



**Πολυτεχνείο Κρήτης**

**Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος**

**Μοντελοποίηση Υπόγειας Ροής του υδροφορέα Μαλίων,  
Ηρακλείου Κρήτης με χρήση του μοντέλου FEFLOW – Εξέ-  
ταση κλιματικών σεναρίων διαφορετικών κλιματικών μο-  
ντέλων.**

ΤΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ

ΠΑΡΑΣΚΕΥΑ ΔΙΑΚΟΠΑΡΑΣΚΕΥΑ

**Τριμελής Επιτροπή:**

Καθηγητής Καρατζάς Γεώργιος (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

Καθηγητής Νικολαΐδης Νικόλαος

Επίκουρος καθηγητής Βαρουχάκης Εμμανουήλ

**Χανιά, 28/02/2025**

"Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για μη κερδοσκοπικό σκοπό, εκπαιδευτικού ή ερευνητικού χαρακτήρα, με την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για άλλη χρήση θα πρέπει να απευθύνονται προς 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 παρούσας διπλωματικής εργασίας εξετάζεται η χρήση λογισμικού για την μοντελοποίηση ρευστών, το πρόγραμμα FEFLOW. Η προσομοίωση των υπογείων υδάτων αφορά την ευρύτερη περιοχή των Μαλίων η οποία βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της Κρήτης ανατολικά της πόλης Ηράκλειο. Η περιοχή αυτή έχει μεγάλες απαιτήσεις για νερό καθώς εκτός από τις αγροτικές δραστηριότητες υπάρχει και μεγάλη ανάπτυξη στον τουριστικό τομέα τα τελευταία χρόνια. Αρχικά πραγματοποιήθηκε κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων για την εισαγωγή τους στο μοντέλο ροής FEFLOW. Η επεξεργασία των διαφόρων μετρήσεων – δεδομένων πραγματοποιήθηκε με την χρήση προγραμμάτων όπως το ArcGIS, το Hydrogonom, 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 11 πηγάδια παρατήρησης τα οποία περιείχαν τιμές για την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα από το 2000 έως το 2012. 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 2<sup>ου</sup> είδους στα ανατολικά, δυτικά και νότια σύνορα του υδροφορέα καθώς και 1<sup>ου</sup> είδους στα παράλια της περιοχής και πραγματοποιήθηκε η βαθμονόμηση και ο έλεγχος του μοντέλου. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από 17 κλιματικά μοντέλα (Oria et al., 2017) για κάθε ένα από τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Αυτά τα κλιματικά σενάρια αφορούν την χρονική περίοδο 2006 – 2098. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι σε όλα τα κλιματικά μοντέλα θα υπάρξει μείωση στην μέση στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

## **Abstract**

This thesis examines the use of the three-dimensional finite element groundwater model FEFLOW. The groundwater simulation refers to the Malia aquifer, which is located in the northern part of the island of Crete, east of the city of Heraklion. This region has a high water demand due to agricultural activities and tourism development in recent years. A prerequisite for any groundwater simulation is the preparation of all the necessary data and its correct processing into a compatible file format that can be imported into the FEFLOW groundwater model. The input data is prepared using other programs and tools such as ArcGIS, Hydrogonom, Matlab and Microsoft Excel. The Arc GIS program was mainly used for processing the maps to be imported into FEFLOW and, if necessary, for data tables. The other programs and tools were used to process time series and constant data values containing the information used as FEFLOW input. The aquifer water levels for the years 2000 to 2012 from 11 observation wells were available as input for FEFLOW. In addition, the precipitation values for the corresponding years and the pumping wells present in the area were imported. Other necessary input parameters are the hydraulic conductivity values of various geological formations and the elevations of the study area. The last model parameters to be imported were the 2nd type boundary conditions, which were set at the eastern, western and southern boundaries of the aquifer, and those of the 1st type, which were set at the coastline of the area, so that the calibration and validation of the model was completed. After the calibration and validation of the model, the data from 17 different climate models (Oria et al., 2017) were used for each of the climate scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5. The climate scenarios were used for the period 2006 – 2098. The results show that there is a decrease in the hydraulic head for the study area in each climate model. The model and the climate scenarios used were created as part of a European program.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	3
Abstract.....	4
Περιεχόμενα Εικόνων.....	7
1. Εισαγωγή.....	12
1.1 Σκοπός της Εργασίας .....	12
1.2 Νερό.....	12
1.3 Υδρολογικός Κύκλος.....	14
1.4 Υδροφορείς .....	16
Αρτεσιανά Πηγάδια .....	17
1.5 Παράμετροι Υδροφορέων .....	18
Πορώδες.....	18
Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	20
Διείσδυση.....	21
Συντελεστής Μεταβασιμότητας.....	24
Διαπερατότητα .....	24
1.6 Ρύπανση στους Υπόγειους Υδροφορείς .....	26
Υφαλμύριση .....	29
Ρύπανση από λίπανση των εδαφών .....	31
Βαρέα Μέταλλα .....	32
1.7. Γενικές Πληροφορίες Περιοχής Μελέτης .....	33
1.8 Η Γεωλογία της Κρήτης.....	35
1.9 Η Γεωλογία στα Μάλια.....	36
1.10 Το Κλίμα της Κρήτης.....	37
1.11 Περιβαλλοντικά Χαρακτηριστικά της Περιοχής Μελέτης .....	39
1.12 Κλιματικά Σενάρια.....	40
RCP 2.6 .....	42
RCP 4.5 .....	42

RCP 6 .....	43
RCP 8.5 .....	43
1.13 FEFLOW .....	43
2. Μεθοδολογία.....	46
2.1 Υψόμετρο .....	48
2.2 Υδραυλική Αγωγιμότητα .....	51
Εισαγωγή δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας για τον άξονα x'x .....	53
Εισαγωγή δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας για τον άξονα y'y .....	54
Εισαγωγή δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας για τον άξονα z'z .....	55
2.3 Πηγάδια Παρατήρησης .....	56
2.4 Γεωτρήσεις Άντλησης .....	58
2.5 Βροχόπτωση .....	63
2.6 Οριακές Συνθήκες.....	66
2.6.1 Οριακές Συνθήκες 2 <sup>ου</sup> Είδους.....	66
2.6.2 Οριακές Συνθήκες 1 <sup>ου</sup> Είδους.....	69
2.7 Βαθμονόμηση Προγράμματος FEFLOW.....	70
2.8 Κλιματικό Σενάριο RCP 4.5.....	72
2.9 Κλιματικό Σενάριο RCP 8.5.....	74
3. Αποτελέσματα.....	76
Αρχικό Μοντέλο .....	76
Αποτελέσματα κλιματικών σεναρίων.....	79
4. Συζήτηση .....	102
5. Συμπεράσματα.....	107
6. Βιβλιογραφία.....	109

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Χημεία του Νερού. (Molly, 2019).....	13
Εικόνα 2. Η Ποσότητα του νερού στον Πλανήτη. (UNESCO, 1978).....	13
Εικόνα 3. Ο κύκλος του νερού ή υδρολογικός κύκλος. (USGS, 2022) .....	15
<i>Εικόνα 4. Γεωλογικό και τοπογραφικό σχήμα απεικόνισής αρτεσιανού και ρέον αρτεσιανού πηγαδιού. (USGS, 2022).....</i>	<i>18</i>
Εικόνα 5. Διάφορες αναπαραστάσεις για την κάλυψη των κενών από το νερό στους υδροφόρους ορίζοντες. (Canada.ca, 2022).....	19
Εικόνα 6. Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης του Darcy. (Καρατζάς, 2022).....	20
Εικόνα 7. Η απεικόνιση της διείσδυσης του νερού από την επιφάνεια του εδάφους προς το υπέδαφος. (Kett, 2017) .....	22
Εικόνα 8. Η ικανότητα διείσδυσης μειώνεται κατά την διάρκεια συνεχούς βροχόπτωσης. (Cheremisinoff, 1997a).....	24
Εικόνα 9. Μεταφορά των ρύπων από το έδαφος στα επιφανειακά και στην συνέχεια στα υπόγεια νερά. (Vegan-to-be, 2018) .....	27
Εικόνα 10. Μέγεθος και συγκέντρωση στο πλούμιο σε σχέση με την ταχύτητα του υπογείου νερού. Στην πάνω εικόνα η ταχύτητα είναι 1.5 ft/ d και στην κάτω είναι 0.5 ft/d. (Cheremisinoff, 1997b) .....	28
Εικόνα 11. Το πρόβλημα της υπαλμύρινσης σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. (Βουδούρης, 2011) .....	30
Εικόνα 12. Μέτωπο Υφαλμύρινσης. (Βουδούρης, 2011) .....	31
Εικόνα 13. Τοποθεσία της περιοχής των Μαλίων επάνω στο νησί της Κρήτης όπως εμφανίζεται σε χάρτη του ευρωπαϊκού προγράμματος Sustain Coast . (Sustain_Coast, 2022) .....	33
Εικόνα 14. Τα όρια της περιοχή μελέτης με base map δορυφορικές εικόνες όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα ArcGIS. ....	34
Εικόνα 15. Οι κύριες καλλιέργειες δέντρων και λαχανικών στην περιοχή των Μαλίων.(Vavoulidou et al., 2009) .....	35
Εικόνα 16. Ο Χάρτης της γεωλογίας της Κρήτης όπως προκύπτει από την Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης. (Κρήτης, 2021).....	36

Εικόνα 17. Ελάχιστη – Μέση - Μέγιστη θερμοκρασία με την χρήση δεδομένων 55 ετών για την πόλη του Ηρακλείου. (EMY, 2022) .....	38
Εικόνα 18. Μέση βροχόπτωση με την χρήση δεδομένων 55 ετών για την πόλη του Ηρακλείου. (EMY, 2022).....	39
Εικόνα 19. Μέση μηνιαία ηλιοφάνεια σε ώρες στην περιοχή Ηράκλειο, Κρήτης.(Climate & Weather, 2022) .....	40
Εικόνα 20. Τα 4 RCPs τα οποία χρησιμοποιούνται από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα. (Jubb et al., 2013) .....	41
Εικόνα 21. Μεταβολή της θερμοκρασίας για κάθε κλιματικό σενάριο για ολόκληρο τον 21 <sup>ο</sup> αιώνα για τους μήνες Δεκέμβριο - Ιανουάριο. (IPCC a, 2014) .....	42
Εικόνα 22. Δημιουργία πλέγματος (Supermesh) με την χρήση του προγράμματος FEFLOW. ....	47
Εικόνα 23. Οι κόμβοι που δημιουργήθηκαν στο FEFLOW κατά την χρήση τους στο πρόγραμμα ArcGIS.....	48
Εικόνα 24. Σύνδεση των δεδομένων του υψομέτρου με την περιοχή μελέτης στο πρόγραμμα FEFLOW.....	49
Εικόνα 25. Η 3D απεικόνιση της περιοχής μελέτης. Η οπτική γωνία είναι από τον βορρά προς τον νότο. ....	50
Εικόνα 26. Ιστοσελίδα Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης. (Κρήτης, 2021) .....	51
Εικόνα 27. Υδραυλικής αγωγιμότητα περιοχής μελέτης με υπόβαθρο τον δορυφορικό χάρτη της Κρήτης. ....	52
Εικόνα 28. Ο χάρτης της υδραυλικής αγωγιμότητας όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW.....	54
Εικόνα 29. Τα πηγάδια παρατήρησης στην περιοχή μελέτης στο πρόγραμμα FEFLOW. Κάθε μαύρη κουκίδα αντιστοιχεί σε ένα πηγάδι παρατήρησης. ....	57
Εικόνα 30. Χρονοσειρά υδραυλικού ύψους σε σχέση με τις ημέρες για ένα τυχαίο πηγάδι παρατήρησης.....	58
Εικόνα 31. Η κατανομή των 407 πηγαδιών άντλησης στην περιοχή μελέτης όπως εμφανίζονται στο πρόγραμμα ArcGIS. ....	59
Εικόνα 32. Το παράθυρο με τις εντολές για το Grouping Analysis όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα ArcGIS.....	60



