τυμπακίου, το οποίο βρίσκεται στο δυτικό άκρο της περιοχής μελέτης.



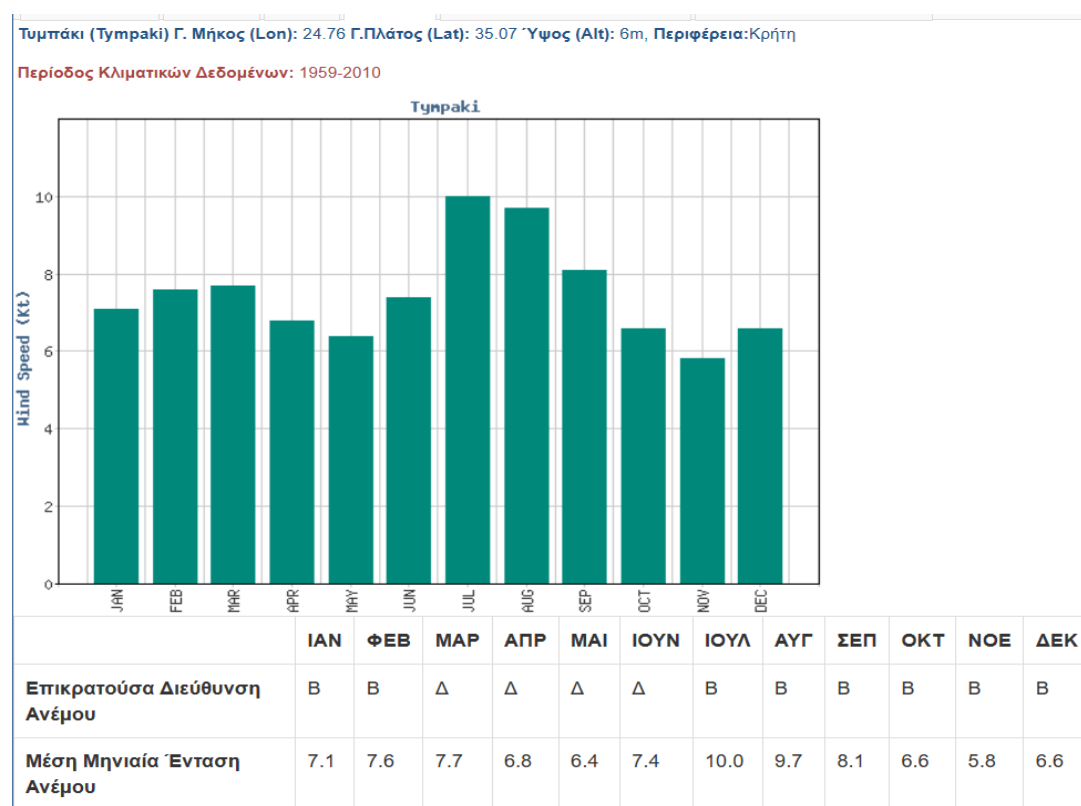
Εικόνα 3.4.1 Κλιματικά δεδομένα θερμοκρασίας Τυμπακίου για την περίοδο 1959-2010
 (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία)



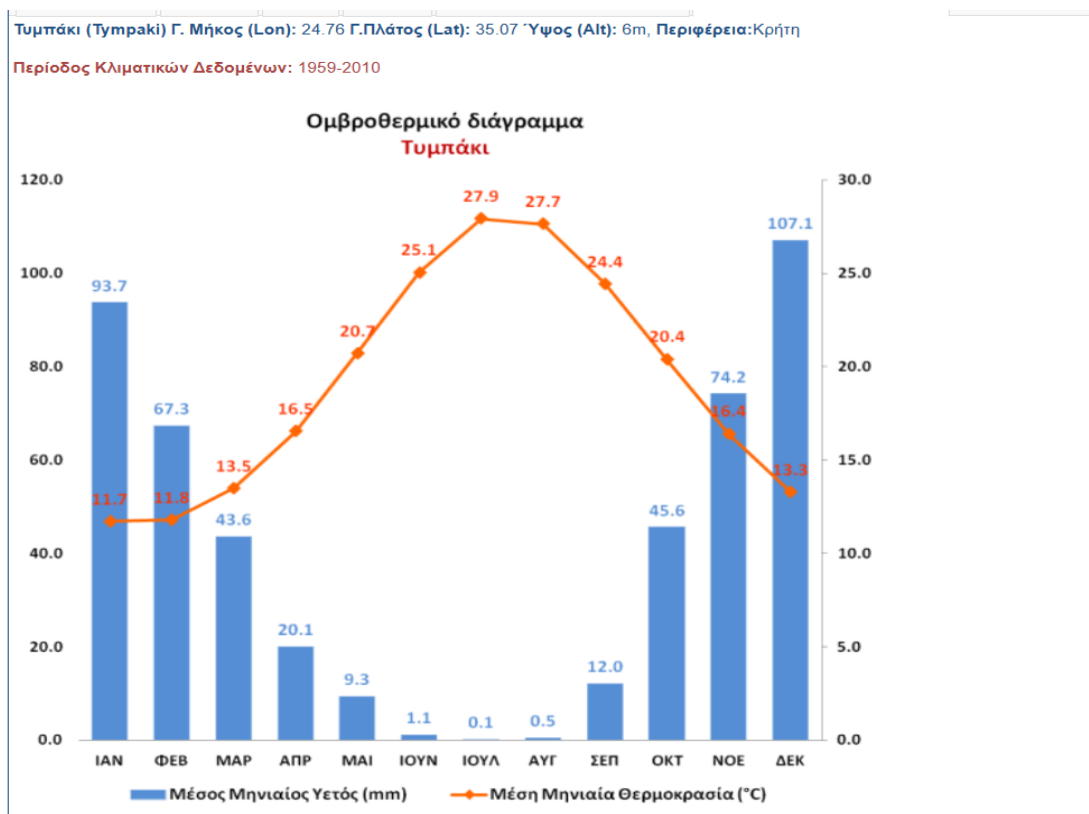
Εικόνα 3.4.2 Κλιματικά δεδομένα υγρασίας Τυμπακίου για την περίοδο 1959-2010
 (Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία)



Εικόνα 3.4.3 Κλιματικά δεδομένα υετού Τυμπακίου για την περίοδο 1959-2010
(Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία)



Εικόνα 3.4.4 Κλιματικά δεδομένα ανέμου Τυμπακίου για την περίοδο 1959-2010
(Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία)

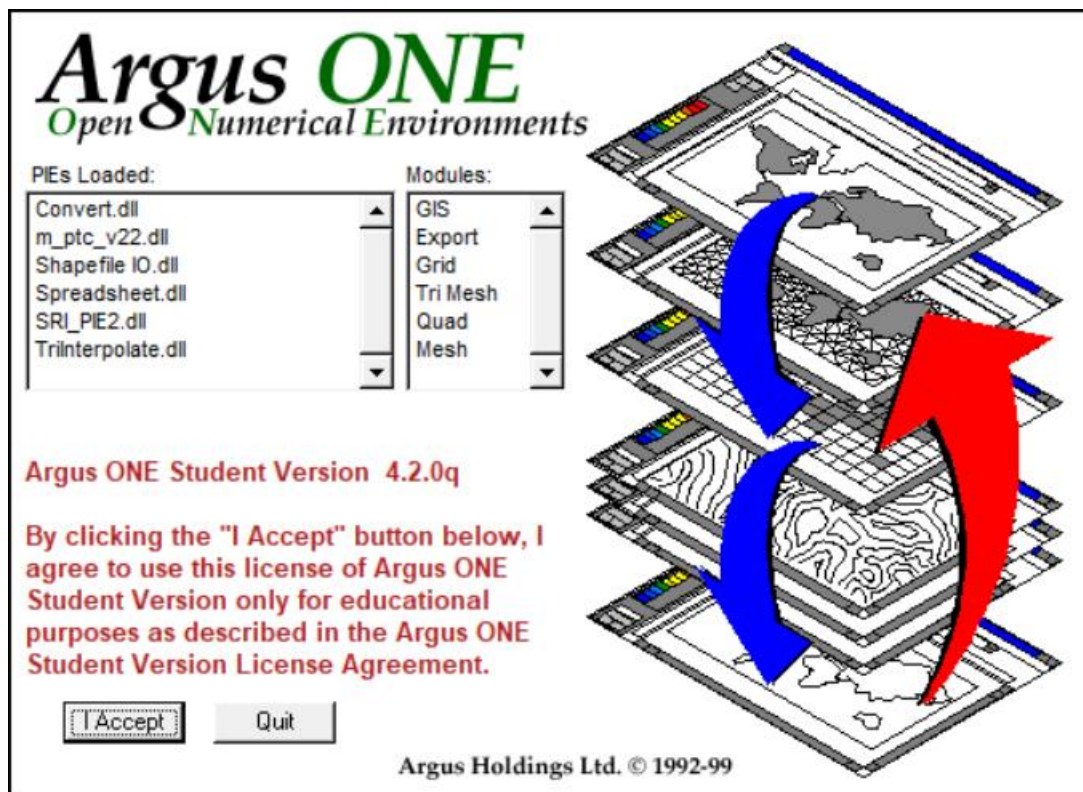


Εικόνα 3.4.5 Ομβροθερμικό διάγραμμα Τυμπακίου για την περίοδο 1959-2010
(Πηγή: Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία)

4. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το μοντέλο PTC παρέχει τη δυνατότητα της μοντελοποίησης της ροής (flow) και της ταχύτητας (velocity) του νερού ενός υπόγειου υδροφορέα, αλλά και της μεταφοράς μάζας ενός ρύπου (transport) σε αυτόν. Εν προκειμένω, στην εργασία αυτή, μοντελοποιείται μόνο η ροή και συγκεκριμένα υπολογίζονται τα υδραυλικά ύψη σε κάθε σημείο της περιοχής.

Τα δεδομένα που καταχωρήθηκαν στο πρόγραμμα Argus One αφορούν στο μέγεθος του μήκους, όπου ως μονάδα χρησιμοποιήθηκε το μέτρο (m) και στο μέγεθος του χρόνου όπου χρησιμοποιήθηκε η ημέρα (d).



