



Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΜΕΣΣΑΡΑΣ, ΜΕ ΧΡΗΣΗ
ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΕΞΕΤΑΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ ΔΙΑΚΥΒΕΡΝΗΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΓΙΑ ΤΗΝ
ΑΛΛΑΓΗ ΤΟΥ ΚΛΙΜΑΤΟΣ (IPCC)**

ΤΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ

ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ ΔΙΑΚΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑ

Τριμελής Επιτροπή:

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Δρ. Τριχάκης Ιωάννης

Χανιά, Σεπτέμβριος 2020

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

Περίληψη

Στο πλαίσιο της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας εξετάζεται η χρήση του μοντέλου προσομοίωσης υπογείων υδάτων FEFLOW. Η προσομοίωση των υπογείων υδάτων αφορά την περιοχή της Μεσσαράς η οποία βρίσκεται στο Νότιο μέρος της Κρήτης και συγκεκριμένα στην νότια πλευρά του Νομού του Ηρακλείου. Η περιοχή αυτή έχει μεγάλες απαιτήσεις σε νερό καθώς είναι από τις μεγαλύτερες αγροτικές περιοχές στην Ελλάδα.

Αρχικά για την πραγματοποίηση σωστής προσομοίωσης υπογείων υδάτων χρειάστηκε η κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων για να γίνει η εισαγωγή τους στο μοντέλο ροής υπογείων υδάτων και μεταφοράς μάζας FEFLOW. Η επεξεργασία των δεδομένων έγινε με την βοήθεια προγραμμάτων – εργαλείων όπως το ArcGIS, το Hydrognomon, το Matlab και το Microsoft Excel. Το πρόγραμμα ArcGIS χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την επεξεργασία των χαρτών αλλά και σε περιπτώσεις που ήταν δυνατό και για πίνακες οι οποίοι περιείχαν τιμές εισόδου. Τα υπόλοιπα προγράμματα – εργαλεία χρησιμοποιήθηκαν για την επεξεργασία των πινάκων στους οποίους περιέχονται οι τιμές εισόδου. Στο πρόγραμμα του FEFLOW εισήχθησαν 12 πηγάδια παρατήρησης τα οποία περιείχαν τιμές για την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα από το 2009 έως το 2016. Στην συνέχεια εισήχθησαν και οι τιμές της βροχόπτωσης για τις αντίστοιχες χρονιές καθώς και τα πηγάδια άντλησης τα οποία βρίσκονται στην περιοχή. Για τους εδαφικούς σχηματισμούς εισήχθησαν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας καθώς και το υψόμετρο της περιοχής μελέτης. Τέλος ορίστηκαν οι οριακές τιμές στα ανατολικά και δυτικά σύνορα του υδροφορέα και πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση και ο έλεγχος του μοντέλου.

Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα τριών κλιματικών σεναρίων το RCP 2.6, το RCP 4.5 και το RCP 8.5. Αυτά τα σενάρια αποτελούν προσομοιωμένες μελλοντικές τιμές που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία καθώς και τα αέρια του θερμοκηπίου για τα επόμενα χρόνια. Για κάθε σενάριο υπήρχαν οι τιμές της βροχόπτωσης ανά εξάμηνο και χρησιμοποιήθηκαν αυτές της περιόδου 2009 - 2039. Για την προσομοίωση των τιμών του σεναρίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο υπογείων υδάτων FEFLOW το οποίο βαθμονομήθηκε με τις πραγματικές τιμές της βροχόπτωσης και παρατηρήθηκε η μεταβολή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα από το 2009 έως το 2039.

Η μοντελοποίηση του υδροφορέα που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει σκοπό την προσομοίωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα για τα κλιματικά σενάρια RCP's.

Abstract

In the context of this thesis the use of the three dimensional finite elements ground water model FEFLOW is examined. The ground water simulation is related to the aquifer of Messara which is located in the southern part of the island of Crete and specifically in the southern part of the Heraklion Prefecture. This region has great demand for water because it's one of the biggest agricultural areas in Greece.

A prerequisite for any groundwater simulation is the editing of all the necessary data and their correct processing into a compatible file format that can be imported to the groundwater model FEFLOW. The processing of input data is performed with the help of other programs and tools like ArcGIS, Hydrognomon, Matlab and Microsoft Excel. The program Arc GIS was mainly used for the processing of the maps that had to be imported in FEFLOW and whenever appropriate for data tables. The rest of the programs and tools were used for the process of time-series and constant data values that contain the information serving as the FEFLOW input. Water level of the aquifer for the years from 2009 to 2016 from 12 observation wells were available as input for FEFLOW. Apart from that, the value of the precipitation was imported for the corresponding years and also the pumping wells that existed in the area. Other necessary input parameters include the hydraulic conductivity values of different geological formations and the elevations of the study area. The last model parameter imported were the boundary condition values set at the eastern and the western borders of the aquifer and the calibration and the validation of the model was accomplished.

After the initial setup and calibration of the model, data according to 3 climate scenarios were used, namely the RCP 2.6, the RCP 4.5 and the RCP 8.5. Those scenarios constitute the simulated future values of solar radiation and greenhouse gases for the years to come. For each scenario, the precipitation values for each semester were calculated concerning the years from 2009 to 2039. For the simulation of the water level value of the aquifer the latest version of the calibrated FEFLOW was used to produce the new simulated values of groundwater resulting when taking into account the input values of parameters for the different scenarios for the years 2009 to 2039.

The objective of the simulation of the aquifer that was conducted for the thesis was the simulation of the aquifer water level under the different RCP's climate scenarios.

Ευχαριστίες

Φέροντας εις πέρας την παρούσα διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Καρατζά Γεώργιο για την καθοδήγηση και την βοήθεια του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Τριχάκη Ιωάννη και τον Δρ. Βαρουχάκη Εμμανουήλ για τις συμβουλές τους και την συνεχή επικοινωνία καθώς και τον καθηγητή κ. Νικόλαο Νικολαΐδη για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω ξεχωριστά την οικογένεια μου και τους φίλους μου.

Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη	iii
Abstract.....	iv
Πίνακας Περιεχομένων	vi
Κατάλογος Εικόνων	viii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός της Εργασίας	1
1.2 Υδρολογικός Κύκλος.....	1
1.3 Υδρολογικό Ισοζύγιο.....	3
Εξάτμιση (E)	4
Εξατμισοδιαπνοή (T).....	4
Κατακρήμνιση (P).....	4
1.4 Νερό	5
1.5 Τα Μέρη του Ποταμού	6
Λεκάνη Απορροής.....	6
Κοίτη Ροής.....	6
Κώνος Προσχώσεων	6
Υδροκριτική Γραμμή – Υδροκρίτης	7
1.6 Υδροφορείς	8
Τύποι υδροφορέων	10
Ελεύθεροι Υδροφορείς.....	10
Αρτεσιανοί Υδροφορείς.....	10
Ημιαρτεσιανοί Υδροφορείς.....	11
1.7 Παράμετροι Υδροφορέων	11
Πορώδες.....	11
Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	12
Ταχύτητα Διήθησης	13
Ειδική Διαπερατότητα.....	13
Συντελεστής Μεταβασιμότητας	14
Συντελεστής Αποθηκευτικότητας	14
1.8 Ρύπανση στους υπόγειους υδροφορείς	14
1.9 Η Γεωλογία της Κρήτης.....	15
1.10 Περιβαλλοντικά Χαρακτηριστικά Περιοχής Μελέτης	15

1.11	Το Κλίμα της Κρήτης.....	16
1.12	Κλιματολογικές Ζώνες στο Ν. Ηρακλείου	17
1.13	Κλιματικά σενάρια RCP's.....	17
	RCP 2.6	17
	RCP 4.5	17
	RCP 8.5	18
1.14	FEFLOW	18
1.15	Τετραγωνική Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE)	19
2	Μεθοδολογία	23
2.1	Υψόμετρο	23
2.2	Υδραυλική Αγωγιμότητα	24
2.3	Οριακές Συνθήκες.....	28
2.4	Βροχόπτωση.....	28
	Βαθμονόμηση του Προγράμματος FEFLOW.....	30
	Πρώτο Σενάριο	30
	Δεύτερο Σενάριο.....	31
	Τρίτο Σενάριο	31
2.5	Πηγάδια Παρατήρησης	31
3	Αποτελέσματα	33
4	Συζήτηση	55
5	Συμπεράσματα	59
	Βιβλιογραφία.....	61

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.Ο κύκλος του νερού ή υδρολογικός κύκλος [Γεωλογική Υπηρεσίας των ΗΠΑ (USGS, 2020)].....	2
Εικόνα 2. Παγκόσμια Ποσότητα νερού [USGS, 1993]	5
Εικόνα 3. Τα Μέρη του Ποταμού. [Βουδούρης, 2019]	7
Εικόνα 4. Ο υδροκρίτης μίας λεκάνης απορροής. [Βουδούρης, 2019].....	8
Εικόνα 5. Είδη υδροφόρων Οριζόντων [Βουδούρης, 2019]	11
Εικόνα 6. Μέσος Όρος Θερμοκρασιών και Βροχοπτώσεων για τον Ν. Ηρακλείου [Meteoblue.gr]	16
Εικόνα 7. Ανεμολόγιο για τον Ν. Ηρακλείου [meteoblue.gr]	20
Εικόνα 8. Ηλιοφάνεια , Νεφελοκάλυψη και Βροχόπτωση στο Ν. Ηρακλείου [meteoblue.gr]...	20
Εικόνα 9. Λεκάνες Απορροής Υπογείων Υδάτων και Πηγάδια Παρατήρησης	21
Εικόνα 10. Υψόμετρο Περιοχής Μελέτης	21
Εικόνα 11. Λεκάνες Απορροής Υπογείων Υδάτων και Γεροπόταμος	22
Εικόνα 12. Λεκάνες Απορροής Υπογείων Υδάτων και Βροχομετρικοί Σταθμοί.....	22
Εικόνα 13. Σύνδεση των Δεδομένων του Υψόμετρου της Περιοχής	24
Εικόνα 14. Υδραυλική Αγωγιμότητα στον Αλλουβιακό Υδροφορέα Μεσσαράς (Μαρίνος Ν. Κριτσωτάκης 2009).....	26
Εικόνα 15. Υδραυλική Αγωγιμότητα στον Πλειστοκαινικό Υδροφορέα Μεσσαράς (Μαρίνος Ν. Κριτσωτάκης 2009).....	27
Εικόνα 16. Σύνδεση Υδραυλικής Αγωγιμότητας	27
Εικόνα 17. Γραμμική Παλινδρόμηση	29
Εικόνα 18. Χρονοσειρά για το Πηγάδι Παρατήρησης Β1	32
Εικόνα 19. Πηγάδια Παρατήρησης στο FEFLOW.....	32
Εικόνα 20. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το 2009. Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2009 και στην κάτω για το καλοκαίρι του 2009.	33
Εικόνα 21. Διάγραμμα διασποράς κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για την χρονιά 2009. Αριστερά εμφανίζεται το διάγραμμα για τον χειμώνα του 2009 και δεξιά για το καλοκαίρι του 2009.	34
Εικόνα 22. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά τον έλεγχο του μοντέλου για την χρονιά 2016. Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2016 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2016.	34
Εικόνα 23. Διάγραμμα διασποράς κατά τον έλεγχο του μοντέλου για την χρονιά 2016 .Αριστερά εμφανίζεται το διάγραμμα για τον χειμώνα του 2016 και δεξιά για το καλοκαίρι του 2016.	35

Εικόνα 24. Διάγραμμα μεταβολής υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο. Το κάθε χρώμα απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για κάθε ένα από τα πηγάδια παρατήρησης.	35
Εικόνα 25. Χάρτης ταχύτητας Darcy	36
Εικόνα 26. Διατομή του υδροφορέα των Μοιρών και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις.	36
Εικόνα 27. Διατομή του υδροφορέα της Βαγιονιάς και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις.	37
Εικόνα 28. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2019 για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2019 και στον κάτω για τον καλοκαίρι του 2019.	38
Εικόνα 29. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2029 για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2029 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2029.	39
Εικόνα 30. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2039 για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2039 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2039.	40
Εικόνα 31. Διάγραμμα μεταβολής υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6). Το κάθε χρώμα απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για κάθε ένα από τα πηγάδια παρατήρησης.	41
Εικόνα 32. Χάρτης ταχύτητας Darcy για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6).	41
Εικόνα 33. Διατομή του υδροφορέα των Μοιρών και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6).	42
Εικόνα 34. Διατομή του υδροφορέα της Βαγιονιάς και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6).	42
Εικόνα 35. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2019 για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2019 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2019.	43
Εικόνα 36. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2029 για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2029 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2029.	44
Εικόνα 37. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2039 για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2039 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2039.	45
Εικόνα 38. Διάγραμμα μεταβολής υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5). Το κάθε χρώμα απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για κάθε ένα από τα πηγάδια παρατήρησης.	46
Εικόνα 39. Χάρτης ταχύτητας Darcy για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5).	46
Εικόνα 40. Διατομή του υδροφορέα των Μοιρών και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5).	47

Εικόνα 41. Διατομή του υδροφορέα της Βαγιονιάς και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5).	47
Εικόνα 42. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2019 για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2019 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2019.	48
Εικόνα 43. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2029 για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2029 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2029.	49
Εικόνα 44. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2039 για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2039 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2039.	50
Εικόνα 45. Διάγραμμα μεταβολής υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5). Το κάθε χρώμα απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για κάθε ένα από τα πηγάδια παρατήρησης.	51
Εικόνα 46. Χάρτης ταχύτητας Darcy για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5).	51
Εικόνα 47. Διατομή του υδροφορέα των Μοιρών και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5).	52
Εικόνα 48. Διατομή του υδροφορέα της Βαγιονιάς και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5).	52
Εικόνα 49. Μεταβολή της βροχόπτωσης για το κλιματικό σενάριο RCP 2.6. [NASA, 2013] ...	58
Εικόνα 50. Σύγκριση της βροχόπτωσης για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και 8.5 [Roberto San Jose et. al. 2016].	58

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της Εργασίας

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των υποχρεώσεων για την απόκτηση του διπλώματος Μηχανικού Περιβάλλοντος από τον φοιτητή Διακοπαρασκευά Παρασκευά. Εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής υπό την επίβλεψη του Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Καρατζά Γεωργίου. Η εργασία αυτή μελετά την κατάσταση των υπογείων υδάτων στην περιοχή της Μεσσαράς, στο νότιο τμήμα του Νομού Ηρακλείου. Η περιοχή μελέτης αποτελείται από δύο λεκάνες απορροής, την λεκάνη της Μεσσαράς και την λεκάνη της Βαγιονιάς, οι οποίες συνδέονται όμως μεταξύ τους. Η μοντελοποίηση της περιοχής θα γίνει με την βοήθεια του μοντέλου FEFLOW με σκοπό την πρόβλεψη της μεταβολής της στάθμης των υπογείων υδάτων για διάφορα σενάρια στα επόμενα 30 χρόνια.

1.2 Υδρολογικός Κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος, ή αλλιώς ο κύκλος του νερού, περιγράφει την παρουσία και την κυκλοφορία του νερού όχι μόνο στην επιφάνεια της Γης αλλά και κάτω και πάνω απ' αυτή. Το νερό της Γης είναι πάντα σε κίνηση. Επίσης το νερό αλλάζει συνεχώς φυσική κατάσταση καθώς υπάρχει σε υγρή μορφή (θάλασσες, λίμνες, ποτάμια κλπ), σε στερεά μορφή (πάγοι) και σε αέρια μορφή (υδρατμοί). Ο κύκλος του νερού λειτουργεί εδώ και δισεκατομμύρια χρόνια και η ζωή στην Γη εξαρτάται από αυτόν. Η ποσότητα του νερού είναι πάντα σταθερή το μόνο που διαφέρει είναι η φυσική του κατάσταση. Το νερό από τους επιφανειακούς υδατικούς πόρους (ωκεανούς, λίμνες, θάλασσες κλπ) εξατμίζεται με την βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας και συμπυκνώνεται στα σύννεφα μέσω των οποίων μεταφέρεται στην ενδοχώρα. Στην συνέχεια επιστρέφει στο έδαφος και στους υδατικούς πόρους με την μορφή βροχής ή χιονιού. Από την βροχή ένα ποσοστό αυτής γίνεται επιφανειακή απορροή όπου καταλήγει σε κάποιον υδατικό πόρο συνήθως θάλασσα ή ωκεανό. Μία ποσότητα της βροχής ή του χιονιού καταλήγει κάτω από το έδαφος στην ζώνη όπου υπάρχουν οι ρίζες των φυτών και τέλος ένα ποσοστό καταλήγει βαθύτερα στα υπόγεια ύδατα. Τα υπόγεια ύδατα είναι πολύ σημαντικά για την ανθρωπότητα καθώς η ποσότητα του γλυκού νερού που υπάρχει εκεί είναι μεγαλύτερη από αυτήν που υπάρχει στα επιφανειακά νερά. Το νερό αυτό είναι πόσιμο και υπάρχει σχεδόν σε όλες τις περιοχές του πλανήτη. [USGS, 2020]

1.3 Υδρολογικό Ισοζύγιο

Το υδρολογικό ή υδατικό ισοζύγιο μιας λεκάνης απορροής είναι η έκφραση του υδρολογικού της κύκλου. Η εξίσωση εκφράζεται από την διαφορά της εισροής και της εκροής σε μία λεκάνη απορροής να ισούται με τον ρυθμό αποθήκευσης του νερού σε αυτήν προς ένα καθορισμένο χρονικό διάστημα. Η εξίσωση είναι της μορφής:

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} = I - O$$

Όπου :

I: είναι η μέση εισροή στην λεκάνη απορροής

O: είναι η μέση εκροή από την λεκάνη απορροής

Δs : είναι ο ρυθμός αποθήκευσης του νερού στην λεκάνη απορροής

Δt : είναι το καθορισμένο χρονικό διάστημα

Για μία λεκάνη απορροής η εισροή αποτελείται από διάφορες μορφές κατακρήμνισης όπως και η εκροή από την επιφανειακή απορροή, την υπόγεια απορροή, την εξάτμιση, την διαπνοή και την διήθηση. Επειδή ο ρυθμός αποθήκευσης έχει διάφορες συνιστώσες η βασική εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου είναι:

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

Όπου:

P: είναι η ποσότητα του νερού η οποία πέφτει με την μορφή κατακρήμνισης

R: είναι η ποσότητα του νερού η οποία απορρέει επιφανειακά

G: είναι η ποσότητα του νερού η οποία απορρέει υπόγεια

E: είναι η ποσότητα του νερού η οποία εξατμίζεται

T: είναι η ποσότητα του νερού η οποία διαπνέεται από τα φυλλώματα της βλάστησης

Οι συνιστώσες της εξάτμισης και της διαπνοής επειδή είναι αρκετά μικρότερες από τις υπόλοιπες αμελούνται συνήθως σε μεμονωμένα επεισόδια βροχόπτωσης. [Μάρης, 2020]

Εξάτμιση (E)

Η εξάτμιση του νερού λαμβάνει χώρα στις ελεύθερες υδατικές επιφάνειες όπως λίμνες, θάλασσες, κλπ. Η ηλιακή ακτινοβολία αποτελεί κινητήριο δύναμη για την εξάτμιση των υδάτων καθώς θερμαίνει τα ύδατα και τον αέρα. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξάτμιση είναι:

1. Η θερμοκρασία του νερού
2. Η θερμοκρασία και η απόλυτη υγρασία του αέρα που έρχεται σε άμεση επαφή με το υδάτινο σώμα.
3. Ο άνεμος

Οι παράγοντες οι οποίοι συντελούν σε λανθασμένη μέτρηση είναι:

1. Η Δυνατή βροχή
2. Τα πτηνά
3. Η κίνηση του ανέμου [Καρατζάς, 2020]

Εξατμισοδιαπνοή (T)

Στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται στο πεδίο είναι αρκετά δύσκολο να μετρηθεί χωριστά η εξάτμιση και η αναπνοή. Το πραγματικό ενδιαφέρον είναι ο υπολογισμός της ολικής απώλειας ύδατος από το πεδίο μελέτης οπότε δεν έχει ιδιαίτερη σημασία αν η απώλεια του νερού προέρχεται από την εξάτμιση ή από την αναπνοή. Για αυτό τον λόγο οι δύο αυτές διεργασίες συνδυάζονται σε μία και ονομάζεται εξατμισοδιαπνοή.

Δυναμική Εξατμισοδιαπνοή είναι η απώλεια ύδατος η οποία θα συμβεί εάν σε καμία χρονική στιγμή δεν παρατηρείται έλλειμμα ύδατος εντός του εδάφους για χρήση από την βλάστηση.

Πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι το πραγματικό ποσόν της εξατμισοδιαπνοής που λαμβάνει χώρα κάτω από τις συνθήκες πεδίου. [Καρατζάς, 2020]

Κατακρήμνιση (P)

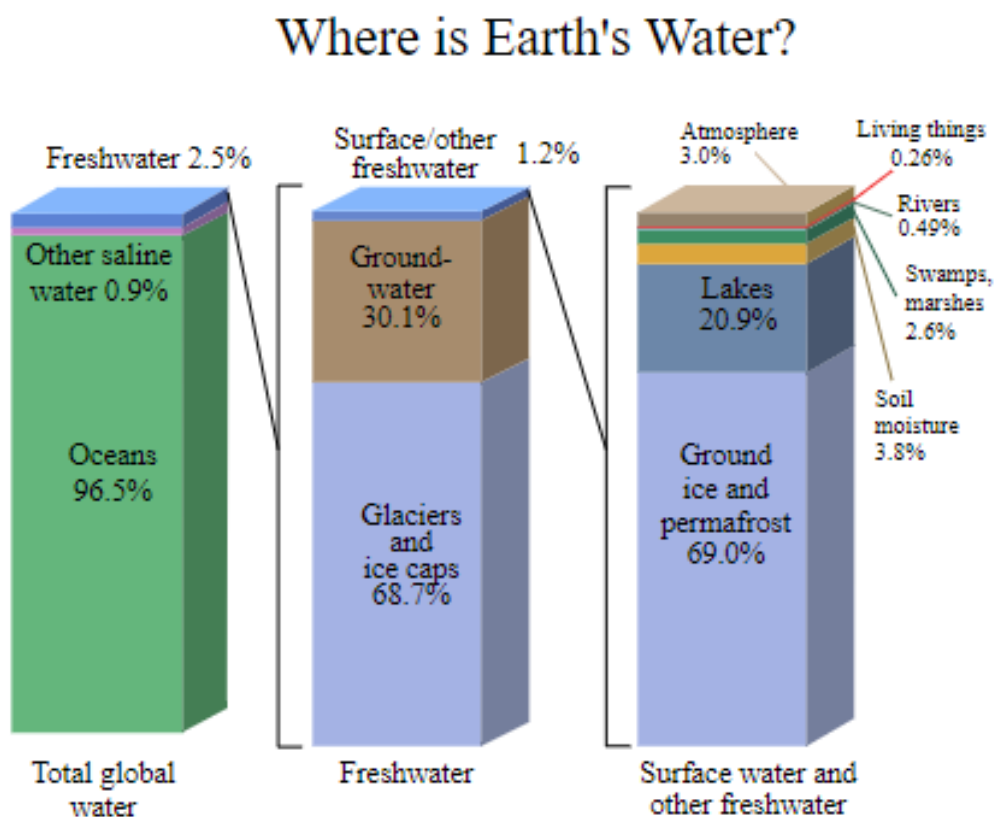
Οι κατηγορίες μορφών βροχοπτώσεων με βάση τον φυσικό μηχανισμό δημιουργίας τους είναι:

1. Οι βροχοπτώσεις οι οποίες οφείλονται σε κινήσεις θερμών και ψυχρών μετώπων (Frontal Precipitation)
2. Οι βροχοπτώσεις οι οποίες οφείλονται σε φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας (Convective Process) και
3. Οι βροχοπτώσεις οι οποίες οφείλονται σε ορογραφικές επιδράσεις (Orographic Effects)

Για την μέτρηση της βροχόπτωσης θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε ανοιχτό δοχείο. Το βροχόμετρο πρέπει να τοποθετείται όσο γίνεται πλησιέστερα στο έδαφος έτσι ώστε να αποφεύγεται η επίδραση του ανέμου. Επίσης πρέπει να τοποθετείται σε ανοιχτό χώρο μακριά από κτήρια και δέντρα και οι μετρήσεις πρέπει να παίρνονται καθημερινά. Υπάρχουν βροχόμετρα τα οποία μπορούν να πραγματοποιούν μετρήσεις αυτόματα. Για την μέτρηση του ύψους της βροχόπτωσης μίας περιοχής χρειάζονται αρκετά βροχόμετρα ομοιόμορφα κατανεμημένα ώστε να υπολογισθεί ορθά ο μέσος όρος του πραγματικού ύψους. [Καρατζάς, 2020]

1.4 Νερό

Το νερό είναι η περισσότερο διαδεδομένη ανόργανη χημική ένωση στην επιφάνεια της γης. Το νερό υπάρχει σε αέρια, υγρή και στερεή κατάσταση. Ο μοριακός του τύπος είναι H_2O . Το χημικά καθαρό νερό είναι άγευστο, άοσμο, διαυγές και σχεδόν άχρωμο αλλά εμφανίζει ένα γαλάζιο χρώμα όταν βρίσκεται σε βαθιά στρώματα. Πολλές ουσίες διαλύονται στο νερό και για αυτό έχει ονομαστεί ως παγκόσμιος διαλύτης. Λόγο της ικανότητας του να διαλύονται ουσίες σε αυτό δεν βρίσκεται στην φύση σε καθαρή μορφή.



Εικόνα 2. Παγκόσμια Ποσότητα νερού [USGS, 1993]

Η ποσότητα του νερού στην Γη σε όλες τις καταστάσεις θεωρείται σταθερή . Αν και είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια το ισοζύγιο του νερού έχουν γίνει κάποιες εκτιμήσεις από την

UNESCO το 1978. Περίπου το 75% του πλανήτη μας καλύπτεται από νερό εκ του οποίου το 97% είναι αλμυρό και μόλις το 3% είναι γλυκό. Από την ποσότητα αυτή του γλυκού νερού το 2.37% περίπου βρίσκεται στους πάγους, το 0.6% αποτελεί τα υπόγεια ύδατα και μόλις το 0.03% αποτελεί τα επιφανειακά νερά [UNESCO,1978]. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2 η κατανομή της ποσότητας του νερού όπως έχει υπολογιστεί από την Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ είναι πολύ κοντά με τα αποτελέσματα της UNESCO.

Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν την μεγαλύτερη δεξαμενή γλυκού νερού στον πλανήτη χωρίς να υπολογίζονται οι πάγοι. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση η ύδρευση γίνεται σε ένα μεγάλο ποσοστό περίπου 75% από τα υπόγεια ύδατα. Επίσης γίνεται άντληση του νερού και για άρδευση και για βιομηχανική χρήση. Τα υπόγεια ύδατα δεν πρέπει όμως να αντιμετωπίζονται μόνο σαν μία δεξαμενή ποιοτικού νερού αλλά πρέπει να αναγνωριστεί η περιβαλλοντική τους αξία. Στην Ευρώπη το 50% της ετήσιας ροής προέρχεται από τα υπόγεια νερά για αυτό τον λόγο η υποβάθμιση τους μπορεί να επηρεάσει τα συνδεδεμένα υδατικά και χερσαία οικοσυστήματα [ec.europa, 2006].