Εικόνα 33. Το παράθυρο με τις εντολές για το Median Center όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα ArcGIS.....	61
Εικόνα 34. Το αποτέλεσμα της ομαδοποίησης των πηγαδιών άντλησης όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα ArcGIS.....	62
Εικόνα 35. Κατανομή βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW.....	64
Εικόνα 36. Χρονοσειρά της βροχόπτωσης όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW για τον βροχομετρικό σταθμό της Νεάπολης.....	65
Εικόνα 37. Χρονοσειρά της βροχόπτωσης όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW για τον βροχομετρικό σταθμό του Τζερμιάδο. ....	66
Εικόνα 38. Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν οι οριακές συνθήκες 2ου είδους επάνω στον χάρτη όπως εμφανίζονται στο πρόγραμμα FEFLOW. ....	67
Εικόνα 39. Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν οι οριακές συνθήκες 1ου είδους επάνω στον χάρτη όπως εμφανίζονται στο πρόγραμμα FEFLOW. ....	69
Εικόνα 40. Χάρτης υδραυλικού ύψους σε τυχαία χρονική περίοδο κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου στο πρόγραμμα FEFLOW.....	71
Εικόνα 41. Σφάλμα υδραυλικού ύψους όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW για την χρονική στιγμή ημέρα 1100 .....	71
Εικόνα 42. Πίνακας με τους 17 συνδυασμούς για την δημιουργία των κλιματικών σεναρίων. ....	72
Εικόνα 43. Χρονοσειρά βροχόπτωσης τυχαίου κλιματικού σεναρίου RCP 4.5 όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW. ....	73
Εικόνα 44. Χρονοσειρά βροχόπτωσης τυχαίου κλιματικού σεναρίου RCP 8.5 όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW. ....	75
Εικόνα 45. Αποτελέσματα αρχικού μοντέλου. Διάγραμμα Υδραυλικού ύψους – Χρόνου (2000 – 2012).....	77
Εικόνα 46. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την διάρκεια του αρχικού μοντέλου όπως απεικονίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW.....	78
Εικόνα 47. Η ταχύτητα Darcy κατά την διάρκεια του αρχικού μοντέλου όπως απεικονίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW. ....	79

Εικόνα	48.	Αποτελέσματα	κλιματικού	μοντέλου	
		'CNRM_CERFACS_CNRM_CM5_CCLM4_8_17'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου			80
		προσομοίωσης.....			
Εικόνα 49.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'CNRM_CERFACS_CNRM_CM5_RCA4'.			
		Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			81
Εικόνα 50.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'DMI-MOHC_HadGEM2-ES_HIRHAM5'.			
		Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			83
Εικόνα 51.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'DMI_HIRHAM5_NorESM1-M'. Διαγράμματα			
		υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			84
Εικόνα 52.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'ICHEC-EC-EARTH_RACMO22E'.			
		Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			85
Εικόνα 53.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'ICHEC-EC-EARTH_RCA4'. Διαγράμματα			
		υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			86
Εικόνα 54.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'ICHEC_EC_EARTH_CCLM4_8_17'.			
		Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			88
Εικόνα 55.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'ICHEC_EC_EARTH_HIRHAM5'.			
		Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			89
Εικόνα 56.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'IPSL-INERIS_WRF381P_IPSL-CM5A-MR'.			
		Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			90
Εικόνα 57.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'IPSL_IPSL_CM5A_MR_RCA4'. Διαγράμματα			
		υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			92
Εικόνα 58.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'IPSL_IPSL_CM5A_MR_WRF331F'.			
		Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			93
Εικόνα 59.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'KNMI_CNRM-CM5'. Διαγράμματα			
		υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			94
Εικόνα 60.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'MOHC_HadGEM2_ES_CCLM4_8_17'.			
		Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			96
Εικόνα 61.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'MOHC_HadGEM2_ES_RACMO22E'.			
		Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			97
Εικόνα 62.		Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'MOHC_HadGEM2_ES_RCA4'. Διαγράμματα			
		υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....			98

Εικόνα 63. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'MPI_M_MPI_ESM_LR_CCLM4_8_17'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....	99
Εικόνα 64. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'MPI_M_MPI_ESM_LR_RCA4'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης. ....	101
Εικόνα 65. Διάγραμμα σύγκρισης πραγματικών μετρήσεων - αποτελεσμάτων FEFLOW για το νοτιότερο πηγάδι παρατήρησης στην περιοχή μελέτης. ....	103
Εικόνα 66. Μεταβολή της θερμοκρασίας στον πλανήτη σύμφωνα με το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 (IPCC a, 2014). ....	105

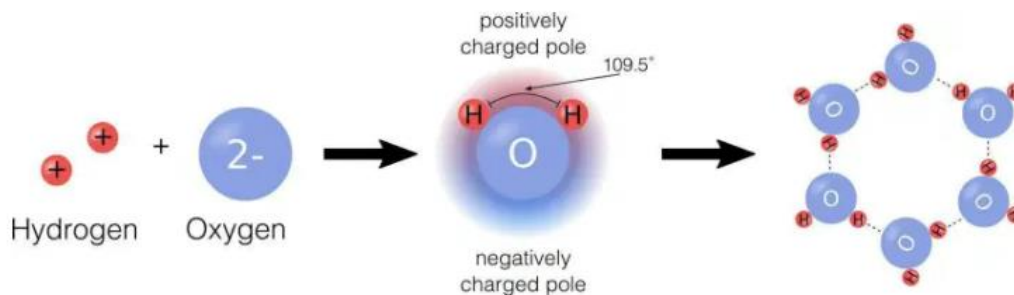
## **1. Εισαγωγή**

### **1.1 Σκοπός της Εργασίας**

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των υποχρεώσεων για την απόκτηση του μεταπτυχιακού διπλώματος στο πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών στην σχολή Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος με ειδίκευση στην «Διαχείριση Νερού και Υγρών Αποβλήτων» από τον φοιτητή Διακοπαρασκευά Παρασκευά. Εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής υπό την επίβλεψη του Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Καρατζά Γεωργίου. Η εργασία αυτή μελετά την κατάσταση των υπογείων υδάτων στην περιοχή των Μαλίων, στο βόρειο τμήμα του Νομού Ηρακλείου. Η περιοχή μελέτης αποτελείται από την λεκάνη των Μαλίων. Η μοντελοποίηση της περιοχής πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του μοντέλου FEFLOW χρησιμοποιώντας δεδομένα από την περίοδο 01/2000 – 12/2012. Στην συνέχεια χρησιμοποιήθηκε το υπάρχον μοντέλο με σκοπό την πρόβλεψη της μεταβολής της στάθμης των υπογείων υδάτων χρησιμοποιώντας 17 διαφορετικά κλιματικά σενάρια για την περίοδο 2012 έως το 2099.

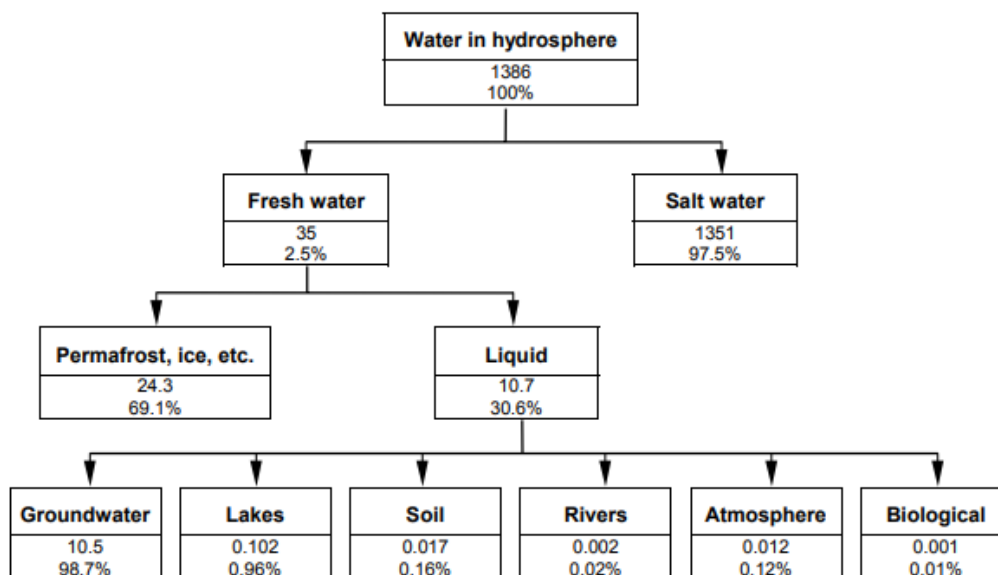
### **1.2 Νερό**

Το νερό είναι η περισσότερο διαδεδομένη ανόργανη χημική ένωση στην επιφάνεια της γης. Το νερό υπάρχει σε αέρια, υγρή και στερεή κατάσταση. 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. Το νερό αποτελεί συνολικά το 60-75% του σωματικού μας βάρους και είναι πολύ σημαντικό καθώς την κατανάλωση του οι άνθρωποι δεν μπορούν να επιβιώσουν πάνω από 3 μέρες. Το νερό μοριακά έχει πολύ απλή δομή καθώς αποτελείται από 2 θετικά φορτισμένα υδρογόνα και ένα αρνητικά φορτισμένο οξυγόνο. Ο μοριακός του τύπος είναι  $H_2O$ . Όταν τα υδρογόνα δεσμεύονται από το οξυγόνο δημιουργείται ένα ασύμμετρο μόριο το οποίο είναι από την μία πλευρά θετικά φορτισμένο και από την απέναντι πλευρά αρνητικά φορτισμένο όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Χημεία του Νερού. (Molly, 2019)

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 97.5% είναι αλμυρό και μόλις το 2.5% είναι γλυκό. Από την ποσότητα αυτή του γλυκού νερού το 69.1% περίπου βρίσκεται στην μορφή του πάγου, και το 30.9% βρίσκεται σε υγρή μορφή. Από αυτή την ποσότητα το 98.7% βρίσκεται στο έδαφος που είναι και η σημαντικότερη πηγή για τις ανθρώπινες δραστηριότητες μόλις το 0.98% αποτελεί τα επιφανειακά νερά όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2. Στο παρακάτω διάγραμμα εμφανίζεται ο όγκος του νερού πάνω από το ποσοστό ο οποίος είναι σε 1000 km<sup>3</sup>. (UNESCO, 1978) Η Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) έχει υπολογίσει επίσης την ποσότητα του νερού του πλανήτη και τα αποτελέσματα της είναι πολύ κοντά με αυτά της UNESCO.