Τα παρακάτω επίπεδα του Argus ONE, δημιουργούνται όταν ο χρήστης ξεκινά ένα νέο PTC Project:

- **PTC DOMAIN OUTLINE:** Το επίπεδο αυτό χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστεί η περιοχή που μελετάται. Είναι μια γραφική απεικόνιση του πεδίου, η οποία συνήθως είναι ένα κλειστό πολύγωνό το οποίο προσομοιώνει τον αληθινό χάρτη της περιοχής ενδιαφέροντος.
- **PTC MESH DENSITY:** Το επίπεδο αυτό σχετίζεται με το μέγεθος της πυκνότητας, η οποία χρησιμοποιείται για να καθοριστεί το επιθυμητό μήκος της πλευράς των στοιχείων που απαρτίζουν το πλέγμα, όταν το πρόγραμμα δημιουργεί αυτόματα το πλέγμα.
- **PTC MESH TYPE:** Το επίπεδο αυτό χρησιμοποιείται με σκοπό να παραχθεί ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, είτε τριγωνικό είτε τετραγωνικό με βάση τις αρχικές ρυθμίσεις του χρήστη στο πρόγραμμα.
- **PTC DATA:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται για την εισαγωγή δεδομένων από εξωτερικά προγράμματα στο Argus ONE.
- **MAPS:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται για την εισαγωγή ψηφιοποιημένων χαρτών στο Argus ONE.
- **PTC OUTPUT GRAPHS:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται για την δημιουργία γραφημάτων που αφορούν τα υδραυλικά ύψη, τις συγκεντρώσεις των ρύπων και τις ταχύτητες ροής, με βάση τα δεδομένα του PTC (PTC Data).
- **RAIN:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστεί η ποσότητα του ύδατος που έχει διηθηθεί μετά την βροχόπτωση στην πρώτη εδαφική στρώση.

- **BOTTOM ELEVATION:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστεί το υψόμετρο κάθε εδαφικής στρώσης.

Τα παρακάτω επίπεδα δημιουργούνται από τον χρήστη ανάλογα με τον αριθμό των εδαφικών στρώσεων. Έχοντας ως παράδειγμα την πρώτη εδαφική στρώση, δηλαδή τον πρώτο γεωλογικό σχηματισμό, τα επίπεδα έχουν ως εξής:

- **ELEVATION L1:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστεί το υψόμετρο της εδαφικής στρώσης.
- **CONDUCTIVITY L1:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστεί η υδραυλική αγωγιμότητα κάθε εδαφικής στρώσης. Περιέχει τρεις μεταβλητές: xConductivity L1, yConductivity L1 και zConductivity L1.
- **INITIAL HEADS L1:** Στο επίπεδο αυτό ορίζονται οι αρχικές συνθήκες υδραυλικής ροής (υδραυλικά ύψη).
- **STORATIVITY L1:** Στο επίπεδο αυτό ορίζεται η ικανότητα αποθηκευτικότητας.
- **BC FLOW L1:** Στο επίπεδο αυτό ορίζονται οι οριακές συνθήκες υδραυλικής ροής. Το επίπεδο αυτό περιέχει ακόμα δύο μεταβλητές, BC Type L1 και BC Stress[j]. Ο δείκτης j σχετίζεται με τον αριθμό των περιόδων που έχει ο χρήστης στις αρχικές ρυθμίσεις του προγράμματος.
- **DISPERSIVITY L1:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστεί η διασπορά. Περιέχει τρεις μεταβλητές: xDispersivity L1, yDispersivity L1, zDispersivity L1.
- **POROSITY L1:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστεί το πορώδες της περιοχής ενδιαφέροντος.
- **ADSORPTION L1:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστεί η απορρόφηση. Περιέχει τρεις μεταβλητές: alpha, beta and gamma.
- **INITIAL CONCENTRATIONS L1:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστούν οι αρχικές συνθήκες για την μεταφορά ρύπου (συγκεντρώσεις).
- **BC TRANSPORT L1:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστούν οι οριακές συνθήκες για την μεταφορά ρύπου (συγκεντρώσεις). Το επίπεδο αυτό περιέχει ακόμα δύο μεταβλητές BC Type L1 and BC Stress[j]. Ο δείκτης j σχετίζεται με τον αριθμό των περιόδων που έχει ο χρήστης στις αρχικές ρυθμίσεις του προγράμματος.
- **BC LEAKAGE L1:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται με σκοπό να καθοριστούν οι οριακές συνθήκες για την διαρροή. Το επίπεδο αυτό περιέχει ακόμα τρεις μεταβλητές: Reference_h_L1, Conductance_L1, Reference_c_L1. These variables are required by PTC to define BCs of type 3 by node.

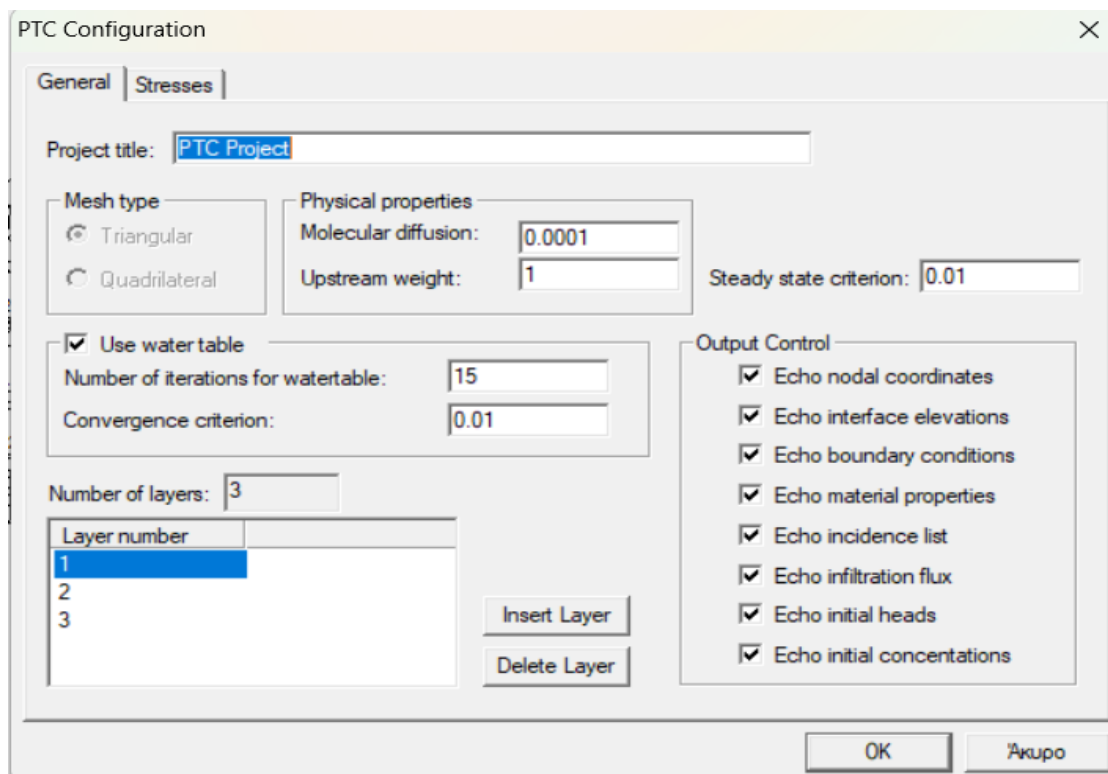
Δύο ακόμα επίπεδα τα οποία δεν σχετίζονται με τις εδαφικές στρώσεις αλλά με την περιγραφή της ταχύτητας της υδραυλικής ροής σε δύο κατευθύνσεις είναι τα παρακάτω:

- **PTC xVELOCITIES:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται για την εισαγωγή της συνιστώσας της ταχύτητας στον άξονα x (Vx).

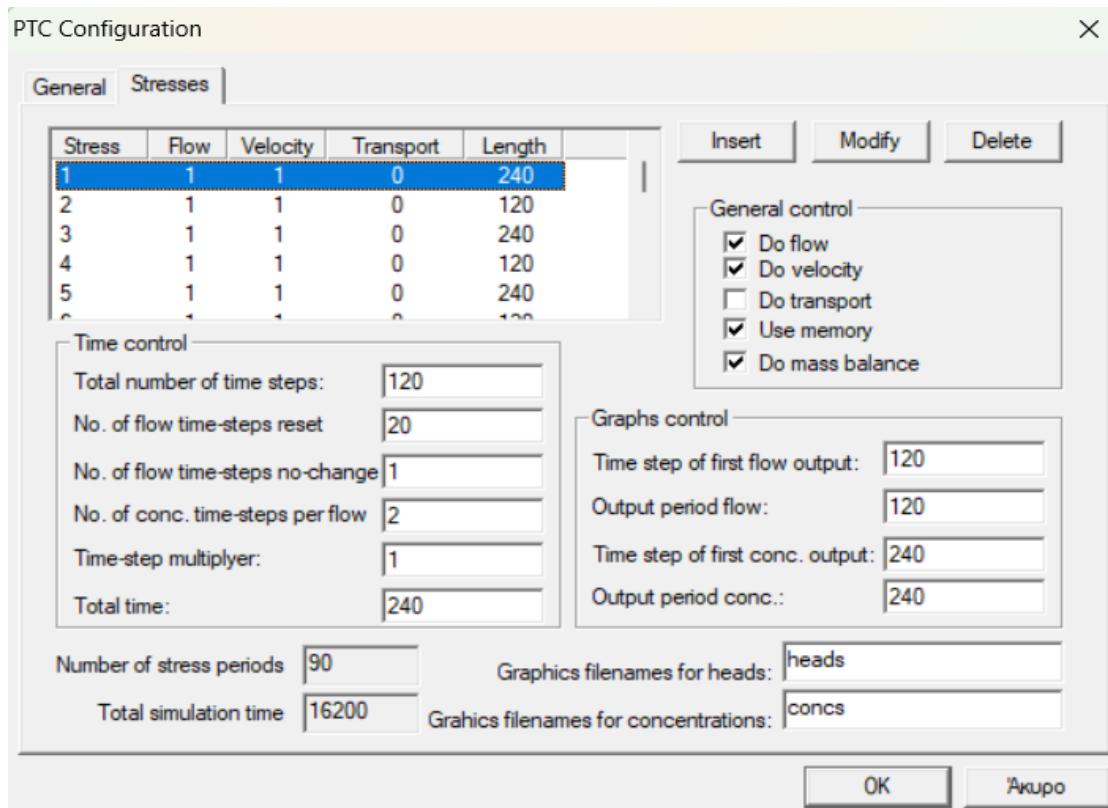
- **PTC yVELOCITIES:** Αυτό το επίπεδο χρησιμοποιείται για την εισαγωγή της συνιστώσας της ταχύτητας στον άξονα y (V_y).