1.5 Τα Μέρη του Ποταμού

Λεκάνη Απορροής

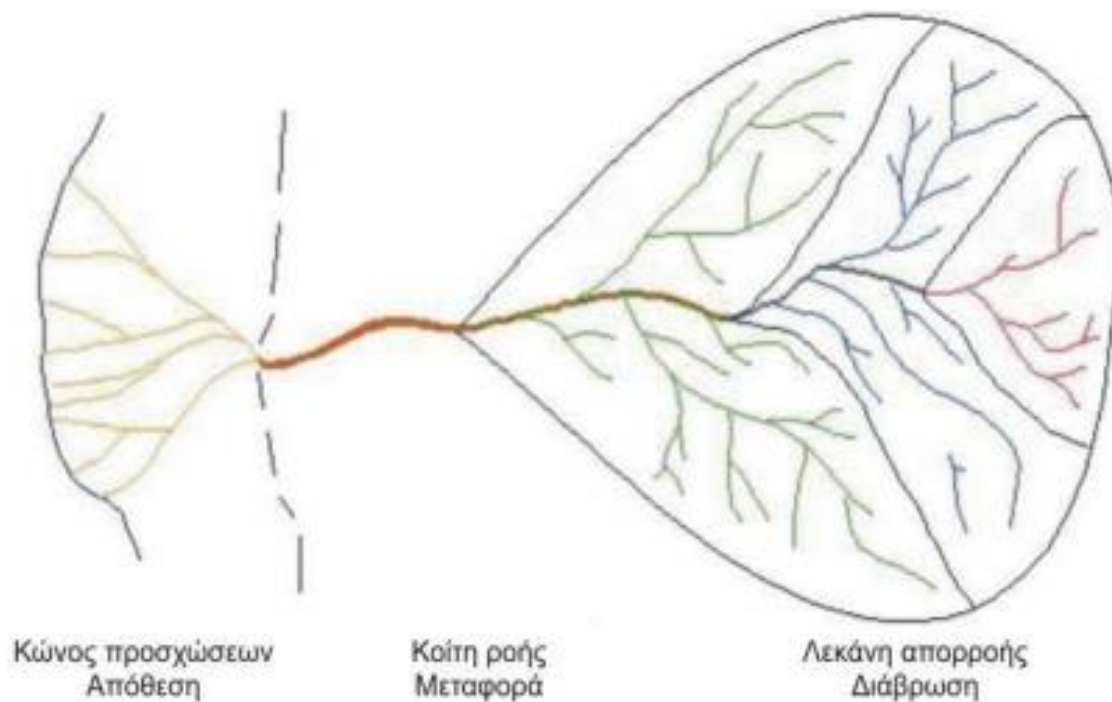
Ένα από τα μέρη ενός ποταμού είναι η λεκάνης απορροής. Λεκάνη απορροής ορίζεται η περιοχή η οποία αποστραγγίζεται από ένα ρέμα ή από ένα σύστημα συγκοινωνούντων ρεμάτων τα οποία καταλήγουν σε ένα μοναδικό σημείο απορροής. [Καρατζάς, 2020]

Κοίτη Ροής

Η κοίτη ροής ενός ποταμού είναι ένα αυλάκι το που διοχετεύει τη ροή της υδάτινης μάζας του ποταμού προς τα κατάντη. Η κοίτη διαμορφώνεται από τις δυνάμεις του τρεχούμενου νερού και μεταφέρει εκτός από την μάζα του νερού και φερτές ύλες οι οποίες αποτελούν προϊόντα της διάβρωσης. Το μέγεθος ενός ποταμού μπορεί να είναι από λίγα μέτρα μέχρι αρκετά χιλιόμετρα. [Βουδούρης, 2019]

Κώνος Προσχώσεων

Ο κώνος προσχώσεων είναι η περιοχή στην εκβολή του ποταμού στην οποία αποτίθενται κυρίως τα φερτά υλικά του ποταμού με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μίας κωνικής ζώνης αποθέσεων όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3. [Βουδούρης, 2019]



Εικόνα 3. Τα Μέρη του Ποταμού. [Βουδούρης, 2019]

Υδροκριτική Γραμμή – Υδροκρίτης

Για να οριστούν τα όρια μίας λεκάνης απορροής πρέπει πρώτα να κατασκευαστεί ο υδροκρίτης του δικτύου. Με τον όρο υδροκρίτης ή υδροκριτική γραμμή ορίζεται μία νοητή γραμμή που συνδέει τα ψηλότερα σημεία των υψωμάτων της επιφάνειας της Γης και διαχωρίζει την ροή των όμβριων υδάτων όπως φαίνεται στην Εικόνα 4. [Βουδούρης, 2019]



Εικόνα 4. Ο υδροκρίτης μίας λεκάνης απορροής. [Βουδούρης, 2019]

1.6 Υδροφορείς

Υδροφορέας είναι ένας υπεδάφιος σχηματισμός ο οποίος αποτελείται από διαπερατά υλικά κορεσμένα με νερό. Οι υδροφορείς μπορούν να ταξινομηθούν σε ελεύθερους, ημιαρτεσιανούς και περιορισμένους. Η ταξινόμηση τους αυτή γίνεται με βάση την θέση του υδροφόρου ορίζοντα. Στον ελεύθερο υδροφορέα η ανώτερη του επιφάνεια έχει πίεση ίση με την ατμοσφαιρική, ενώ στον περιορισμένο ή αρτεσιανό υδροφορέα το νερό βρίσκεται σε πίεση μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής και περικλείεται άνω και κάτω από αδιαπέρατα στρώματα [Καρατζάς, 2019].

Η παρουσία του νερού στους υπόγειους υδροφορείς μπορεί να διακριθεί στην Ζώνη Αερισμού και στην Ζώνη Κορεσμού. Η Ζώνη Αερισμού αποτελείται από διάκενα στα οποία υπάρχει αέρας και νερό και υποδιαιρείται:

1. Στην υποζώνη εδαφικού νερού μικρού πάχους η οποία επηρεάζεται από τους κλιματικούς παράγοντες, τον τύπο του εδάφους και την βλάστηση
2. Στην ενδιάμεση ζώνη όπου το νερό συγκρατείται με υγροσκοπικές και τριχοειδής δυνάμεις και από την οποία περνάει το νερό για να καταλήξει στην ζώνη κορεσμού και
3. Στην τριχοειδή υποζώνη με ύψος το οποίο μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το μέγεθος των διακένων. Η τριχοειδής ανύψωση δίνεται από τον τύπο:

$$h_c = \frac{2\tau}{\varepsilon R} \sigma \nu \varphi$$

Όπου:

τ : η επιφανειακή τάση

ε : το ειδικό βάρος του νερού

R : η ακτίνα του τριχοειδούς σωλήνα

φ : η γωνία ανάμεσα στα τοιχώματα του σωλήνα και του μηνίσκου

Στην Ζώνη Κορεσμού όλα τα διάκενα είναι γεμάτα με νερό και η ζώνη αυτή αντιπροσωπεύει ουσιαστικά το υδροφόρο στρώμα. Η ζώνη αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς τροφοδοτεί με νερό τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Το επιφανειακό νερό με την δύναμη της βαρύτητας κατείσδυει προς την ζώνη κορεσμού εμπλουτίζοντας του υπόγειους υδροφορείς. Κατείσδυση δηλαδή είναι η κατακόρυφη κίνηση του νερού από την ζώνη αερισμού στην ζώνη κορεσμού. [Βουδούρης, 2019]

Επίσης υπάρχει και η ακόρεστη ζώνη η οποία καταλαμβάνει το τμήμα μεταξύ της στάθμης του υπογείου νερού και της επιφάνειας του εδάφους με εξαίρεση την τριχοειδή ζώνη η οποία περιέχει νερό και αέρα. Η ποσότητα του νερού στην ακόρεστη ζώνη εκφράζεται από την σχέση:

$$\theta = \frac{V_w}{V_T}$$

Όπου:

V_w : είναι ο όγκος του νερού

V_T : είναι ο όγκος του μέσου

Η ροή του νερού στην ακόρεστη ζώνη είναι κατακόρυφη είτε ανοδική με την εξάτμιση, είτε καθοδική με την κατείσδυση του νερού στην κορεσμένη ζώνη. [Βουδούρης, 2019]

Τύποι υδροφορέων

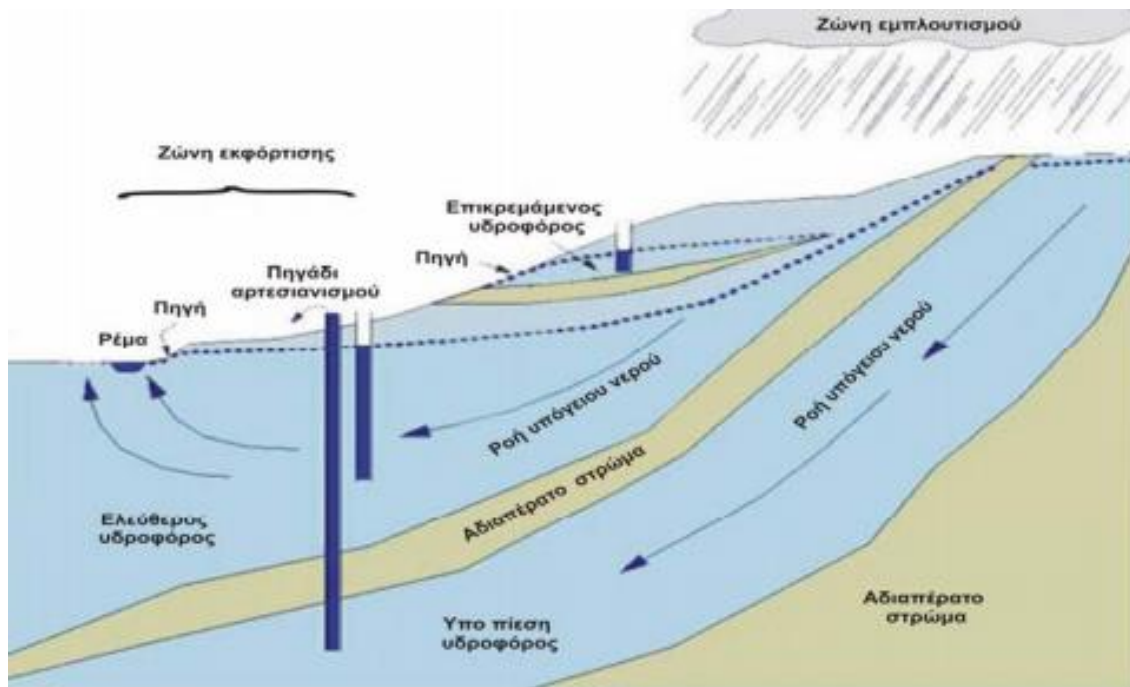
Οι τύποι των υδροφορέων είναι οι ελεύθεροι, οι αρτεσιανοί και οι ημιαρτεσιανοί υδροφορείς.

Ελεύθεροι Υδροφορείς

Οι ελεύθεροι υδροφορείς είναι αυτοί οι οποίοι έχουν ως δάπεδο του ένα αδιαπέραστο γεωλογικό στρώμα και στην οροφή τους ένα διαπερατό γεωλογικό στρώμα. Έτσι στην οροφή του βρίσκεται η ελεύθερη επιφάνεια των υπογείων υδάτων και η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Ο όγκος του αποθηκευμένου νερού δεν είναι σταθερός και μεταβάλλεται ανάλογα με την μεταβολή της στάθμης του νερού.

Αρτεσιανοί Υδροφορείς

Οι αρτεσιανοί υδροφορείς είναι αυτοί οι οποίοι περιέχουν ανάμεσα από αδιαπέρατα στρώματα δαπέδου και οροφής το νερό. Είναι κορεσμένοι σε όλο το πάχος τους και η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5 η πιεζομετρική επιφάνεια του αρτεσιανού υδροφορέα βρίσκεται ψηλότερα από την βάση της αδιαπέρατης οροφής. Όταν η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους τότε παρατηρείται αυτόματη ροή με την μορφή πίδακα.



Εικόνα 5. Είδη υδροφόρων Οριζόντων [Βουδούρης, 2019]

Ημιαρτεσιανοί Υδροφορείς

Οι ημιαρτεσιανοί υδροφορείς είναι παρόμοιοι με τους αρτεσιανούς με μόνη διαφορά ότι το υπερκείμενο στρώμα παρουσιάζει μικρή υδροπερατότητα. Αυτοί οι υδροφορείς από πετρογραφικής άποψης διακρίνονται σε καρστικούς (αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα) και πορώδεις (αναπτύσσονται σε κοκκώδεις σχηματισμούς).

1.7 Παράμετροι Υδροφορέων

Πορώδες

Πορώδες είναι ο λόγος του όγκου, που καταλαμβάνεται από τον αέρα και νερό, προς το συνολικό όγκο του εδάφους και κυμαίνεται περίπου από 20-60%. Υπάρχουν παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν το πορώδες του εδάφους όπως είναι η κοκκομετρική σύνθεση, η διάταξη και το σχήμα των κόκκων.

$$n = \frac{V_{\text{κενών}}}{V_o}$$

Όπου n: πορώδες

$V_{\text{κενών}}$: Ο όγκος των κενών (L^3)

V_o : Ο συνολικός όγκος του δείγματος (L^3)

Επιπλέον χρησιμοποιείται και το ενεργό πορώδες. Ενεργό πορώδες ορίζεται ως το συνολικό ποσοστό των πόρων οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους και είναι διαθέσιμοι για την ροή του ρευστού με την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Τα διάκενα τα οποία δεν συνεισφέρουν στην ροή συγκρατούν το νερό. Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό πορώδες κυμαίνεται από 0 – 3% για αργιλικά εδάφη και έως και 20% για χαλίκια. [Καρατζάς, 2019].

$$n_e = \frac{V_r}{V_o}$$

Όπου:

n_e : ενεργό πορώδες

V_r : Ο όγκος νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων.

Υδραυλική Αγωγιμότητα

Υδραυλική αγωγιμότητα περιγράφεται η ιδιότητα ενός γεωλογικού σχηματισμού να επιτρέπει τη ροή υγρού μέσα από τη μάζα του. Για να υπάρξει ροή μεταξύ δύο θέσεων, σε ένα κορεσμένο εδαφικό υλικό, θα πρέπει να υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ των θέσεων αυτών. Ο Darcy απέδειξε ότι, για γραμμική ροή μέσα σε κύλινδρο υπάρχει αναλογία μεταξύ της ποσότητας του νερού που διέρχεται στη μονάδα του χρόνου και της απώλειας δυναμικού μεταξύ δύο σημείων της διαδρομής του νερού. Θεωρώντας ένα συντελεστή k για να αποδώσει την αναλογία αυτή, διατύπωσε τη σχέση [Στειακακης, 2008]

$$\frac{Q}{A} = q = -k \frac{\Delta h}{L}$$

Όπου:

Q : είναι η παροχή (L^3/T)

A : είναι η επιφάνεια (L^2)

K : είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

Δh : είναι η απώλεια φορτίου που εκφράζεται ως $(p_1/\gamma + z_1) - (p_2/\gamma + z_2)$ (L)

L : είναι το μήκος της στήλης (L)

q : είναι η ταχύτητα του Darcy ή ειδική παροχή (L/T)

Το αρνητικό πρόσημο δείχνει ότι η ταχύτητα της ροής είναι προς την κατεύθυνση που ελαττώνεται το φορτίο.

Ταχύτητα Διήθησης

Στο νόμο του Darcy ο λόγος Q/A ισοδυναμεί με την παροχή που περνά από τη μονάδα επιφάνειας της διατομής και ισούται με την ταχύτητα Darcy. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας αυτής γίνεται η παραδοχή ότι η ροή πραγματοποιείται διαμέσου της συνολικής επιφάνειας του μέσου και δε λαμβάνονται υπόψη το στερεό υλικό και οι πόροι. Σε ένα πορώδες υλικό η ροή περιορίζεται εντός του χώρου των πόρων. Οπότε η ταχύτητα διήθησης υπολογίζεται με τον τύπο: [Καρατζάς, 2019]

$$q_p = \frac{Q}{nA} = \frac{q}{n} = -K \frac{dh}{dl}$$

Όπου:

q_p : η ταχύτητα διήθησης, [$L T^{-1}$]

Q : ο ρυθμός παροχής, [$L^3 T^{-1}$]

A : η επιφάνεια, [L^2]

n : το πορώδες, []

q : η ταχύτητα Darcy ή ειδική παροχή, [$L T^{-1}$]

K : η υδραυλική αγωγιμότητα, [$L T^{-1}$]

dh : η απώλεια φορτίου, [L]

dl : το μήκος της στήλης, [L]

dh/dl : υδραυλική κλίση, []

Ειδική Διαπερατότητα

Διαπερατότητα ορίζεται η ευκολία με την οποία το νερό ρέει ανάμεσα από τους πόρους. Στα λεπτόκοκκα εδάφη η ροή του νερού ανάμεσα από τους πόρους γίνεται με μεγαλύτερη δυσκολία σε σχέση με τα χονδρόκοκκα. Αυτό οφείλεται στα κενά που υπάρχουν ανάμεσα από τους κόκκους. Για να χαρακτηριστεί διαπερατό ένα έδαφος πρέπει οι πόροι να είναι συνεχείς. Για παράδειγμα το πορώδες ενός αργιλικού εδάφους είναι συνήθως μεγαλύτερο από αυτό μίας άμμου όμως είναι λιγότερη διαπερατή κατά ένα εκατομμύριο φορές η άργιλος. Αυτό οφείλεται στο ότι η διαπερατότητα επηρεάζεται από την κοκκομετρία, την πυκνότητα του εδάφους, τα κενά, την ύπαρξη λεπτόκοκκου κλάσματος, τον βαθμό κορεσμού, την θερμοκρασία και τις ασυνέχειες. Για να γίνεται εύκολος ο διαχωρισμός των εδαφών με βάση την διαπερατότητα έχει οριστεί ο

συντελεστής διαπερατότητας k . Ο Συντελεστής Διαπερατότητας είναι η σταθερά της αναλογίας μεταξύ της φαινόμενης ταχύτητας ροής και της υδραυλικής κλίσης ή η φαινόμενη ταχύτητα ροής μέσω του εδάφους υπό υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα.

Συντελεστής Μεταβασιμότητας

Ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο, νερό δεδομένου κινηματικού ιξώδους, μεταβιβάζεται διαμέσου μοναδιαίου πλάτους ενός υδροφορέα με μοναδιαία υδραυλική κλίση και εκφράζεται με την σχέση: [Καρατζάς, 2019]

$$T=kb$$

Όπου:

k : η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]

b : το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα [L].

Συντελεστής Αποθηκευτικότητας

Ως αποθηκευτικότητα ορίζεται η ικανότητα των εδαφών να αποθηκεύουν νερό. Η αποθηκευτικότητα επηρεάζεται από το είδος του υδροφορέα (ελεύθερος ή περιορισμένος) αλλά και από τους υφιστάμενους μηχανισμούς αποθήκευσης (συμπιεστότητα ύδατος, συμπιεστότητα υλικού, πλήρωση και εκκένωση πόρων). [Καββαδάς, 2019]

1.8 Ρύπανση στους υπόγειους υδροφορείς

Σύμφωνα με το ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) τα μέχρι σήμερα ποιοτικά και ποσοτικά συμπεράσματα για την Ελλάδα δεν είναι ενθαρρυντικά καθώς διαπιστώνεται:

1. Νιτρορύπανση από υπερλίπανση των εδαφών
2. Υφαλμύριση σε παράκτιες ζώνες λόγω της υπεράντλησης και
3. Υποβάθμιση των υπογείων υδάτων οφειλόμενη σε βαρέα μέταλλα και τοξικά ιχνοστοιχεία

Οι ανωτέρω ποιοτικές επιβαρύνσεις έχουν αυξητική τάση και υποβαθμίζουν το περιβάλλον τα τελευταία 20 χρόνια. Τα ποσοτικά χαρακτηριστικά που προκαλούν προβληματισμό είναι:

1. Η υπερεκμετάλλευση για αρδευτικούς και υδρευτικούς λόγους που έχει συνέπεια την ταπείνωση της στάθμης σε αρκετούς υδροφορείς
2. Η ανομβρία που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των υδρολογικών αποθεμάτων

Στην περιοχή της Μεσσαράς τα κυριότερα προβλήματα είναι τα ποσοτικά καθώς υπάρχει μεγάλη απαίτηση σε νερό για την κάλυψη των αναγκών για υδρευτικούς και αρδευτικούς λόγους. Υπάρχει όμως και ποιοτικό πρόβλημα καθώς από τις αγροτικές δραστηριότητες υπάρχει και η νιτρορύπανση των εδαφών. [ΙΓΜΕ, 2009]

1.9 Η Γεωλογία της Κρήτης

Η γεωλογία της Κρήτης χαρακτηρίζεται κυρίως από την ύπαρξη αλπικών και προ-αλπικών πετρωμάτων. Επιπλέον χαρακτηρίζεται από την εμφάνιση πολλών μετά-αλπικών ιζημάτων τα οποία καλύπτουν τις λεκάνες που χωρίζουν τα ψηλά βουνά. Το οικοδόμημα αυτό δημιουργείται από ένα αριθμό τεκτονικών ενοτήτων οι οποίες βρίσκονται η μία πάνω στην άλλη και χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες τα ανώτερα και τα κατώτερα στρώματα. [Μουντράκης, 1985, Φασούλας, 2001]

Τα κατώτερα στρώματα περιλαμβάνουν τρία επιμέρους καλύμματα. Το κατώτερο κάλυμμα είναι οι Πλακώδης Ασβεστόλιθοι, το ενδιάμεσο είναι ένα κάλυμμα κροκαλοπαγών ασβεστόλιθων και δολομιτών και τα ανώτερα καλύμματα αποτελούνται από τεκτονικές ενότητες που μπορούν να συσχετισθούν με τις λιθοτεκτονικές ενότητες της Κεντρικής Ελλάδας και των Κυκλάδων. [Μουντράκης, 1985, Φασούλας, 2001]

Τέλος πάνω στου αλπικούς σχηματισμούς βρίσκονται με στρωματογραφική ασυμφωνία ιζήματα του Νεογενούς. Στα Νεογενή ιζήματα της Κρήτης έχουν καταγραφεί δεκάδες λιθοστρωματογραφικές ενότητες από τις οποίες κάποιες έχουν τοπική εξάπλωση ενώ άλλες εμφανίζονται σε όλο το νησί. [Μουντράκης, 1985, Φασούλας, 2001]

Η περιοχή της Μεσσαράς αποτελείται από δύο λεκάνες απορροής την λεκάνη της Βαγιονιάς και των Μοιρών. Η λεκάνη της Βαγιονιάς αποτελείται από ένα πορώδες υδροφόρο σύστημα το οποίο δομείται από αλλουβιακές αποθέσεις και πλειστοκαινικά κροκαλοπαγή. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζει και το πορώδες υδροφόρο σύστημα των Μοιρών. [Κριτωτάκης κ. α., 2013]

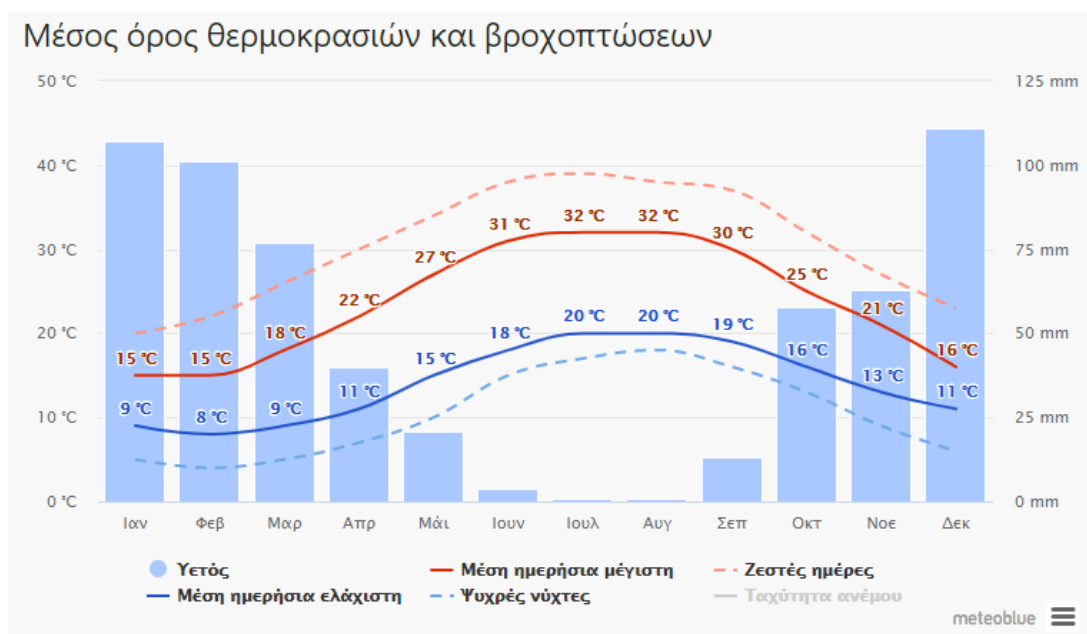
1.10 Περιβαλλοντικά Χαρακτηριστικά Περιοχής Μελέτης

Ο υδροφορέας της Κοιλιάδας της Μεσσαράς θεωρείται η μόνη "αποθήκη" νερού για την περιοχή. Η επαναφόρτιση γίνεται κυρίως λόγω της κατακρήμνισης όπως και όλα τα άλλα συστατικά, δηλαδή η προμήθεια άρδευσης που είναι αμελητέα εξαιτίας των ειδών των φυτών και του συστήματος άρδευσης που χρησιμοποιείται. Τέλος η επαναφόρτιση από το ρέμα του Γεροπόταμου θεωρείται μικρή καθώς έχει μειωθεί πολύ η ροή του ρέματος. Η υδρολογική λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης είναι περίπου 400 km² όπως φαίνεται στην Εικόνα 9 με κίτρινο χρώμα και βρίσκεται στο νότιο μέρος της Κρήτης σε απόσταση περίπου 50 km από την πόλη του Ηρακλείου. Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής χρησιμοποιείται για καλλιέργεια ενώ σχεδόν όλη η υπόλοιπη για κτηνοτροφία. Η περιοχή που καλλιεργείται καλύπτει μία έκταση περίπου 250 km² γεγονός που την καθιστά την μεγαλύτερη και πιο παραγωγική κοιλάδα της Κρήτης. Η κατανομή των καλλιεργούμενων φυτών είναι 75% ελιές, 10% αμπέλια, 2% εσπεριδοειδή και 13% λαχανικά. Τα υπόγεια νερά της κοιλάδας της Μεσσαράς αποτελούν την κύρια πηγή άρδευσης και ύδρευσης

της περιοχής. Η μέση ετήσια βροχόπτωση της περιοχής είναι περίπου 650 mm και το μέσο υψόμετρο 260 m όπως φαίνεται και στην Εικόνα 10. [Λυμπέρη, 2016]

1.11 Το Κλίμα της Κρήτης

Το κλίμα της Κρήτης είναι εύκρατο. Ανήκει σε δύο κλιματολογικές ζώνες, τη Μεσογειακή και τη Βόρεια Αφρικανική. Η χειμερινή περίοδος είναι αρκετά ήπια με πολλές βροχοπτώσεις ιδιαίτερα στα δυτικά τμήματα του νησιού. Την θερινή περίοδο οι βροχές είναι σπάνιες. Οι χιονοπτώσεις είναι σπάνιες στα πεδινά τμήματα αλλά στις ορεινές περιοχές η παρουσία του χιονιού είναι συχνή. Το καλοκαίρι οι μέσες θερμοκρασίες κυμαίνονται από 25 έως 30 βαθμούς κελσίου όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6 οι οποίες είναι χαμηλότερες από την Ηπειρωτική Ελλάδα γεγονός που οφείλεται στα καλοκαιρινά μελτέμια. Τέλος είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι διαφορές της θερμοκρασίας του βόρειου τμήματος του νησιού από το νότιο είναι σημαντικές και αυτό οφείλεται στις κλιματολογικές διαφοροποιήσεις του νησιού [meteo24news.gr].