Εικόνα 2. Η Ποσότητα του νερού στον Πλανήτη. (UNESCO, 1978)

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. (European Commission, 2006)

### 1.3 Υδρολογικός Κύκλος

Ο κύκλος του νερού ή υδρολογικός κύκλος 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. Ένα ποσοστό από το νερό το οποίο βρίσκεται στους επιφανειακούς υδατικούς πόρους (ωκεανούς, λίμνες, θάλασσες κλπ) εξατμίζεται με την βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας και τα ανοδικά ρεύματα αέρα ανεβάζουν τους υδρατμούς στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Εκεί λόγω της χαμηλής πίεσης και θερμοκρασίας οι υδρατμοί συμπυκνώνονται και σχηματίζουν τα σύννεφα. Αυτά κινούνται με τα ρεύματα του αέρα γύρω από τον πλανήτη. Κατά την διάρκεια της κίνησης του συγκρούονται τα σταγονίδια μεταξύ τους και μεγαλώνουν σε μέγεθος. Στην συνέχεια επιστρέφουν 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 (Gleick, 1996) (USGS, 2022).



Εικόνα 3. Ο κύκλος του νερού ή υδρολογικός κύκλος. (USGS, 2022)

Η Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS) έχει διακρίνει 16 στάδια στον υδρολογικό κύκλο:

- Αποθήκευση νερού στη θάλασσα
- Αποθήκευση υπόγειου νερού
- Εξάτμιση
- Πηγές
- Εξάχνωση
- Διήθηση
- Αποθήκευση του νερού στην ατμόσφαιρα
- Συμπύκνωση
- Κατακρημνίσματα
- Αποθήκευση νερού σε πάγους και χιόνια
- Ροή σε υδατορεύματα
- Απορροή από λιώσιμο του χιονιού
- Επιφανειακή απορροή
- Εξατμισοδιαπνοή
- Αποθήκευση γλυκού νερού
- Εκφόρτιση υπόγειου νερού

## 1.4 Υδροφορείς

Υδροφορέας είναι ένας υπεδάφιος σχηματισμός ο οποίος περιέχει σημαντικές ποσότητες διαπερατών υλικών τα οποία είναι κορεσμένα με νερό. Αυτά προμηθεύουν φρέατα και πηγές με υδατικές ποσότητες. Τέτοιοι σχηματισμοί συνίστανται από άμμο και χάλικες. Οι περισσότεροι υδροφορείς οι οποίοι εκτείνονται σε μεγάλες εκτάσεις μπορούν να θεωρηθούν σαν υπόγειες δεξαμενές. Οι υδροφορείς ταξινομούνται σε ελεύθερους και περιορισμένους. Οι περιορισμένοι υδροφορείς πολλές φορές αναφέρονται και ως αρτεσιανοί υδροφορείς. (Καρατζάς, 2022)

- Οι ελεύθεροι υδροφορείς είναι αυτοί οι οποίοι έχουν ως κάτω όριο ένα αδιαπέρατο γεωλογικό στρώμα και άνω όριο την ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Ο όγκος του νερού που βρίσκεται σε έναν ελεύθερο υδροφορέα δεν είναι σταθερός και μεταβάλλεται ανάλογα με την μεταβολή της στάθμης του νερού.
- Οι περιορισμένοι υδροφορείς είναι αυτοί οι οποίοι βρίσκονται ανάμεσα από δύο αδιαπέρατα γεωλογικά στρώματα. Είναι κορεσμένοι σε όλο το πάχος τους και το νερό μέσα σε αυτούς βρίσκεται υπό πίεση. Η πιεζομετρική επιφάνεια είναι το νοητό σημείο στο οποίο θα βρισκόταν η στάθμη του περιορισμένου υδροφορέα αν δεν βρισκόταν υπό πίεση. (Canada.ca, 2022)

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:

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

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

Όπου:

$\tau$ : η επιφανειακή τάση

$\varepsilon$ : 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:

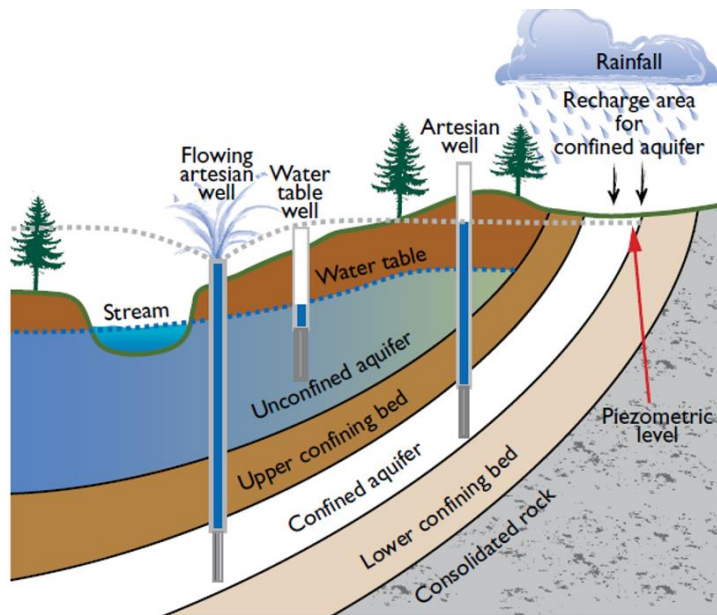
$V_w$ : είναι ο όγκος του νερού

$V_T$ : 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)

### **Αρτεσιανά Πηγάδια**

Αρτεσιανό πηγάδι είναι αυτό το οποίο αντλεί νερό από τον περιορισμένο υδροφορέα (αρτεσιανό υδροφορέα). Η στάθμη του νερού μέσα στο πηγάδι αυξάνεται μέχρι την νοητή πιεζομετρική επιφάνεια. Σε μερικές περιπτώσεις όπου η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους το νερό ρέει αυτόματα με την μορφή πίδακα. Στην *Εικόνα 4* απεικονίζονται σχηματικά οι διαφορές των πηγαδιών. (Canada.ca, 2022)



Εικόνα 4. Γεωλογικό και τοπογραφικό σχήμα απεικόνισης αρτεσιανού και ρέον αρτεσιανού πηγαδιού. (USGS, 2022)

## 1.5 Παράμετροι Υδροφορέων

### Πορώδες

Το πορώδες είναι ο λόγος μεταξύ του όγκου που καταλαμβάνεται από τον αέρα και το νερό προς το συνολικό όγκο μια ποσότητας εδάφους. Στις καλλιέργειες το πορώδες είναι πολύ σημαντικό καθώς το νερό, ο αέρας και τα θρεπτικά συστατικά του εδάφους εξαρτώνται από αυτό. Μικροί πόροι οι οποίοι βρίσκονται στις ρίζες των φυτών δίνουν την δυνατότητα στο έδαφος να αποθηκεύσει νερό και αέρα τα οποία είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη του. Το πορώδες καθώς και η κατανομή των πόρων επηρεάζουν πολλές από τις υδραυλικές ιδιότητες του εδάφους όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, η κατακράτηση νερού, την διείσδυση του νερού στο έδαφος καθώς και την ποσότητα νερού που μπορεί να αποθηκεύσει. (Indoria et al., 2020)

Το πορώδες του εδάφους κυμαίνεται περίπου από 20-60%. Ο τύπος από τον οποίο υπολογίζεται το πορώδες του εδάφους είναι:

$$n = \frac{V_{\text{κενών}}}{V_o}$$

Όπου:

$n$ : το πορώδες

$V_{\text{κενών}}$ : Ο όγκος των κενών που καταλαμβάνεται από νερό και αέρα ( $L^3$ )

$V_o$ : Ο συνολικός όγκος του δείγματος ( $L^3$ ) (Καρατζάς, 2022).

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. Το ενεργό πορώδες υπολογίζεται από τον τύπο:

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

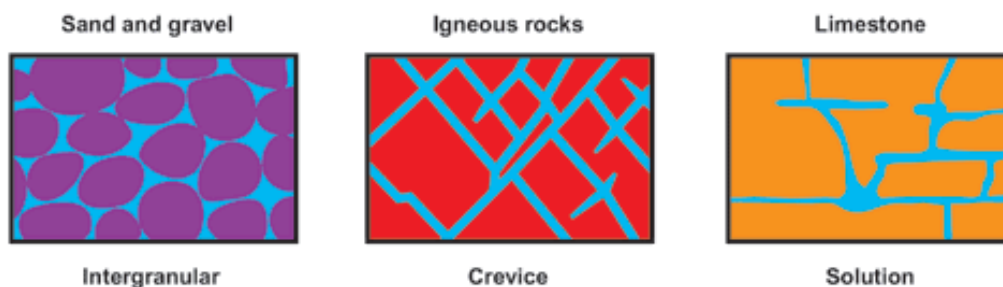
Όπου:

$n_e$ : το ενεργό πορώδες

$V_Y$ : Ο όγκος νερού που μπορεί να στραγγιστεί κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, δηλαδή ο όγκος νερού που περιέχεται εντός των ενεργών πόρων. ( $L^3$ )

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

### Main types of porosity



Εικόνα 5. Διάφορες αναπαραστάσεις για την κάλυψη των κενών από το νερό στους υδροφόρους ορίζοντες. (Canada.ca, 2022)

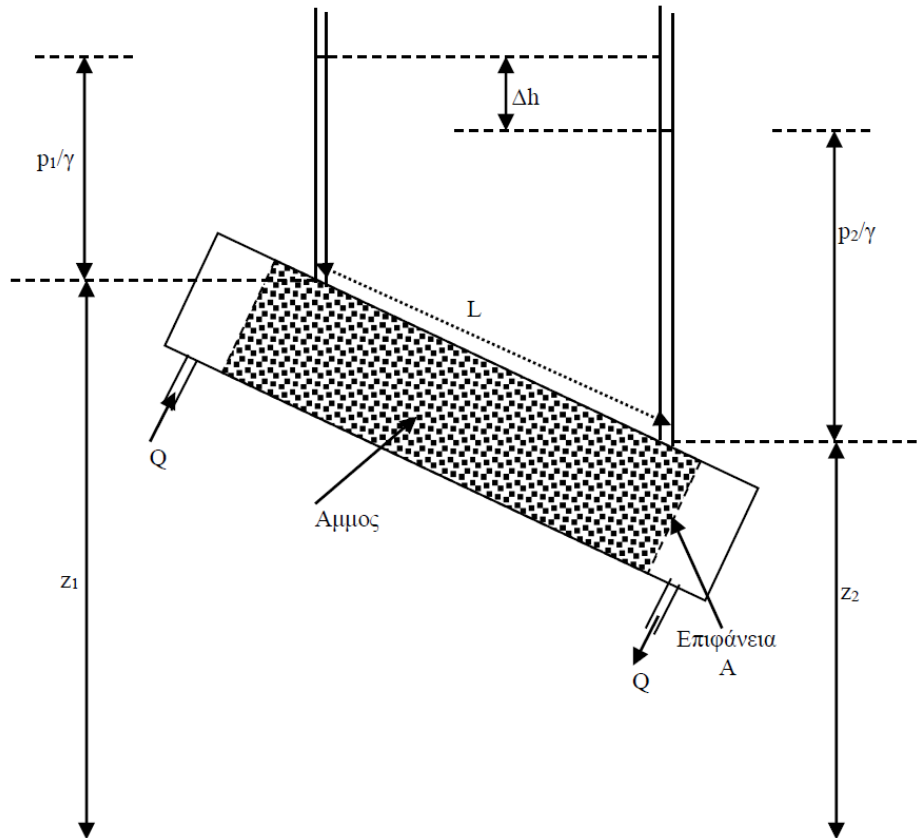
Το υπόγειο νερό κάποιες φορές μπορεί να ρέει σε υπόγεια ποτάμια ή να βρίσκεται σε υπόγειες λίμνες. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως βρίσκεται παντού. Ανάμεσα στα κενά που δημιουργούνται μεταξύ των διαφόρων κόκκων ή χαλίκιων ή σε ρωγμές στα διάφορα πετρώματα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5. Αυτά τα κενά που εμφανίζονται βρίσκονται σε σχετικά μικρά βάθη καθώς στα μεγάλα βάθη τα κενά αυτά είναι πολύ μικρότερα λόγω του βάρους τους εδάφους. (Canada.ca, 2022)