4.1 Αρχικές Ρυθμίσεις Παραμέτρων Μοντέλου

- Αρχικά, με το άνοιγμα του προγράμματος δημιουργείται ένα νέο PTC project και ορίζεται ο τύπος καννάβου (mesh type) ως τριγωνικός. Επιλέγεται ο τριγωνικός και όχι ο τετραγωνικός κάνναβος διότι ο τριγωνικός προσφέρει το πλεονέκτημα μεγαλύτερης ακρίβειας απεικόνισης του περιβάλλοντα χώρου και έτσι η περιοχή απεικονίζεται από τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία. Επιπλέον στο PTC Configuration, ορίζεται ο αριθμός των εδαφικών στρώσεων ή επιπέδων (layers) σε τρεις καθώς και ο αριθμός των χρονικών περιόδων (stresses). Η μοντελοποίηση γίνεται για 45 χρόνια άρα για 90 περιόδους, καθώς το έτος χωρίζεται σε 2 περιόδους, ξηρή και υγρή. Η υγρή περίοδος έχει διάρκεια περίπου 240 ημέρες και αφορά τους μήνες Σεπτέμβριο μέχρι Απρίλιο, ενώ η ξηρή 120 ημέρες και αφορά τους μήνες Μάη μέχρι Αύγουστο. Τέλος, στο παράθυρο αυτό ορίζονται 120 χρονικά βήματα για κάθε περίοδο.

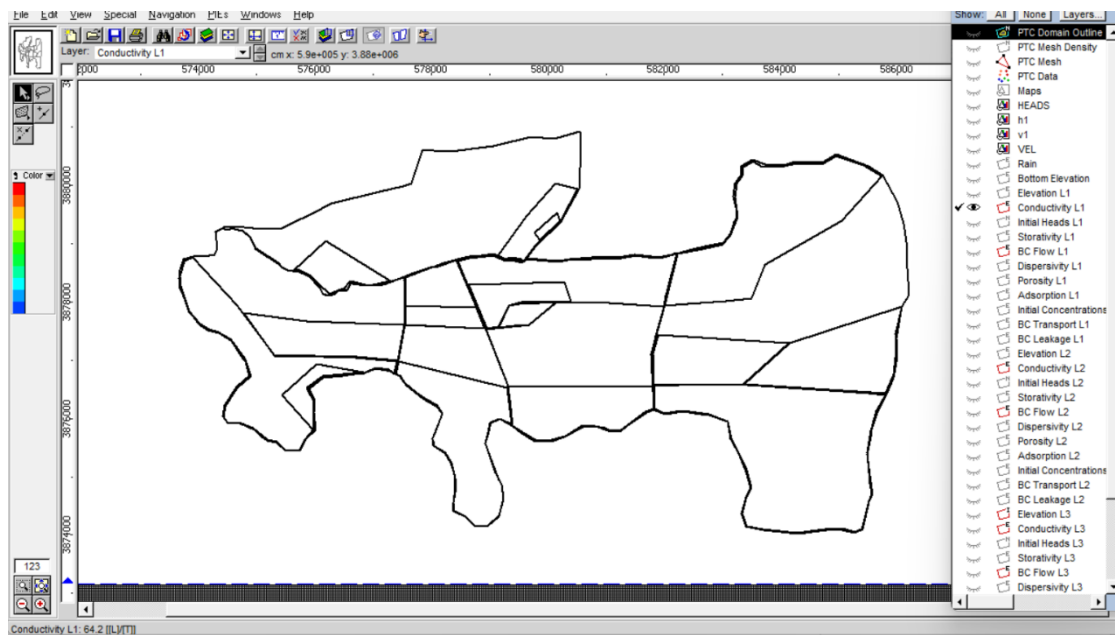


Εικόνα 4.1.1 Παράθυρο PTC Configuration, Καρτέλα General

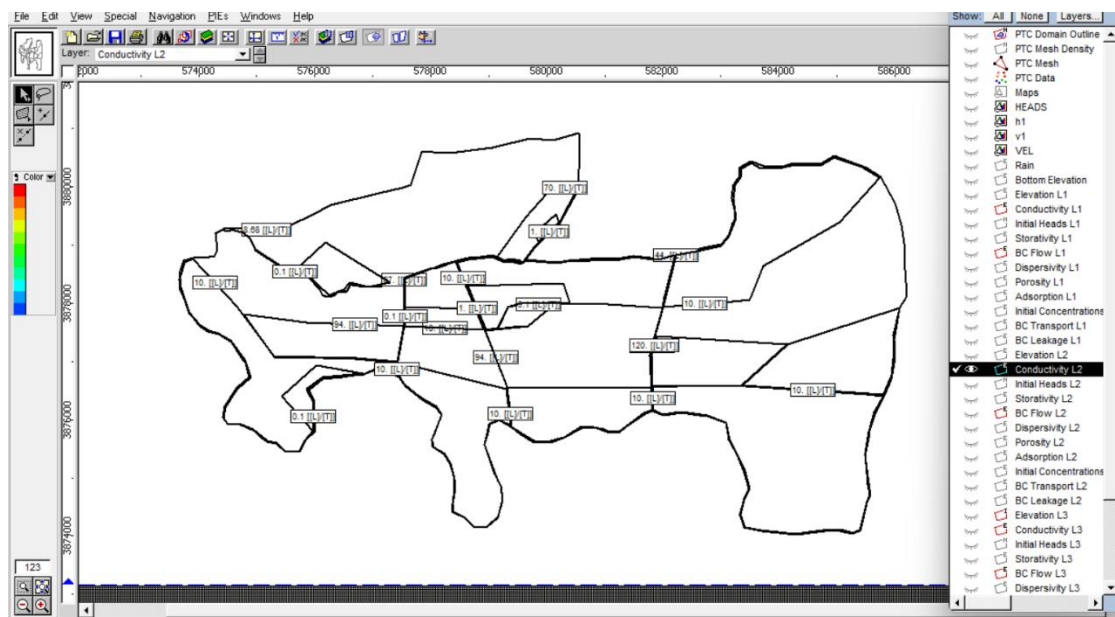


Εικόνα 4.1.2 Παράθυρο PTC Configuration, Καρτέλα Stresses

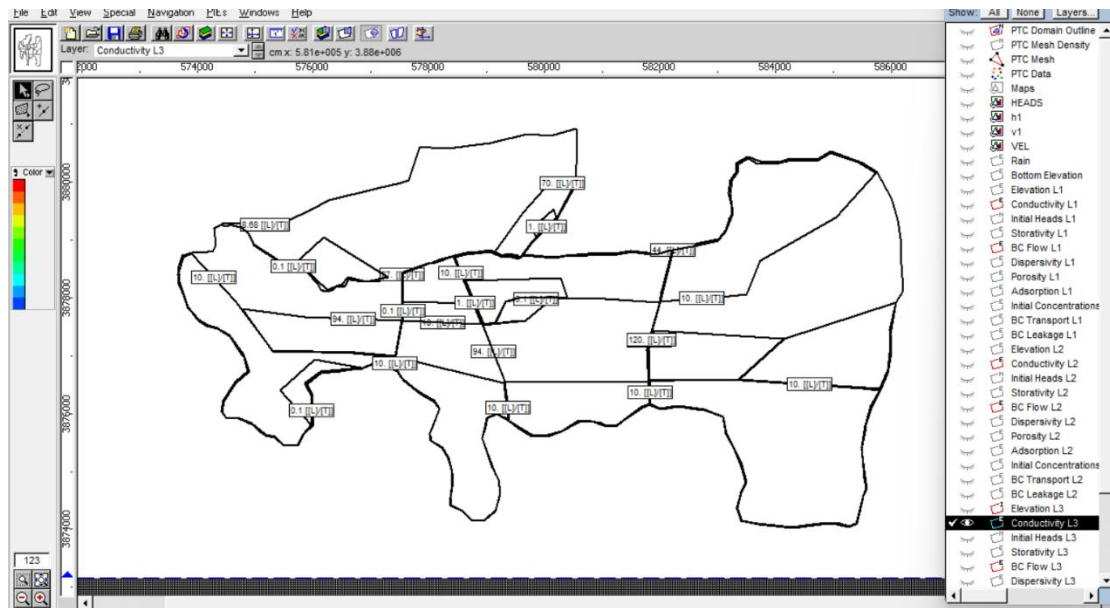
- Στο παράθυρο των layers, PTC Domain Outline, εισάγεται ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής, μέσω της καρτέλας File > Import PTC Domain Outline > Import Shape File, ο οποίος από προηγούμενη έρευνα, περιέχει στοιχεία για τις τρεις στρώσεις L1, L2 και L3. Η ανύψωση του εδάφους (Bottom Elevation) ορίζεται στα 0 μέτρα και η πυκνότητα του καννάβου (Density), δηλαδή πόσο πυκνά είναι τα τρίγωνα που δημιουργούνται, ορίζεται ίση με 3500. Έπειτα καθορίζεται το υψόμετρο της πρώτης εδαφικής στρώσης (Elevation L1) στα 100 μέτρα και το υψόμετρο της δεύτερης εδαφικής στρώσης (Elevation L2) στα 150 μέτρα. Για το υψόμετρο της τελευταίας εδαφικής στρώσης (Elevation L3) εισάγεται ένα αρχείο shaprefile που περιέχει πληροφορίες για τις ισοϋψείς καμπύλες της περιοχής.
- Ακόμα μια παράμετρος που χρειάζεται να συμπληρωθεί είναι αυτή της υδραυλικής αγωγιμότητας (conductivity) και για τα τρία επίπεδα δηλαδή L1, L2 και L3. Η περιοχή διαιρείται σε υποπεριοχές με διαφορετικές υδραυλικές αγωγιμότητες. Οι τιμές αυτών έχουν παρθεί από αρμόδιους φορείς της περιοχής με σκοπό να συμπληρωθούν στο μοντέλο.