Εικόνα 6. Μέσος Όρος Θερμοκρασιών και Βροχοπτώσεων για τον Ν. Ηρακλείου [Meteoblue.gr]

Οι άνεμοι είναι αρκετά ισχυροί σε όλο το νησί κυρίως όμως στην νότια πλευρά του νησιού. Στην νότια πλευρά πνέουν άνεμοι βόρειοι-βορειοδυτικοί κατά τη διάρκεια του Ιουλίου και Αυγούστου, τα λεγόμενα μελτέμια. Όταν σταματούν τα μελτέμια, πνέουν στις παραθαλάσσιες περιοχές οι αύρες, κατά το φθινόπωρο πνέουν νότιοι ζεστοί άνεμοι ενώ το χειμώνα επικρατούν κυρίως βόρειοι άνεμοι. Ηλιοφάνεια υπάρχει αρκετή καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου ενώ οι νεφώσεις είναι λίγες. Οι πυκνές νεφώσεις εμφανίζονται τον Ιανουάριο και οι πιο αραιές τον Ιούλιο. Γενικότερα, οι ακτές παρουσιάζουν λιγότερες νεφώσεις καθώς και η νότια πλευρά έχει πολύ λιγότερες από την βόρεια. [Ταμπακάκη, 2008]

1.12 Κλιματολογικές Ζώνες στο Ν. Ηρακλείου

Ο Νομός Ηρακλείου είναι ο μεγαλύτερος σε έκταση νομός της Κρήτης, βρίσκεται ανατολικά του νομού Ρεθύμνης και δυτικά του νομού Λασιθίου, βόρεια βρέχεται από το Κρητικό πέλαγος και νότια από το Λιβυκό πέλαγος. Ο νομός Ηρακλείου χωρίζεται σε τρεις κλιματικές ζώνες, τη Βόρεια παραλιακή, όπου βρίσκεται η περιφέρεια Ηρακλείου, τη Κεντρική, όπου βρίσκεται η περιφέρεια Καστελιού, Γέργερης και Πραιτοριών και τη Νότια παραλιακή, στην οποία ανήκει η περιοχή μελέτης, όπου βρίσκεται η περιφέρεια Τυμπακίου, Γόρτυνος, Καψάλων και Άρβης. Η παρούσα εργασία ασχολείται με την Νότια παραλιακή ζώνη. Συγκεκριμένα υπάρχουν δεδομένα για τους μετεωρολογικούς σταθμούς της Βαγιωνιάς και των Μοιρών για την παρούσα εργασία. Όπως φαίνεται στις Εικόνα 7 και Εικόνα 8 στο κλίμα στο Νομό Ηρακλείου είναι παρόμοιο με ολόκληρης της Κρήτης. [Ταμπακάκη, 2008]

1.13 Κλιματικά σενάρια RCP's

Ο IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) είναι ένας οργανισμός όπου αποτελείται από χώρες – μέλη των Ηνωμένων Εθνών. Ο IPCC δημιουργήθηκε το 1988 από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO) και από το Περιβαλλοντικό Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών (UNEP) με σκοπό την παροχή επιστημονικών πληροφοριών στις κυβερνήσεις για την ανάπτυξη κλιματικών πολιτικών. Κάθε χρόνο χιλιάδες εθελοντές επιστήμονες δημοσιεύουν την έρευνα τους για να γίνει εκτίμηση για την κλιματική αλλαγή, τους μελλοντικούς κινδύνους έτσι ώστε να γίνει η κατάλληλη προσαρμογή για την μείωση αυτών των κινδύνων. Ο IPCC δεν διεξάγει δική του έρευνα αλλά γίνεται μία εκτίμηση για τις περιοχές οι οποίες έχουν αρκετά επιστημονικά στοιχεία και στις περιοχές οι οποίες χρειάζεται παραπάνω έρευνα. Τα κλιματικά σενάρια RCP's (Representative Concentration Pathway) εκφράζουν την πορεία της συγκέντρωσης των αερίων του θερμοκηπίου προσαρμοσμένα στον IPCC. Τα κλιματικά σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν είναι το RCP 2.6, RCP 4.5 και το RCP 8.5. Τα RCP's αναφέρονται συνήθως σε ένα τμήμα της συγκέντρωσης που εκτείνεται μέχρι και το 2100 για το οποίο ολοκληρωμένα μοντέλα αξιολόγησης αναπαρήγαγαν αντίστοιχα σενάρια εκπομπών. Τα RCP's παίρνουν το όνομα τους από τα επίπεδα της ηλιακής ακτινοβολίας για το 2100. [IPCC, 2007]

RCP 2.6

Είναι το σενάριο όπου θεωρεί πολύ χαμηλά επίπεδα συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου. Αρχικά η ηλιακή ακτινοβολία έχει τιμή 2.6 W/m^2 και φτάνει την μέγιστη τιμή της στο μέσο του αιώνα, περίπου το 2050 στα 3 W/m^2 . Έπειτα η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας επιστρέφει στα αρχικά επίπεδα του αιώνα δηλαδή 2.6 W/m^2 . Στο σενάριο αυτό η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) αυξάνεται και ισοδυναμεί με 490 ppm. [Vuuren et al, 2007]

RCP 4.5

Αποτελεί ένα μετριοπαθές σενάριο καθώς η ηλιακή ακτινοβολία αυξάνεται κατά την διάρκεια το αιώνα και σταθεροποιείται στα 4.5 W/m^2 μετά το 2100 χωρίς όμως να ξεπεράσει μακροπρόθεσμα αυτή την τιμή. Η συγκέντρωση του CO_2 ισοδυναμεί με 650 ppm και η μεταβολή της θερμοκρασίας σε $2.4 \text{ }^\circ\text{C}$. [Clarke et al, 2007]

RCP 8.5

Είναι ένα ακραίο σενάριο για το οποίο η τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας αυξάνεται συνεχώς και ξεπερνάει τα 8.5 W/m² μέχρι το 2100 και συνεχίζει να αυξάνεται για ένα διάστημα μετά το 2100. Τα αέρια του θερμοκηπίου βρίσκονται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Η συγκέντρωση του CO₂ ισοδυναμεί με 936 ppm και η μεταβολή της θερμοκρασίας σε 5 - 6 °C. [Riahi et al, 2007]

Τα RCP's παρέχουν ένα μοναδικό σύνολο δεδομένων ιδίως όσον αφορά την πληρότητα, την λεπτομέρεια και την χωρική κλίμακα των δεδομένων στα κλιματικά μοντέλα. Τα σενάρια καλύπτουν ένα φάσμα ακτινοβολίας το οποίο ακολουθεί την τρέχουσα βιβλιογραφία. Το ίδιο ισχύει και για τα αέρια του θερμοκηπίου CO₂, CH₄ και N₂O των οποίων τα δεδομένα εκτελέστηκαν από ένα παγκόσμιο κλιματικό μοντέλο και μοντέλο για τον κύκλο του άνθρακα. Τα στοιχεία για τις χρήσεις γης και την ατμοσφαιρική ρύπανση έγιναν διαθέσιμα με λεπτομέρεια για κάθε διαφορετική γεωγραφική περιοχή σε 0.5°× 0.5° μοίρες. Επίσης τα RCP's έχουν εναρμονιστεί πλήρως με τα τελευταία δεδομένα από ιστορικές περιόδους και ο αλγόριθμος πλέον επιτρέπει μία ομαλότερη μετάβαση από τις ιστορικές περιόδους στις περιόδους των σεναρίων. [Vuuren et al, 2007]

Ο στόχος της χρήσης των διαφορετικών κλιματικών σεναρίων δεν είναι η πρόβλεψη του μέλλοντος αλλά η κατανόηση των αβεβαιοτήτων του. Δηλαδή τα σενάρια τα οποία αφορούν την κλιματική αλλαγή ερευνούν τις πιθανές συνέπειες για το ανθρωπογενές και το φυσικό περιβάλλον. Επίσης βοηθούν στο να δημιουργηθεί μία περιβαλλοντική πολιτική (έρευνα για ενεργειακά συστήματα, καλύτερη διαχείριση των υδατικών πόρων κ.α.). [IPCC, 2007]

1.14 FEFLOW

Το FEFLOW (Finite Element Subsurface FLOW and transport system) είναι ένα διαδραστικό μοντέλο υπογείων υδάτων για:

- 3 διαστάσεις και 2 διαστάσεις
- χωρική και διατομή (οριζόντια, κατακόρυφη ή αξονοσυμμετρική)
- κορεσμένες μεταβλητές
- μεταβατικές ή σταθερές συνθήκες
- ροή, μεταφορά μάζας και θερμότητας
- μεταφορά διαφόρων μη συντηρητικών ουσιών
- υπόγεια νερά με ή χωρίς ελεύθερη επιφάνεια

Το FEFLOW μπορεί αποτελεσματικά να περιγράψει την χωρική και προσωρινή κατανομή και τις αντιδράσεις στους υπόγειους ρυπαντές. Μπορεί να προσομοιάσει γεωθερμικές διαδικασίες και να εκτιμήσει την διάρκεια και τον χρόνο μεταφοράς των ρυπαντών στους υδροφορείς. Δέχεται δεδομένα από εξελιγμένα προγράμματα όπως το GIS και το CAD αλλά επίσης και απλά κείμενα. Ο νόμος του Darcy και η εξίσωση της μεταφοράς μάζας αποτελούν την βάση του προγράμματος και η εξίσωση είναι της μορφής:

$$q = - K_r(s)K(\nabla h + \chi e) = - K_r(s)K[\nabla \psi + (1 + \chi)e]$$

Όπου:

ψ : Η πίεση των πόρων

e : Μοναδιαίο διάνυσμα της ταχύτητας του ρευστού

q : Η Ταχύτητα Darcy

K : Η υδραυλική αγωγιμότητα

$K_r(S)$: Η σχετική υδραυλική αγωγιμότητα

h : Το υδραυλικό ύψος

χ : Η ανωση συσχετισμένη με την πυκνότητα του υγρού

Στην διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε η σχετική υδραυλική αγωγιμότητα είναι ίση με 1 καθώς θεωρείται ότι οι πόροι στο έδαφος είναι πλήρως κορεσμένοι όταν υπάρχει νερό. Δηλαδή δεν υπάρχουν κενά τα οποία δεν επικοινωνούν μεταξύ τους.

1.15 Τετραγωνική Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE)

Το RMSE είναι ένα συχνά χρησιμοποιούμενο μέτρο σύγκρισης μεταξύ της παρατηρούμενης τιμής και της τιμής που έχει προβλεφθεί από κάποιο μοντέλο. Επειδή τα σφάλματα τετραγωνίζονται πριν βγει ο μέσος όρος το RMSE δίνει μεγάλο βάρος στα μεγάλα σφάλματα. Η σχέση η οποία το εκφράζει είναι: [Παπαδόπουλος κ. α., 2009]

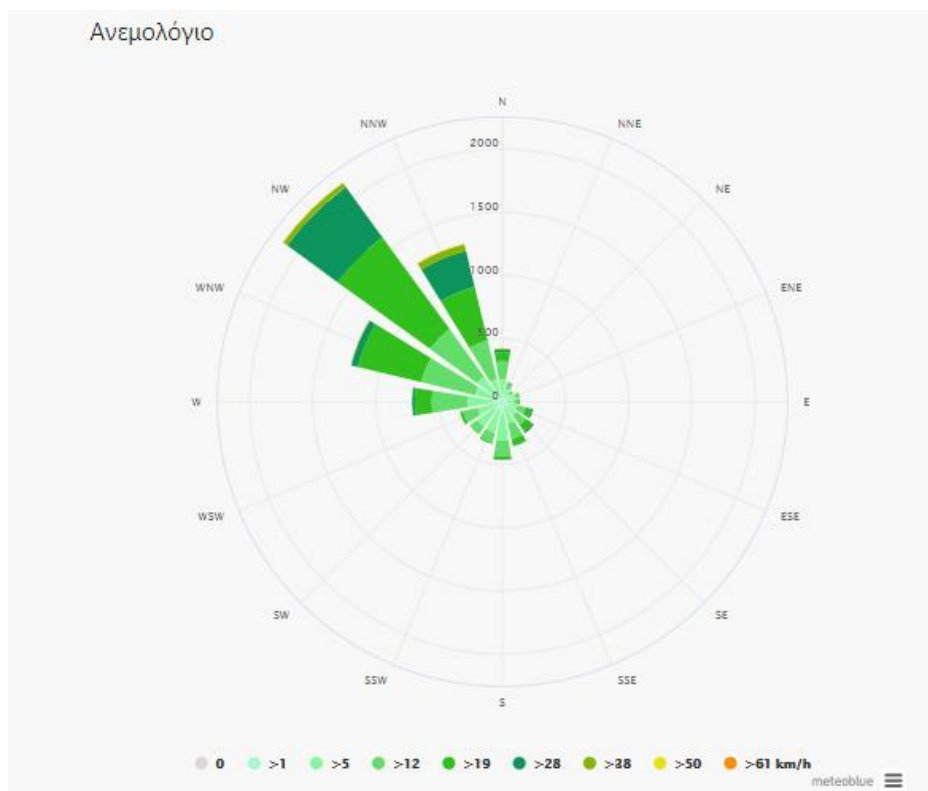
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Obs_i - model_i)^2}{n}}$$

Όπου:

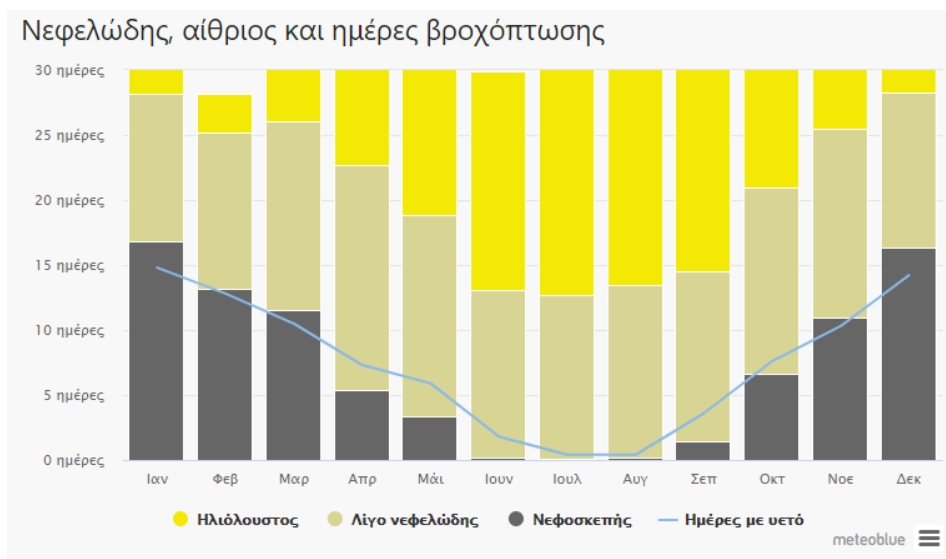
Obs_i :είναι η παρατηρούμενη τιμή

$model_i$ είναι η προγνωστική τιμή

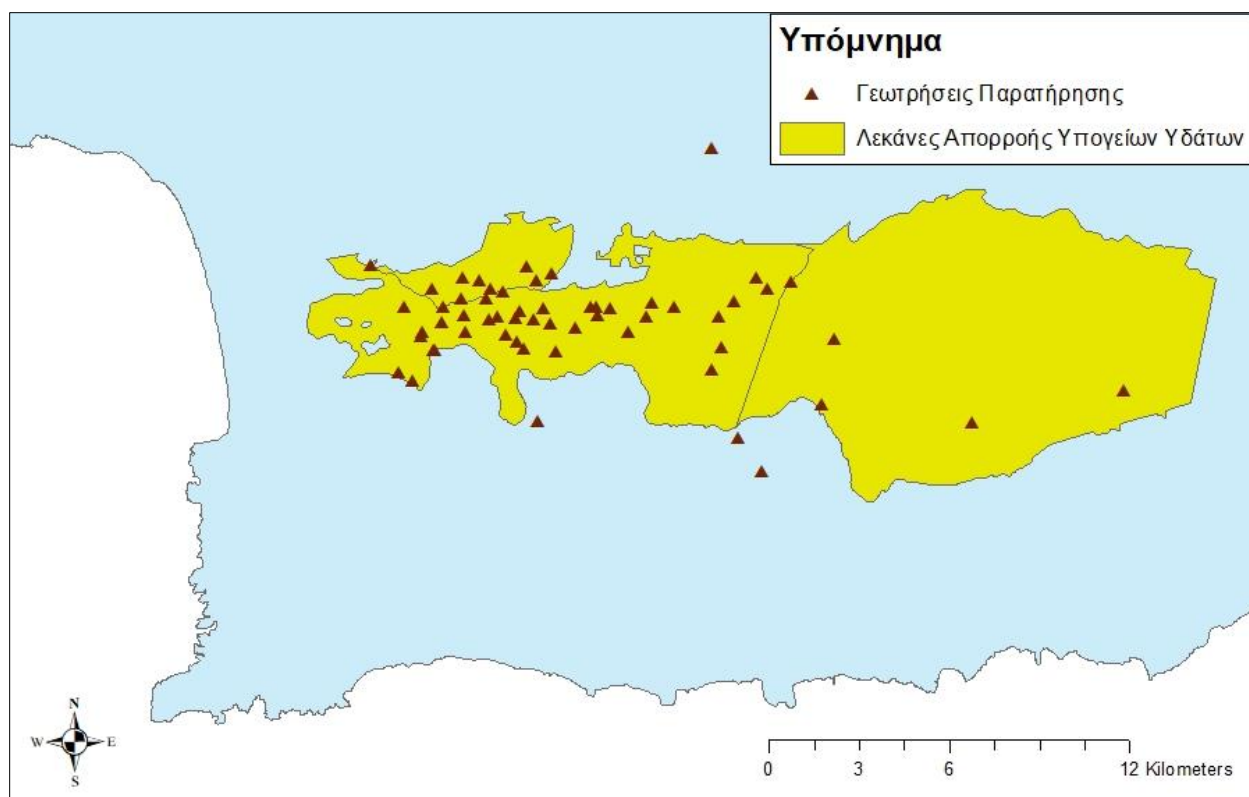
n : είναι το πλήθος των ζευγών



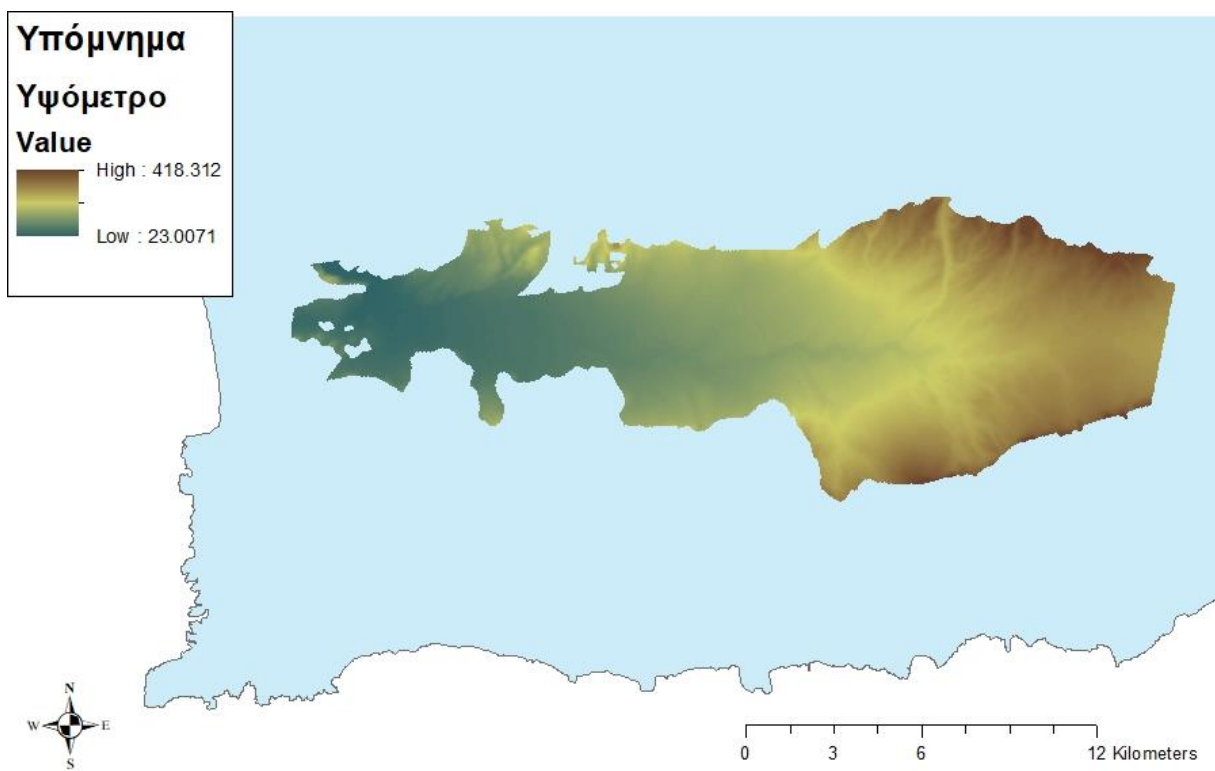
Εικόνα 7. Ανεμολόγιο για τον Ν. Ηρακλείου [meteoblue.gr]



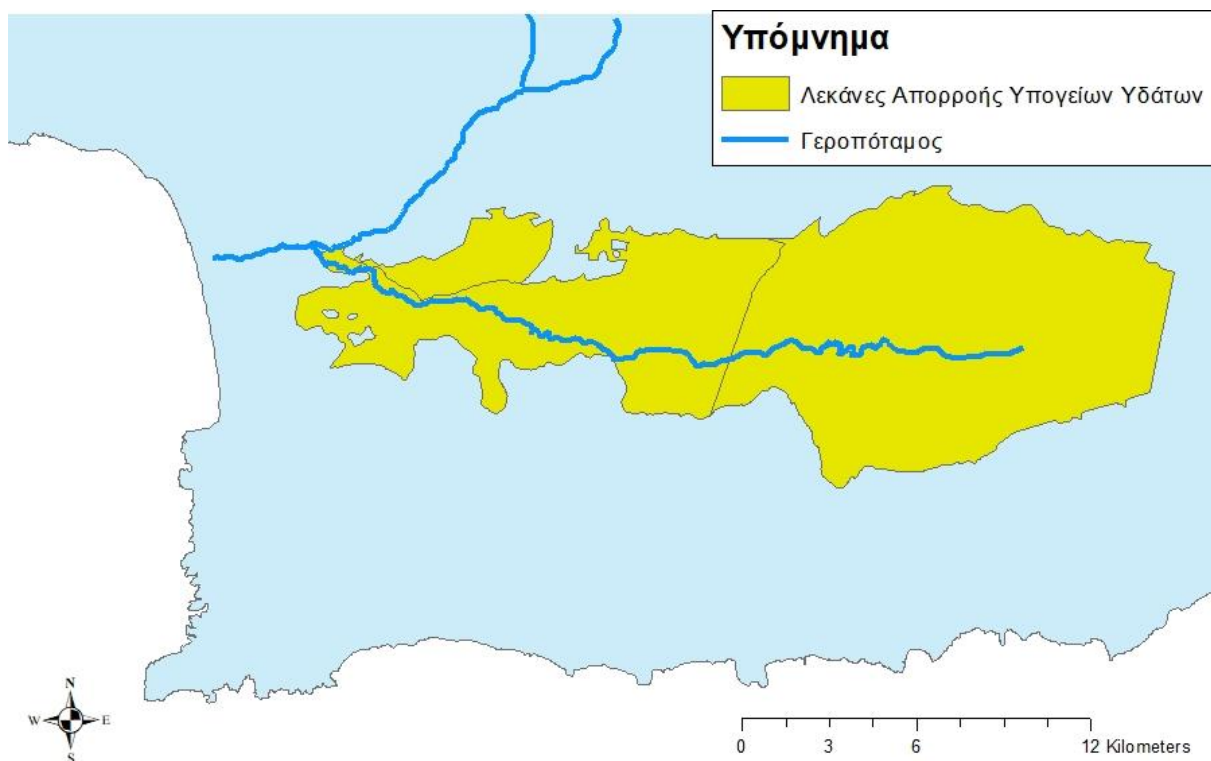
Εικόνα 8. Ηλιοφάνεια, Νεφελοκάλυψη και Βροχόπτωση στο Ν. Ηρακλείου [meteoblue.gr]



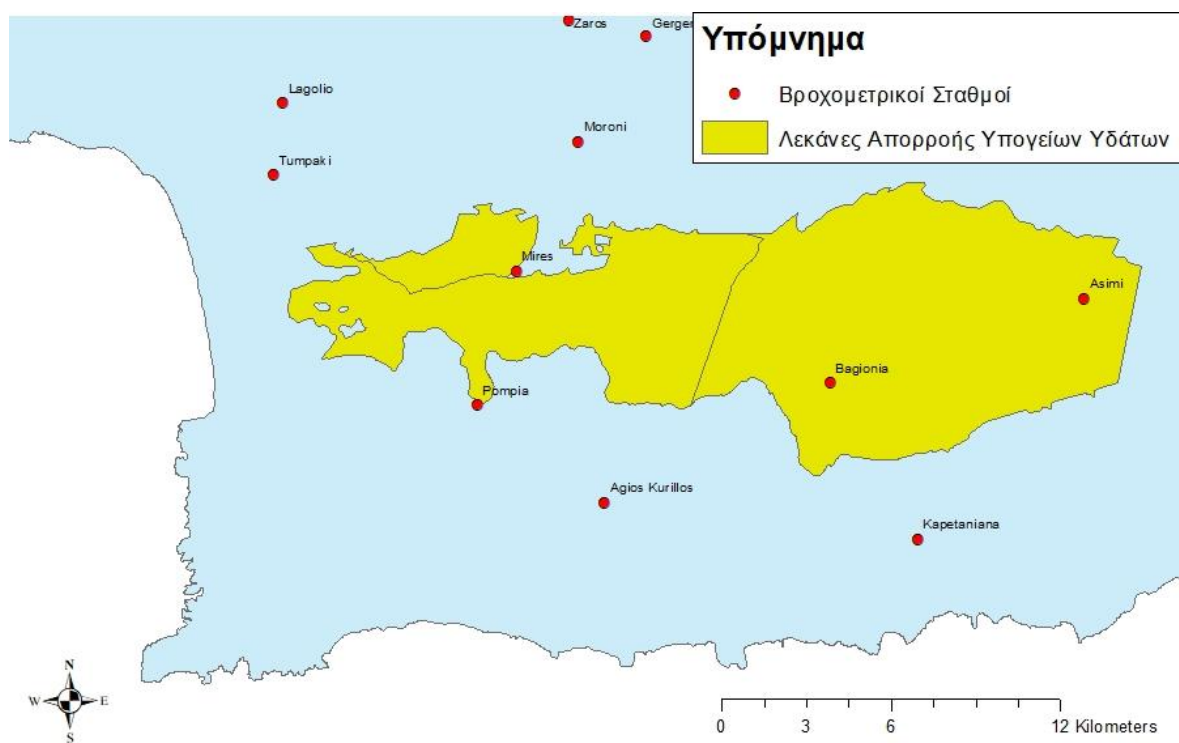
Εικόνα 9. Λεκάνες Απορροής Υπογείων Υδάτων και Πηγάδια Παρατήρησης



Εικόνα 10. Υψόμετρο Περιοχής Μελέτης



Εικόνα 11. Λεκάνες Απορροής Υπογείων Υδάτων και Γεροπόταμος



Εικόνα 12. Λεκάνες Απορροής Υπογείων Υδάτων και Βροχομετρικοί Σταθμοί

2 Μεθοδολογία

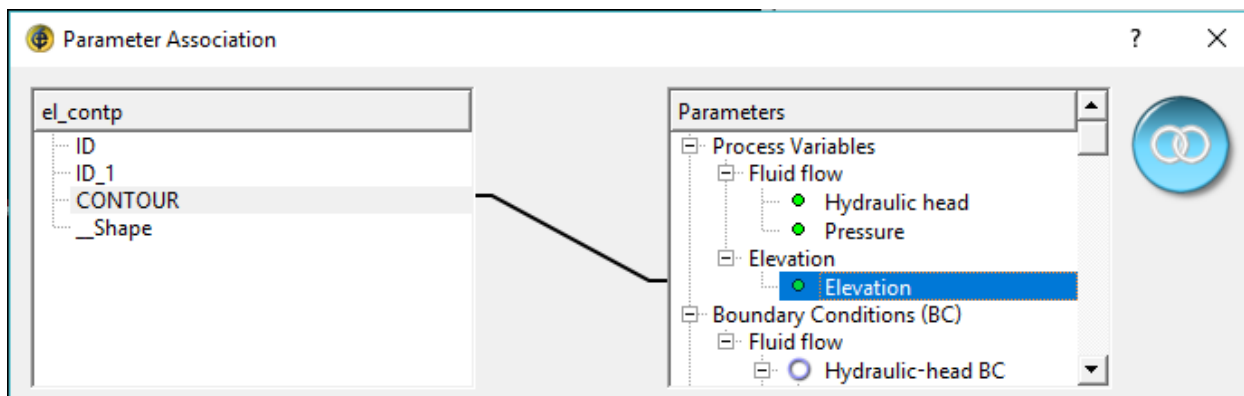
Για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα αρχεία που αφορούν τους χάρτες ή τις μετρήσεις της περιοχής μελέτης πρέπει να γίνει επεξεργασία αυτών. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται έτσι ώστε να μπορεί να γίνει χρήση τους στο πρόγραμμα FEFLOW. Η επεξεργασία τους γίνεται κυρίως με την βοήθεια του προγράμματος arcGIS για τους χάρτες κυρίως και σε κάποιες περιπτώσεις και για τις μετρήσεις. Οι χάρτες οι οποίοι εισάγονται στο πρόγραμμα arcGIS απεικονίζουν συνήθως περιοχές μεγαλύτερες από την περιοχή μελέτης. Επίσης τα αρχεία των μετρήσεων της περιοχής μελέτης περιέχουν δεδομένα που δεν απαιτούνται από το μοντέλο. Για την αποφυγή προβλημάτων από τους χάρτες και τα αρχεία αυτά εξάγονται μόνο τα δεδομένα που απαιτούνται από το μοντέλο. Η περιοχή μελέτης αποτελείται από την λεκάνη απορροής της Βαγιονιάς και της Μεσσαράς. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται μετατρέπονται και αφορούν τις δύο αυτές λεκάνες.