## Υδραυλική Αγωγιμότητα

Υδραυλική αγωγιμότητα ενός εδάφους χαρακτηρίζεται η ικανότητα ενός ρευστού να περάσει μέσα από τους πόρους ή τις ρωγμές των πετρωμάτων. Η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους που βρίσκεται σε κάθε περιοχή. (Saravanan et al., 2018)

Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους για τους υδροφορείς και παρόλα αυτά είναι η πιο ασταθής μεταβλητή. Η πιο αξιόπιστη μέθοδος για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας είναι μέσω των πηγαδιών. Όταν δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν δοκιμές στον υδροφορέα η υδραυλική αγωγιμότητα εκτιμάται μέσω των κόκκων του εδάφους ή από την βιβλιογραφία όταν είναι γνωστή η γεωλογία. Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να διαφέρει αρκετές τάξεις μεγέθους μεταξύ 2 εδαφών τα οποία βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές και αποτελούνται από τα ίδια υλικά. Μεγάλες διαφορές αρκετών τάξεων μεγέθους μπορούν να παρατηρηθούν σε ίδιους γεωλογικούς σχηματισμούς οι οποίοι βρίσκονται ακόμη και στον ίδιο υδροφορέα. (Lu, 2015)

Ο Henry Darcy απέδειξε ότι, για γραμμική ροή μέσα σε κύλινδρο όπως φαίνεται στην Εικόνα 6 υπάρχει αναλογία μεταξύ της ποσότητας του νερού που διέρχεται στη μονάδα του χρόνου και της απώλειας δυναμικού μεταξύ δύο σημείων της διαδρομής του νερού. Θεώρησε ένα συντελεστή  $k$  για να αποδώσει την αναλογία αυτή..(Καρατζάς, 2022)



Εικόνα 6. Απεικόνιση της πειραματικής διάταξης του Darcy. (Καρατζάς, 2022)

Η μαθηματική έκφραση του νόμου του Darcy είναι:

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

Όπου:

Q: είναι η παροχή ( $L^3/T$ )

A: είναι η επιφάνεια ( $L^2$ )

K: είναι η υδραυλική αγωγιμότητα ( $L/T$ )

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

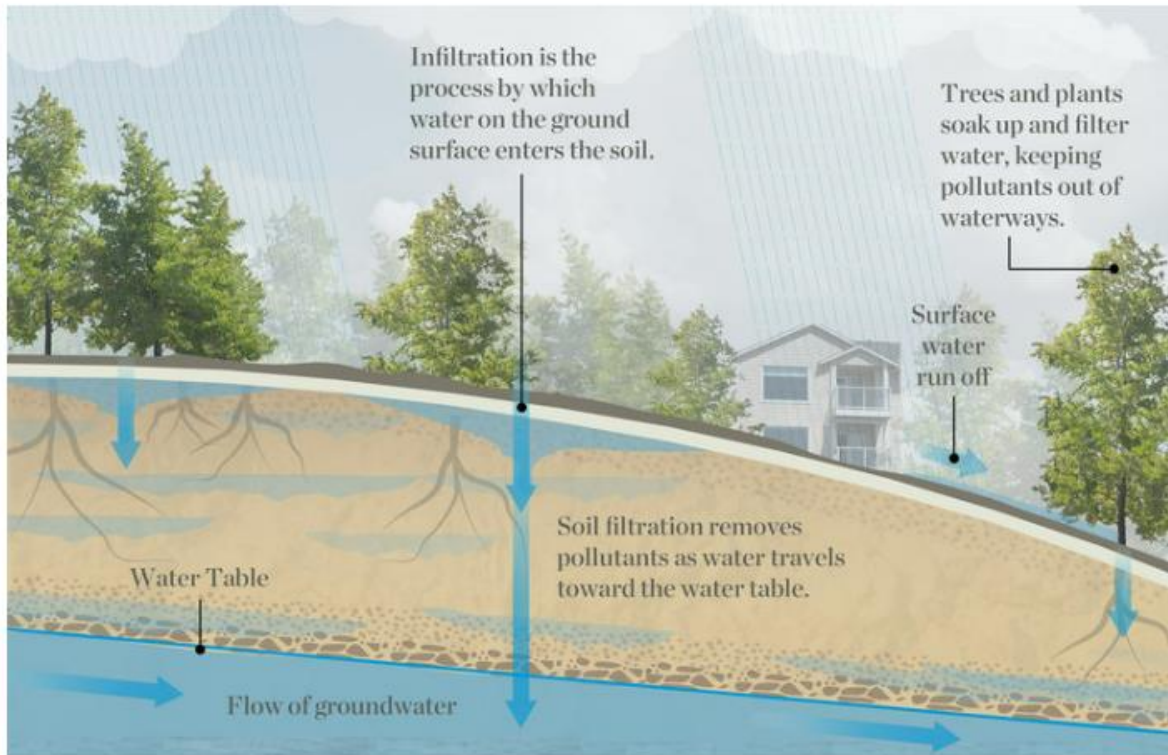
L: είναι το μήκος της στήλης (L)

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

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

### **Διείσδυση**

Η διείσδυση ορίζεται ως η ροή του νερού από την επιφάνεια του εδάφους προς το υπέδαφος όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7. Είναι μία πολύ σημαντική παράμετρος η οποία έχει μελετηθεί από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα. Η παράμετρος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα θεμάτων όπως η άρδευση, η ρύπανση των εδαφών από επιφανειακούς ρυπαντές, επαναφόρτιση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων καθώς και την βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων. Γενικώς η ποσοτική κατανόηση της διαδικασίας της διείσδυσης είναι σημαντική για την περιγραφή του υδρολογικού κύκλου. (Ferré & Warrick, 2004)



Εικόνα 7. Η απεικόνιση της διείσδυσης του νερού από την επιφάνεια του εδάφους προς το υπέδαφος. (Kett, 2017)

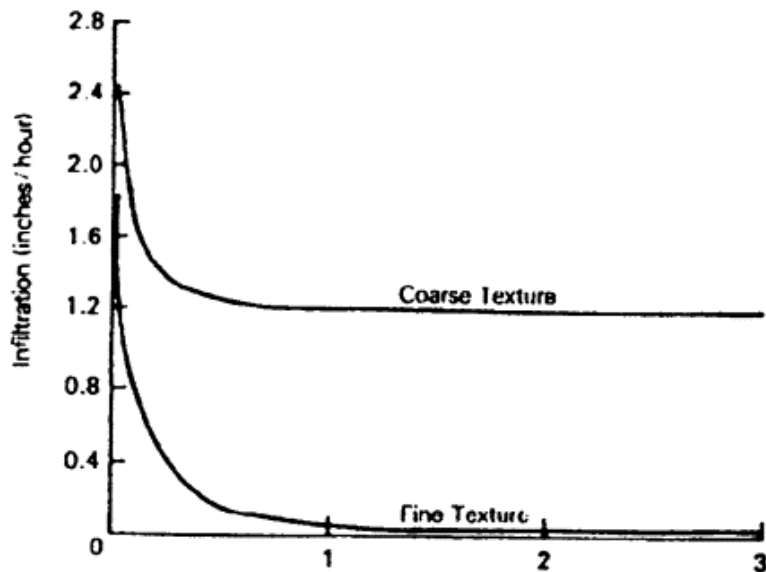
Το πιο απλό παράδειγμα της διείσδυσης μπορεί να περιγραφεί σαν μονοδιάστατη ροή κάθετα στην επιφάνεια του εδάφους. Οι πιο απλές επιφανειακές οριακές συνθήκες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι η οριακή συνθήκη τύπου 1 (Dirichlet boundary condition) όπου αυτή περιγράφει την εφαρμογή του νερού σαν ένα συνεχές πιεζομετρικό φορτίο (λίμνη, ποτάμι). Επίσης η εφαρμογή νερού σε διάφορους ρυθμούς και εντάσεις αποτελεί την οριακή συνθήκη τύπου 2 (Neumann boundary condition) η οποία είναι και η ευκολότερη στην κατανόηση καθώς προκαλείται από την βροχόπτωση. (Ferré & Warrick, 2004)

Οι μονάδες μέτρησης της διείσδυσης είναι μέτρα προς μονάδα χρόνου άσχετα με τις δυνάμεις τις οποίες ασκούνται πάνω στον νερό. Συχνά ο όρος της διείσδυσης μπερδεύεται με την υδραυλική αγωγιμότητα. Η υδραυλική αγωγιμότητα έχει μονάδες μέτρησης μέτρα προς χρόνο κάτω από την επίδραση της βαρυτικής δύναμης ή της υδραυλικής κλίσης. Αν 2 σταγόνες νερού με συνολικό όγκο  $2 \text{ mm}^3 = 0,000002 \text{ m}^3$  πέσουν το έδαφος σε μία ημέρα σε ένα τετραγωνικό μέτρο εδάφους τότε ο ρυθμός διείσδυσης είναι  $0.000002 \text{ m/day}$ . (Kirkham, 2014)

Η μέγιστη ποσότητα του νερού που μπορεί να διεισδύσει στο έδαφος εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες όπως:

- Προγενέστερη βροχόπτωση και υγρασία του εδάφους. Η υγρασία του εδάφους κυμαίνεται εποχικά από πολύ υψηλή τον χειμώνα και την άνοιξη σε πολύ χαμηλή κατά την διάρκεια του καλοκαιριού. Αν το έδαφος είναι αφυδατωμένο και βραχεί το επάνω μέρος του μόνο δημιουργούνται ισχυρά τριχοειδή φαινόμενα με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί πηλός και το έδαφος να φουσκώσει και να μειώσει την διείσδυση του για ένα μικρό χρονικό διάστημα όταν ξεκινήσει η βροχή.
- Συμπύεση του εδάφους λόγω της πρόσκρουσης των σταγονιδίων της βροχής
- Έκπλυση μικροσκοπικών σωματιδίων στα ανοίγματα του εδάφους μειώνοντας την διείσδυση του νερού. Σε ξηρά εδάφη είναι ακόμη σημαντικότερο αυτό το φαινόμενο.
- Συμπύεση του εδάφους από ζώα, δρόμους, μονοπάτια αστική ανάπτυξη κλπ.
- Διάφορες φυσικές παρεμβάσεις προωθούν την διείσδυση όπως ανοίγματα από ζώα που ζουν στο έδαφος, έντομα, φυτά που αποσυντίθενται, ρωγμές στο ξηρό έδαφος και άλλα
- Η χλωρίδα της περιοχής βοηθάει καθώς προάγει την αύξηση του πληθυσμού διάφορων οργανισμών που ζουν στο έδαφος, κατακρατά την επιφανειακή απορροή, μειώνει την διάβρωση και την συμπίεση από τις σταγόνες τις βροχής
- Η πτώση της θερμοκρασία
- Παγιδευμένος αέρα στην ακόρεστη ζώνη
- Κλίση του εδάφους (Cheremisinoff, 1997a).