Εικόνα 4.1.3 Χάρτης περιοχής υδραυλικής αγωγιμότητας επιπέδου 1 (Conductivity L1)



Εικόνα 4.1.4 Χάρτης περιοχής υδραυλικής αγωγιμότητας επιπέδου 2 (Conductivity L2)



Εικόνα 4.1.5 Χάρτης περιοχής υδραυλικής αγωγιμότητας επιπέδου 3 (Conductivity L3)

4.2 Οριακές Συνθήκες Μοντέλου και Γεωτρήσεις

Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες, αυτές εισάγονται στο μοντέλο PTC, για κάθε στρώση ξεχωριστά ως BC Flow L1, BC Flow L2, και BC Flow L3. Οι οριακές συνθήκες ανάλογα με την παράμετρο που διατηρείται σταθερή εκκρίνουν σε δύο κατηγορίες, πρώτου τύπου και δεύτερου τύπου. Οι οριακές συνθήκες πρώτου τύπου είναι αυτές οι οποίες αφορούν σταθερό υδραυλικό ύψος και οι δεύτερου τύπου είναι αυτές της σταθερής υδραυλικής κλίσης -παροχής. Στις εδαφικές στρώσεις L1 και L2, οι οριακές συνθήκες είναι πρώτου τύπου. Σημειώνεται επίσης ότι η ποσότητα ύδατος που εισρέει στη περιοχή κατευθύνεται από το ανατολικό κομμάτι προς το δυτικό κομμάτι της περιοχής καθώς βόρεια και νότια της περιοχής υπάρχουν αδιαπέρατοι γεωλογικοί σχηματισμοί οι οποίοι καθιστούν την εισροή του νερού σχεδόν αδύνατη.

- Συμπληρώνονται οι τιμές των οριακών συνθηκών (BC Flow) για όλες τις χρονικές περιόδους και στα τρία επίπεδα, με θετικό πρόσημο καθώς η ποσότητα ύδατος εισρέει στη περιοχή και εμπλουτίζει τον υδροφόρο.
- Οι γεωτρήσεις που έχουν δημιουργηθεί στη περιοχή βρίσκονται στη δεύτερη εδαφική στρώση (επίπεδο L2) και ορίζονται ως οριακές συνθήκες δεύτερου τύπου. Συμπληρώνονται τα δεδομένα των πηγαδιών αντλήσεων (wells) για όλες τις χρονικές περιόδους με αρνητικό πρόσημο καθώς η άντληση σηματοδοτεί την αφαίρεση ύδατος από το έδαφος. Εδώ σημειώνεται ότι τα δεδομένα για τις αντλήσεις αλλά και για τις θέσεις των πηγαδιών άντλησης προήλθαν από τους αρμόδιους φορείς της περιοχής.

Contour Information

Please enter value for this contour:

OK Cancel

Contour is: One point
 Number of vertices: 1
 Contour area: 0
 Contour length: 0

Contour name: 43

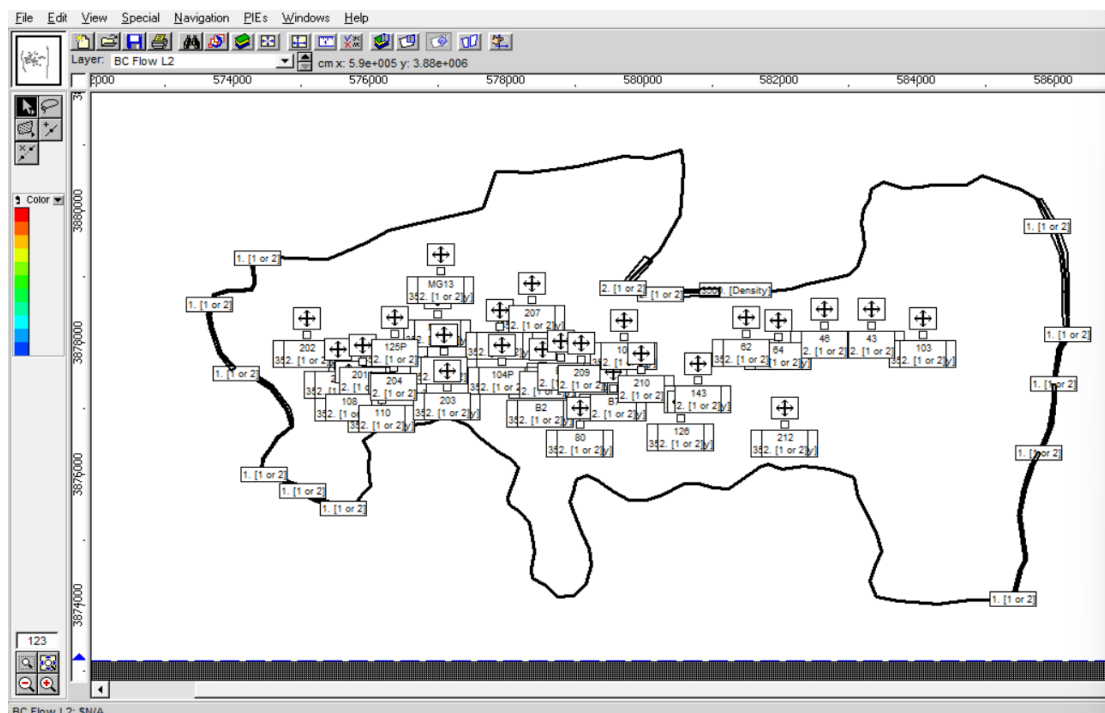
Icon: Source

Parameter	Value	Units
BC Type L2	2	1 or 2
BC Stress1	-288	
BC Stress2	-672	
BC Stress3	-288	
BC Stress4	-672	
BC Stress5	-288	

Εικόνα 4.2.1 Παράδειγμα ενός πηγαδιού άντλησης (επίπεδο 2 , BC Flow L2)

Σημειώνεται πως τα πηγάδια άντλησεως (wells) έχουν ομαδοποιηθεί κατά έναν συγκεκριμένο τρόπο διότι η έκδοση του μοντέλου PTC που χρησιμοποιείται στην εργασία (PTC version) δεν επιτρέπει την δημιουργία περισσότερων από 2000 κόμβων. Συνεπώς, τα 58 υπάρχοντα πηγάδια ομαδοποιήθηκαν σε 30 ως εξής:

Τα παραπάνω 58 πηγάδια άντλησης ομαδοποιήθηκαν σε 30 με τον εξής τρόπο: για πολλά πηγάδια σε πολύ κοντινή απόσταση επιλέχθηκε αυτό με τον μεγαλύτερο ρυθμό άντλησης ενώ ταυτόχρονα προστέθηκε σε αυτό και ο ρυθμός κάθε γειτονικού πηγαδιού που αφαιρέθηκε κατά την διαδικασία της ομαδοποίησης.



Εικόνα 4.2.2 Χάρτης οριακών συνθηκών και γεωτρήσεων για το επίπεδο 2 (BC Flow L2)

4.3 Παράμετρος Βροχόπτωσης

Η βροχόπτωση αποτελεί έναν σημαντικό παράγοντα εμπλουτισμού των υπογείων υδάτων. Ένα ποσοστό αυτής διηθείται προς τα κατώτερα εδαφικά στρώματα, ένα ποσοστό αυτής εξατμίζεται και τέλος ένα πολύ μικρό ποσοστό αυτής απορρέει επιφανειακά.

Για την εύρεση της συνολικής ποσότητας βροχόπτωσης για κάθε ξηρή και υγρή περίοδο των 45 ετών της μοντελοποίησης, χρειάστηκαν ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης για την περιοχή για το χρονικό διάστημα 2005-2050. Τα δεδομένα αυτά προήλθαν από 6 αξιόπιστα επιστημονικά μοντέλα και έπειτα επεξεργάστηκαν. Το πορώδες της περιοχής (porosity) ορίστηκε ίσο με 0.1 για όλα τα εδαφικά επίπεδα.

Τα μοντέλα αυτά είναι τα εξής :

1. DMI_HIRHAM5_NorESM1-M
2. CNRM_CERFACS_CNRM_CM5_CCLM4_8_17
3. ICHEC_EC_EARTH_HIRHAM5
4. IPSL-INERIS_WRF381P_IPSL-CM5A-MR
5. KNMI_CNRM-CM5
6. MPI_M_MPI_ESM_LR_RCA4

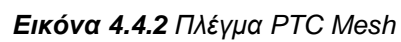
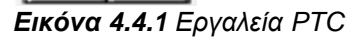
Αρχικά, βρέθηκε η συνολική ποσότητα βροχόπτωσης σε mm/d για κάθε μήνα ξεκινώντας από τον Σεπτέμβριο του 2005 μέχρι τον Αύγουστο του 2050, η οποία μετατράπηκε σε m/d. Έπειτα βρέθηκε η συνολική ποσότητα βροχόπτωσης για κάθε ξηρή και κάθε υγρή περίοδο κάθε έτους σε m/d, δηλαδή για Σεπτέμβρη 2005 – Απρίλη 2006 (υγρή) και Μάη 2006 - Αύγουστο 2006 (ξηρή) και ούτω καθ' εξής για τα επόμενα έτη. Τέλος, η τιμή κάθε υγρής περιόδου διαιρέθηκε διά 240 ημέρες ενώ κάθε ξηρής διά 120 ημέρες με σκοπό να βρεθεί ο μέσος όρος βροχόπτωσης για κάθε περίοδο.

Για τα δύο κλιματικά σενάρια, η παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκε 6 φορές, λαμβάνοντας υπόψιν τα δεδομένα κάθε μοντέλου ξεχωριστά και η τελική τιμή της συνολικής βροχόπτωσης για κάθε περίοδο προέκυψε από τον μέσο όρο των έξι τιμών των μοντέλων.