Αρχικά:

- εισάγεται το αρχείο στο πρόγραμμα arc GIS στο οποίο περιέχεται η περιοχή μελέτης και μετατρέπεται σε αρχείο shapefile
- εισάγεται το αρχείο shapefile της περιοχής μελέτης στο πρόγραμμα FEFLOW
- στην συνέχεια στο πρόγραμμα arcGIS τα αρχεία τα οποία περιέχουν τα δεδομένα για τον Γεροπόταμο και τα γεωλογικά ρήγματα μετατρέπονται σε αρχείο shapefile
- εισάγονται τα αρχεία shapefile στο πρόγραμμα FEFLOW
- στο πρόγραμμα όλα τα αρχεία μετατρέπονται σε supermesh

2.1 Υψόμετρο

Ο ορισμός του υψόμετρου της περιοχής γίνεται με χρήση του αρχείου raster στο πρόγραμμα του GIS. Το αρχείο αυτό περιέχει τα υψόμετρα ολόκληρης της Κρήτης. Με την εντολή contour του GIS μετατρέπεται το αρχείο raster σε shapefile το οποίο περιέχει ισοϋψείς με διαφορά ενός μέτρου μεταξύ τους. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε επειδή το FEFLOW δεν δέχεται αρχεία raster. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η εντολή clip του GIS για να εξαχθούν μόνο τα υψόμετρα της περιοχής μελέτης. Έπειτα ανοίγοντας το αρχείο στο FEFLOW για την ενεργοποίηση των δεδομένων γίνεται σύνδεση με την παράμετρο του ύψους του προγράμματος πατώντας πάνω στο όνομα του αρχείου και επιλέγοντας το Link to Parameter. Τέλος ανοίγει ένα παράθυρο όπως φαίνεται στην Εικόνα 13 και για να εισαχθούν τα δεδομένα στο πρόγραμμα επιλέγεται με διπλό πάτημα το CONTOUR όπου υπάρχουν τα στοιχεία του υψόμετρου για την περιοχή μελέτης και το Elevation όπου είναι η εντολή του προγράμματος FEFLOW η οποία αντιστοιχεί τα δεδομένα στο υψόμετρο. Στην συνέχεια στην επιφάνεια του FEFLOW από την λίστα του material properties επιλέγεται το elevation και μαρκάρονται όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται πάνω στον χάρτη. Η σύνδεση πραγματοποιείται πατώντας το πράσινο κουμπί (assign) που έχει μέσα ένα τικ (✓) και εμφανίζεται το ανάγλυφο του εδάφους στην επιφάνεια του FEFLOW.



Εικόνα 13. Σύνδεση των Δεδομένων του Υψόμετρου της Περιοχής

2.2 Υδραυλική Αγωγιμότητα

Ο ορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια της Διδακτορικής Διατριβής με θέμα την Διαχείριση Υδατικών Πόρων στην Μεσσήρα Κρήτης του Μαρίνου Ν. Κριτσωτάκη. Από την διδακτορική διατριβή ελήφθησαν δεδομένα για την υδραυλική αγωγιμότητα της περιοχής και για την οριοθέτηση των στρωμάτων των εδαφικών υλικών. Αρχικά εισήχθη στο πρόγραμμα του GIS η εικόνα του χάρτη ο οποίος φαίνεται στην Εικόνα 14 που απεικονίζει το πρώτο στρώμα. Για να συμπίπτουν οι συντεταγμένες της Εικόνα 14 με τις συντεταγμένες της περιοχής μελέτης έγινε γεωαναφορά της Εικόνα 14, εισάγοντας σημεία ελέγχου (control points). Στην συνέχεια ψηφιοποιήθηκαν στο GIS τα όρια των διάφορων εδαφικών υλικών. Έπειτα για κάθε εδαφικό υλικό βρέθηκε από την βιβλιογραφία ένα πεδίο τιμών, επιλέχθηκε μια αρχική τιμή και εισήχθη στο αντίστοιχο υλικό στον πίνακα στο GIS με την παρακάτω διαδικασία

- Αρχικά πατώντας δεξί κλικ πάνω στην ονομασία του αρχείου ανοίγει μία λίστα και επιλέγεται το Open Attribute Table
- Στην συνέχεια ανοίγει ένας πίνακας με τα χαρακτηριστικά του αρχείου και πατώντας την εντολή Add Field δημιουργείται καινούργια στήλη στον πίνακα αυτόν
- Για να γίνει δυνατή η επεξεργασία του πίνακα χρησιμοποιείται το Editor και πατώντας το Start Editing εισάγονται οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στο αντίστοιχο πεδίο του εδαφικού υλικού
- Για να αποθηκευτούν οι τιμές στο εδαφικό υλικό χρειάζεται η επιλογή της εντολής Save Edits
- Και το τέλος της επεξεργασίας γίνεται πατώντας την εντολή Stop Editing.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία και για το δεύτερο στρώμα το οποίο απεικονίζεται στην Εικόνα 15. Οι τιμές που εμφανίζονται αντιστοιχούν στην υδραυλική αγωγιμότητα για τον άξονα x'x που εκφράζεται με το σύμβολο Kx'x. Για να μπορεί να γίνει εισαγωγή των δεδομένων στο FEFLOW εξήχθησαν τα δεδομένα αυτά από το GIS σε μορφή αρχείων shapefile. Κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο FEFLOW χρειάζεται να γίνει σύνδεση των τιμών με την μεταβλητή του προγράμματος Kx'x. Αυτό πραγματοποιείται πατώντας δεξί κλικ στο αρχείο που εισήχθη και με την εντολή Link to Parameter εμφανίζεται το παράθυρο το οποίο

φαίνεται στην Εικόνα 16. Για να πραγματοποιηθεί η σύνδεση των τιμών που έχουν ορισθεί με τη μεταβλητή του FEFLOW πραγματοποιείται η εξής διαδικασία.

Εισαγωγή τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας στον άξονα x

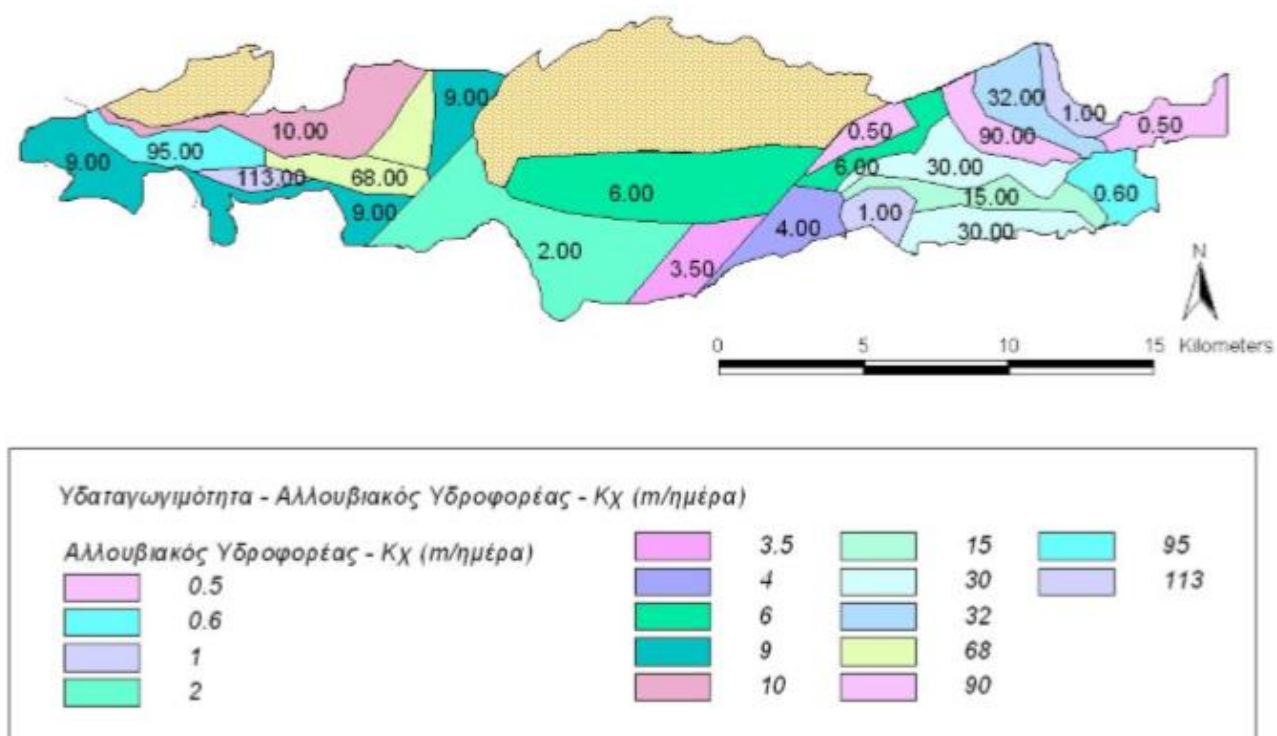
- Από τη λίστα των πεδίων του πίνακα χαρακτηριστικών του αρχείου sharefile, επιλέγεται το CONDX
- Από τη λίστα των παραμέτρων του μοντέλου υπογείων υδάτων FEFLOW επιλέγεται η ομάδα Material Properties, κατόπιν η παράμετρος Conductivity και συγκεκριμένα η μεταβλητή που αντιστοιχεί στην x διεύθυνση, δηλαδή η K_{xx} .
- Στη συνέχεια, επιλέγονται οι κόμβοι στους οποίους πρέπει να ανατεθούν οι τιμές από το αρχείο sharefile, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση το σύνολο των κόμβων ενός επιπέδου (layer).
- Τέλος γίνεται η ανάθεση των τιμών στους επιλεγμένους κόμβους του FEFLOW με την επιλογή Assign ([✓])

Εισαγωγή τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας στον άξονα y

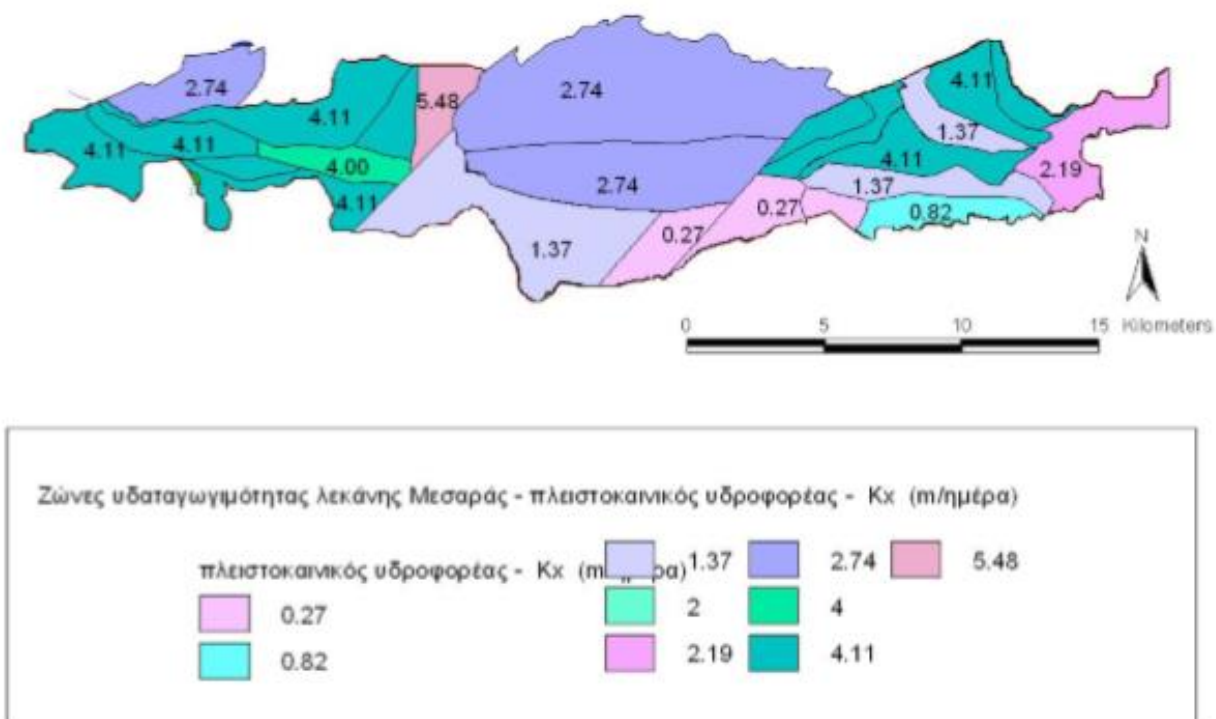
Για την υδραυλική αγωγιμότητα στον άξονα $y'y$ η οποία συμβολίζεται με $Ky'y$ χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές του $Kx'x$ και έγινε σύνδεση με τον ίδιο τρόπο με το $Kx'x$ με μόνη διαφορά ότι έγινε αντιστοίχιση στο K_{yy} .

Εισαγωγή τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας στον άξονα z

Για την υδραυλική αγωγιμότητα στο άξονα $z'z$ η οποία συμβολίζεται με $Kz'z$ χρησιμοποιήθηκε το 10% της τιμής του $Kx'x$ όπως αναφέρει η βιβλιογραφία και η σύνδεση πραγματοποιήθηκε με τον ίδιο τρόπο με το $Kx'x$ και το $Ky'y$ με μόνη διαφορά ότι η αντιστοίχιση έγινε με το K_{zz} .

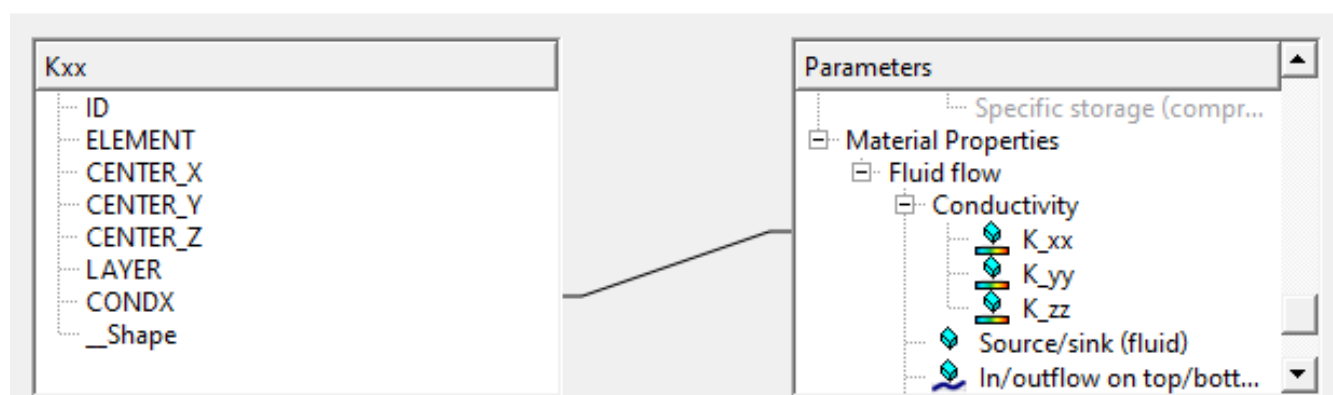


Εικόνα 14. Υδραυλική Αγωγιμότητα στον Αλλουβιακό Υδροφόρα Μεσσαράς (Μαρίνος Ν. Κριτσωτάκης 2009)



Εικόνα 15. Υδραυλική Αγωγιμότητα στον Πλειστοκαινικό Υδροφορέα Μεσαράς (Μαρίνος Ν. Κριπσωτάκης 2009)

Parameter Association



Εικόνα 16. Σύνδεση Υδραυλικής Αγωγιμότητας

2.3 Οριακές Συνθήκες

Με βάση τα δεδομένα των υδραυλικών υψών της περιοχής μελέτης, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η ροή γίνεται από την Ανατολή στην Δύση. Για το λόγο αυτόν, κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης της ροής των υπογείων υδάτων εισήχθησαν οι απαραίτητες οριακές συνθήκες στο ανατολικό και δυτικό άκρο της περιοχής μελέτης. Για την εισροή υδάτων στον υδροφορέα χωρίζονται τα ανατολικά όρια της περιοχής σε τέσσερα μικρότερα τμήματα και με την μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των αποτελεσμάτων του μοντέλου στις πραγματικές τιμές. Επίσης για να υπάρχει μια μεταβολή στην εισροή υδάτων κατά την διάρκεια του έτους οι τιμές αυτές συνδέθηκαν με την βροχόπτωση με σκοπό την δημιουργία μίας χρονοσειράς η οποία μεταβάλλεται συναρτήσει της βροχόπτωσης. Η σύνδεση αυτή έγινε δημιουργώντας μια γραμμική συσχέτιση της αρχικής τιμής της οριακής συνθήκης BC_0 με την βροχόπτωση P , από την οποία υπολογίστηκε μια χρονοσειρά οριακής συνθήκης με μέσο όρο την αρχική τιμή της οριακής συνθήκης που είχε προκύψει από την πρώτη βαθμονόμηση του μοντέλου και διακύμανση σε αντιστοιχία με εκείνη της καταγεγραμμένης βροχόπτωσης στην περιοχή. Για να γίνει αυτό πολλαπλασιάστηκε η αρχική τιμή της οριακής συνθήκης BC_0 που βρέθηκε από την μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος με τον λόγο της καταγεγραμμένης τιμής της βροχόπτωσης για κάθε εξάμηνο προς τη μέση τιμή της βροχόπτωσης $\frac{P_{semester}}{\bar{P}}$. Τα αποτελέσματα $BC_{semester}$ τα οποία εξήχθησαν μεταβάλλονταν ανά εξάμηνο.

$$BC_{semester} = BC_0 \cdot \frac{P_{semester}}{\bar{P}}$$

Οι τιμές εισήχθησαν στο μοντέλο σαν οριακές τιμές. Επίσης στην δυτική πλευρά της περιοχής μελέτης όπου το υψόμετρο είναι χαμηλό χρησιμοποιήθηκαν οριακές συνθήκες διαφορετικού τύπου. Παρατηρήθηκε ότι στα πηγάδια που βρίσκονται κοντά στα όρια της περιοχής μελέτης το υδραυλικό ύψος παραμένει σχετικά σταθερό κοντά στα 12 μέτρα. Οπότε κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου ορίστηκε οριακή συνθήκη 1^{ου} είδους, στην οποία το υδραυλικό ύψος παραμένει σταθερό στα 12 μέτρα.

2.4 Βροχόπτωση

Για την περιοχή των Μοιρών υπήρχαν ημερήσια δεδομένα για την βροχόπτωση από το 1973 έως το 2019. Για το μοντέλο χρειάστηκαν δεδομένα της βροχόπτωσης από το 2009 έως το 2016. Για την ευκολότερη επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Hydrognomon όπου από τις ημερήσιες τιμές εξήχθησαν εξαμηνιαίες τιμές οι οποίες αντιστοιχούν στο υγρό εξάμηνο και το ξηρό εξάμηνο. Οι τιμές της βροχόπτωσης για τους μήνες από τον Οκτώβριο μέχρι και τον Μάρτιο ανήκουν στο υγρό εξάμηνο και οι τιμές από τον Απρίλιο μέχρι και στον Σεπτέμβριο ανήκουν στο ξηρό εξάμηνο. Για την περιοχή της Βαγιονιάς δεν υπήρχαν αρκετά δεδομένα βροχόπτωσης καθώς υπήρχαν μόνο οι ημερήσιες τιμές της βροχόπτωσης από το 2016 έως το 2018. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμησης όπου εξήχθη μία σχέση μεταξύ της βροχόπτωσης της περιοχής των Μοιρών και της περιοχής της Βαγιονιάς. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 17 στον άξονα x'x βρίσκονται οι τιμές της βροχόπτωσης για την περιοχή της Βαγιονιάς και στον άξονα y'y βρίσκονται οι τιμές της βροχόπτωσης για την περιοχή των Μοιρών. Η εξίσωση της ευθείας είναι

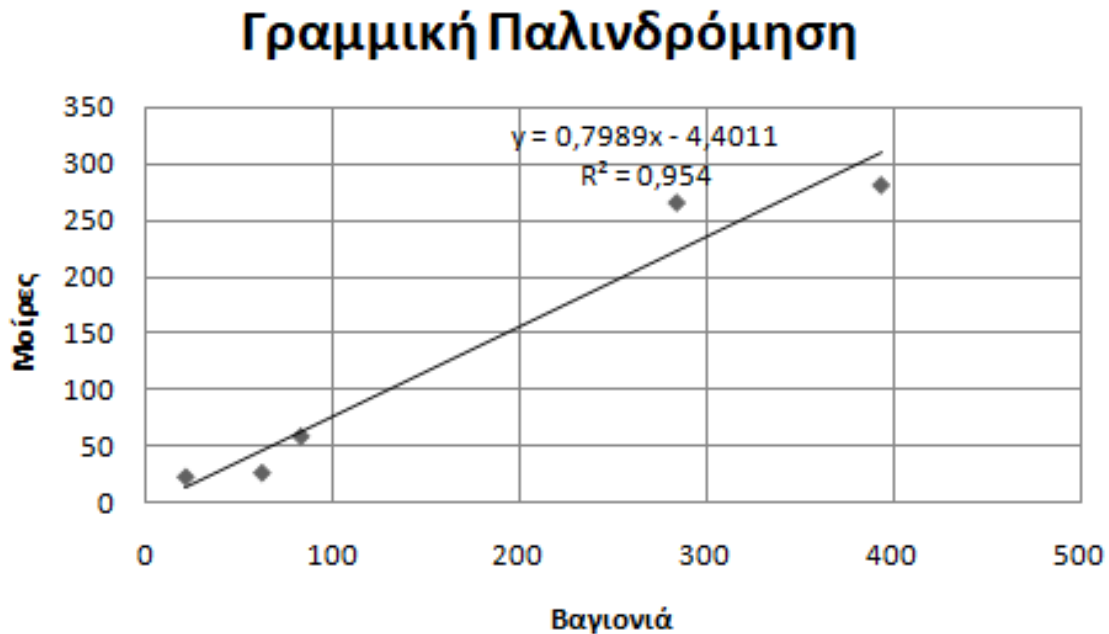
$$y = 0,7989 \cdot x - 4,4011$$

Όπου:

x: αντιστοιχεί η τιμή της βροχόπτωσης για την περιοχή της Βαγιονιάς

y: αντιστοιχεί η τιμή για την περιοχή των Μοιρών.

Η εύρεση των τιμών της βροχόπτωσης για την περιοχή της Βαγιονιάς για την χρονική περίοδο 2009 έως 2016 πραγματοποιείται αντικαθιστώντας στο y στην εξίσωση την τιμή της βροχόπτωσης για την περιοχή των Μοιρών. Λύνοντας ως προς x εμφανίζεται η τιμή της βροχόπτωσης για την περιοχή της Βαγιονιάς. Οι τιμές της βροχόπτωσης που βρέθηκαν είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στην περιοχή των Μοιρών πράγμα που επιβεβαιώνεται καθώς η Βαγιονιά βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο από τις Μοίρες. Στην συνέχεια οι εξαμηνιαίες τιμές της βροχόπτωσης εισήχθησαν στο μοντέλο του FEFLOW με την μορφή χρονοσειράς και αντιστοιχήθηκαν στην ανάλογη περιοχή. Η αντιστοίχιση της χρονοσειράς με την περιοχή πραγματοποιήθηκε μαρκάροντας τους κόμβους της περιοχής της Βαγιονιάς και συνδέοντας την με την χρονοσειρά που δημιουργήθηκε για την Βαγιονιά πατώντας την επιλογή assign με το πράσινο τικ (✓). Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται και για την περιοχή των Μοιρών.



Εικόνα 17. Γραμμική Παλινδρόμηση

Βαθμονόμηση του Προγράμματος FEFLOW

Για την βαθμονόμηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τις χρονιές 2009 έως 2013. Οι στάθμες των πηγαδιών παρατήρησης για τα συγκεκριμένα έτη αποτέλεσαν τις τιμές στόχους οι οποίες έγινε προσπάθεια να προσομοιωθούν από το μοντέλο υπογείων υδάτων με το ελάχιστο δυνατό σφάλμα. Τα δεδομένα της βροχόπτωσης ήταν γνωστά για αυτές τις χρονιές οπότε εισήχθησαν χωρίς να είναι απαραίτητη κάποια περαιτέρω επεξεργασία τους. Για την προσομοίωση του μοντέλου έγινε μεταβολή των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας στο εύρος μίας τάξης μεγέθους και ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες με την μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος. Στη συνέχεια βρέθηκε ο κατάλληλος συνδυασμός των τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας και των οριακών συνθηκών έτσι ώστε οι τιμές του υδραυλικού ύψους να είναι κοντά στις πραγματικές τιμές. Για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τις χρονιές 2014 έως 2016. Στο πρόγραμμα εισήχθησαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης της περιοχής καθώς και οι στάθμες των πηγαδιών παρατήρησης. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και των οριακών τιμών παρέμειναν ίδιες με εκείνες που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση με σκοπό να γίνει έλεγχος αν το μοντέλο λειτουργεί σωστά και όχι μόνο για τις χρονιές που έχει γίνει η βαθμονόμησης του. Για να θεωρηθεί ικανοποιητικό το μοντέλο το RMS πρέπει να είναι μικρότερο από το 10% του μέσου υδραυλικού ύψους δηλαδή περίπου 20 μέτρα για την συγκεκριμένη περιοχή.

Πρώτο Σενάριο

Για το ύψος της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης για το πρώτο σενάριο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την Διδακτορική Διατριβή της κ. Νεραντζάκη με βάση το κλιματικό σενάριο RCP26_EC-EARTH_RCA. Από το συγκεκριμένο κλιματικό σενάριο υπήρχαν δεδομένα βροχόπτωσης για την περιοχή της Βαγιονιάς για την χρονική περίοδο 2009-2039. Για την περιοχή των Μοιρών τα δεδομένα βρέθηκαν με την εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε και στην βαθμονόμηση του μοντέλου η οποία είναι:

$$y=0.79892 \cdot x-4.4011$$

όπου

y: οι τιμές της βροχόπτωσης για την περιοχή των Μοιρών

x: οι τιμές της βροχόπτωσης για την περιοχή της Βαγιονιάς

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 17. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και των οριακών συνθηκών παρέμειναν σταθερές όπως και στην βαθμονόμηση του μοντέλου.

Δεύτερο Σενάριο

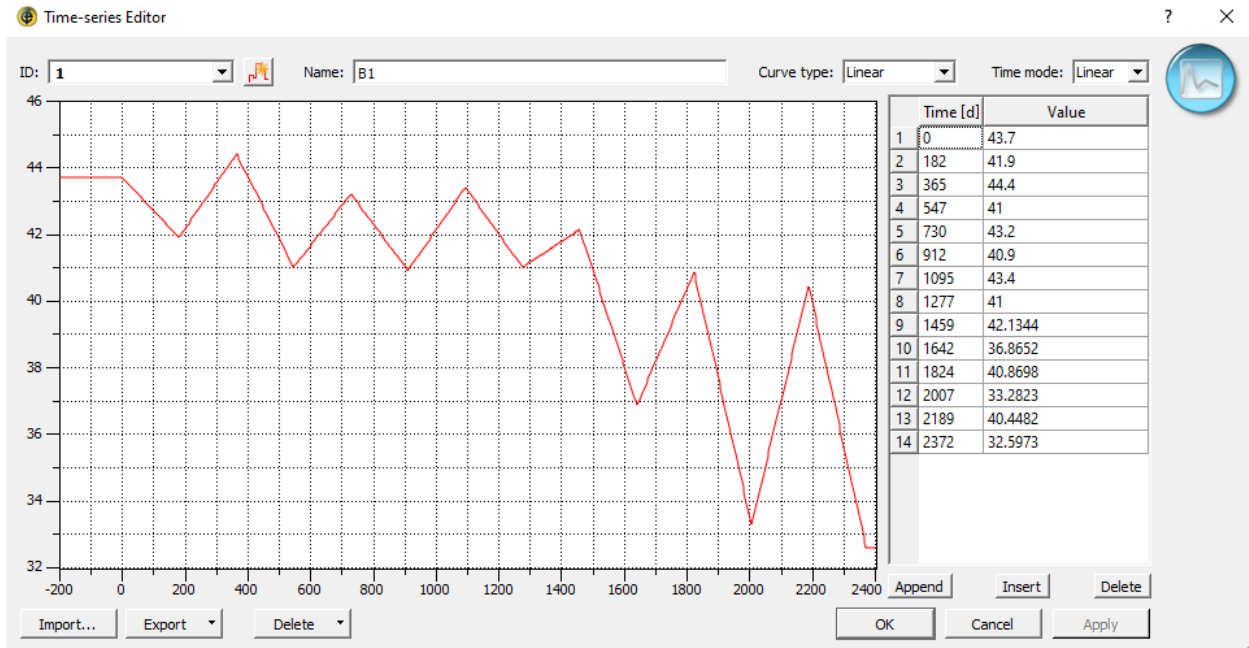
Για το ύψος της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης για το δεύτερο σενάριο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την Διδακτορική Διατριβή της κ. Νεραντζάκη με βάση το σενάριο RCP45_EC-EARTH_RCA. Από το συγκεκριμένο σενάριο χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα βροχόπτωσης για την περιοχή της Βαγιονιάς για την χρονική περίοδο 2009-2039. Για την περιοχή των Μοιρών τα δεδομένα εξήχθησαν με τον ίδιο τρόπο με το πρώτο σενάριο. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και των οριακών συνθηκών παρέμειναν σταθερές όπως και στην βαθμονόμηση του μοντέλου.