Η ικανότητα του εδάφους στην διείσδυση αρχικά είναι υψηλή στην αρχή στην συνέχεια όμως μειώνεται όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8. Η ικανότητα διείσδυσης μειώνεται κατά την διάρκεια συνεχούς βροχόπτωσης. (Cheremisinoff, 1997a)

Τα λεπτόκοκκα εδάφη μετά από ώρες βροχόπτωσης βουλώνουν από τον πηλό και τα διάφορα σωματίδια και δεν επιτρέπουν στο νερό να περάσει σε αντίθεση με τα αμμώδη εδάφη τα οποία διατηρούν υψηλά την ικανότητα διείσδυσης για πολύ περισσότερο χρόνο. (Cheremisinoff, 1997a)

### 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:

$$T=kb$$

Όπου:

k: η υδραυλική αγωγιμότητα [L/T]

b: το κορεσμένο βάθος του υδροφορέα [L].(Καρατζάς, 2022)

### Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα ορίζεται ως η ικανότητα ενός πορώδους μέσου να επιτρέψει την κίνηση ενός ρευστού μέσο αυτού. Έχει επηρεάσει σημαντικά γεωτεχνικές και γεωλογικές μηχανικές δραστηριότητες. Η ικανότητα του να υπολογίζεται η μεταβολή της διαπερατότητας κάτω από διαφορετικές συνθήκες (μηχανικές, χημικές και θερμικές) είναι πολύ σημαντική στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στα υπόγεια νερά και όχι μόνο. (Ma, 2015)



Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές θεωρητικές και πειραματικές έρευνες οι οποίες προσπαθούν να υπολογίσουν την διαπερατότητα σύμφωνα με το πορώδες, την θερμοκρασία, τις διάφορες πιέσεις, χημικές διεργασίες κ.α. Γενικά 4 είναι οι κύριες κατηγορίες που βασίζονται τα μοντέλα υπολογισμού της διαπερατότητας:

1. Πορώδες
2. Πιέσεις και καταστροφές
3. Η έννοια του ισοδύναμου καναλιού
4. Μοντέλο δικτύου (Ma, 2015)

Η κατανομή της διαπερατότητας  $k$  στο υπέδαφος είναι πολύ σημαντική στην υδρολογία καθώς και σε πολλές σχετικές με το νερό επιστήμες για την αξιολόγηση του υδροφορέα και την απόδοση του κάτω από διαφορετικά σενάρια. Κάποια από αυτά τα σενάρια είναι η πρόβλεψη του πλουμίου μίας οργανικής διαλυτής ουσίας, επίσης η αξιολόγηση διαφόρων στρατηγικών αποκατάστασης από ρύπανση με πετρέλαιο κ.α. (Niu & Zhang, 2019)

Η διαπερατότητα αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους για τα εδάφη. Για κορεσμένο έδαφος η διαπερατότητα είναι πολύ εύκολο να υπολογιστεί με εμπειρικές μεθόδους για σταθερό λόγο κενού – κόκκων. Για ακόρεστα εδάφη η τιμή της διαπερατότητας εξαρτάται από αρκετές μεταβλητές και υπολογίζεται με την εξίσωση:

$$k_w = \frac{a_1 L}{a_2(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \times \frac{1}{100} / \left( 1 - \frac{L_E}{k_E} \frac{a_1}{a_2(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_1}{h_2} \right)$$

Όπου:

- $a_1$  και  $a_2$  είναι οι τομές όπου γίνεται η εισροή και η εκροή αντίστοιχα
- $L$  το πάχος του δείγματος του εδάφους
- $t_1$  και  $t_2$  είναι ο αρχικός και ο τελικός χρόνος κατά τον οποίο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις
- $L_E$  είναι το πάχος του πορώδους μέσου
- $k_E$  η ισοδύναμη τιμή της διαπερατότητας του πορώδους μέσου και υπολογίζεται με το τύπο

$$k_E = \frac{L_c + L_p}{L_p} \frac{k_p}{1 + \frac{k_p L_c}{k_c L_p}}$$

Όπου:

- $L_c$  και  $L_p$  αποτελούν το πάχος του πορώδους μέσου

- $k_c$  και  $k_p$  αποτελούν την διαπερατότητα του πορώδους μέσου (Gao & Chai, 2022)

Υπάρχουν πολλές εξισώσεις για τον υπολογισμό της διαπερατότητας για κορεσμένο έδαφος η εξίσωση που ακολουθεί είναι: (Taylor, 1950):

$$k_s = M \sum_{\rho=0}^{\sigma=R} \sum_{\sigma=0}^{\sigma=R} \sigma^2 f(\sigma) f(\rho) \delta_\gamma \delta_\gamma$$

Όπου:

$K_s$  είναι η διαπερατότητα για κορεσμένο μέσο

$M$  συντελεστής ο οποίος πρέπει να μετρηθεί

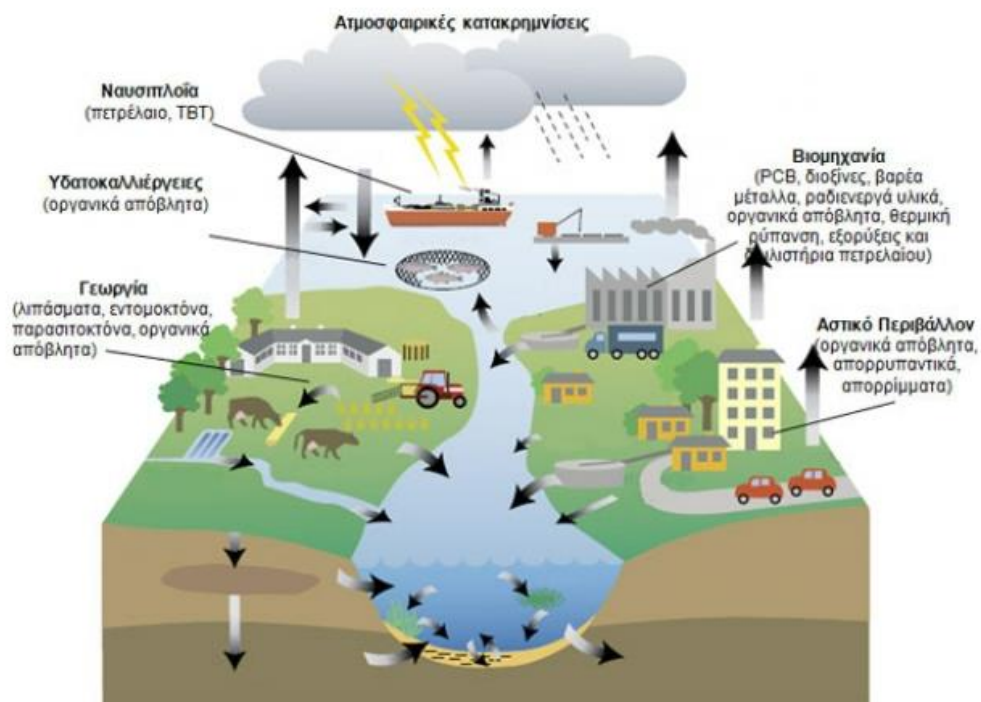
$\rho$ ,  $\sigma$ , και  $r$  είναι οι διαστάσεις των πόρων

$f(\sigma)$  μέγεθος πόρων

$f(\rho)$  πυκνότητα πόρων (Zhai et al., 2018)

## 1.6 Ρύπανση στους Υπόγειους Υδροφορείς

Είναι αποδεδειγμένο ότι η περιβαλλοντική ρύπανση είναι αποτέλεσμα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων κυρίως και σπάνιο από κάποιο φυσικό φαινόμενο όπως ηφαίστειο ή σεισμό. Η χρήση χημικών σε καλλιέργειες συμβάλλουν στην αύξηση των βαρέων μετάλλων και τοξικών ουσιών στο νερό και στο έδαφος. Η ρύπανση του υπόγειου νερού είναι αποτέλεσμα της μη αποτελεσματικής διαχείρισης των αστικών, αγροτικών και βιομηχανικών αποβλήτων. Οργανικές, ανόργανες ενώσεις και παθογόνοι μικροοργανισμοί μπορούν να βρεθούν σχεδόν σε όλους τους υπόγειους υδατικούς αποδέκτες. (Papaioannou et al., 2007)



Εικόνα 9. Μεταφορά των ρύπων από το έδαφος στα επιφανειακά και στην συνέχεια στα υπόγεια νερά. (Vegan-to-be, 2018)

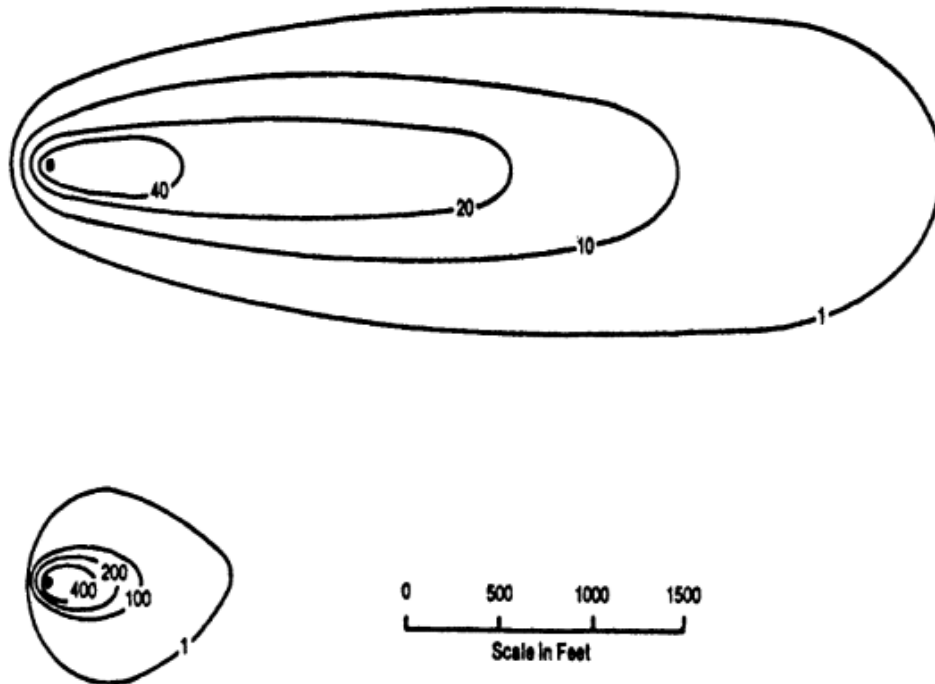
Σε κάθε μελέτη που γίνεται για την ρύπανση των υπογείων υδάτων πρέπει να μελετιούνται οι ρύποι που υπάρχουν σε αυτό και ειδικότερα αυτοί που υπάρχουν στο νερό φυσικά και αυτοί που προκαλούν την ρύπανση του. Είναι πολύ δύσκολο να μελετηθεί το ιστορικό ενός υδροφορέα καθώς κατά την διάρκεια του χρόνου αλλάζει συνεχώς η χημική ποιότητα του νερού. Η σοβαρότητα της ρύπανσης του νερού οφείλεται κυρίως:

- στα χαρακτηριστικά του ρύπου
- στην ποσότητα που έχει εισέλθει στον υδροφορέα
- στην συγκέντρωση του ρύπου
- στο μέγεθος της έκτασης στην οποία έχει ελευθερωθεί ο ρύπος
- και στην πυκνότητα του. (Cheremisinoff, 1997b)

Ο ρύπος αρχικά ξεκινά να κατεβαίνει προς τον υδροφορέα περνώντας από την ακόρεστη ζώνη όπου κατά την διάρκεια της καθόδου του ασκούνται δυνάμεις φυσικές, χημικές και βιολογικές. Όταν φτάσει στην κορεσμένη ζώνη τότε ακολουθεί κυρίως οριζόντια κατεύθυνση όπως καθορίζεται από την υδραυλική κλίση. Από αυτό το σημείο και έπειτα ο ρύπος διαλύεται μέσα στο νερό λόγω πολλών διαδικασιών και διεργασιών που συμβαίνουν ταυτόχρονα (Εικόνα 10) όπως:

- Φίλτρωση
- Ρόφηση

- Χημικές αντιδράσεις
- Μικροβιακή αποδόμηση
- Διασπορά
- Χρόνος
- Απόσταση που έχει διανύσει (Cheremisinoff, 1997b)



Εικόνα 10. Μέγεθος και συγκέντρωση στο πλούμιο σε σχέση με την ταχύτητα του υπογείου νερού. Στην πάνω εικόνα η ταχύτητα είναι 1.5 ft/d και στην κάτω είναι 0.5 ft/d. (Cheremisinoff, 1997b)

Περίπου 2.3 δισεκατομμύρια άνθρωποι παγκοσμίως δεν έχουν επαρκή υγιεινή και 844 εκατομμύρια δεν έχουν πρόσβαση σε ασφαλές πόσιμο νερό. Από την άλλη πλευρά στις αναπτυσσόμενες χώρες οι άνθρωποι έχουν πρόσβαση σε πόσιμο νερό το οποίο είναι επικίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Παγκοσμίως το 80% των υγρών αποβλήτων απελευθερώνεται στο περιβάλλον χωρίς επαρκή επεξεργασία. (UNESCO, 2018)

Οι παράκτιες περιοχές παρουσιάζουν μία περίπλοκη και δυναμική αλληλεπίδραση μεταξύ ξηράς και θάλασσας. Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις της ανθρωπότητας είναι η περιβαλλοντική διαχείριση αυτών των περιοχών καθώς το μεγαλύτερο μέρος του παγκόσμιου πληθυσμού ζει σε παράκτιες περιοχές. Η μεγαλύτερη ανάγκη για τους ανθρώπους είναι η κάλυψη της ανάγκης του νερού. Η ποιότητα του νερού είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ανθρώπινη υγεία. Η βιώσιμη διαχείριση του νερού ποσοτικά και ποιοτικά είναι απαραίτητη καθώς επηρεάζει την οικονομική ανάπτυξη και την κοινωνική ευημερία. Οι επιρρεπείς παράκτιες περιοχές

επηρεάζονται από την αύξηση του πληθυσμού και έτσι μειώνονται τα αποθέματα του υπόγειου νερού. Οι κύριες ανθρωπογενείς δραστηριότητες οι οποίες υποβαθμίζουν την στάθμη του υδροφορέα είναι η υπεράντληση, η χρήση του νερού για άρδευση και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη για ύδρευση. (Papazotos et al., 2019)

Οι κύριοι ρύποι οι οποίοι βρίσκονται στους υπόγειους υδροφορείς σύμφωνα με το ΙΓΜΕ (Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών) είναι:

1. Υφαλμύριση σε παράκτιες ζώνες λόγω υπεράντληση
2. Νιτρορύπανση από υπερλίπανση των εδαφών
3. Βαρέα μέταλλα και τοξικά ιχνοστοιχεία

### **Υφαλμύριση**

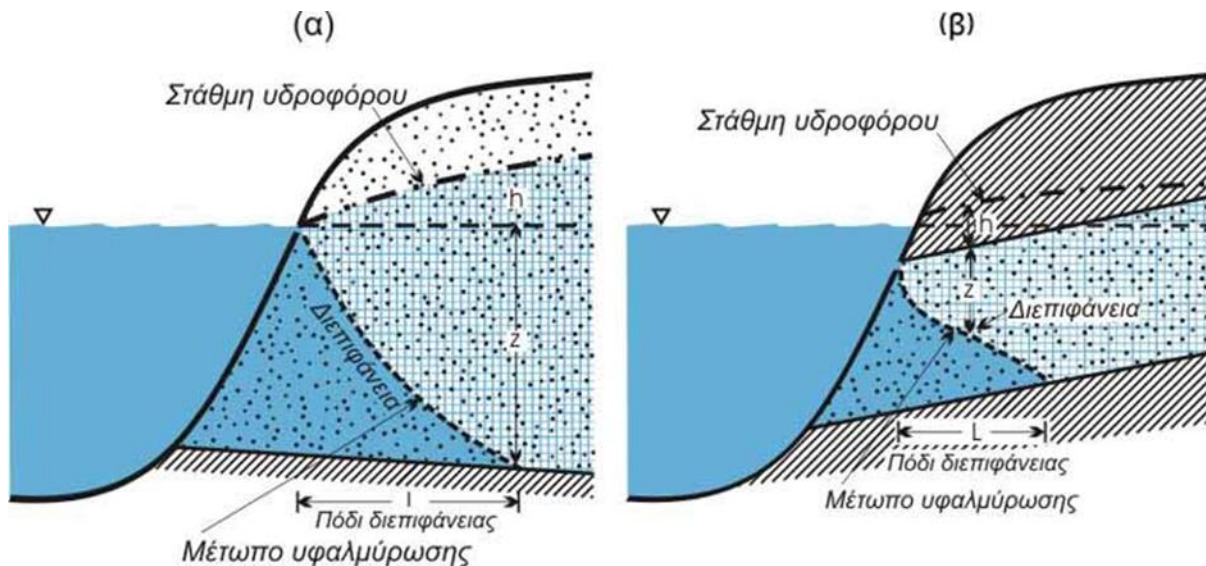
Η διείσδυση αλμυρού νερού στους παράκτιους υδροφορείς είναι ένα πολύ συχνό πρόβλημα που προκαλεί υφαλμύριση του υδροφορέα. Στην Μεσόγειο το πρόβλημα αυτό παρατηρείται σε πολλές περιοχές και προκαλείται από την υπεράντληση του υπογείου νερού και του ημίξηρου κλίματος που δεν επαναφορτίζει τους υδροφορείς με τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο αδειάζουν. Το πρόβλημα της υφαλμύρισης θέτει σε κίνδυνο την μελλοντική εκμετάλλευση των υδροφορέων. Στην Ελλάδα το πρόβλημα αυτό παρατηρείται σε πολλές παράκτιες περιοχές όπου τα πηγάδια πλέον αντλούν υφάλμυρο νερό όπως εμφανίζεται και στην Εικόνα 11.(Petalas et al., 2009)

Το νερό με υψηλή αλατότητα εκτός από το γεγονός ότι δεν είναι πόσιμο δημιουργεί προβλήματα στις καλλιέργειες όπως την μείωση της σοδιάς καθώς και σε κάποιες περιπτώσεις την καταστροφή. Όταν η αλατότητα ξεπεράσει το νομοθετικό όριο για το πόσιμο νερό τότε παύει η λειτουργία του πηγαδιού άντλησης. Οι διαδικασίες μεταφοράς και ροής αλμυρού νερού μέσα σε έναν υδροφορέα καθώς και η αντίδραση που έχει με το έδαφος δεν είναι πλήρως κατανοητές. Αυτό οφείλεται στην ετερογένεια που έχουν οι εδαφικοί σχηματισμοί. Αυτές οι ετερογένειες μπορούν να διαφέρουν τοπικά και χρονικά, καθώς μπορούν να δημιουργούν μονοπάτια μέσα στον υδροφορέα και ανομοιόμορφες χημικές αντιδράσεις. (Petalas et al., 2009)



Εικόνα 11. Το πρόβλημα της υπαλμύρινης σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας. (Βουδούρης, 2011)

Η εισροή θαλασσινού νερού στους υδροφορείς των παράκτιων υδροφορέων είναι το σημαντικότερο τους πρόβλημα το οποίο επηρεάζει σε μικρότερο ή μεγαλύτερο βαθμό του περισσότερους παράκτιους υδροφορείς. Η μορφή της ζώνης υπαλμύρινης που δημιουργείται εμφανίζεται στην Εικόνα 12. Κυρίως το καλοκαίρι όπου οι περισσότερες παράκτιες περιοχές δέχονται πολλούς τουρίστες και αυξάνεται η κατανάλωση του νερού. Σε αυτή την περίπτωση οι αγρότες στις παράκτιες περιοχές αναγκάζονται να ποτίζουν με υφάλμυρο νερό και να θέτουν σε κίνδυνο την σοδιά τους. Το πρόβλημα της εισροής αλμυρού νερού στους υδροφορείς έχει μελετηθεί αρκετά σε πολλές χώρες τις Μεσογείου όπου το κλίμα είναι ξηρό όπως και της Ελλάδας. (Telahigue et al., 2020)



Εικόνα 12. Μέτωπο Υφαλμύρισης. (Βουδούρης, 2011)

### Ρύπανση από λίπανση των εδαφών

Η συνεχής επιδείνωση της ποιότητας του νερού δεν οφείλεται μόνο στην εισροή θαλασσινού νερού στους υδροφορείς αλλά και στην μεγάλη χρήση λιπασμάτων από τους αγρότες. Το άζωτο είναι πλέον ένας από τους πιο συνηθισμένους χημικούς ρυπαντές που βρίσκονται στα υπόγεια νερά σε ολόκληρο τον πλανήτη. Το δημιουργείται και με φυσικές διεργασίες ή από τις ανθρώπινες δραστηριότητες οι οποίες μπορεί να είναι σημειακές όπως (βόθρος, εκροή εγκατάστασης υγρών αποβλήτων, εκροή χημικού εργοστασίου) η μη σημειακές όπως (χρήση αζωτούχων λιπασμάτων, ζιζανιοκτόνα, ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις κ.α.). (Feng et al., 2022)

Από τους παραπάνω λόγους η χρήση αζωτούχων λιπασμάτων έχει γίνει ο πιο διαδεδομένος τρόπος μη σημειακής ρύπανσης υπογείων υδάτων. Η υψηλή ποσότητα με την οποία χρησιμοποιείται το αζωτούχο λίπασμα σε συνδυασμό με το πότισμα δημιουργούν ένα μίγμα το οποίο καταλήγει μέσω την απόπλυσης στον υπόγειο υδροφόρο. Από την μεριά της υγείας των ανθρώπων έρευνες έχουν δείξει ότι το άζωτο μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες στην ανθρώπινη υγεία όπως καρκίνο του θυροειδή και μεθεμοσφαιριναιμία. (Feng et al., 2022)