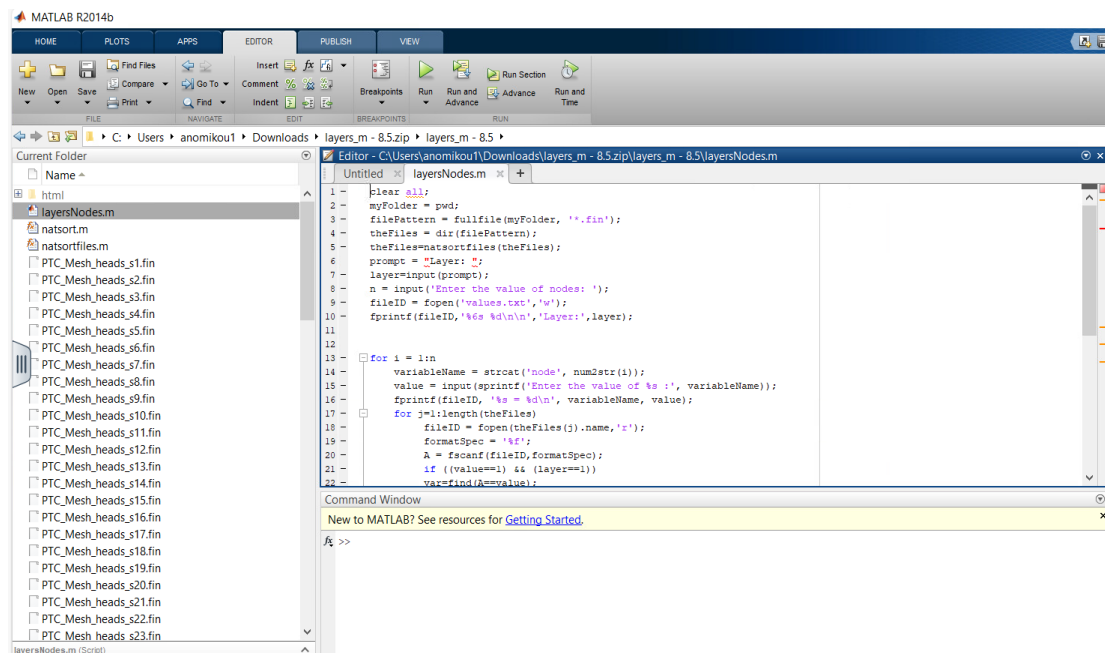
4.4 Δημιουργία πλέγματος και τρέξιμο μοντέλου

Ο χρήστης του μοντέλου μπορεί να επιλέξει το επίπεδο PTC Mesh και με την χρήση των εργαλείων του μοντέλου, πιο συγκεκριμένα με το «μαγικό ραβδί» (magic wand), πατώντας σε ένα σημείο μέσα στον όγκο ελέγχου, της περιοχής δηλαδή, το μοντέλο δημιουργεί ένα πλέγμα αποτελούμενο από πολλούς κόμβους. Οι κόμβοι οφείλουν να είναι αριθμημένοι έτσι ώστε να επιτευχθεί το τρέξιμο του μοντέλου. Με σκοπό να αριθμηθούν, στην ενότητα Special επιλέγεται η εντολή Renummer και ενεργοποιείται η εντολή Optimize the Bandwidth.

Το μοντέλο τρέχει όταν ο χρήστης βρίσκεται στο PTC Mesh και από την ενότητα PIE's επιλέγει Run PTC.

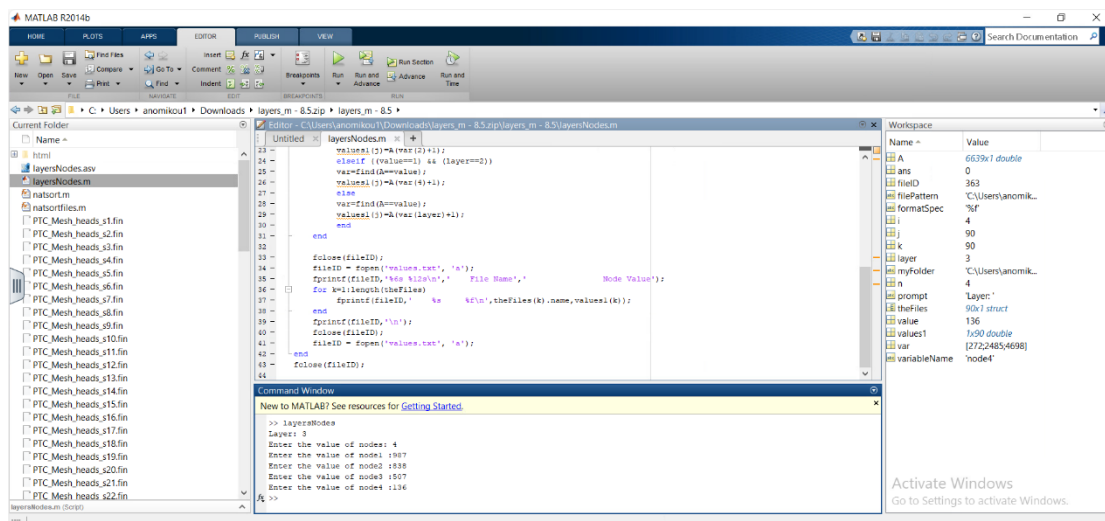


60



Εικόνα 4.4.3 Περιβάλλον MATLAB με ενσωματωμένο τον κώδικα στο παράθυρο του Editor

Με το πέρας του τρεξίματος του κώδικα, στο command window της MATLAB, συμπληρώνεται ο αριθμός των κόμβων καθώς και ο αριθμός των εδαφικών επιπέδων. Οι κόμβοι που έχουν επιλεγεί είναι οι 987, 838, 507, 136.



Εικόνα 4.4.4 Περιβάλλον MATLAB μετά το πέρας του τρεξίματος του κώδικα

Η Matlab “τρέχει”, εξάγονται τα αποτελέσματα σε μορφή κειμένου από το values.txt και επεξεργάζονται σε περιβάλλον excel.

```
values - Notepad
File Edit Format View Help
Layer: 3

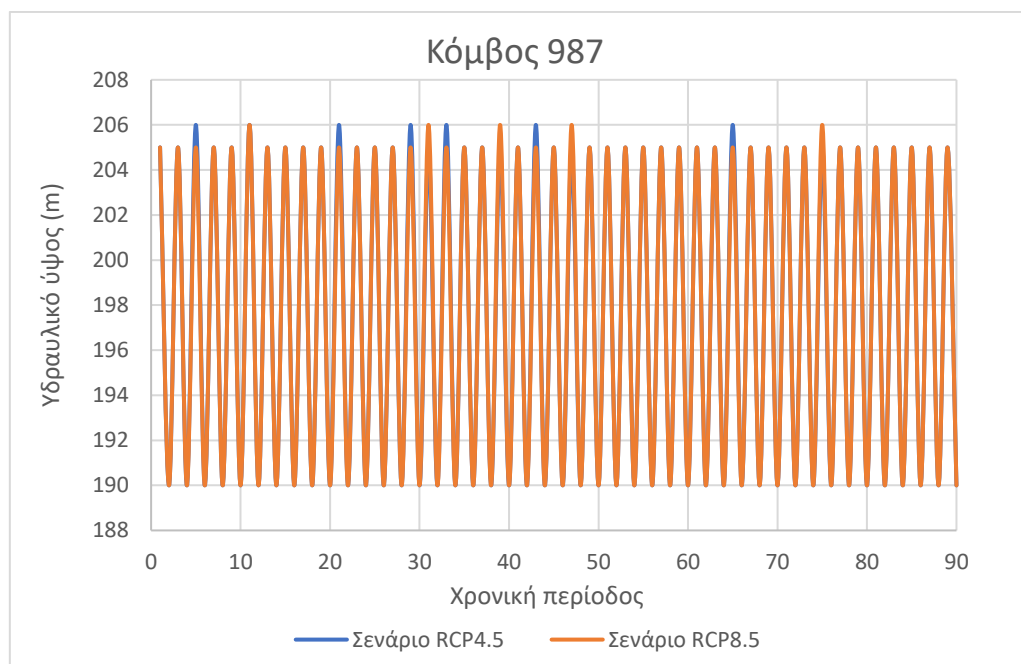
node1 = 987
File Name      Node Value
PTC_Mesh_heads_s1.fin  204.982058
PTC_Mesh_heads_s2.fin  190.094564
PTC_Mesh_heads_s3.fin  205.323533
PTC_Mesh_heads_s4.fin  190.186549
PTC_Mesh_heads_s5.fin  205.387585
PTC_Mesh_heads_s6.fin  190.085882
PTC_Mesh_heads_s7.fin  205.206227
PTC_Mesh_heads_s8.fin  190.189556
PTC_Mesh_heads_s9.fin  205.033837
PTC_Mesh_heads_s10.fin 190.183648
PTC_Mesh_heads_s11.fin 205.615740
PTC_Mesh_heads_s12.fin 190.158917
PTC_Mesh_heads_s13.fin 205.277164
PTC_Mesh_heads_s14.fin 190.181936
PTC_Mesh_heads_s15.fin 205.111157
PTC_Mesh_heads_s16.fin 190.184477
PTC_Mesh_heads_s17.fin 205.179593
PTC_Mesh_heads_s18.fin 190.112967
PTC_Mesh_heads_s19.fin 204.792781
```

Εικόνα 4.4.5 Εξαγόμενες τιμές υδραυλικών υψών έπειτα από το τρέξιμο του μοντέλου σε περιβάλλον Matlab

Για κάθε κλιματικό σενάριο, RCP4.5 και RCP8.5, στο περιβάλλον excel δημιουργείται ένα διάγραμμα το οποίο συσχετίζει τις τιμές των υδραυλικών υψών των κόμβων (σε m) με τις χρονικές περιόδους.