Τρίτο Σενάριο

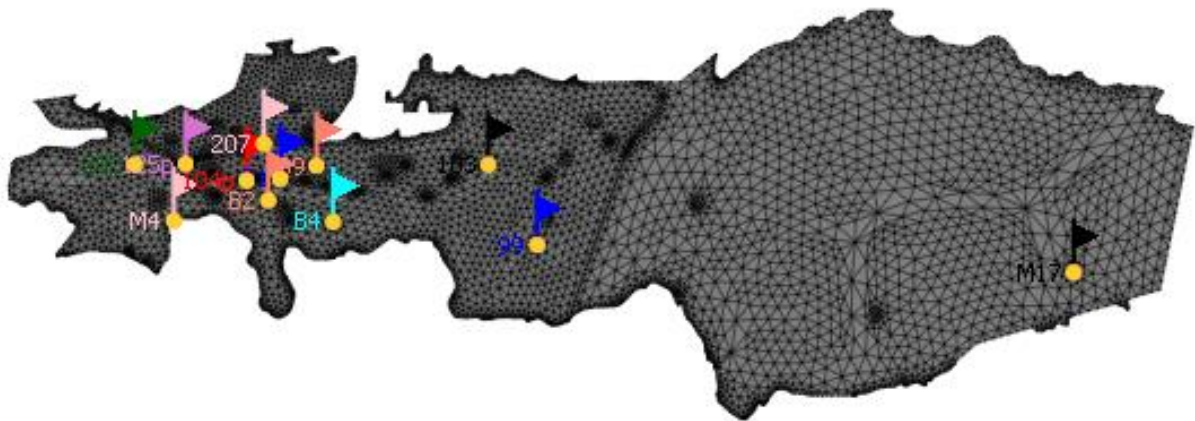
Για το ύψος της βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης για το τρίτο σενάριο χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την Διδακτορική Διατριβή της κ. Νεραντζάκη με βάση το σενάριο RCP85_EC-EARTH_RCA. Από το συγκεκριμένο σενάριο χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα βροχόπτωσης για την περιοχή της Βαγιονιάς για την χρονική περίοδο 2009-2039. Για την περιοχή των Μοιρών τα δεδομένα εξήχθησαν με τον ίδιο τρόπο με το πρώτο και δεύτερο σενάριο. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας και των οριακών συνθηκών παρέμειναν σταθερές όπως και στην βαθμονόμηση του μοντέλου.

2.5 Πηγάδια Παρατήρησης

Για την τοποθέτηση των πηγαδιών παρατήρησης στο πρόγραμμα του FEFLOW χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις για το ύψος των υπογείων υδάτων για την χρονική περίοδο 2009-2016. Για να γίνει εισαγωγή των δεδομένων στο FEFLOW χρειάστηκε πρώτα να εισαχθούν τα δεδομένα στο πρόγραμμα GIS και στην συνέχεια να εξαχθούν από εκεί σαν αρχείο shapefile. Στο συγκεκριμένο αρχείο περιέχονταν οι συντεταγμένες της κάθε γεώτρησης στο ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα και το υδραυλικό ύψος ανά εξάμηνο για την χρονική περίοδο 2009-2016. Στην συνέχεια το αρχείο αυτό εισήχθη στο FEFLOW και για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί έγινε σύνδεση των χρονοσειρών με το κάθε πηγάδι παρατήρησης έτσι ώστε να εμφανίζονται τα αποτελέσματα σε σχέση με τα αντίστοιχα δεδομένα. Οι χρονοσειρές θα έχουν την μορφή όπως φαίνεται στην Εικόνα 18. Τα πηγάδια παρατήρησης που έχουν εισαχθεί είναι συνολικά 12 ενώ υπάρχουν παραπάνω από 12. Τα 11 από αυτά βρίσκονται στην περιοχή των Μοιρών και 1 στην περιοχή της Βαγιονιάς. Το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιήθηκαν όλα τα πηγάδια παρατήρησης οφείλεται στο ότι οι μετρήσεις για κάποια πηγάδια για αρκετά χρόνια δεν υπήρχαν δεδομένα για το υδραυλικό ύψος οπότε δεν χρησιμοποιήθηκαν. Στην Εικόνα 19 φαίνονται τα πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν στο περιβάλλον του FEFLOW.



Εικόνα 18. Χρονοσειρά για το Πηγάδι Παρατήρησης B1

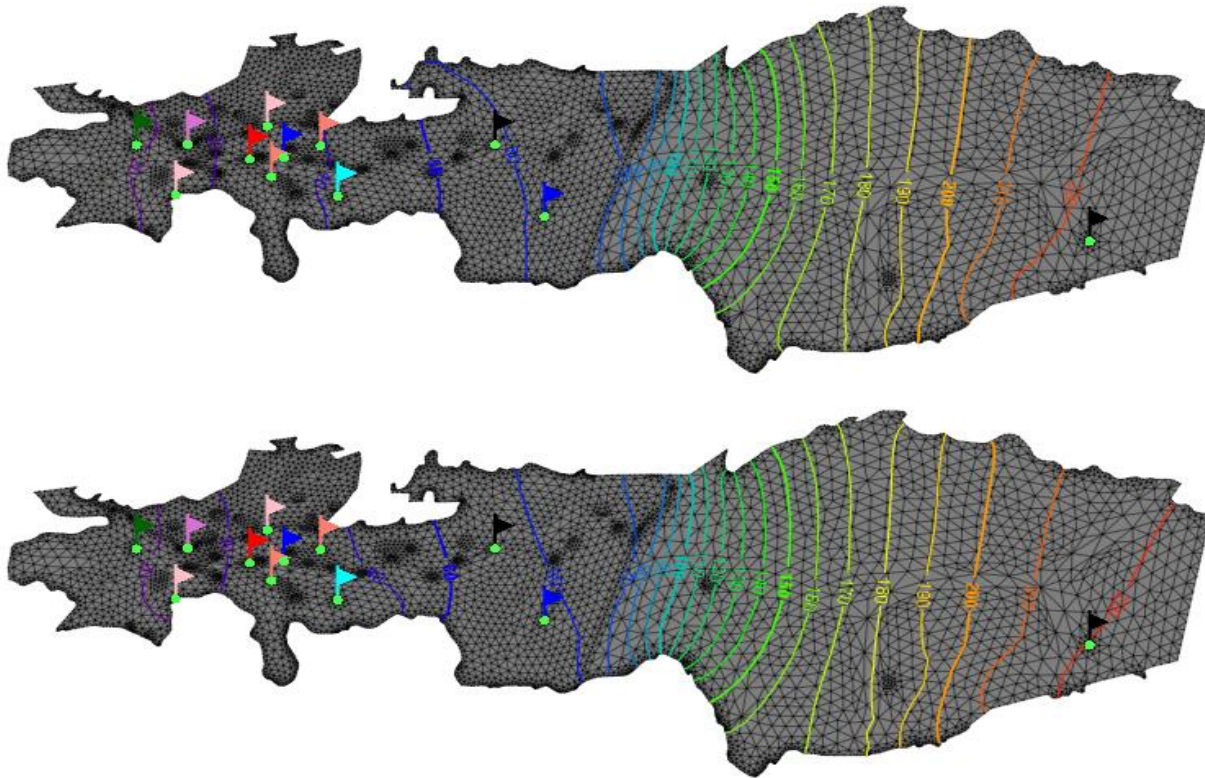


Εικόνα 19. Πηγάδια Παρατήρησης στο FEFLOW

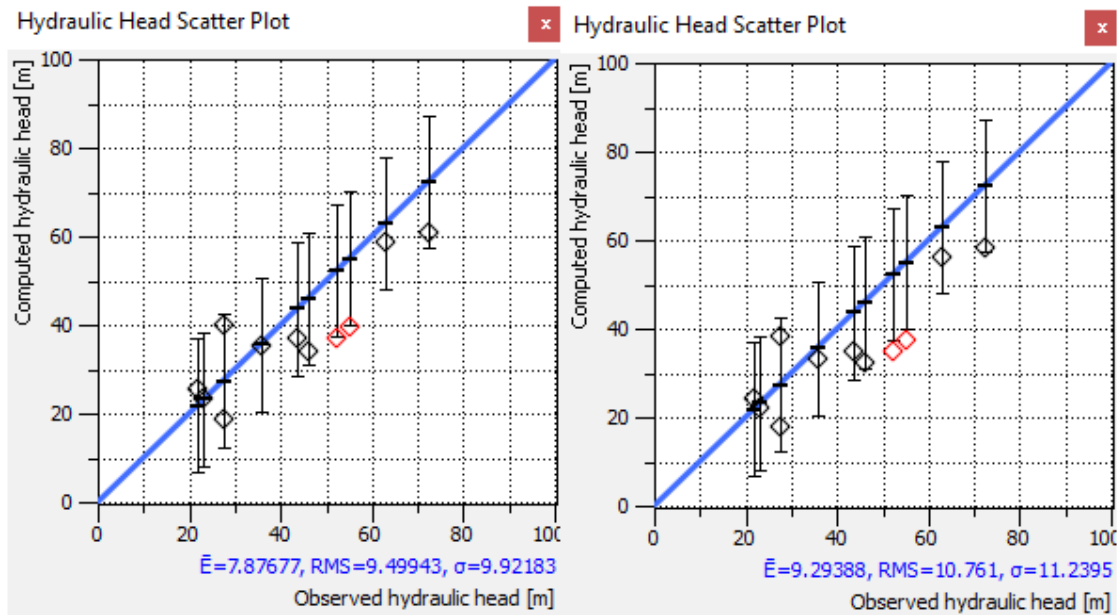
3 Αποτελέσματα

Calibration – Validation

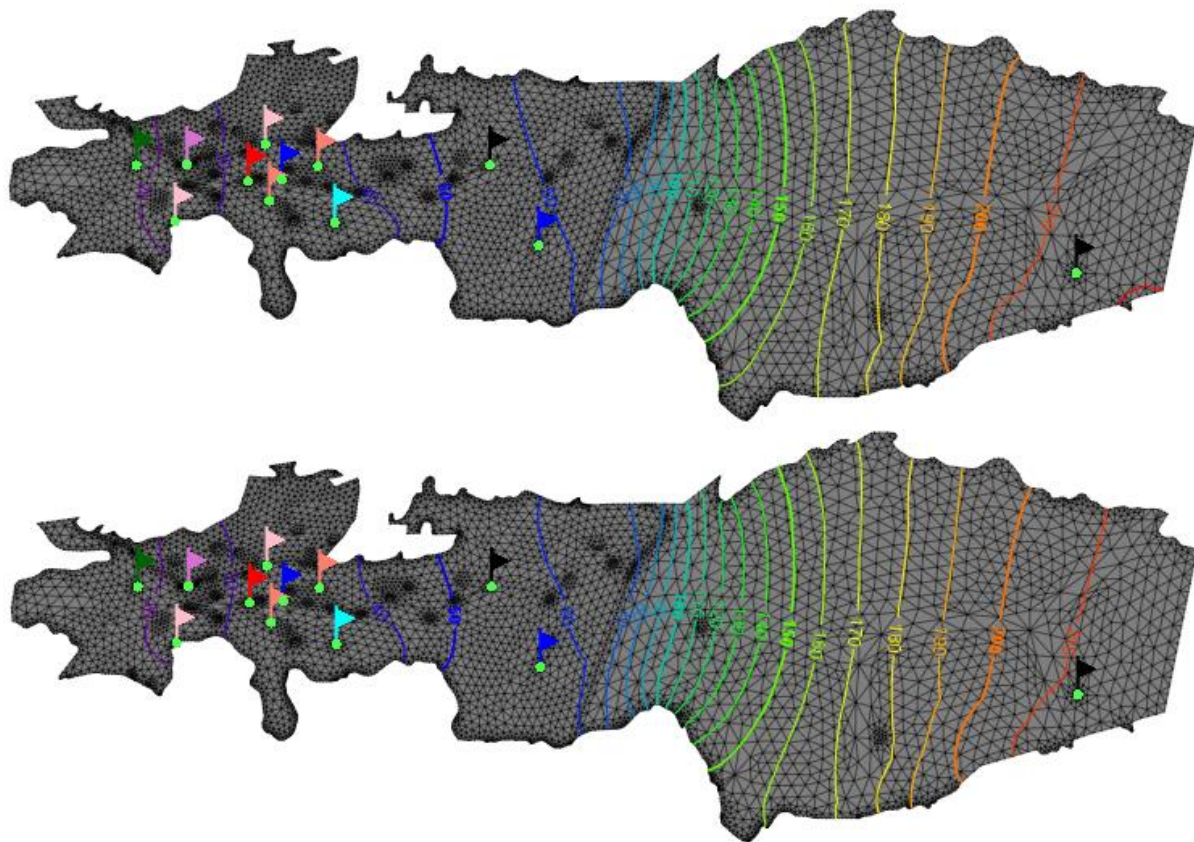
Τα αποτελέσματα της διπλωματικής εργασίας θα παρουσιαστούν σε μορφή χαρτών και διαγραμμάτων για τις πραγματικές μετρήσεις καθώς και για κάθε ένα από τα τρία σενάρια. Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για τις πραγματικές μετρήσεις για τα έτη 2009, και 2016. Επιλέχθηκαν αυτά τα έτη επειδή το 2009 είναι η πρώτη χρονιά για την οποία έγινε βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου και το 2016 επειδή είναι η τελευταία χρονιά για την οποία πραγματοποιείται ο έλεγχος (validation) του μοντέλου ότι λειτουργεί σωστά.



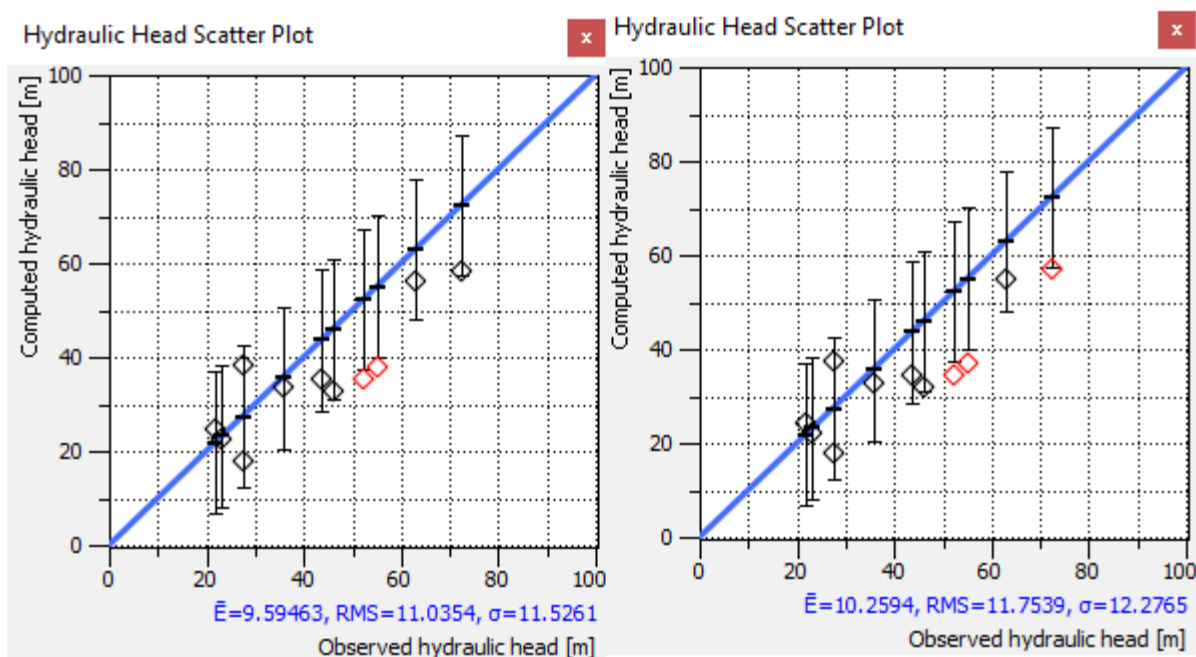
Εικόνα 20. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για το 2009. Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2009 και στην κάτω για το καλοκαίρι του 2009.



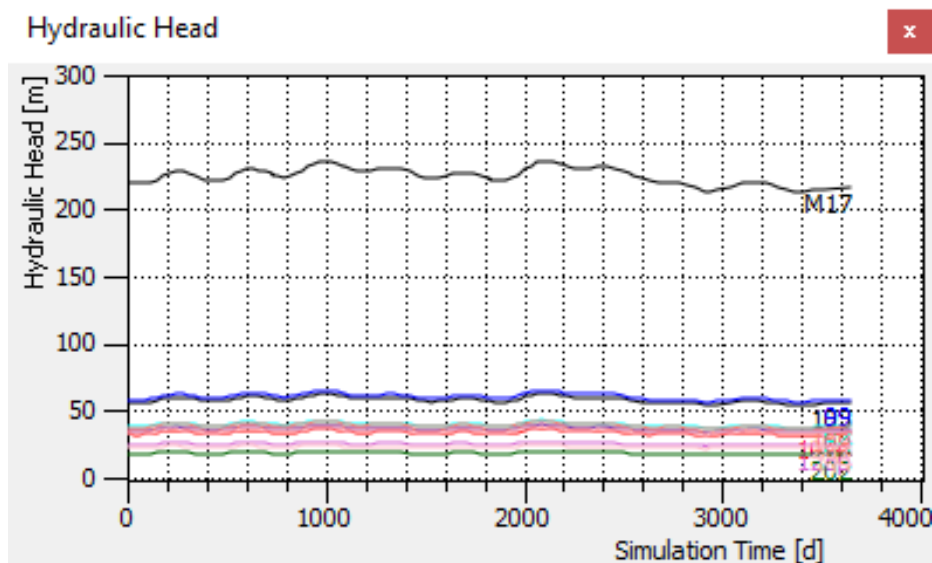
Εικόνα 21. Διάγραμμα διασποράς κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου για την χρονιά 2009. Αριστερά εμφανίζεται το διάγραμμα για τον χειμώνα του 2009 και δεξιά για το καλοκαίρι του 2009.



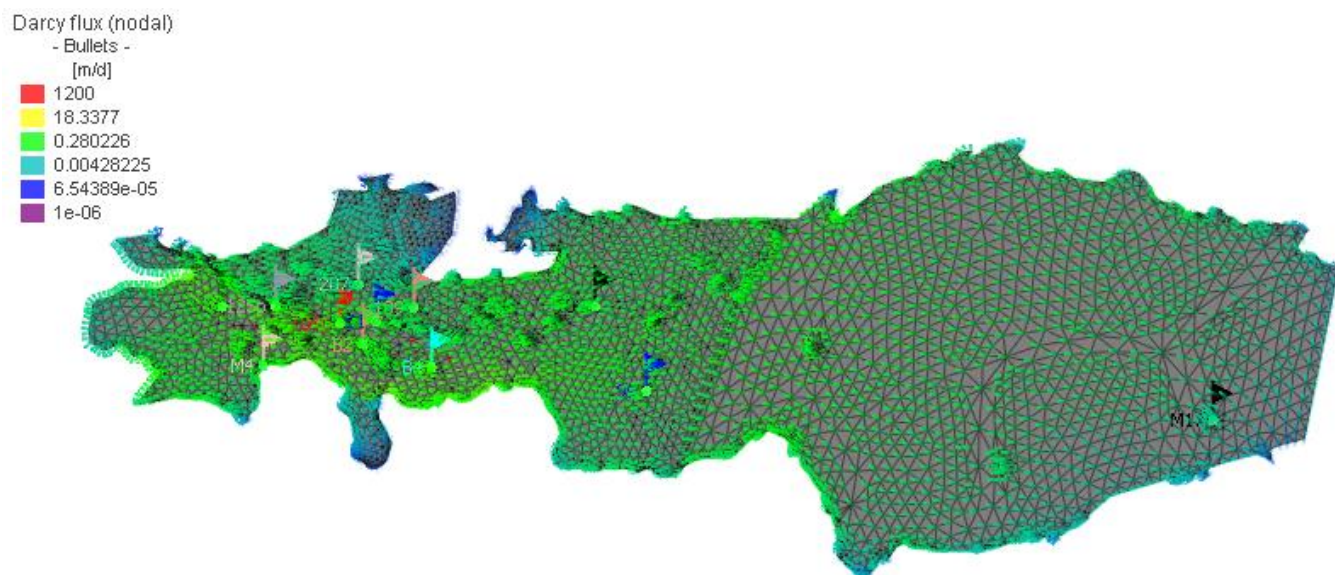
Εικόνα 22. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά τον έλεγχο του μοντέλου για την χρονιά 2016. Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2016 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2016.



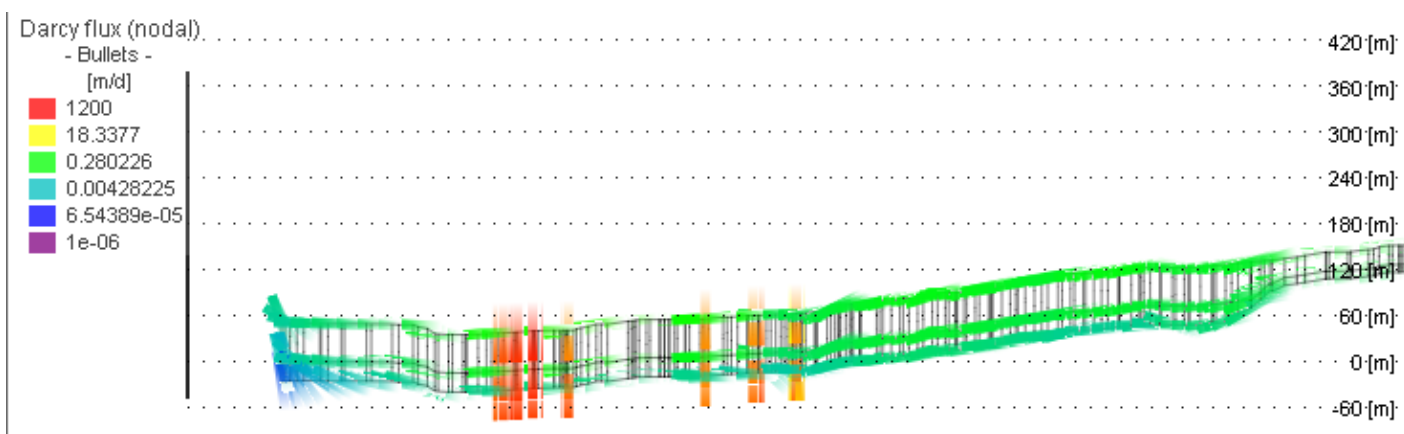
Εικόνα 23. Διάγραμμα διασποράς κατά τον έλεγχο του μοντέλου για την χρονιά 2016 .Αριστερά εμφανίζεται το διάγραμμα για τον χειμώνα του 2016 και δεξιά για το καλοκαίρι του 2016.



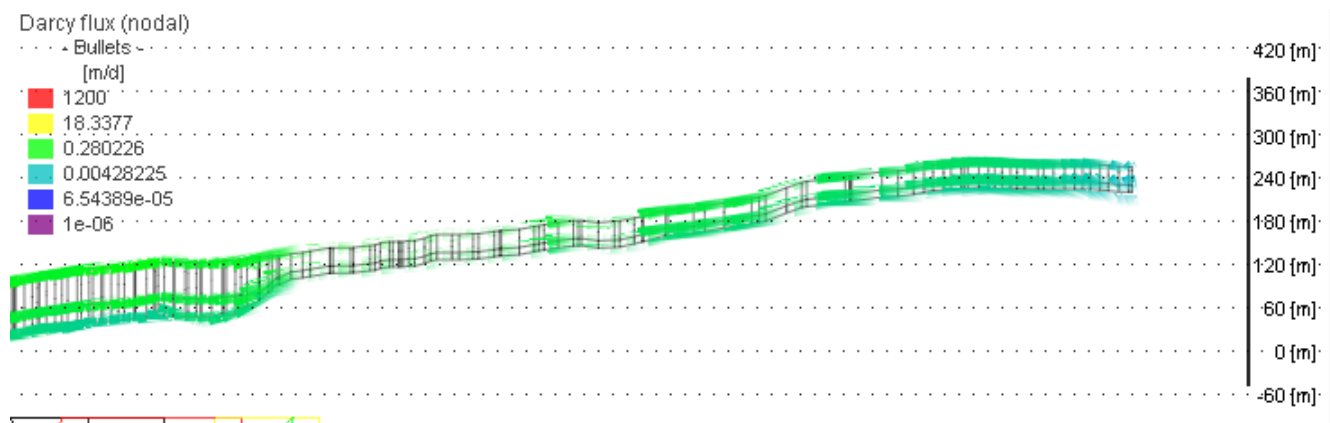
Εικόνα 24. Διάγραμμα μεταβολής υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο. Το κάθε χρώμα απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για κάθε ένα από τα πηγάδια παρατήρησης.



Εικόνα 25. Χάρτης ταχύτητας Darcy



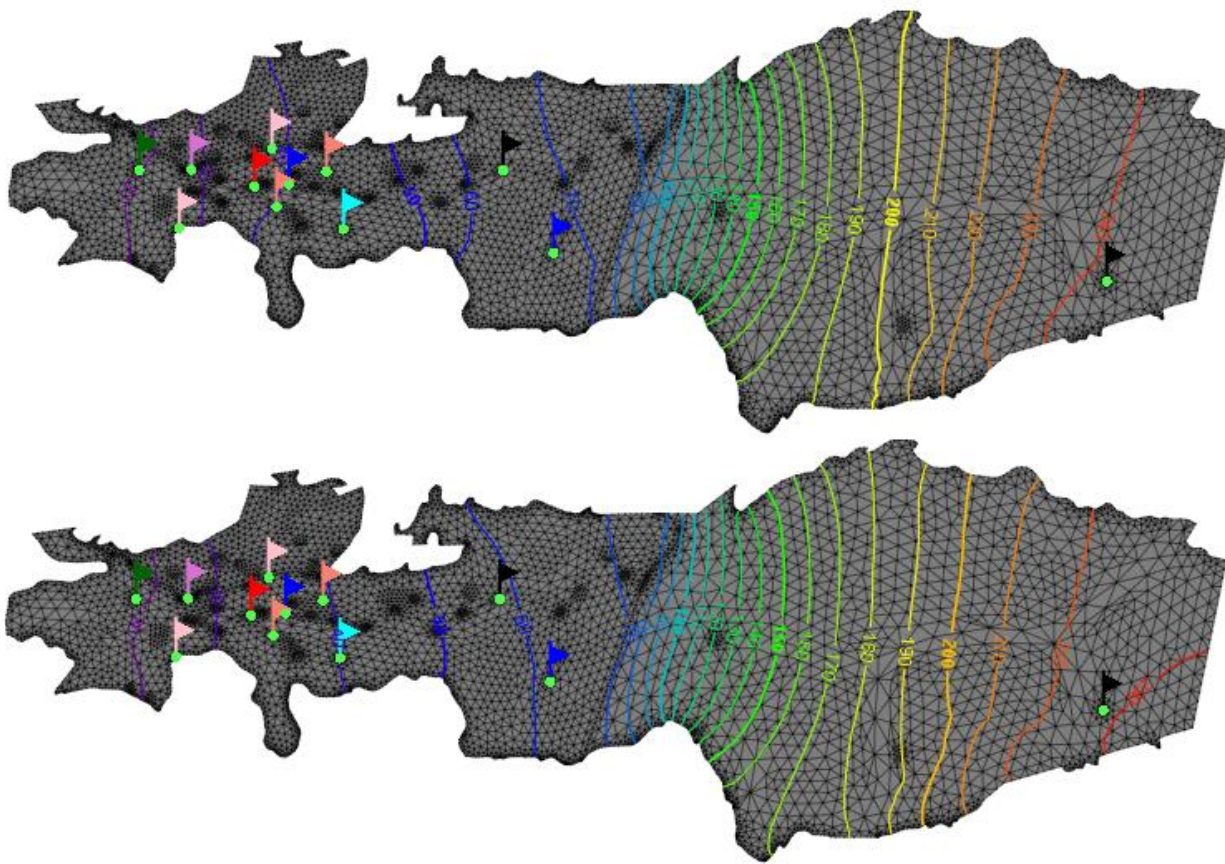
Εικόνα 26. Διατομή του υδροφορέα των Μοιρών και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις.