Νιτρικά οποία απορρέουν από καλλιεργήσιμη γη μπορούν να προκαλέσουν ευτροφισμό αναλόγως με την αλληλεπίδραση των επιφανειακών και τον υπόγειων νερών. Τα νιτρικά μπορούν να μειωθούν με μία διεργασία η οποία ονομάζεται απονιτροποίηση αν υπάρχουν ιδανικές συνθήκες μέσα στο έδαφος. Ο ρυθμός της απονιτροποίησης συχνά σχετίζεται με την ποσότητα του διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC) στα υπόγεια νερά. Αν η ποσότητα του DOC είναι

χαμηλή και γίνει περιοριστικός παράγοντας, άλλοι “δωρητές ηλεκτρονίων” θα πάρουν την θέση του. (Collins et al., 2017)

## **Βαρέα Μέταλλα**

Στην Ελλάδα δεν συναντάται συχνά η ρύπανση των υπογείων υδάτων από βαρέα μέταλλα εκτός από λίγες περιοχές όπου υπάρχουν λατομία και εκροές εργοστασίων που επεξεργάζονται μεταλλεύματα. Η ρύπανση με βαρέα μέταλλα συνιστά ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που συναντάται σε όλο τον κόσμο λόγω της τοξικότητας, της επιμονής και της έκθεσης τους οικοσυστήματος σε συνεχή κίνδυνο. Η αξιολόγηση και η εκτίμηση της ρύπανσης είναι ζήτημα ζωής η θανάτου. Υπάρχουν φυσικές πηγές ρύπανσης από βαρέα μέταλλα όπως:

- Διάβρωση πετρωμάτων
- Αποδόμηση οργανικής ύλης
- Ατμοσφαιρικά ραδιενεργά κατάλοιπα (Sharma et al., 2022)

Οι κύριες πηγές ρύπανσης με βαρέα μέταλλα είναι ανθρωπογενείς όπως:

- Βιομηχανία εξόρυξης
- Επεξεργασία πετρωμάτων
- Γεωργικά απόβλητα
- Βιομηχανικά απόβλητα
- Χώροι υγειονομικής ταφής στερεών αποβλήτων
- Ιατρικά απόβλητα (Sharma et al., 2022)

Τα βαρέα μέταλλα θεωρούνται από τους πιο επικίνδυνους και επίμονους ρυπαντές οι οποίοι μπορούν να βρεθούν στην φύση λόγω της υψηλής τοξικότητας τους και της ικανότητας τους να μεταφέρονται μέσω της τροφικής αλυσίδας. Ακόμα και σε μικρές συγκεντρώσεις έχουν την ικανότητα να βιοσυσσωρεύονται. Τα βαρέα μέταλλα μπορούν να προσληφθούν εύκολα μέσω των υπογείων υδάτων και να δημιουργήσουν προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία (Sharma et al., 2022) όπως καρκίνο, Αλτσχάιμερ, και άλλες νευρολογικές παθήσεις. (Boumazza et al., 2021)

Υπάρχουν μερικά βαρέα μέταλλα τα οποία ακόμη και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις είναι τοξικά για τον άνθρωπο κάποια από αυτά είναι:

- Αρσενικό (As)
- Παλλάδιο (Pb)
- Υδράργυρος (Hg)
- Άργυρος (Ag) κ.α (Uugwanga & Kgabi, 2021)



Υπάρχουν όμως και αρκετά βαρέα μέταλλα τα οποία είναι απαραίτητα στον άνθρωπο σε χαμηλές συγκεντρώσεις αλλά σε υψηλές είναι τοξικά όπως:

- Μαγνήσιο (Mg)
- Μαγγάνιο (Mn)
- Νικέλιο (Ni)
- Σίδηρος (Fe)
- Ψευδάργυρος (Zn) και
- Χαλκός (Cu) (Uugwanga & Kgabi, 2021)

### 1.7. Γενικές Πληροφορίες Περιοχής Μελέτης

Η περιοχή μελέτης αποτελείται από τον υπόγειο υδροφορέα στην περιοχή της χερσονήσου στην βόρεια πλευρά του νησιού της Κρήτης. Βρίσκεται στον νομό Ηρακλείου σε απόσταση περίπου 40 χιλιομέτρων ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου και αποτελείται από την πόλη των Μαλίων και των γύρω χωριών όπως φαίνεται και στην Εικόνα 14. Η πόλη των Μαλίων βρίσκεται στους πρόποδες του βουνού Σελίνα. Οι αρχαιολογικές εκσκαφές που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή δείχνουν ότι η πόλη κατοικείτο από το 2800 π.Χ. έως το 1200 π.Χ. (Lespez et al., 2003)



Εικόνα 13. Τοποθεσία της περιοχής των Μαλίων επάνω στο νησί της Κρήτης όπως εμφανίζεται σε χάρτη του ευρωπαϊκού προγράμματος Sustain Coast . (Sustain\_Coast, 2022)



*Εικόνα 14. Τα όρια της περιοχή μελέτης με base map δορυφορικές εικόνες όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα ArcGIS.*

Η περιοχή των Μαλίων εκτός από την εκτεταμένη τουριστική ανάπτυξη τα τελευταία 50 χρόνια λόγω του πανέμορφου τοπίου, της ιστορικής κληρονομιάς και του κλίματος (N. J. Lambarakis, 1998) είναι μία περιοχή στην οποία υπάρχουν πολλές καλλιέργειες. Οι κύριες καλλιέργειες στην περιοχή των Μαλίων είναι Ελαιώνες και καλλιέργεια πατάτας υπάρχουν όμως και άλλες καλλιέργειες οι οποίες πραγματοποιούνται σε μικρότερα ποσοστά όπως φαίνεται και στην Εικόνα 15. (Vavoulidou et al., 2009)

Crop	Cultivated area (ha)	Irrigated land (ha)
Potatoes	180	175
Olive trees	1430	255
Citrus trees	21	21
Bananas (glass house)	25	25
Vineyards	68	
Vegetables	23	23
Total area	1747	499

Εικόνα 15. Οι κύριες καλλιέργειες δέντρων και λαχανικών στην περιοχή των Μαλίων. (Vavoulidou et al., 2009)

Λόγω του τουρισμού κατά την διάρκεια του καλοκαιριού η πόλη των Μαλίων είναι πυκνοκατοικημένη. Αυτό συνεπάγεται μεγάλη αύξηση στην ζήτηση του νερού που οδηγεί στην υπεράντληση των υπογείων υδάτων λόγω της έλλειψης άλλων πηγών. Η έλλειψη προστασία του υδροφορέα καθώς και η υπεράντληση έχουν οδηγήσει στην σταδιακή πτώση της ποιότητας του υπόγειου νερού. (N. J. Lambrakis, 1998)

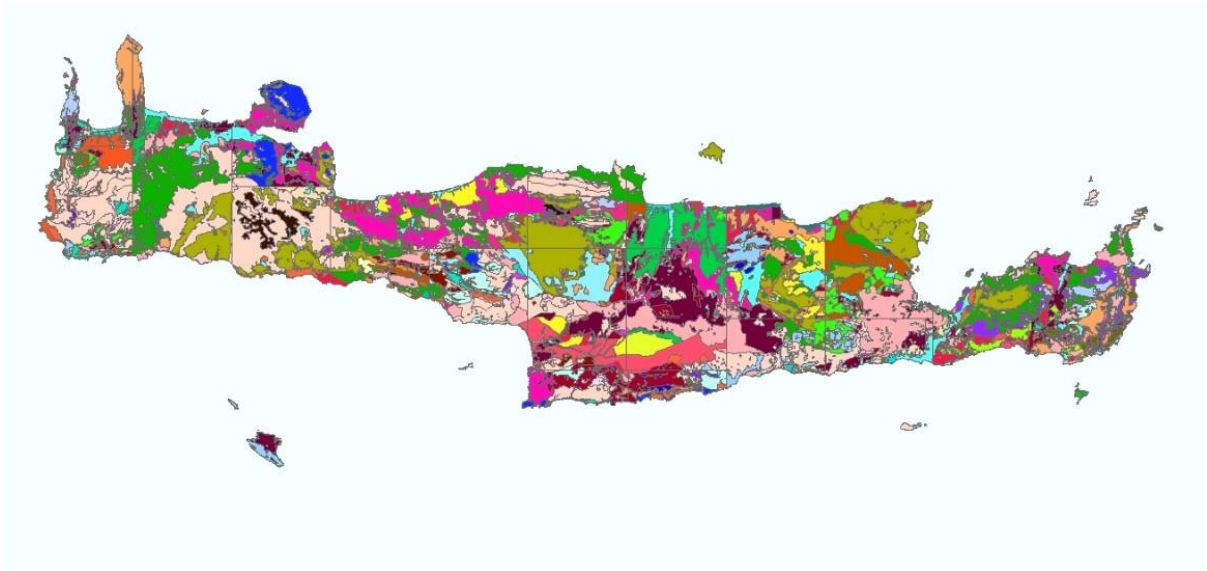
### 1.8 Η Γεωλογία της Κρήτης

Η γεωλογία και η σύσταση των πετρωμάτων στην Κρήτη όπως και στην υπόλοιπη Ελλάδα είναι αποτέλεσμα διεργασιών οι οποίες έλαβαν χώρα για πολλά εκατομμύρια χρόνια. (Φυτρολάκης, 1978). Τα πετρώματα τα οποία εμφανίζονται στο νησί της Κρήτης είναι αποτέλεσμα ορογενετικών διαδικασιών οι οποίες εμφανίζονται σε 2 σειρές καλυμμάτων το ανώτερο και στο κατώτερο στρώμα. Το πρώτο στρώμα χωρίζεται σε 3 μέρη. Το πρώτο μέρος είναι το κάλυμμα των πλακωδών ασβεστόλιθων του οποίου η σύσταση είναι νηριτικά και πελαγικά πετρώματα καθώς και ασβεστολιθικά. (Hall & Audley-Charles, 1983)

Στην συνέχεια εμφανίζεται το δεύτερο κάλυμμα το κάλυμμα του Τρυπαλίου το οποίο περιλαμβάνει ασβεστόλιθους, δολομίτες και ανακρυσταλλωμένα ανθρακικά κροκαλοπαγή. (Bonneau, 1984)

Τέλος στην ανώτερη τεκτονικά θέση των κατώτερων καλυμμάτων βρίσκεται το κάλυμμα των Φυλλιών-Χαλαζιτών, το οποίο αποτελείται από δύο στρώματα, το ανώτερο περιέχει σχιστόλιθους, χαλαζίτες, φυλλίτες, , μάρμαρα και μεταφαιστειακά πετρώματα και το κατώτερο, με μετά-γραουβάκες, χαλαζίτες, σχιστόλιθους, δολομίτες και εβαπορίτες. Τα ανώτερα καλύμματα μπορούν να συγκριθούν με τις λιθοτεκτονικές ενότητες της Κεντρικής Ελλάδος και των Κυκλάδων. (Bonneau, 1984)

Η γεωμορφολογική εξέλιξη μιας περιοχής είναι η δυναμική διαδικασία μετάβασης από ένα περιβάλλον σε ένα άλλο διαφορετικών συνθηκών, που χαρακτηρίζει μια χρονική περίοδο εξαρτώμενη από την γεωλογική δομή της περιοχής, την τεκτονική της εξέλιξη, τις επικρατούσες κλιματολογικές συνθήκες, την ένταση και τον χρόνο επίδρασης των διεργασιών, τις ανθρωπίνες επεμβάσεις κλπ. (Theodorakouroulou et al., 2005)