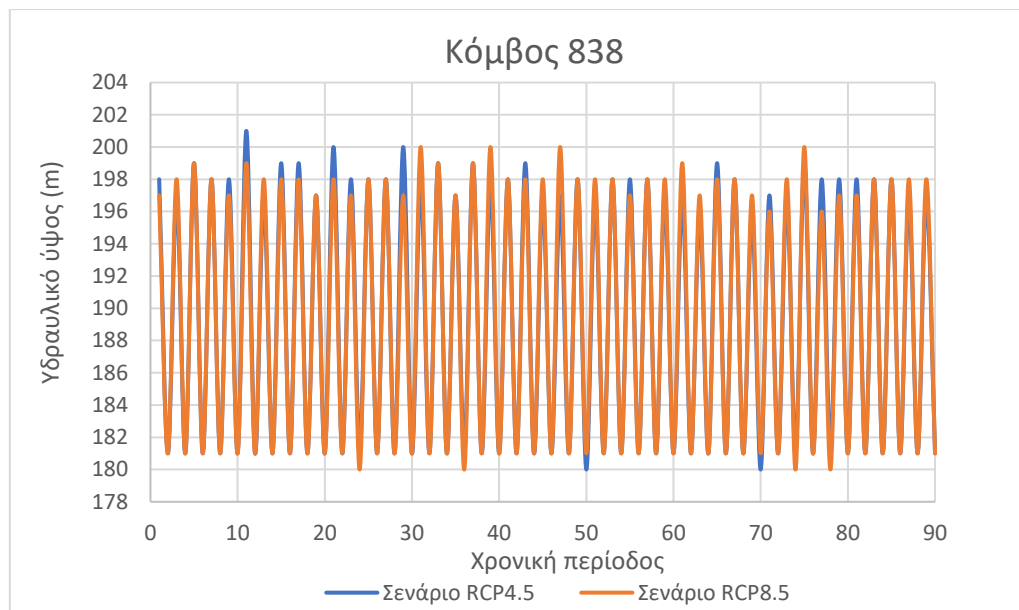
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν βασίζονται σε δεδομένα που προέκυψαν από το τρέξιμο του μοντέλου στο περιβάλλον της MATLAB. Στον άξονα x τοποθετούνται οι χρονικές περίοδοι (Stresses) από την πρώτη μέχρι και την εννενηκοστή, καθώς το χρονικό διάστημα της μοντελοποίησης είναι 45 έτη (2005-2050), ενώ στον άξονα y τοποθετούνται οι τιμές των υδραυλικών υψών για τους κόμβους που έχουν επιλεγεί στην περιοχή μελέτης. Έχουν επιλεγεί 4 κόμβοι των οποίων οι αυξομειώσεις των υδραυλικών υψών παρουσιάζονται παρακάτω. Στο διάγραμμα του εκάστοτε κόμβου απεικονίζονται οι τιμές του υδραυλικού ύψους κάθε χρονικής περιόδου για κάθε κλιματικό σενάριο ξεχωριστά.



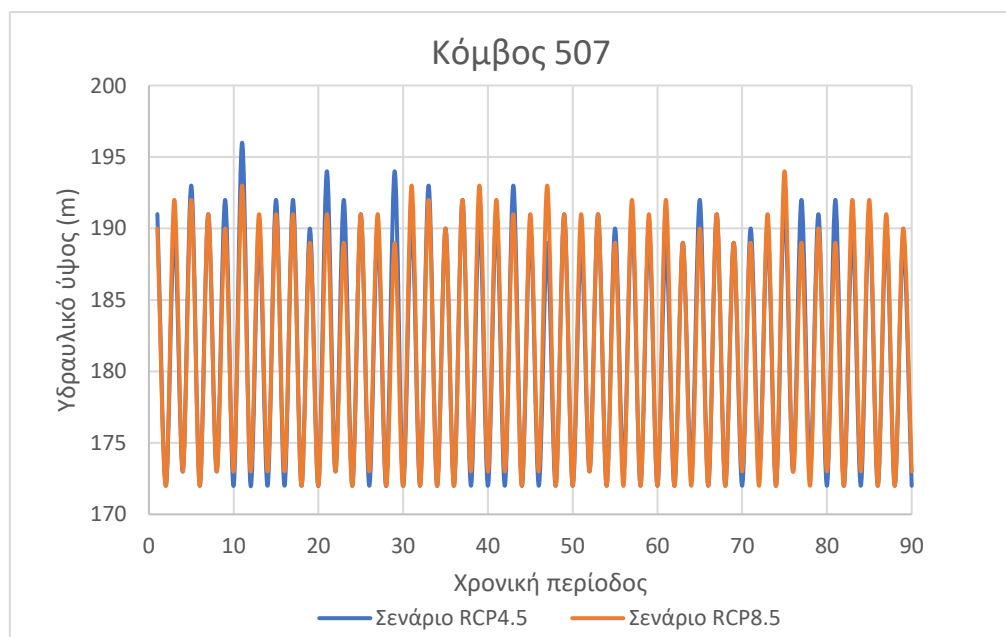
Διάγραμμα 5.1 Υδραυλικά ύψη κόμβου 987 για κλιματικά σενάρια RCP4.5 και RCP8.5

Όσον αφορά τον κόμβο 987, μεταξύ των δύο κλιματικών σεναρίων, οι διαφορές των τιμών του υδραυλικού ύψους κάθε περιόδου είναι αμελητέες. Το εύρος του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται μεταξύ **190-206 μέτρα** και για τα δύο κλιματικά σενάρια. Όπως γίνεται αντιληπτό, οι τιμές των ξηρών περιόδων είναι ίδιες και για τα δύο σενάρια, όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται σταθερά στα 190 μέτρα. Μικρή διαφοροποίηση παρουσιάζουν οι τιμές του σεναρίου RCP4.5 ως προς τις υγρές περιόδους, καθώς η μέγιστη τιμή που λαμβάνει το υδραυλικό ύψος στον κόμβο φτάνει τα 206 μέτρα, σε σχέση με την μέγιστη τιμή που λαμβάνει το υδραυλικό ύψος στο σενάριο RCP8.5 (205m). Γενικά, η υψομετρική διαφορά στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μεταξύ υγρής και ξηρής περιόδου κυμαίνεται στα 15-16 μέτρα και για τον λόγο αυτό θεωρείται σχετικά μικρή και για τα δύο σενάρια.



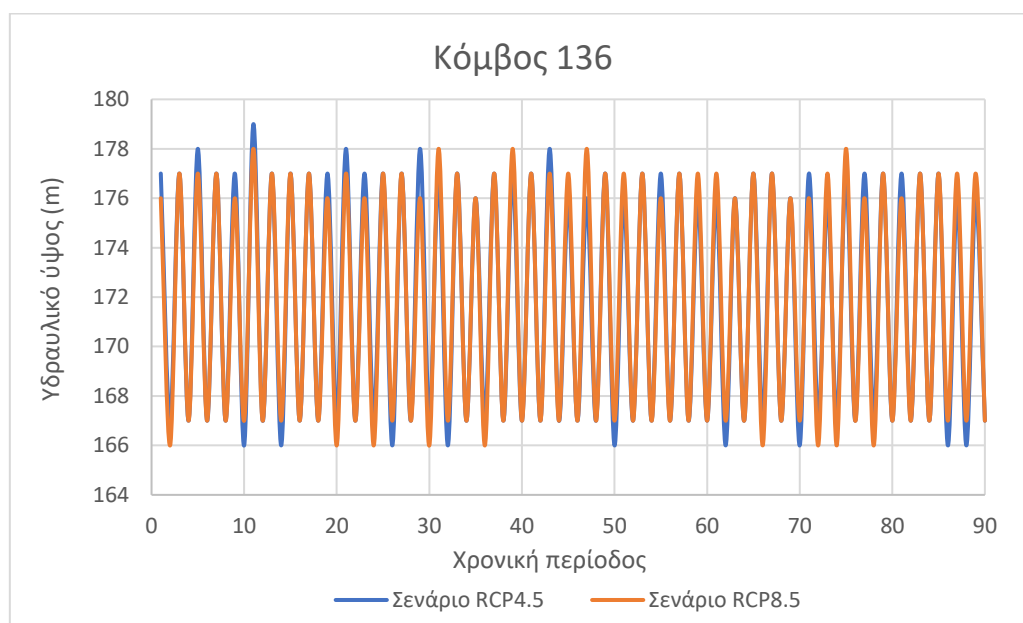
Διάγραμμα 5.2 Υδραυλικά ύψη κόμβου 838 για κλιματικά σενάρια RCP4.5 και RCP8.5

Σχετικά με τον κόμβο 838, το εύρος του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται μεταξύ **180-201 μέτρα** για το κλιματικό σενάριο RCP4.5 και **180-200 μέτρα** για το σενάριο RCP8.5. Μεγαλύτερες αυξομειώσεις παρατηρούνται στο υδραυλικό ύψος κατά την διάρκεια των υγρών περιόδων και όχι τόσο των ξηρών. Η αυξομείωση αυτή στις υγρές περιόδους, αφορά και τα δύο κλιματικά σενάρια και ανέρχεται στα 1-4 μέτρα. Όπως φαίνεται, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στις ξηρές περιόδους ανέρχεται στα 180-181 μέτρα και για τα δύο κλιματικά σενάρια. Η υψηλότερη τιμή υδραυλικού ύψους παρατηρείται στο σενάριο RCP4.5 και ανέρχεται στα 201 μέτρα. Η διαφορά μεταξύ της μέγιστης τιμής υδραυλικού ύψους υγρής περιόδου και ελάχιστης τιμής υδραυλικού ύψους ξηρής περιόδου, είναι 21 μέτρα.



Διάγραμμα 5.3 Υδραυλικά ύψη κόμβου 507 για κλιματικά σενάρια RCP4.5 και RCP8.5

Όσον αφορά τον κόμβο 507, το εύρος του ύψους του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται μεταξύ **172-196 μέτρα** για το κλιματικό σενάριο RCP4.5 και **172-194 μέτρα** για το σενάριο RCP8.5. Κατά την διάρκεια των υγρών περιόδων, παρατηρούνται έντονες και εμφανείς αυξομειώσεις στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, οι οποίες αφορούν και τα δύο σενάρια. Στο κλιματικό σενάριο RCP4.5 παρατηρείται η υψηλότερη τιμή υδραυλικού ύψους, η οποία απέχει από την ελάχιστη τιμή υδραυλικού ύψους, 24 μέτρα. Οι αυξομειώσεις της στάθμης κυμαίνονται από 1 μέχρι 6 μέτρα.