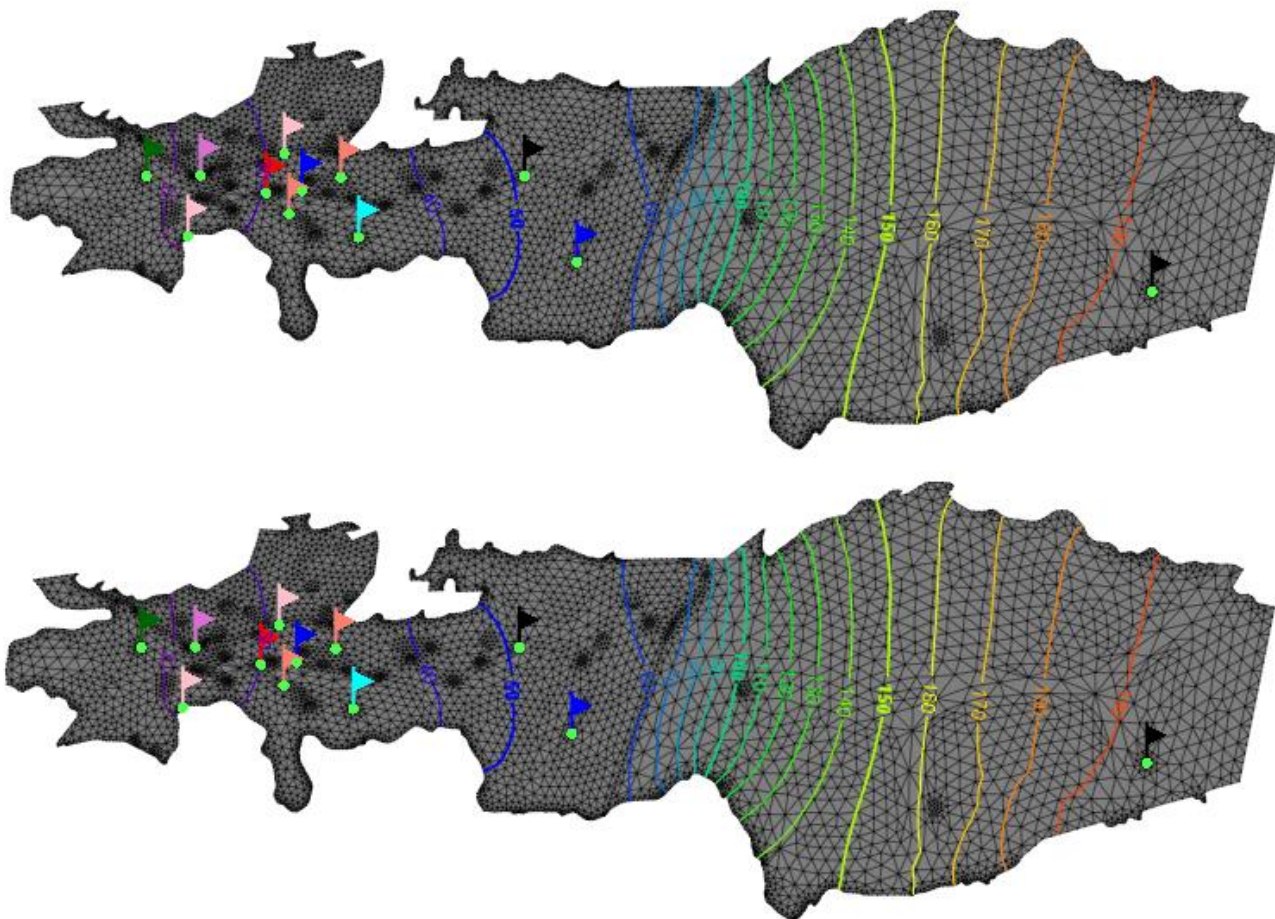
Εικόνα 27. Διατομή του υδροφορέα της Βαγιονιάς και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις.

Κλιματικό Σενάριο 1 (RCP 2.6)

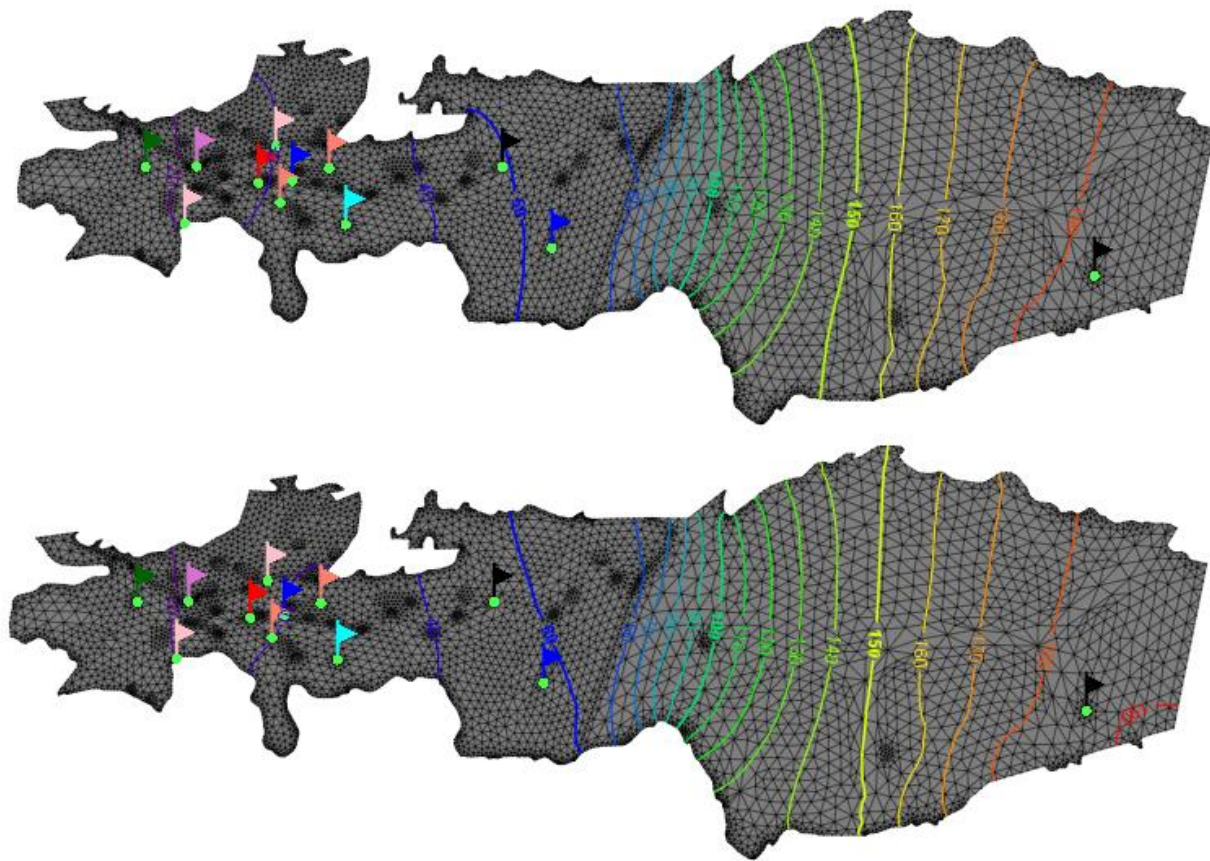
Για τον κλιματικό σενάριο RCP 2.6 τα αποτελέσματα που θα εμφανιστούν βρίσκονται υπό την μορφή χαρτών και διαγραμμάτων και αφορούν τις χρονιές 2019, 2029 και 2039.



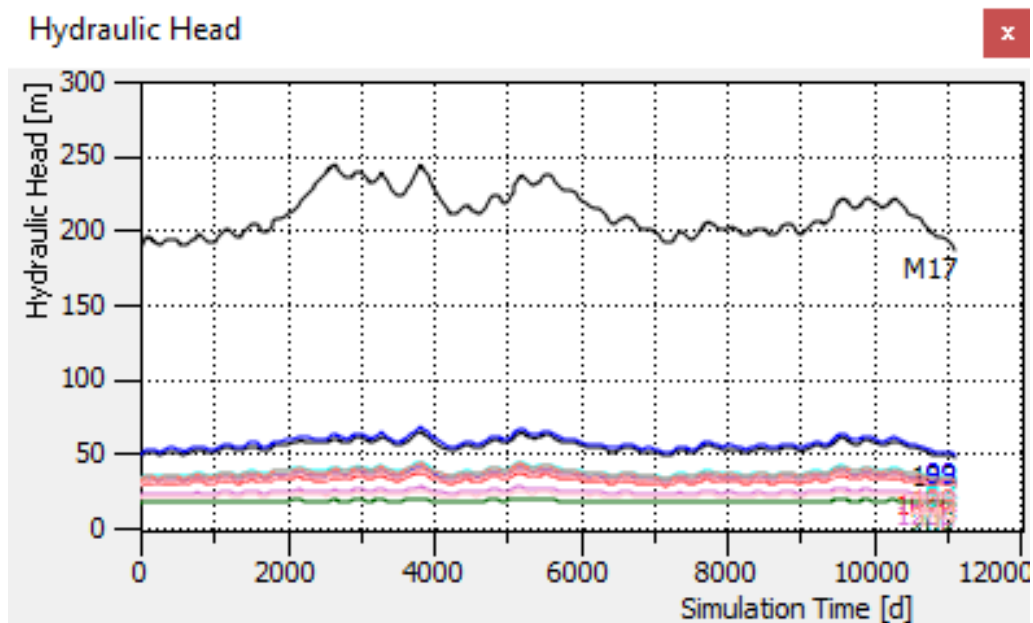
Εικόνα 28. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2019 για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2019 και στον κάτω για τον καλοκαίρι του 2019.



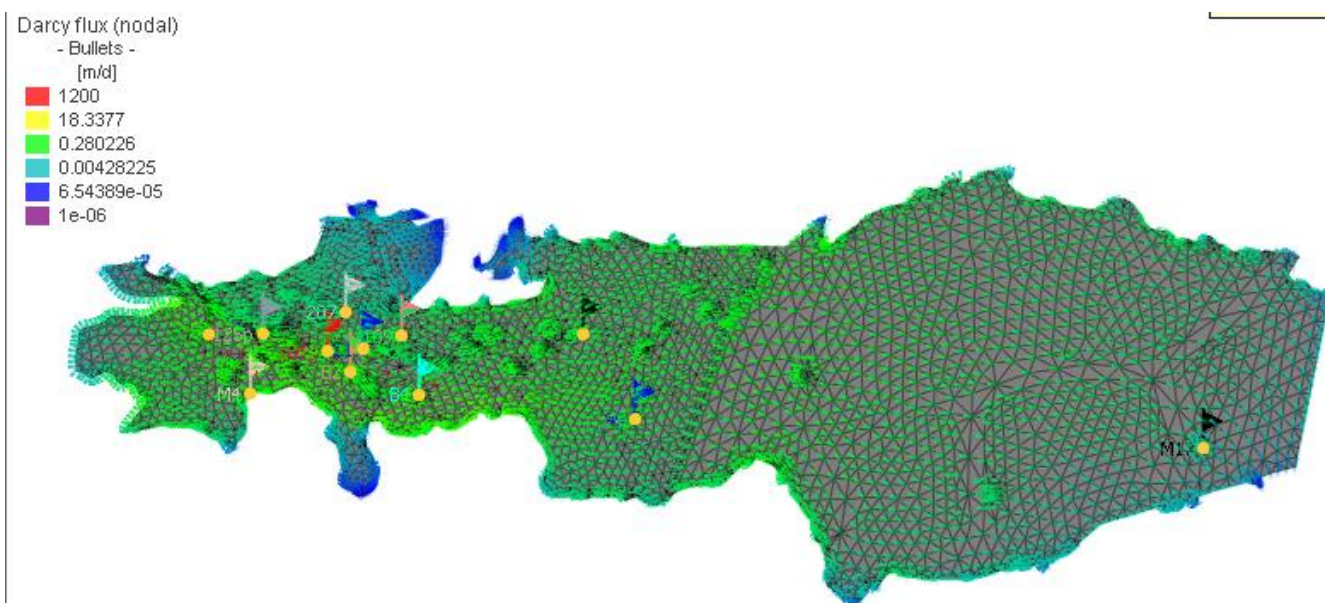
Εικόνα 29. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψιών για την χρονιά 2029 για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2029 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2029.



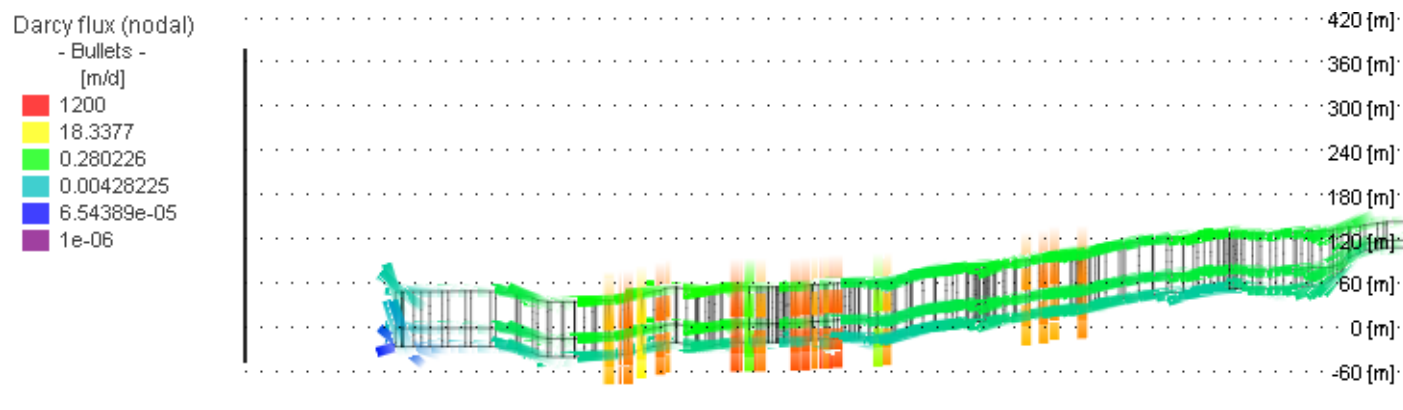
Εικόνα 30. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2039 για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2039 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2039.



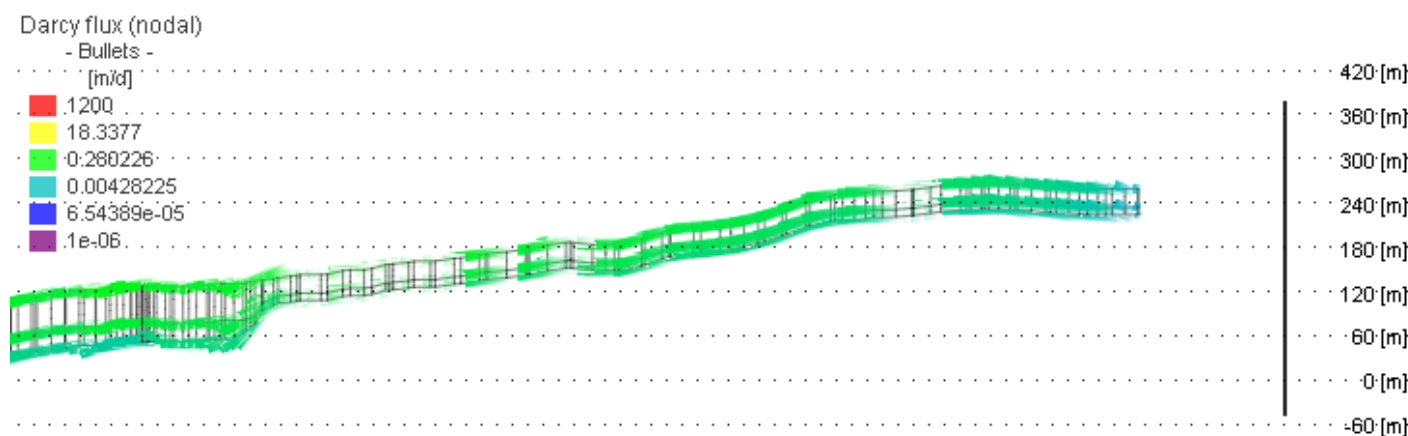
Εικόνα 31. Διάγραμμα μεταβολής υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6). Το κάθε χρώμα απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για κάθε ένα από τα πηγάδια παρατήρησης



Εικόνα 32. Χάρτης ταχύτητας Darcy για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6).



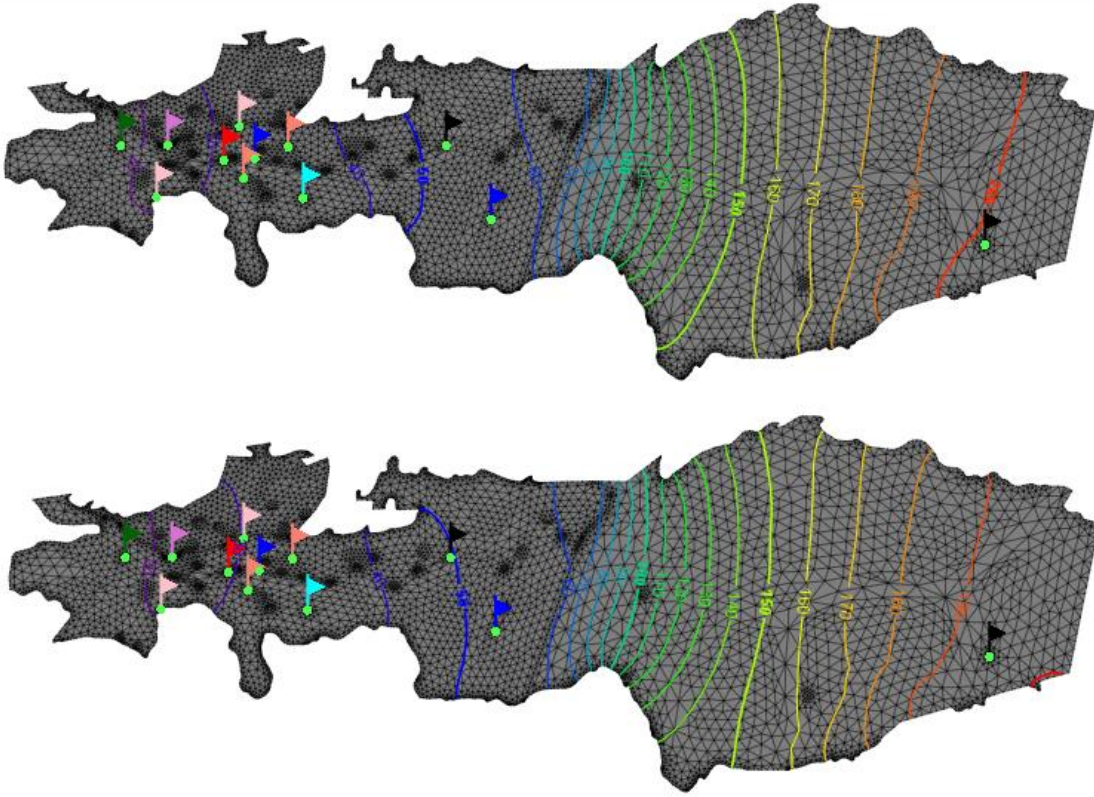
Εικόνα 33. Διατομή του υδροφορέα των Μοιρών και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6).



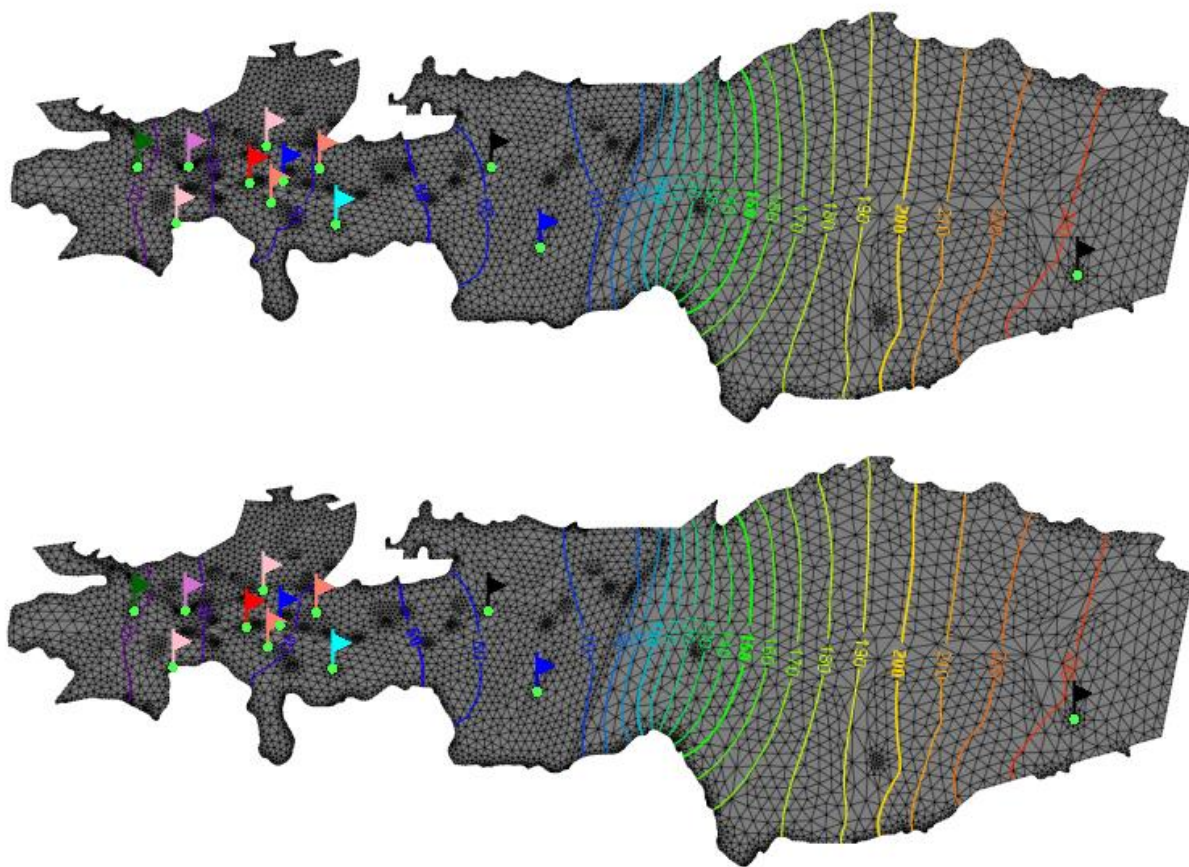
Εικόνα 34. Διατομή του υδροφορέα της Βαγιονιάς και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6).

Κλιματικό Σενάριο 2 (RCP 4.5)

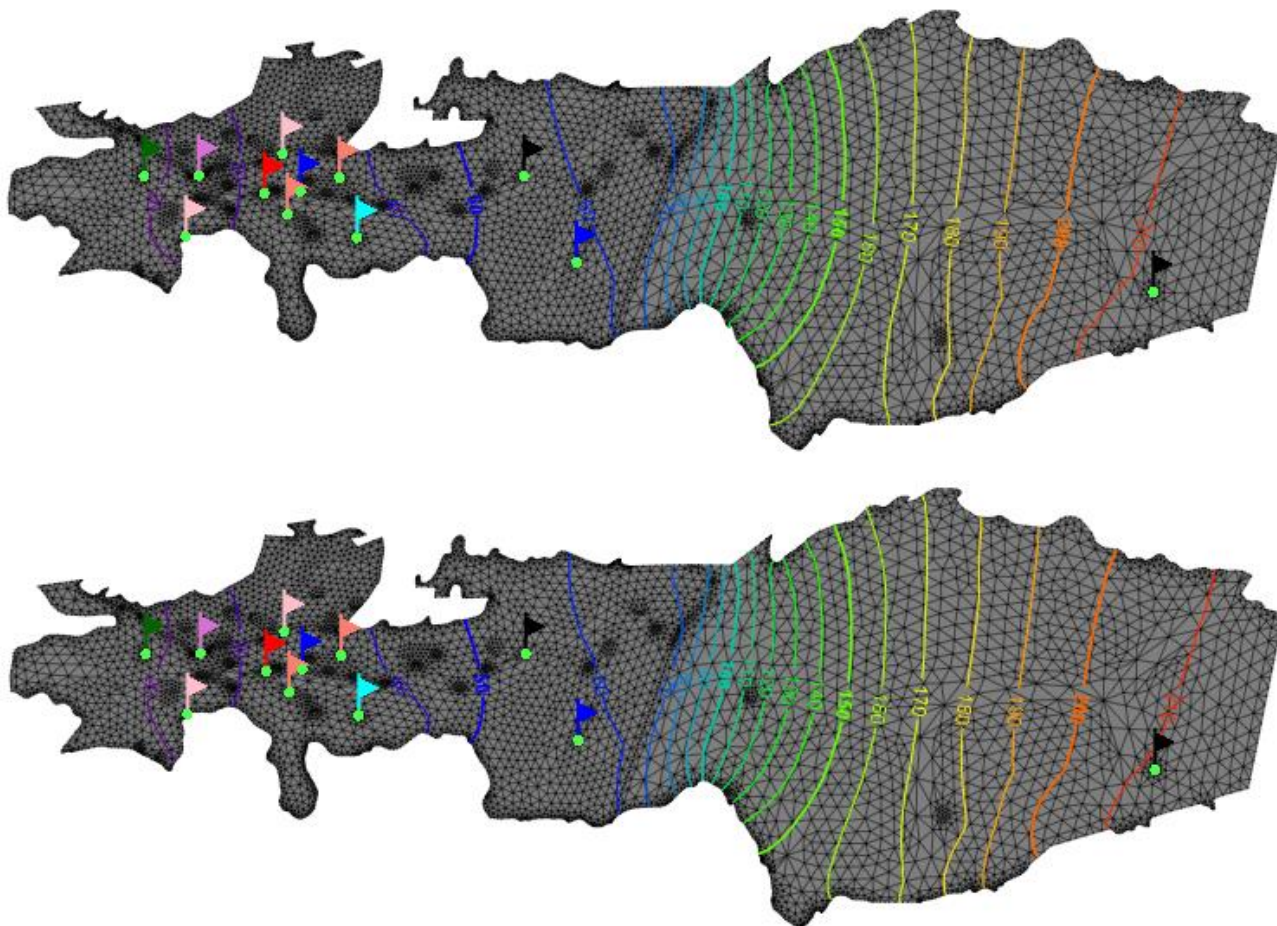
Για τον κλιματικό σενάριο RCP 4.5 τα αποτελέσματα που θα εμφανιστούν βρίσκονται υπό την μορφή χαρτών και διαγραμμάτων και αφορούν τις χρονιές 2019, 2029 και 2039.



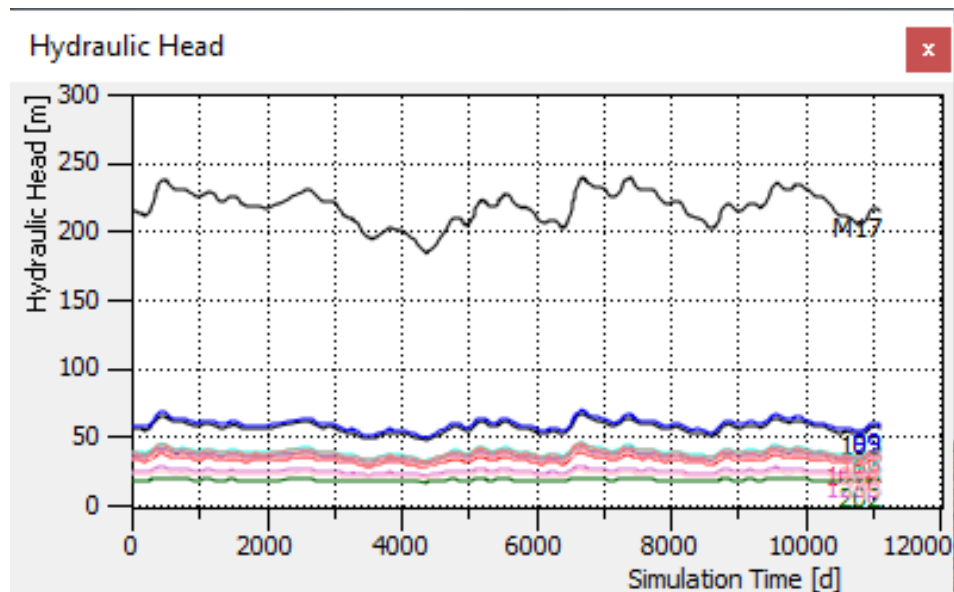
Εικόνα 35. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2019 για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2019 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2019.



Εικόνα 36. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2029 για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2029 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2029.

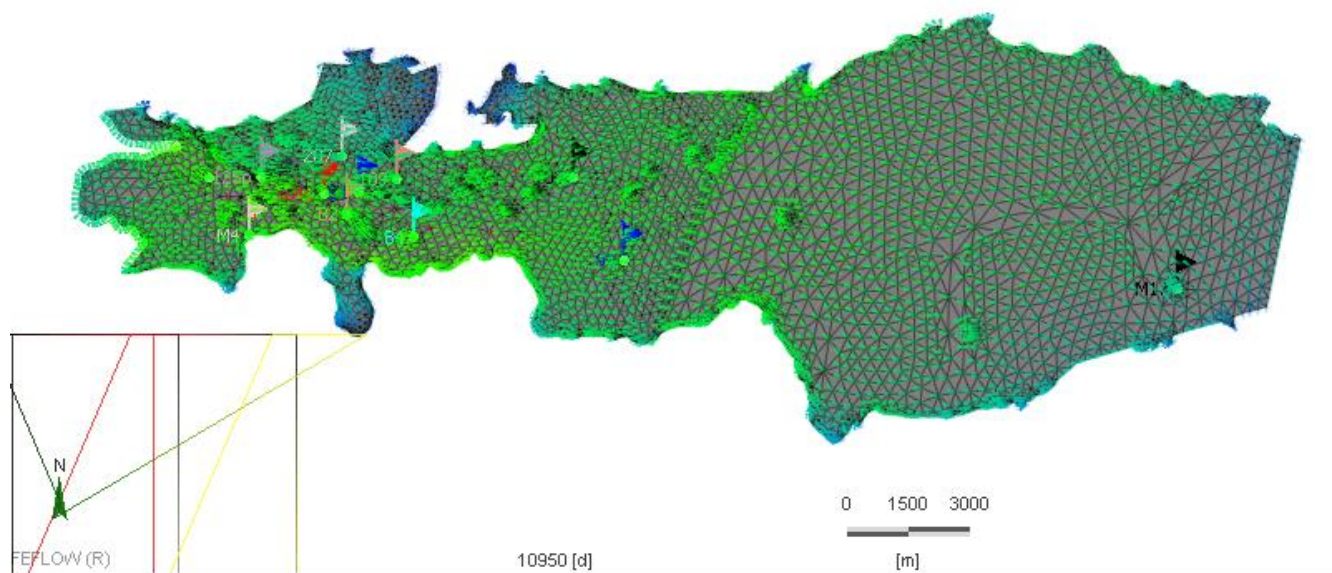


Εικόνα 37. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2039 για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2039 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2039.

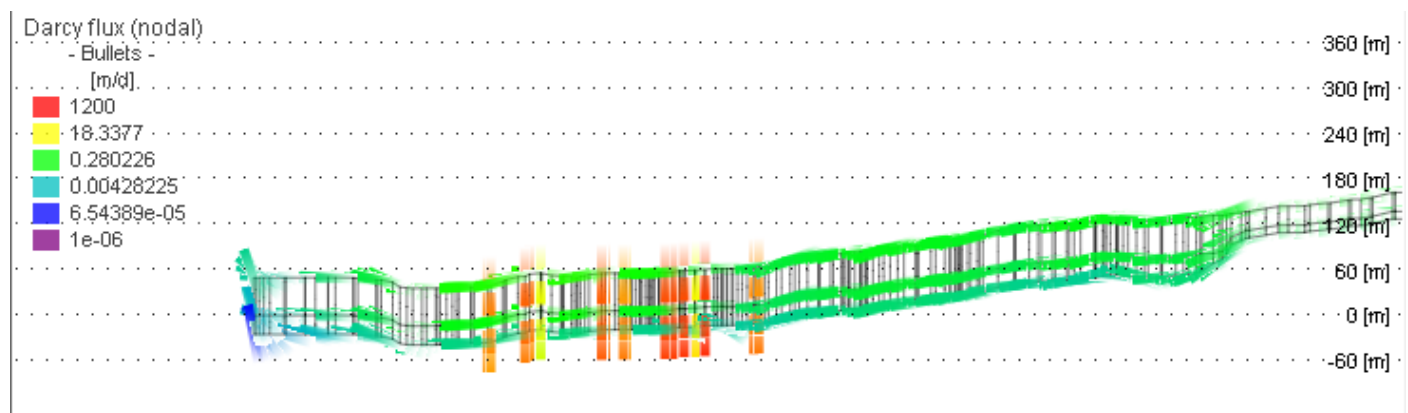


Εικόνα 38. Διάγραμμα μεταβολής υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5). Το κάθε χρώμα απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για κάθε ένα από τα πηγιάδια παρατήρησης.

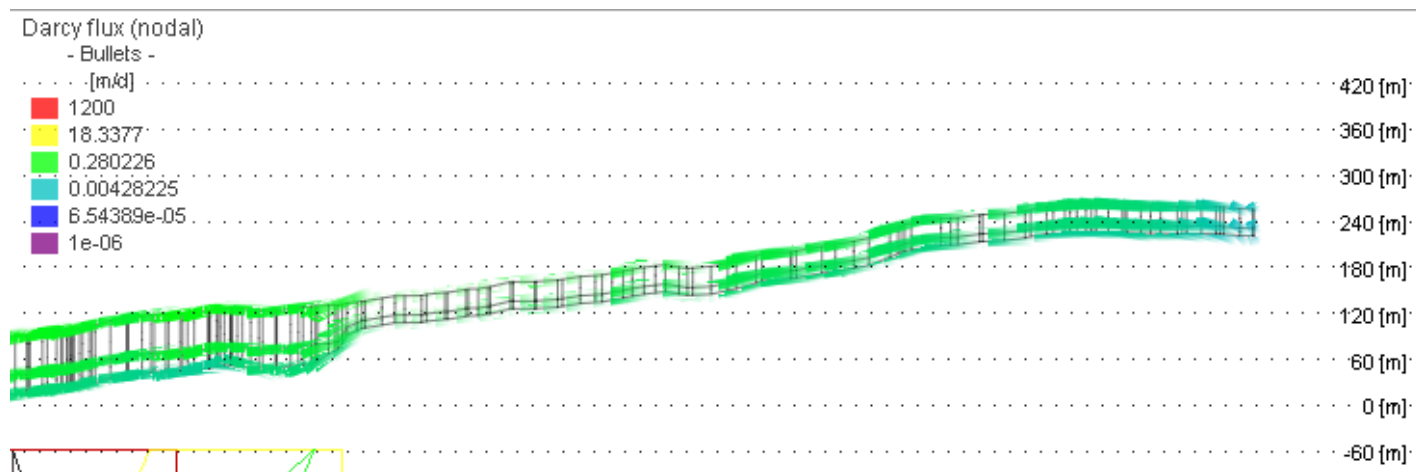
Darcy flux (nodal)
- Bullets -
[m/d]
1200
18.3377
0.280226
0.00428225
6.54389e-05
1e-06



Εικόνα 39. Χάρτης ταχύτητας Darcy για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5).



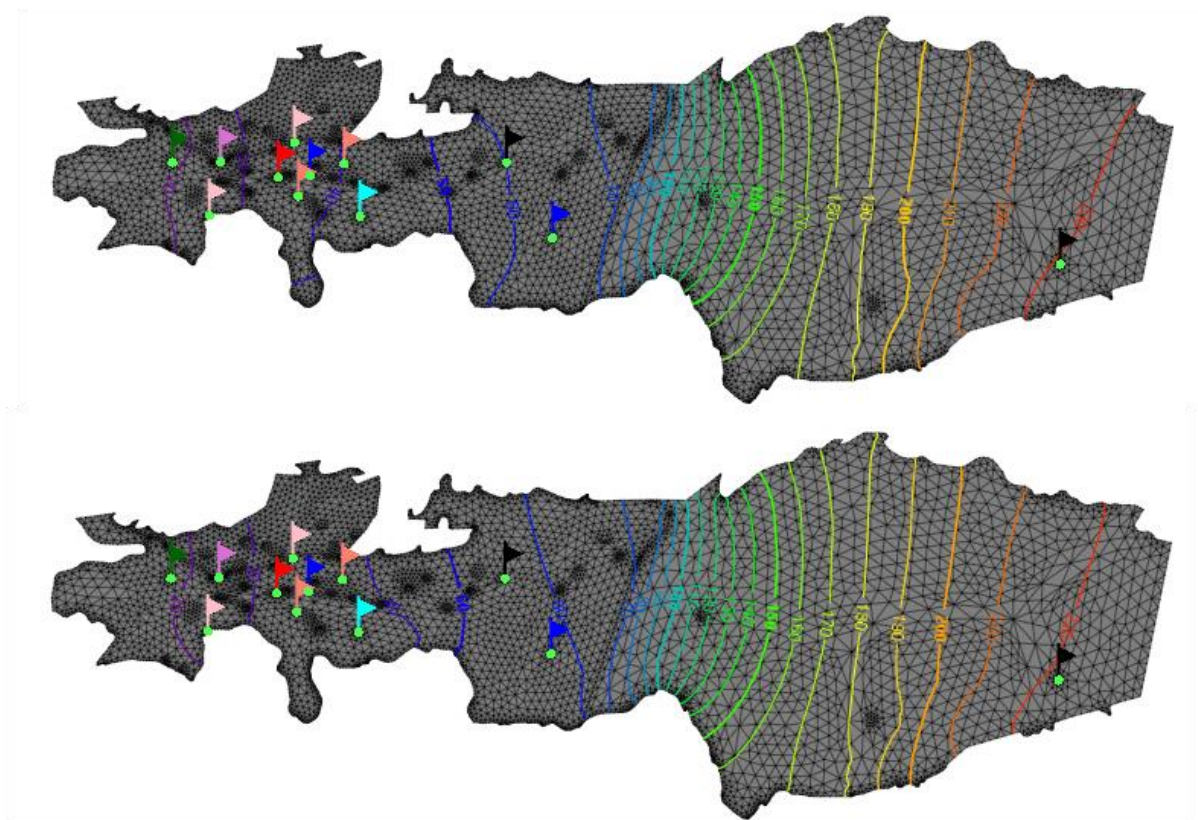
Εικόνα 40. Διατομή του υδροφορέα των Μοιρών και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5).



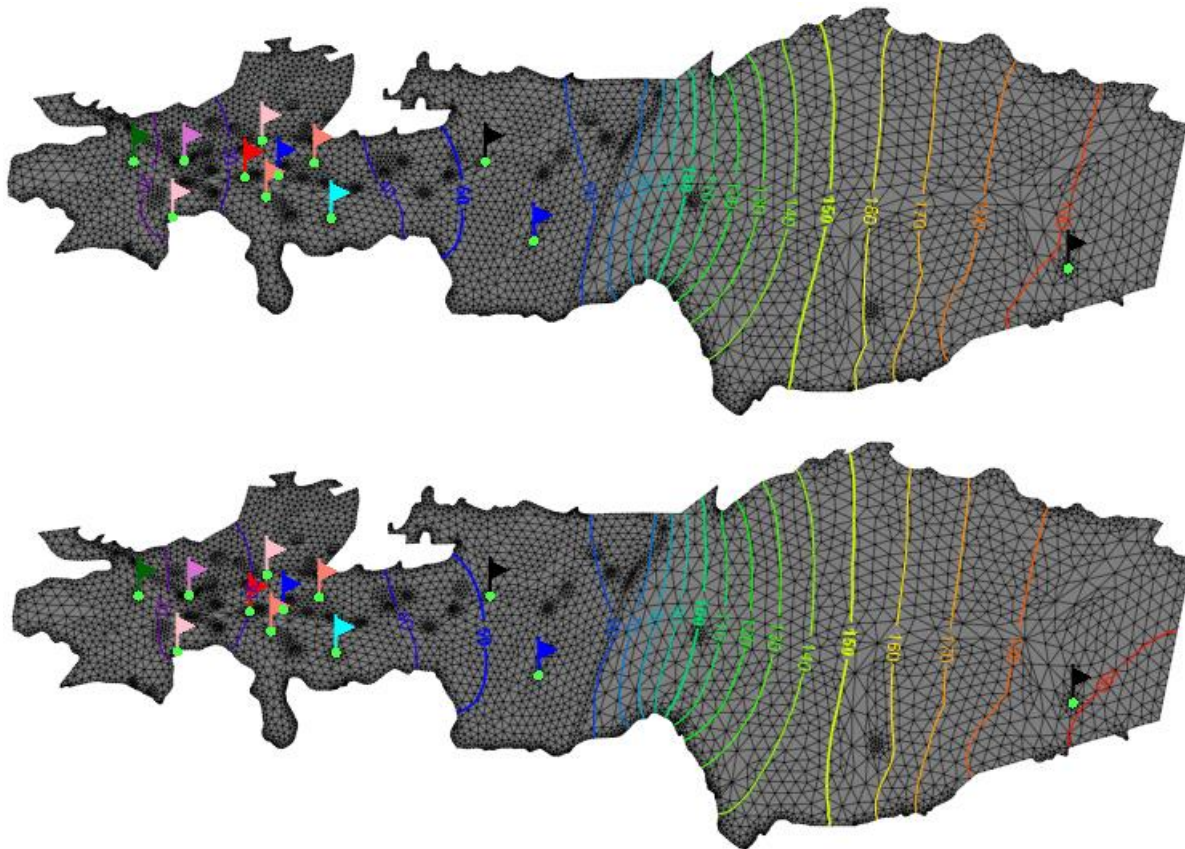
Εικόνα 41. Διατομή του υδροφορέα της Βαγιονιάς και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5).

Κλιματικό Σενάριο 3 (RCP 8.5)

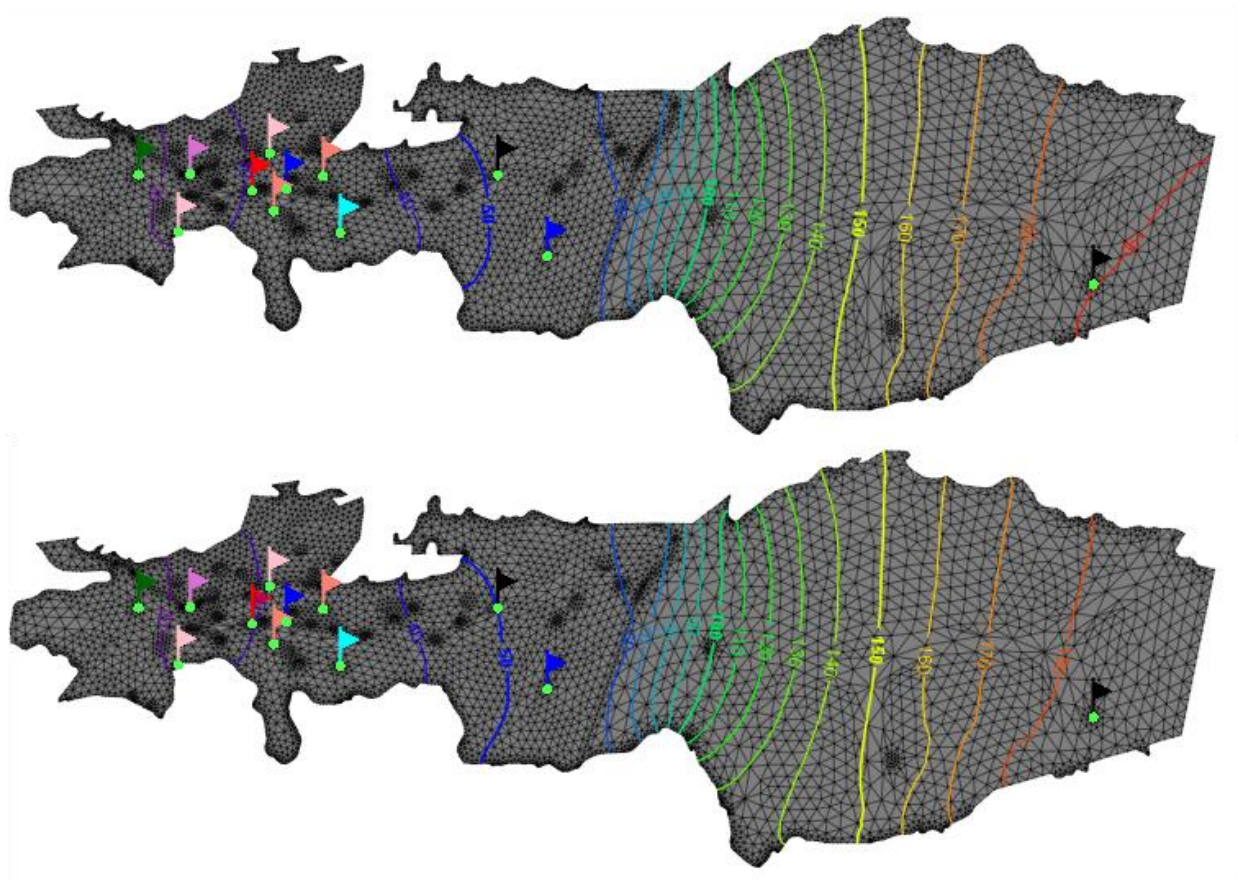
Για τον κλιματικό σενάριο RCP 8.5 τα αποτελέσματα που θα εμφανιστούν βρίσκονται υπό την μορφή χαρτών και διαγραμμάτων και αφορούν τις χρονιές 2019, 2029 και 2039.



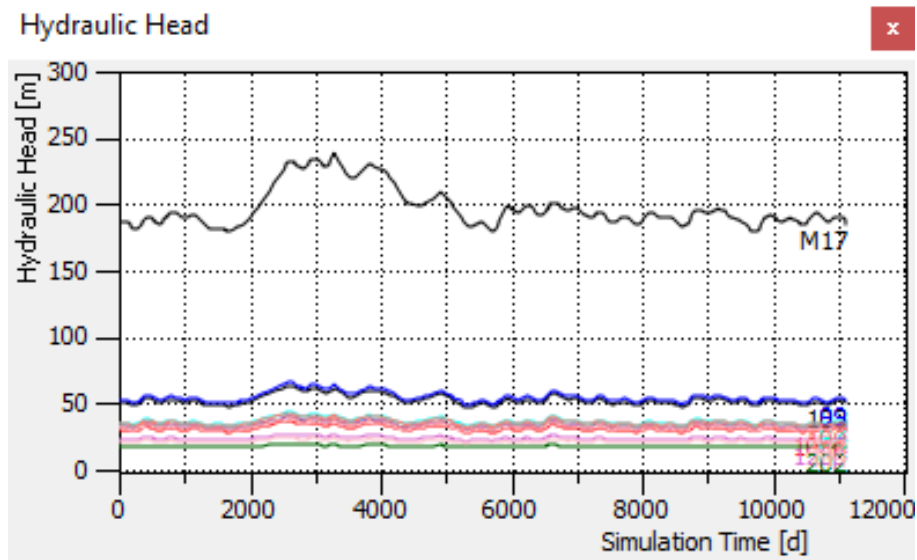
Εικόνα 42. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2019 για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2019 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2019.



Εικόνα 43. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2029 για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2029 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2029.



Εικόνα 44. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για την χρονιά 2039 για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5). Στον πάνω χάρτη εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος για τον χειμώνα του 2039 και στον κάτω για το καλοκαίρι του 2039.



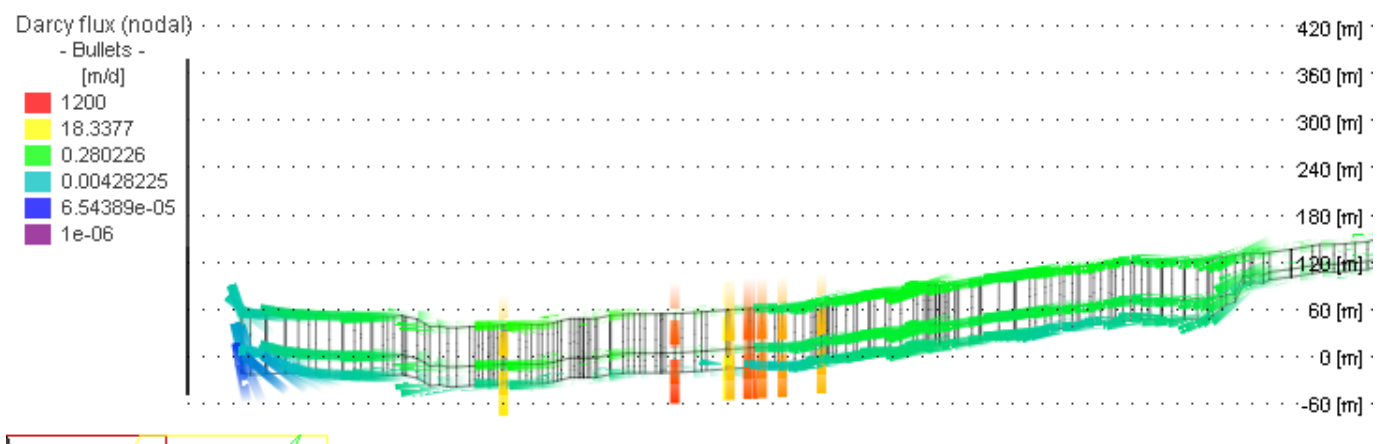
Εικόνα 45. Διάγραμμα μεταβολής υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5). Το κάθε χρώμα απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για κάθε ένα από τα πηγάδια παρατήρησης.

Darcy flux (nodal)

- Bullets -
[m/d]

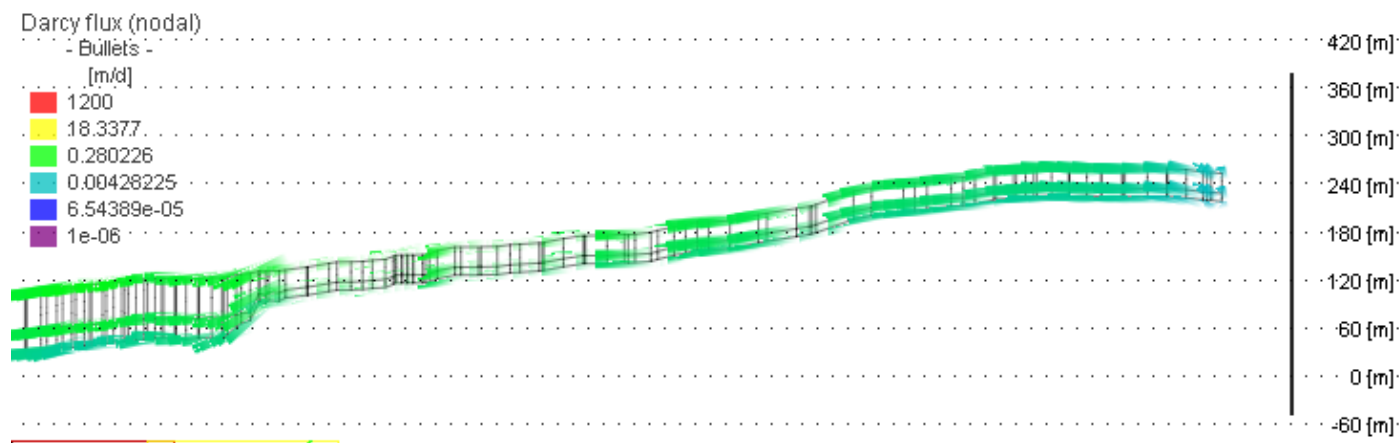


Εικόνα 46. Χάρτης ταχύτητας Darcy για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5).



Εικόνα 47. Διατομή του υδροφορέα των Μοιρών και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5).

).



Εικόνα 48. Διατομή του υδροφορέα της Βαγιονιάς και εμφάνιση της ταχύτητας Darcy σε όλα τα στρώματα και κατευθύνσεις για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5).

Πίνακας 1. Το μέσο υδραυλικό ύψος για τα 12 πηγάδια παρατήρησης

Μέσο Υδραυλικό Ύψος (m)												
Αρίθμηση Πηγαιδιών	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Πραγματικές Μετρήσεις	36,1	36,0	57,5	33,3	24,9	18,2	34,4	39,2	59,8	38,5	22,8	221,7
Κλιματικό Σενάριο 1 (RCP 2.6)	34,5	34,4	54,8	31,9	24,1	17,8	32,9	37,5	57,0	36,8	22,1	211,4
Κλιματικό Σενάριο 2 (RCP 4.5)	35,5	35,4	56,5	32,9	24,6	18,1	33,9	38,6	58,8	38,0	22,6	217,5
Κλιματικό Σενάριο 3 (RCP 8.5)	33,5	33,4	52,6	31,1	23,6	17,6	32,0	36,4	54,7	35,7	21,7	197,1

Πίνακας 2. Η ποσοστιαία μείωση του υδραυλικού ύψους σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις.

Ποσοστιαία Μείωση Υδραυλικού Ύψους σε Σχέση με τις Πραγματικές Μετρήσεις (%)													
Αρίθμηση Πηγαδιών	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Μ. Ο.
Κλιματικό Σενάριο 1 (RCP 2.6)	4,35	4,33	4,75	4,20	3,46	2,31	4,34	4,46	4,76	4,47	3,17	4,67	4,11
Κλιματικό Σενάριο 2 (RCP 4.5)	1,48	1,48	1,67	1,43	1,17	0,78	1,46	1,53	1,69	1,52	1,07	1,89	1,43
Κλιματικό Σενάριο 3 (RCP 8.5)	7,05	7,04	8,47	6,75	5,45	3,58	6,80	7,33	8,59	7,27	4,97	11,09	7,03

4 Συζήτηση

Αρχικά κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου παρατηρούμε στην Εικόνα 21 στην οποία εμφανίζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις ότι προσεγγίζει πολύ καλά τις πραγματικές τιμές καθώς το σφάλμα RMS είναι περίπου 9.5 m για τον χειμώνα και 10.8 m για το καλοκαίρι. Το αποδεκτό σφάλμα (RMS) κατά την βαθμονόμηση του υδροφόρου προκύπτει από την εξίσωση:

$$SRMS\% = 100 \times \frac{RMS_{Αποδεκτό}}{\Delta H}$$

Όπου:

SRMS: είναι το μέγιστο αποδεκτό σφάλμα επί της 100

RMS: είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

ΔH : είναι η διαφορά του μέγιστου με το ελάχιστο υδραυλικό ύψος

Για κάθε περίπτωση που πρέπει να εξεταστεί αντικαθιστάται στο SRMS% το ποσοστό 10% και στο ΔH αντικαθιστάται η διαφορά του ελάχιστου με το μέγιστο υδραυλικό ύψος. Έπειτα η εξίσωση λύνεται ως προς το $RMS_{αποδεκτό}$ και το αποτέλεσμα είναι το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα εκφρασμένο σε μέτρα το οποίο είναι εύκολο να συγκριθεί με το RMS το οποίο δίνεται από το μοντέλο FEFLOW.