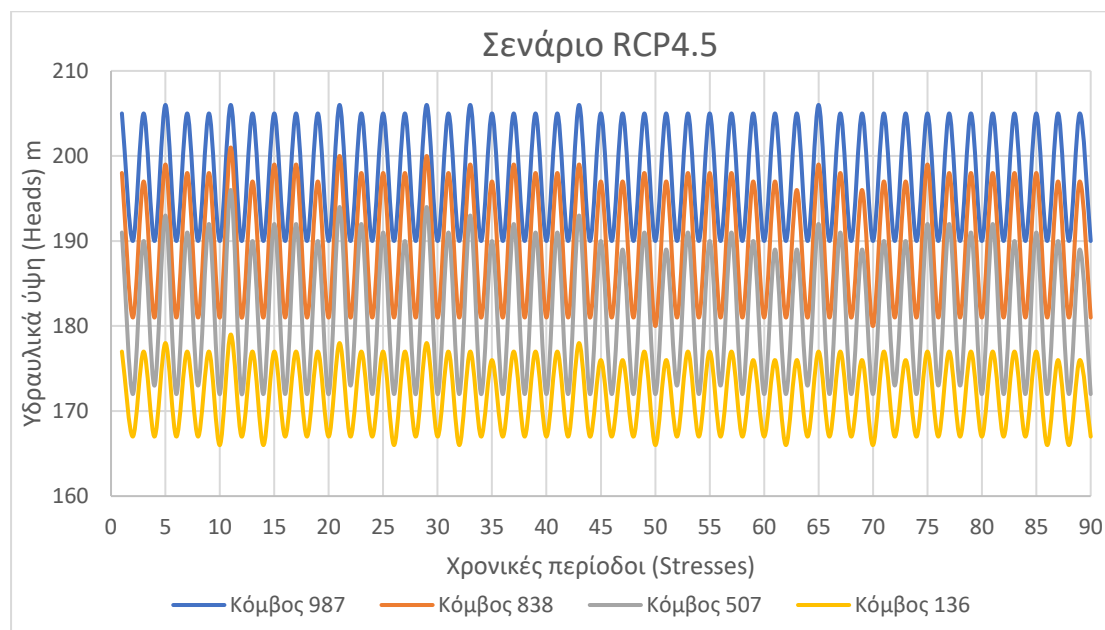


Διάγραμμα 5.4 Υδραυλικά ύψη κόμβου 136 για κλιματικά σενάρια RCP4.5 και RCP8.5

Σχετικά με τον κόμβο 136, παρατηρούνται έντονες αυξομειώσεις στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα τόσο στις υγρές περιόδους όσο και στις ξηρές. Το εύρος του υδραυλικού ύψους στον κόμβο, κυμαίνεται μεταξύ **166-179 μέτρα** για το κλιματικό σενάριο RCP4.5 και **166-178 μέτρα** για το σενάριο RCP8.5. Οι αυξομειώσεις στις τιμές της στάθμης του νερού είναι 1-2 μέτρα και αφορούν και τα δύο σενάρια. Η υψηλότερη τιμή στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα παρατηρείται στο σενάριο RCP4.5 (179m), η οποία απέχει 13 μέτρα από την ελάχιστη τιμή στάθμης.

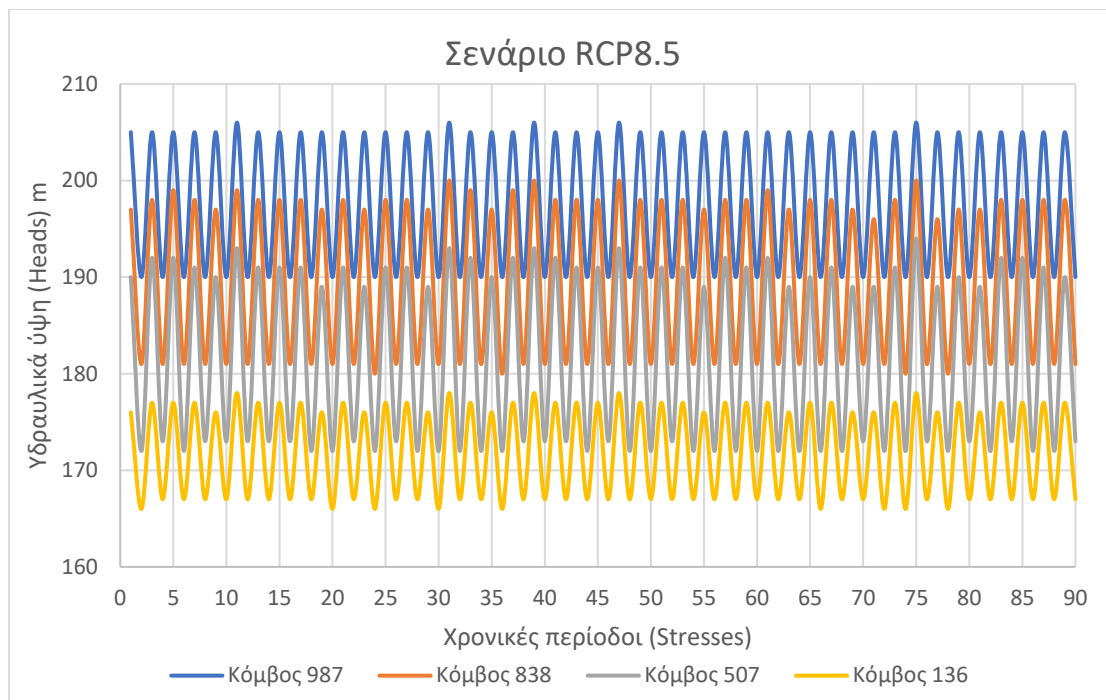
- Συνολικά, όπως γίνεται αντιληπτό, **μεγαλύτερη σταθερότητα στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα**, παρουσιάζει ο **κόμβος 987**, καθώς η στάθμη κατά τις υγρές περιόδους παραμένει περίπου στα 205 μέτρα, ενώ τις ξηρές είναι σταθερή στα 190 μέτρα.
- **Εντονότερες αυξομειώσεις στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα** και κυρίως κατά την διάρκεια των υγρών περιόδων, παρουσιάζει ο **κόμβος 507**.
- Όσον αφορά τις **διακυμάνσεις μεταξύ ξηρής και υγρής περιόδου** ενός κόμβου, **μεγαλύτερες διακυμάνσεις** παρουσιάζονται στον **κόμβο 507** ενώ **μικρότερες** στον **κόμβο 136**.

Επιπλέον, παρακάτω παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μεταβολές του υδραυλικού ύψους των 4 κόμβων για κάθε κλιματικό σενάριο.



Διάγραμμα 5.1 Μεταβολή υδραυλικών υψών κάθε επιλεγμένου κόμβου με το πέρας των χρονικών περιόδων για τα έτη 2005-2050 για το κλιματικό σενάριο RCP4.5

Στο παραπάνω διάγραμμα, το οποίο αφορά το κλιματικό σενάριο RCP4.5, μεγαλύτερες αυξομειώσεις παρατηρούνται στους κόμβους 987, 838 και 507 ενώ μικρότερες στον κόμβο 136. Οι μεγαλύτερες τιμές υδραυλικού ύψους διακρίνονται στον κόμβο 987 ενώ οι μικρότερες στον κόμβο 136. Η υψηλότερη τιμή υδραυλικού ύψους του κόμβου 987 είναι τα 206m ενώ η χαμηλότερη τιμή υδραυλικού ύψους του κόμβου 136, είναι τα 166m. Συνεπώς, **οι διακυμάνσεις του υδραυλικού ύψους στον υδροφορέα της περιοχής για τους συγκεκριμένους κόμβους, με βάση το RCP4.5, είναι 166m-206m.**



Διάγραμμα 5.2 Μεταβολή υδραυλικών υψών κάθε επιλεγμένου κόμβου με το πέρας των χρονικών περιόδων για τα έτη 2005-2050 για το κλιματικό σενάριο RCP8.5

Ομοίως όπως και στο κλιματικό σενάριο RCP4.5, στο διάγραμμα με βάση τα αποτελέσματα του σεναρίου RCP8.5, μεγαλύτερες αυξομειώσεις παρατηρούνται στους κόμβους 987, 838 και 507 ενώ μικρότερες στον κόμβο 136. Η υψηλότερη τιμή στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στον κόμβο 987 είναι τα 206m ενώ η χαμηλότερη τιμή στάθμης του κόμβου 136, είναι τα 166m. Συνεπώς, **οι διακυμάνσεις του υδραυλικού ύψους** στον υδροφορέα της περιοχής για τους συγκεκριμένους κόμβους, **με βάση το RCP8.5 είναι, όπως και στο RCP4.5, 166m - 206m.**

Οι τιμές των υδραυλικών υψών των δύο κλιματικών σεναρίων διαφέρουν ελάχιστα για κάθε έναν από τους 4 κόμβους. Αυτό συμβαίνει διότι και οι αρχικές τιμές βροχόπτωσης (mm/d) των δύο σεναρίων που εισάχθηκαν στο μοντέλο PTC, παρουσίαζαν μικρές διαφορές. Αξίζει να αναφερθεί ότι το σενάριο RCP4.5 έχει ελαφρώς πιο αυξημένες τιμές βροχόπτωσης από το σενάριο RCP8.5, το οποίο αναμένεται καθώς έχει αποδειχτεί από το επιστημονικό προσωπικό της IPCC ότι με βάση την αυξανόμενη RF, η παράμετρος της βροχόπτωσης επηρεάζεται αρνητικά και άρα τα επίπεδα κατακρήμνισης μειώνονται ελαφρώς.

Όπως είναι λογικό, κατά την διάρκεια της ξηρής περιόδου (Μάης- Αύγουστος) κάθε έτους, παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές υδραυλικών υψών από ότι κατά την διάρκεια της υγρής περιόδου (Σεπτέμβρης- Απρίλης). Η διακύμανση των τιμών είναι αναμενόμενη καθώς κατά τους θερινούς μήνες οι βροχοπτώσεις, οι οποίες εμπλουτίζουν τους υπόγειους υδροφορείς, είναι αμελητέες. Επιπλέον, λόγω των αρκετά υψηλών θερμοκρασιών στην περιοχή μελέτης αλλά και στην ευρύτερη περιοχή της νότιας Κρήτης, οι ποσότητες ύδατος στην ατμόσφαιρα εξατμίζονται γρηγορότερα και άρα ελάχιστες ποσότητες νερού φτάνουν στο έδαφος. Αντίθετα, κατά την διάρκεια των χειμερινών μηνών, στην περιοχή, η στάθμη των υπόγειων υδροφορέων αυξάνεται, καθώς εντείνονται οι βροχοπτώσεις.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε η συμπεριφορά του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής των Μοιρών Ηρακλείου Κρήτης, με βάση τα δύο κλιματικά σενάρια RCP4.5 και RCP8.5. Η μοντελοποίηση της υπόγειας ροής της περιοχής των Μοιρών πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του προγράμματος Argus One και συγκεκριμένα του υπολογιστικού μοντέλου Princeton Transport Code (PTC).