Επίσης στην Εικόνα 20 όπως είναι αναμενόμενο παρατηρείται ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πέφτει το καλοκαίρι. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται σε ολόκληρη την Κρήτη λόγω των αντλήσεων. Στην Εικόνα 22 η οποία απεικονίζει την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για το έτος 2016 παρατηρείται η ίδια συμπεριφορά για χειμώνα και καλοκαίρι. Η στάθμη έχει μεταβληθεί ελάχιστα καθώς βρίσκεται περίπου στα 220 m για τον χειμώνα και για το καλοκαίρι το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα είναι μεγαλύτερο από τα 210 m. Στα διαγράμματα διασποράς το σφάλμα RMS για τον χειμώνα του 2016 είναι 11 m και για το καλοκαίρι είναι 11.4 m. Παρότι το σφάλμα είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από τις αντίστοιχες τιμές του 2009 είναι αποδεκτό καθώς είναι μικρότερο από τα 20 m. Στην Εικόνα 24 απεικονίζεται το διάγραμμα μεταβολής του υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο. Για κάθε πηγάδι παρατήρησης εμφανίζεται η στάθμη του για κάθε ημέρα από το 2009 μέχρι και το 2016. Όπως φαίνεται αρχικά υπάρχει μία μικρή αύξηση στην στάθμη των πηγαδιών η οποία φαίνεται καλύτερα στο πηγάδι M17 αλλά μέχρι το τέλος του 2016 επανέρχεται στα αρχικά του επίπεδα. Παρατηρείται ότι όσο χαμηλότερη είναι η στάθμη του νερού στα πηγάδια παρατήρησης τόσο μικρότερη είναι και η μεταβολή του από χειμώνα σε καλοκαίρι. Τέλος για την βαθμονόμηση (calibration) και τον έλεγχο (validation) στις Εικόνα 25 και Εικόνα 26 εμφανίζεται η ταχύτητα Darcy. Στην Εικόνα 25 και Εικόνα 27 εμφανίζεται η κάτοψη του χάρτη στην οποία υπάρχουν βέλη με διάφορα χρώματα τα οποία δείχνουν την φορά και την ένταση της ταχύτητας. Παρατηρείται ότι η διεύθυνση της ταχύτητας ακολουθεί την κατεύθυνση του

Γεροπόταμου όπως φαίνεται και στην Εικόνα 11 στον χάρτη στον οποίο τον απεικονίζει. Η κλίμακα είναι λογαριθμική με σκοπό την καλύτερη απεικόνιση των μικρότερων τιμών της ταχύτητας Darcy καθώς υπάρχει μεγάλη διακύμανση στις τιμές. Επίσης η κλίμακα δείχνει ότι υπάρχει ταχύτητα μέχρι και 1200 m/d η οποία δεν φαίνεται καθαρά στον χάρτη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ταχύτητα αυτή βρίσκεται στο άξονα z'z και φαίνεται καθαρά στην Εικόνα 26 όπου απεικονίζεται η διατομή της περιοχής μελέτης. Οι ταχύτητες αυτές είναι τόσο μεγάλες επειδή σε αυτήν την περιοχή υπάρχουν πολλά πηγάδια άντλησης και επηρεάζουν την κανονική ροή του νερού.

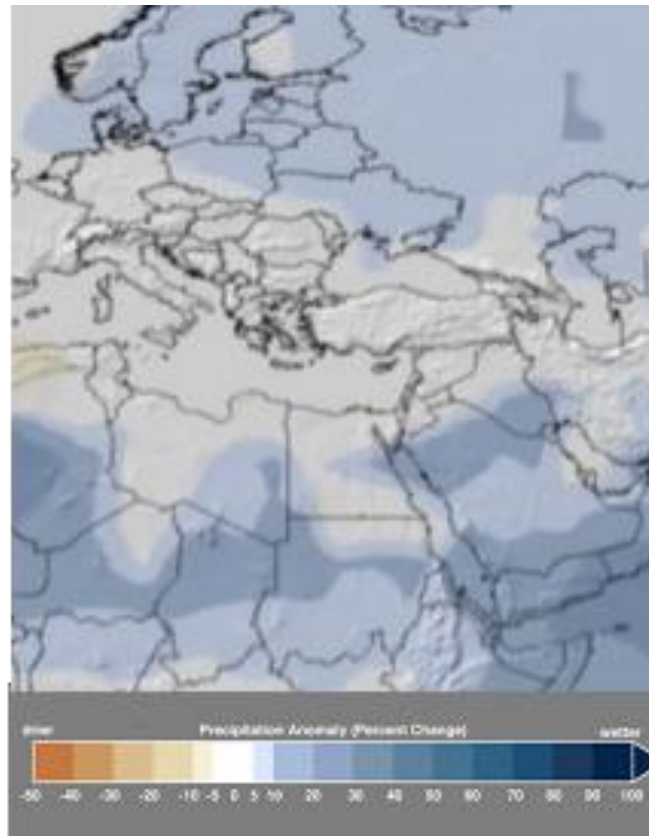
Για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6) τα αποτελέσματα εμφανίζονται στις Εικόνα 28, Εικόνα 29 και Εικόνα 30 στις οποίες απεικονίζεται το υδραυλικό ύψος σε μορφή ισοϋψών για τα έτη 2019, 2029 και 2039 αντίστοιχα. Σε κάθε εικόνα ο χάρτης που βρίσκεται στην πάνω πλευρά απεικονίζει τον χειμώνα ενώ ο χάρτης στην κάτω πλευρά το καλοκαίρι του αντίστοιχου έτους. Είναι εύκολο στην Εικόνα 28 να παρατηρηθεί ότι για το 2019 υπάρχει μία μεγάλη αύξηση στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα και έτσι τον χειμώνα του 2019 φτάνει πάνω από τα 240 m και το καλοκαίρι στα 230m. Στην συνέχεια και στην Εικόνα 29 στην οποία απεικονίζονται οι χάρτες για το έτος 2029 υπάρχει μια μεγάλη μείωση του υδραυλικού ύψους. Η στάθμη βρίσκεται για τον χειμώνα και το καλοκαίρι λίγο πάνω από τα 190 m. Τέλος για το έτος 2039 το οποίο εμφανίζεται στην Εικόνα 30 υπάρχει μία επιπλέον μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα όπου για τον χειμώνα η στάθμη βρίσκεται στα 190 m περίπου και το καλοκαίρι λίγο πάνω από τα 180 m. Η συμπεριφορά αυτή του υδροφορέα φαίνεται καλύτερα στην Εικόνα 31 όπου υπάρχει το διάγραμμα μεταβολής του υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο καθ'όλη την διάρκεια του κλιματικού σεναρίου. Όπως φαίνεται γίνεται μία μεγάλη αύξηση στην στάθμη της τάξεως των 50 μέτρων περίπου για το πηγάδι παρατήρησης M17 και στην συνέχεια παρατηρείται μία πτωτική τάση όσο περνάνε τα χρόνια. Στο τέλος παρατηρείται μία αύξηση περίπου 20 μέτρων η οποία διαρκεί περίπου από το 2035 έως το 2037 και ακολουθείται από μία μεγάλη πτώση. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από την βιβλιογραφία καθώς ο IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) αναφέρει ότι μετά το 2020 υπάρχει μία σταθερή μικρή αύξηση στην προσπίπτουσα ακτινοβολία μέχρι να φτάσει την μέγιστη τιμή της στο 2100 η οποία είναι περίπου στα 3 W/m² και μετά το 2100 θα αρχίσει να μειώνεται. Η αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας επηρεάζει και την βροχόπτωση όπως φαίνεται στην Εικόνα 49 καθώς υπάρχει μία μικρή μείωση στην βροχόπτωση.

Για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5) τα αποτελέσματα εμφανίζονται στις Εικόνα 35, Εικόνα 36 και Εικόνα 37 στις οποίες απεικονίζεται το υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών για τα έτη 2019, 2029 και 2039 αντίστοιχα. Σε κάθε εικόνα ο χάρτης που βρίσκεται στην πάνω πλευρά της εικόνας απεικονίζεται ο χειμώνας και στην κάτω πλευρά της εικόνας απεικονίζεται το καλοκαίρι του αντίστοιχου έτους. Παρατηρείται στην Εικόνα 35 ότι για το έτος 2019 η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για τον χειμώνα βρίσκεται πάνω από τα 200 m ενώ για το καλοκαίρι είναι περίπου στα 190 m. Για το έτος 2029 η στάθμη αυξάνεται και παρατηρείται ότι μένει σχεδόν σταθερή για τον χειμώνα και το καλοκαίρι λίγο πάνω από 230 m όπως φαίνεται στην Εικόνα 36. Η στάθμη για το καλοκαίρι φαίνεται ότι έχει πέσει ελάχιστα αλλά δεν φαίνεται καμία σημαντική διαφορά. Τέλος στην Εικόνα 37 για το έτος 2039 η στάθμη πέφτει σε σχέση με το 2029 αλλά ακόμα παρατηρείται ότι είναι υψηλή καθώς βρίσκεται πάνω από τα 210 m. Η συμπεριφορά του υδροφορέα παραμένει ίδια καθώς το καλοκαίρι η στάθμη πέφτει ελάχιστα σε σχέση με τον χειμώνα. Για την καλύτερη

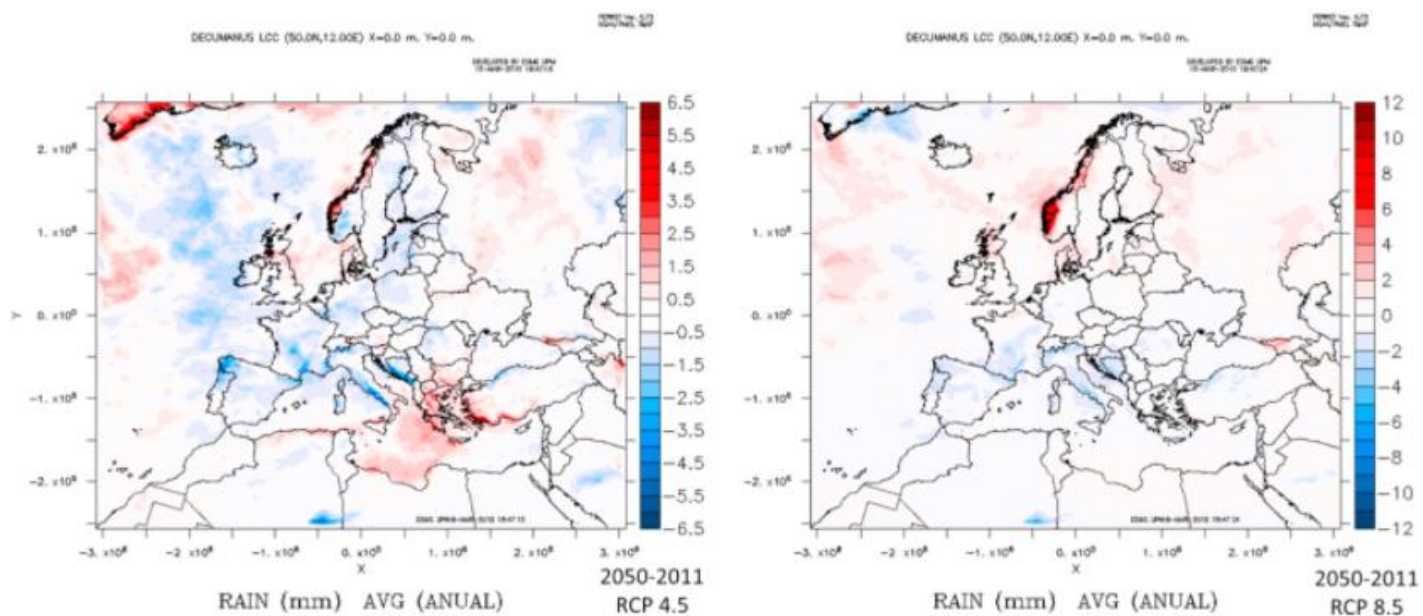
παρατήρηση του υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο η Εικόνα 38 απεικονίζει το διάγραμμα στο οποίο εμφανίζονται όλες οι τιμές του υδραυλικού ύψους για τα 30 χρόνια του κλιματικού μοντέλου που μελετιούνται στην διπλωματική εργασία. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα οι τιμές του υδραυλικού ύψους παρουσιάζουν μεγάλες αυξομειώσεις αλλά πάντα παραμένουν σε υψηλά επίπεδα σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις που υπάρχουν για την περιοχή. Όπως είναι γνωστό από την βιβλιογραφία το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 αρχικά παρουσιάζει υψηλές τιμές βροχόπτωσης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 50 μέχρι και το 2050. Η μέση αυτή αύξηση είναι μικρή της τάξεως των 5 mm τον χρόνο. Μετά το 2050 ακολουθεί μείωση της βροχόπτωσης η οποία όπως είναι φυσικό επηρεάζει και την στάθμη του υδροφορέα.

Για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5) τα αποτελέσματα εμφανίζονται στις Εικόνα 42, Εικόνα 43 και Εικόνα 44 στις οποίες απεικονίζεται το υδραυλικό ύψος με την μορφή ισούψων για τα έτη 2019, 2029 και 2039 αντίστοιχα. Σε κάθε εικόνα ο χάρτης που βρίσκεται στην πάνω πλευρά της εικόνας απεικονίζει τον χειμώνα και ο κάτω το καλοκαίρι του αντίστοιχου έτους. Στο τρίτο κλιματικό σενάριο παρατηρείται μία μεγάλη αύξηση στην στάθμη του υδραυλικού ύψους για το έτος 2019. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 42 τον χειμώνα του 2019 η στάθμη του υδροφορέα βρίσκεται πάνω από τα 230 m και το καλοκαίρι πάνω από 220 m. Στην συνέχεια παρατηρείται ίδια συμπεριφορά για τα έτη 2029 στην Εικόνα 43 και για το 2039 στην Εικόνα 44 καθώς τον χειμώνα η στάθμη βρίσκεται πάνω από τα 190 m και για το καλοκαίρι πέφτει λίγο πάνω από τα 180 m και για τις δύο εικόνες. Τέλος για την καλύτερη παρατήρηση της στάθμης καθ'όλη την διάρκεια του κλιματικού σεναρίου εμφανίζεται το διάγραμμα στην Εικόνα 45. Εκεί παρατηρείται ότι αρχικά υπάρχει μία μεγάλη αύξηση του υδραυλικού ύψους που διαρκεί για περίπου 4 χρόνια και στην συνέχεια παρατηρείται μία μεγάλη μείωση όπου καταλήγει να παραμένει σε σταθερά επίπεδα μέχρι το τέλος του κλιματικού σεναρίου. Στην Εικόνα 50 παρατηρείται μία μικρή μέση μείωση της βροχόπτωσης της τάξεως των 2mm τον χρόνο.

Και για τα τρία κλιματικά σενάρια εμφανίζονται οι εικόνες στις οποίες απεικονίζεται η ταχύτητα Darcy. Για το πρώτο κλιματικό σενάριο είναι η Εικόνα 25, η Εικόνα 26 και η Εικόνα 27 για το δεύτερο είναι η Εικόνα 32, η Εικόνα 33 και η Εικόνα 34 και για το τρίτο είναι η Εικόνα 39, η Εικόνα 40 και η Εικόνα 41. Δεν παρατηρείται κάποια διαφορά στον χάρτη στον οποίο απεικονίζεται η ταχύτητα Darcy σε σχέση με την διεύθυνση της ταχύτητας σε κανένα από τα τρία κλιματικά σενάρια με τον χάρτη τον οποίο εμφανίζεται κατά την βαθμονόμηση (Calibration) και τον έλεγχο (Validation). Η ροή των υπογείων υδάτων συνεχίζει να ακολουθεί την ροή του Γεροπόταμου. Η μόνη διαφορά που υπάρχει είναι μεταξύ των κλιματικών σεναρίων είναι μία μικρή μεταβολή στην τιμή της ταχύτητας Darcy η οποία όμως είναι αμελητέα.



Εικόνα 49. Μεταβολή της βροχόπτωσης για το κλιματικό σενάριο RCP 2.6. [NASA, 2013]



Εικόνα 50. Σύγκριση της βροχόπτωσης για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και 8.5 [Roberto San Jose et. al. 2016].

5 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας έπεται από αρκετές δοκιμές στις τιμές των οριακών συνθηκών καθώς καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μοντέλο χαρακτηρίζεται από σχετική ακρίβεια καθώς επιτεύχθηκαν αποδεκτά σφάλματα. Συγκεκριμένα κατά την βαθμονόμηση (Calibration) και τον έλεγχο (Validation) το μικρότερο σφάλμα είναι 9.5 m και το μεγαλύτερο 11.4 m. Το μέγιστο επιτρεπτό σφάλμα είναι κοντά στα 20 m καθώς στην περιοχή υπάρχουν μεγάλα υδραυλικά ύψη. Το σφάλμα κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου είναι περίπου στο 5%.

Όπου υπάρχει έλλειψη δεδομένων για έναν βροχομετρικό σταθμό μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της γραμμικής παλινδρόμηση εάν βρίσκεται σε κοντινή απόσταση με έναν άλλο σταθμό ο οποίος δεν έχει έλλειψη βροχομετρικών δεδομένων. Αυτό είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί εάν υπάρχουν δεδομένα βροχόπτωσης για κοινές χρονικές περιόδους και για τους δύο σταθμούς. Χρησιμοποιώντας την μέθοδο αυτή εξάγεται μία εξίσωση με δύο αγνώστους οι οποίοι αντιστοιχούν στην βροχόπτωση κάθε σταθμού. Αντικαθιστώντας την βροχόπτωση στον έναν άγνωστο προκύπτει η βροχόπτωση του άλλου σταθμού.

Για την υδραυλική αγωγιμότητα εξήχθησαν οι τιμές της από την Εικόνα 14 και Εικόνα 15 από την Διδακτορική διατριβή του κ. Κριτσωτάκη. Παρότι αυτές οι τιμές χρησιμοποιήθηκαν σαν βάση κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου υπογείων υδάτων FEFLOW τελικά πραγματοποιήθηκαν αλλαγές μέχρι μίας τάξης μεγέθους στην τιμή τους όπου χρειάστηκε ώστε να προσομοιωθούν οι παρατηρημένες στάθμες του υδροφόρου ορίζοντα.

Για τις οριακές συνθήκες στις οποίες χρησιμοποιήθηκε συνθήκη δευτέρου είδους στα ανατολικά άκρα της περιοχής μελέτης χωρίζοντας τα όρια σε 4 μικρότερα τμήματα. Για κάθε ένα από αυτά τα τμήματα πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για την τιμή της εισροής υδάτων μέχρις ότου να προσεγγιστεί η στάθμη του υδροφόρου όσο το δυνατόν καλύτερα. Επίσης έγινε σύνδεση των τιμών αυτών με την χρονοσειρά της βροχόπτωσης έτσι ώστε να υπάρχει εποχική διακύμανση.

Για το πρώτο κλιματικό σενάριο (RCP 2.6) παρατηρείται ότι αρχικά υπάρχει μία αύξηση στην τιμή της βροχόπτωσης και συνεπώς και στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό είναι λογικό καθώς όπως αναφέρει ο IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) η πτώση στην τιμή της βροχόπτωσης και σε συνέπεια και στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα θα συμβεί μετά το 2020. Στον Πίνακα 1 και Πίνακα 2 παρατηρείται ότι υπάρχει μία μείωση για το μέσο υδραυλικό ύψος μεγαλύτερη από το δεύτερο κλιματικό σενάριο παρότι είναι το σενάριο το οποίο θεωρεί την χαμηλότερη συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου. Όπως αναφέρει ο IPCC ενώ μπορεί να υπάρχει μεγαλύτερη αύξηση θερμοκρασίας και μεγαλύτερη συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου κάθε περιοχή επηρεάζεται διαφορετικά με το κάθε κλιματικό σενάριο.

Για το δεύτερο κλιματικό σενάριο (RCP 4.5) παρατηρείται ότι υπάρχουν μεγάλα υδραυλικά ύψη για την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κατά την διάρκεια του σεναρίου.. Ο IPCC αναφέρει ότι στο συγκεκριμένο κλιματικό σενάριο η πτώση της τιμής της βροχόπτωσης οπότε και η πτώση της στάθμης του υδροφόρου πραγματοποιείται μετά το 2050. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2 η μέση ποσοστιαία πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα είναι περίπου 1.4% σε σχέση με

τις πραγματικές μετρήσεις. Αυτό δείχνει ότι η περιοχή μελέτης δεν επηρεάζεται σημαντικά με το συγκεκριμένο κλιματικό σενάριο. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 50 υπάρχει μικρή αύξηση στην βροχόπτωση παρόλα αυτά παρατηρείται μείωση στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυξάνονται τα ακραία καιρικά φαινόμενα και το νερό επιστρέφει στην θάλασσα με την μορφή επιφανειακής ροής προτού να καθισδύσει στο υπέδαφος.

Για το τρίτο κλιματικό σενάριο (RCP 8.5) παρατηρείται η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα παραμένει σχεδόν σταθερή σε χαμηλά επίπεδα για την περιοχή στα 180 m για τις καλοκαιρινές περιόδους και στα 190 m για τις χειμερινές περιόδους με εξαίρεση μία μεγάλη αύξηση με μείωση της τάξεως των 50 m η οποία διήρκεσε περίπου 4 χρόνια. Από το Πίνακα 1 και Πίνακα 2 είναι εμφανές ότι είναι το χειρότερο κλιματικό σενάριο καθώς υπάρχει η μεγαλύτερη μείωση στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 50 υπάρχει μία μικρή μείωση και στην βροχόπτωση η οποία αντικατοπτρίζεται στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Ο λόγος ο οποίος εξετάστηκαν τα τρία κλιματικά σενάρια RCP 2.6, 4.5 και 8.5 είναι επειδή στην περιοχή πραγματοποιούνται αγροτικές δραστηριότητες και υπάρχει μεγάλη απαίτηση σε νερό. Τα αποτελέσματα δεν αποτελούν πρόβλεψη του μέλλοντος αλλά μία εκτίμηση για τις μεταβολές στο ανθρωπογενές και φυσικό περιβάλλον. Για αυτό χρησιμοποιούνται παραπάνω από ένα κλιματικά σενάρια έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη εικόνα για την κλιματική αλλαγή. Από τα κλιματικά σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία το καλύτερο για την περιοχή μελέτης είναι το δεύτερο κλιματικό σενάριο δηλαδή το RCP 4.5. Το μετριοπαθές αυτό σενάριο είναι το καλύτερο καθώς επιφέρει τις μικρότερες αλλαγές στους υδροφορείς των Μοιρών και της Βαγιονιάς. Στην συνέχεια ακολουθεί το RCP 2.6 το οποίο παρότι είναι το ηπιότερο κλιματικό σενάριο δεν είναι αυτό με τις λιγότερες συνέπειες για την περιοχή. Τέλος το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 το οποίο αποτελεί ένα ακραίο σενάριο έχει τις σημαντικότερες επιπτώσεις στην περιοχή οπότε είναι το χειρότερο από τα τρία. Τα παραπάνω ισχύουν μέχρι το 2039 καθώς μετά δεν έγινε έρευνα για τις μεταβολές στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Επειδή ο IPCC θεωρεί ότι το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 μετά το 2050 έχει σημαντική μείωση γεγονόσ που μπορεί να επηρεάζει αρνητικά την περιοχή μελέτης.

Σε μελλοντικές διπλωματικές εργασίες οι οποίες αφορούν την περιοχή της Μεσσαράς θα μπορούσε να μελετηθεί σε κάποιο σενάριο η ενδεχόμενη μεταβολή του ρυθμού άντλησης των πηγαδιών άντλησης κατά την διάρκεια των ετών και η παρατήρηση της μεταβολής του υδροφορέα. Επίσης ένα άλλο πρόβλημα το οποίο θα μπορούσε να απασχολήσει μελλοντική έρευνα για την περιοχή της Μεσσαράς είναι τα 3 κλιματικά σενάρια να εκτελεστούν στο πρόγραμμα FEFLOW για χρόνο μεγαλύτερο από τα 30 χρόνια. Τέλος στην περιοχή της Μεσσαράς υπάρχει η τεχνητή λίμνη της Φανερωμένης. Το πρόβλημα το οποίο θα μπορούσε να απασχολήσει μελλοντική έρευνα είναι η εύρεση ενός τρόπου έτσι ώστε να χρησιμοποιείται ένα ποσοστό από το νερό από της λίμνης σε περιόδους ξηρασίας με σκοπό την μικρή μεταβολή του υδροφόρου η ορίζοντα.

Βιβλιογραφία

- Κριτσωτάκης, Μ. Ν. (2009). Διαχείριση Υδάτινων Πόρων Μεσσαράς Κρήτης. Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Καρατζάς Γεώργιος (2019). Σημειώσεις Ροής Υπογείων Υδάτων και Μεταφοράς Ρύπων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Μοσχοπούλου Ελένη (2017). Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής και Μεταφοράς Ρύπου στην πεδιάδα των Μοιρών Ηρακλείου με τη χρήση του προσομοιωτή Visual MODFLOW, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Μιχάλας Μιχαήλ (2013). Διερεύνηση υδραυλικής αγωγιμότητας εδαφών με χρήση εύκαμπτου και άκαμπτου τύπου περατομέτρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Δαουλάρη Γεωργία (2007). Μοντελοποίηση Υπόγειας Ροής και Προσδιορισμός Υφάλμυρης Ζώνης Υπόγειου Υδροφορέα Περιοχής Φαλασάρνων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Ταμπακάκη Αρετή (2008). Δυνατότητα Καλλιέργειας Τροπικών και Υποτροπικών Καρποφόρων Δέντρων στις Νοτιοανατολικές Περιοχές του Νομού Ηρακλείου, ΤΕΙ Κρήτης, Σχολή Τεχνολογίας Γεωπονίας, Ηράκλειο
- Λυμπέρη Ουρανία (2016). Εφαρμογή της Θεωρίας Λήψης Αποφάσεων Κατά Bayes σε Θέματα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά
- Detlef P. Van Vuuren (2007). The representative concentration pathways :an overview, Article
- Στειακάκης Εμμανουήλ (2008). Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας – Εδαφομηχανικής, Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά
- Μάρης Φώτιος, (2020). Σημειώσεις Τεχνικής Υδρολογίας, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Κομοτηνή
- Καββαδάς Μιχαήλ (2019). Σημειώσεις Εδαφομηχανικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα
- Clarke L. (2007). Scenarios of Greenhouse Gas Emissions and Atmospheric Concentrations
- Riahi K. (2007). Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization.
- Roberto San Jose, (2016). Impacts of the 4.5 and 8.5 RCP global climate scenarios on urban meteorology and air quality: Application to Madrid, Antwerp, Milan, Helsinki and London.
- Κωνσταντίνος Βουδούρης, (2019). Σημειώσεις Υδρογεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη
- ΙΓΜΕ, (2009). Ελληνική Γεώσφαιρα, Περιοδική Έκδοση Νο7
- Fassoulas C., (2001). The tectonic development of a Neogene basin at the leading edge of the active European margin: the Heraklion basin, Journal of Geodynamics 31
- Μουντράκης Δ. Μ., (1985). Γεωλογία της Ελλάδας, University Studio Press, Θεσσαλονίκη
- Κριτσωτάκης Μ. (2013). Κατάσταση Υπογείων Υδροφόρων Κρήτης, Ηράκλειο
- Νεραντζάκη Σ. (2020). Impact of climate change on the hydrology and geochemistry of Crete and estimation of uncertainty, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Διαδικτυακές Πηγές

- Κριτσωτάκης Μ. Ν. [Diaxeirisi ydatikwn porwn Mesaras Kritis](#) [7/2020]
- Κέντρο Περιβαλλοντικής Εκπαίδευσης Καστοριάς, http://kpe-kastor.kas.sch.gr/the_lake/water.htm/katanomi.htm [7/2020]
- Επίσημος Ιστότοπος Ευρωπαϊκής Ένωσης, <https://ec.europa.eu/> [7/2020]
- Πολυτεχνείο Κρήτης, Eclass, <https://www.eclass.tuc.gr/> [7/2020]
- Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης, Eclass, <https://eclass.aspete.gr/> [7/2020]
- Meteo.gr, <https://meteo.gr/> [7/2020]
- United States Geological Survey, <https://www.usgs.gov/> [7/2020]
- Meteo24 news, <https://www.meteo24news.gr/2014/01/to-klima-tis-kritis.html> [7/2020]
- Skeptical Science, <https://skepticalscience.com/rcp.php?t=1> [8/2020]
- Intergovernmental Panel on Climate Change, https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/glossary/glossary_r.html [8/2020]
- Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/about/> [8/2020]
- Springer, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-011-0148-z#Sec2> [8/2020]
- Δημοκρήτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Eclass <https://eclass.duth.gr/> [8/2020]
- Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, mycourses <https://mycourses.ntua.gr/> [9/2020]
- NASA, <https://svs.gsfc.nasa.gov/11376> [9/2020]