Όπως έχει βρεθεί από την επιστημονική κοινότητα, στην πεδιάδα της Μεσσαράς ελλοχεύει ο κίνδυνος της ερημοποίησης καθώς έχει αποδειχθεί ότι η πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα έχει πέσει σχεδόν 30 μέτρα κατά την διάρκεια της περιόδου 1989-2002. Η μείωση αυτή στην στάθμη του υδροφορέα έχει οδηγήσει στην περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού προς άρδευση στην περιοχή. Αφορμή του φαινομένου αυτού στάθηκε η δημιουργία γεωτρήσεων με σκοπό την στάγδην άρδευση των βασικών καλλιεργειών της περιοχής (ελαιώνες). (Tsanis I. et al., 2006)

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψιν τις γεωτρήσεις που έχουν δημιουργηθεί στην περιοχή καθώς και τον ρόλο που διαδραματίζει η περιοχή λόγω της έντονης αγροτικής δραστηριότητας. Η ορθολογική διαχείριση των υπογείων υδάτων με σκοπό να επιτευχθούν όλες οι ανάγκες στη περιοχή, είναι κρίσιμη και απαραίτητη. Συνεπώς, η μοντελοποίηση του υδροφορέα με βάση τα δύο κλιματικά σενάρια αποτέλεσε έναν τρόπο διερεύνησης της συμπεριφοράς του υδροφορέα της περιοχής για τα επόμενα 45 έτη, προσφέροντας μια καλή εκτίμηση για την πιθανή πτώση στάθμης του υπόγειου νερού.

Όπως απεδείχθη και παραπάνω, τα υδραυλικά ύψη του υδροφορέα για χρονικό ορίζοντα 45 ετών παρέμειναν σχετικά σταθερά, παρουσιάζοντας ωστόσο διακυμάνσεις. Για την ακρίβεια, όσον αφορά το σενάριο RCP 4.5, η αυξομείωση του υδραυλικού ύψους κυμαίνεται περίπου στα 13-25 μέτρα για τους επιλεγόμενους κόμβους, ενώ για το σενάριο RCP 8.5 η αυξομείωση κυμαίνεται στα 13-22 μέτρα. Παρόλα αυτά, η στάθμη του υδροφορέα διατηρείται σταθερή καθώς όσον αφορά **τον πρώτο κόμβο (987)**, αυτή, με το πέρας των 90 περιόδων βρίσκεται σταθερά στα 205 μέτρα με βάση και τα δύο κλιματικά σενάρια. **Στον δεύτερο κόμβο (838)**, η στάθμη μετά την χρονική περίοδο μελέτης, βρίσκεται στα 197 μέτρα με βάση το RCP 4.5 και στα 198 μέτρα με βάση το RCP 8.5 παρουσιάζοντας μικρή αύξηση ενός μέτρου από την αρχική της τιμή. **Στον τρίτο κόμβο (507)**, η στάθμη του υδροφορέα βρίσκεται στα 189 μέτρα με βάση το RCP 4.5 και στα 190 μέτρα με βάση το RCP 8.5. Παρόλο που ο κόμβος αυτός παρουσιάζει τις μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές μεταξύ των τιμών ξηρών και υγρών περιόδων, τελικά η στάθμη με το πέρας των χρονικών περιόδων, παραμένει σχεδόν σταθερή, αφού η μείωση που παρουσιάζει στο RCP 4.5 είναι μόλις 2 μέτρα ενώ στο RCP 8.5 είναι μηδενική. Τέλος, **για τον τέταρτο κόμβο (136)**, η πτώση της στάθμης του υδροφορέα παρουσιάζει μείωση ενός μέτρου και βρίσκεται στα 176 μέτρα, με βάση το RCP 4.5, ενώ παρουσιάζει αύξηση ενός μέτρου με βάση το RCP 8.5 και βρίσκεται στα 177 μέτρα.

Συνεπώς, ο υδροφορέας της περιοχής μπορεί να ανταπεξέλθει τουλάχιστον μέχρι το έτος 2050 χωρίς να υποστεί σοβαρή πτώση στάθμης. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά κλιματικά σενάρια είναι διότι αυτά διαφέρουν, καθώς το σενάριο RCP4.5 αποτελεί ένα μετριοπαθές σενάριο ενώ το σενάριο RCP8.5 αποτελεί την πιο ακραία εκδοχή των σεναρίων RCP. Από την ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία που παρέχεται από τον IPCC, είναι γνωστό ότι στο κλιματικό σενάριο RCP 4.5 τα επίπεδα βροχόπτωσης είναι αυξημένα, τουλάχιστον μέχρι το 2050, συνεπώς η σχεδόν σταθερή στάθμη του υδροφορέα η οποία παρατηρείται στην εν λόγω μελέτη, είναι λογικό επακόλουθο.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξερόγλωσση Βιβλιογραφία

- Amanambu, A.C., et al., 2020: Groundwater system and climate change: present status and future considerations. J. Hydrol. , 589, 125163
- Anderson, Mary P., Woessner, William W., Applied groundwater modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press 1992
- Argus ONE-PTC Interface, v. 2.2 User's guide José-Luis Olivares
- Befus, K.M., et al., 2020: Increasing threat of coastal groundwater hazards from sea-level rise in California. Nat. Clim. Chang. , 10 (10), 946–952
- Bierkens, M.F.P. and Y. Wada, 2019: Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: a review. Environ. Res. Lett. , 14 (6), 63002
- Brassington, R., Field Hydrology, Wiley 1998
- Corine Land Cover, Copernicus
- Dokou, Z. and Karatzas, G.P., 2012. Saltwater intrusion estimation in a karstified coastal system using density-dependent modelling and comparison with the sharp-interface approach. Hydrological Sciences Journal, 57 (5), 985–999.
- Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, F. Driouech, S. Emori, V. Eyring, C. Forest, P. Gleckler, E. Guilyardi, C. Jakob, V. Kattsov, C. Reason and M. Rummukainen, 2013: Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Gleick, P. H., 1996: Water resources. In Encyclopedia of Climate and Weather, ed. by S. H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2, pp.817-823.
- Princeton Transport Code Manual
- Todd, David K. Salt water intrusion and its control, American Water Works Association Journal, v.66, 1974
- Tsanis, Ioannis K., Koutroulis, Aristeidis G., Daliakopoulos, Ioannis N., Harmonised techniques and representative river basin data for assessment and use of uncertainty information in integrated water management, Technical University of Crete, Chania, Greece (TUC), 2006
- H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.), Technical summary in: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.), Technical Summary in: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

- IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A, (eds.)]. IPCC. Geneva, Switzerland, 104 pp
- IPCC, 2013: Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- IPCC, 2013: Annex I: Atlas of Global and Regional Climate Projections Supplementary Material RCP8.5 [van Oldenborgh, G.J., M. Collins, J. Arblaster, J.H. Christensen, J. Marotzke, S.B. Power, M. Rummukainen and T. Zhou (eds.)]. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Available from www.climatechange2013.org and www.ipcc.ch.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [Groundwater Storage and the Water Cycle | U.S. Geological Survey \(usgs.gov\)](http://www.usgs.gov)
- Reinecke, R., et al., 2021: Uncertainty of simulated groundwater recharge at different global warming levels: a global-scale multi-model ensemble study. Hydrol. Earth Syst. Sci. , 25 (2), 787–810
- Wada, Y., 2016: Modeling groundwater depletion at regional and global scales: present state and future prospects. Surv. Geophys. , 37 (2), 419–451
- Wada, Y., et al., 2017: Recent changes in land water storage and its contribution to sea level variations. Surv. Geophys. , 38 (1), 131–152
- Vardavas, I.M., Bolle, H.-J., Bromley, J., de Bruin, H., Devereux, B., Prastacos, P., 1996. An integrated monitoring and modelling study of desertification and climatic change impacts in the Messara Valley of Crete. EU DGXII, Environment and Climate Change Programme, Final Report EV5V-CT94-0466, 143 pp., November 1996.
- I.M. Vardavas, J. Papamastorakis, A. Fountoulakis, M. Manousakis Water resources in the desertification-threatened Messara Valley of Crete: estimation of potential evaporation Ecological Modeling 102 (1997) pp 363-374.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Κριτσωτάκης Μαρίνος Ν., "Διαχείριση υδατικών πόρων Μεσαράς Κρήτης", Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, Ελλάς, 2009.
- Μιρίκου, Μ. Α., Μπαλάς, Ε. Α., Τεχνική Υδρολογία, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 6^η έκδοση, 2018

- Μεταπτυχιακή Διατριβή «Διαχείριση των υπογείων υδάτων με χρήση συνδυασμού μεθόδων προσομοίωσης και βελτιστοποίησης», Καρτεράκης Σ. Μ., Πολυτεχνείο Κρήτης 2005
- Πανεπιστημιακές σημειώσεις μαθήματος «Ροή Υπογείων Υδάτων και Μεταφορά Ρύπων», Καρατζάς Γ., Πολυτεχνείο Κρήτης 2021
- [Μοίρες Ηρακλείου - Βικιπαίδεια \(wikipedia.org\)](#)
- [Δήμος Φαιστού - Βικιπαίδεια \(wikipedia.org\)](#)
- Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης | [Ανοιχτά Δεδομένα Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης \(apdkritis.gov.gr\)](#)
- Γενική Διεύθυνση Ηλεκτρονικής Διακυβέρνησης και Γεωχωρικών Πληροφοριών, Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος
- Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία [Κλιματικά Δεδομένα ανά Πόλη-ΜΕΤΕΩΓΡΑΜΜΑΤΑ, EMY, Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία \(emy.gr\)](#)
- Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος
- <http://www.oikoskopio.gr/>