Εικόνα 16. Ο Χάρτης της γεωλογίας της Κρήτης όπως προκύπτει από την Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης. (Κρήτης, 2021)

### 1.9 Η Γεωλογία στα Μάλια

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από μία πλαγιά με μικρή κλίση στη βόρεια πλευρά του νησιού η οποία καταλήγει στην πόλη των Μαλίων και από το ψηλό βουνό το οποίο ονομάζεται Σελένα στην νότια πλευρά. Η περιοχή που βρίσκονται τα βουνά αποτελείται από μία σειρά από Φυλλίτες – Χαλαζίτες και μία σειρά Τρίπολης. Τα πετρώματα από Φυλλίτη – Χαλαζίτη λειτουργούν σαν αδιαπέρατο στρώμα. Το ΙΓΜΕ το 1989 πετρογράφησε αυτά τα πετρώματα τα οποία αποτελούνται από εναλλασσόμενους χλωριτικούς σχιστόλιθους, Φυλλίτες και Χαλαζίτες. Η σειρά της Τρίπολης αποτελείται από ρηγματώδες και Καρστικούς ασβεστόλιθους, δολομίτες και ασβεστώδη δολομίτες. Αυτές οι ανθρακικές αλληλουχίες φέρουν τα υπόγεια ύδατα βρίσκονται επάνω στο προαναφερθέν στρώμα. Η στρωματογραφία της περιοχής τελειώνει με διάφορα κοιτάσματα Νεογενούς που αποτελούνται από Μεσσηνιακούς ασβεστόλιθους και τεταρτογενή κλαστικά ιζήματα που φιλοξενούν δυο διαφορετικούς υδροφορείς οι οποίοι όμως βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία. Όλο το σύστημα συμπεριφέρεται σαν ένα ετερογενές και ασυνεχές υδροφόρο σύστημα, όχι μόνο ο Μεσοζωικός σχηματισμός αλλά και το Νεογενές. (N. J. Lambrakis, 1998)

Η δομική και λιθολογική χαρτογράφηση της έχει δείξει ότι στο νότιο ανατολικό τμήμα της περιοχής εμφανίζεται ένας λεπτόκοκκος σχηματισμός που ανήκει στην κατηγορία του ασβεστόλιθου. Ο σχηματισμός αυτός αποτελείται από αρκετά μέτρα κρυσταλλικού ασβεστόλιθου και δολομίτη ο οποίος είναι ενδιάμεσα στρωμένος και τεκτονικά επικαλύπτεται από το σχηματισμό Φυλλίτη – Χαλαζίτη. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί της σειράς της Τρίπολης βρίσκονται πάνω από τον σχηματισμό Φυλλίτη – Χαλαζίτη και καλύπτουν τα 2/3 στα βόρεια της περιοχής. Η σειρά της Τρίπολης αποτελείται από 2 λιθостρωματογραφικές ενότητες. Η κατώτερη ενότητα αποτελείται από ημικρυσταλλικούς δολομίτες και ασβεστόλιθους που κυμαίνονται ηλικιακά από το Άνω Τριασικό έως το Ανώτερο Ιουρασικό. Η ανώτερη ενότητα αποτελείται από μέτρια έως ογκώδη ασφαλικούς ασβεστόλιθους της Κρητιδικής ηλικίας. (Steiakakis et al., 2016)

Νεογενείς μονάδες βρίσκονται πάνω από τα ανθρακικά πετρώματα της Τρίπολης και αποτελούνται από βραχοειδής ή συμπλεγματοώδεις ασβεστόλιθους. Στο βόρειο κυρίως κομμάτι της περιοχής καλύπτουν τα παλαιότερα γεωλογικά στρώματα Πλειστόκαινα – Ολόκαινα επιφανειακά ιζήματα. (Steiakakis et al., 2016)

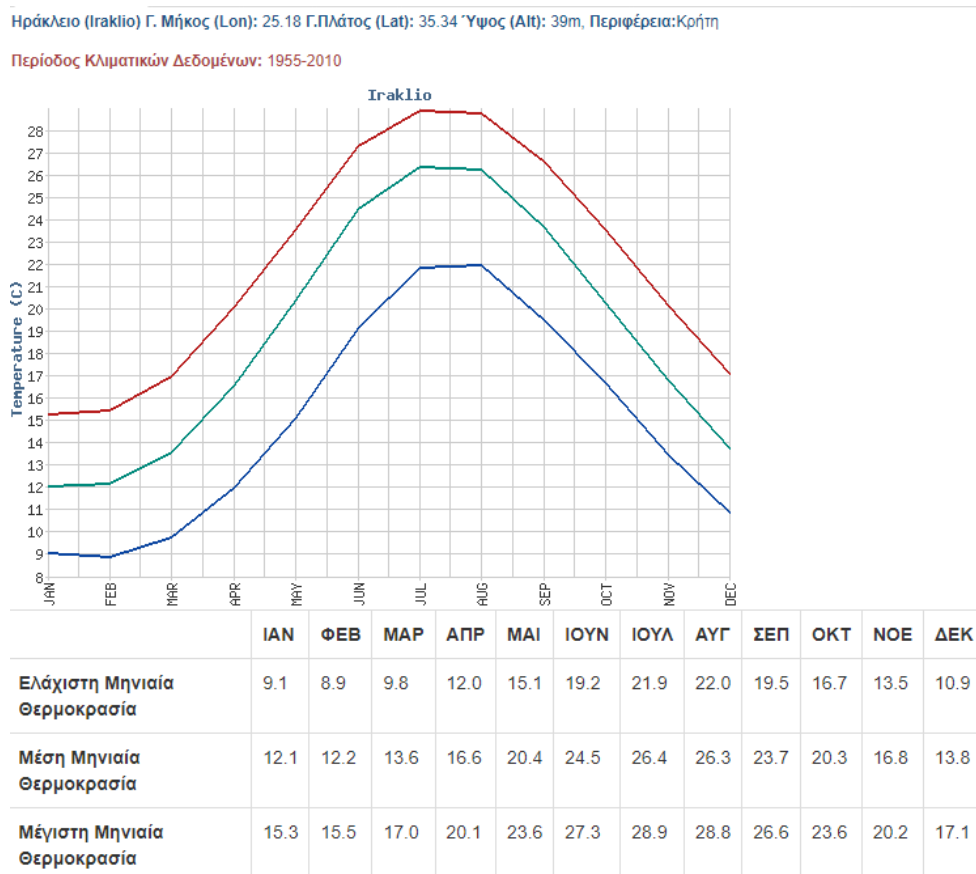
### **1.10 Το Κλίμα της Κρήτης**

Η κλιματική αλλαγή είναι στενά συνδεδεμένη με την αύξηση της θερμοκρασίας του αέρα στην ατμόσφαιρα σαν αποτέλεσμα του φαινομένου του θερμοκηπίου. Κατά την δεκαετία του 80 έγιναν πολλές προσπάθειες να βρεθεί μία μέση θερμοκρασία για όλο τον πλανήτη συνδέοντας τα διάφορα δεδομένα από τοπικούς μετεωρολογικούς σταθμούς. Αυτή η προσπάθεια απέδωσε καρπούς και με τις τότε μετρήσεις για την θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης υπήρχε αύξηση 0.5 °C. (N. Lambrakis & Kallergis, 2001)

Η συνεχής μείωση στην μέση βροχόπτωση της Ελλάδας τη περίοδο του 1980 με 1990 παρουσάζει ότι ήταν μία περίοδος ξηρασίας. Σε αυτή την μελέτη συγκρίθηκαν οι μετρήσεις από την κεντρική, βόρεια και νότια Ελλάδα για την περίοδο 1970 – 1990. Την ίδια περίοδο η υπεράντληση του υπογείου νερού και η έλλειψη διαχείρισης του οδήγησε σε ανεπανόρθωτη καταστροφή. Η εισροή θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα και τα αρνητικά πιεζομετρικά επίπεδα αποτελούν τα σημαντικότερα προβλήματα. (N. Lambrakis & Kallergis, 2001)

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 μέρη του νησιού. Την θερινή περίοδο οι βροχές είναι σπάνιες. Οι χιονοπτώσεις είναι σπάνιες στα πεδινά μέρη 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 17 οι οποίες είναι χαμηλότερες από την Ηπειρωτική Ελλάδα γεγονός που οφείλεται στα καλοκαιρινά μελέτμια. 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. Η περίοδος των κλιματικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των διαγραμμάτων που εμφανίζονται στην Εικόνα 17 και Εικόνα 18 είναι από την χρονιά 1955 - 2010 (ΕΜΥ, 2022)

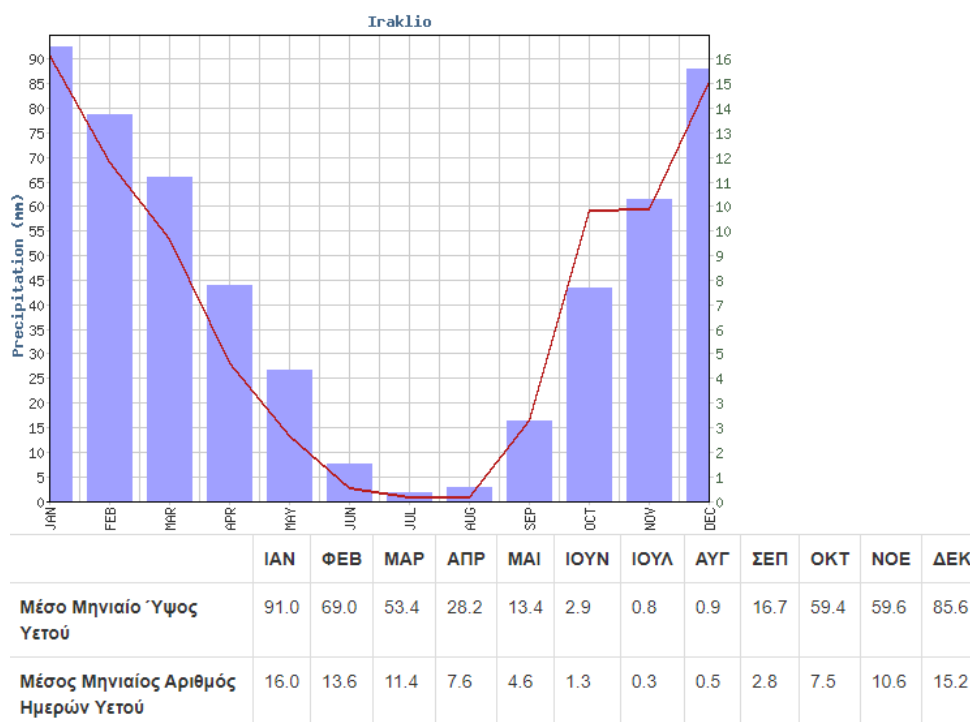


Εικόνα 17. Ελάχιστη – Μέση - Μέγιστη θερμοκρασία με την χρήση δεδομένων 55 ετών για την πόλη του Ηρακλείου. (ΕΜΥ, 2022)



Ηράκλειο (Iraklio) Γ. Μήκος (Lon): 25.18 Γ.Πλάτος (Lat): 35.34 Ύψος (Alt): 39m, Περιφέρεια:Κρήτη

Περίοδος Κλιματικών Δεδομένων: 1955-2010



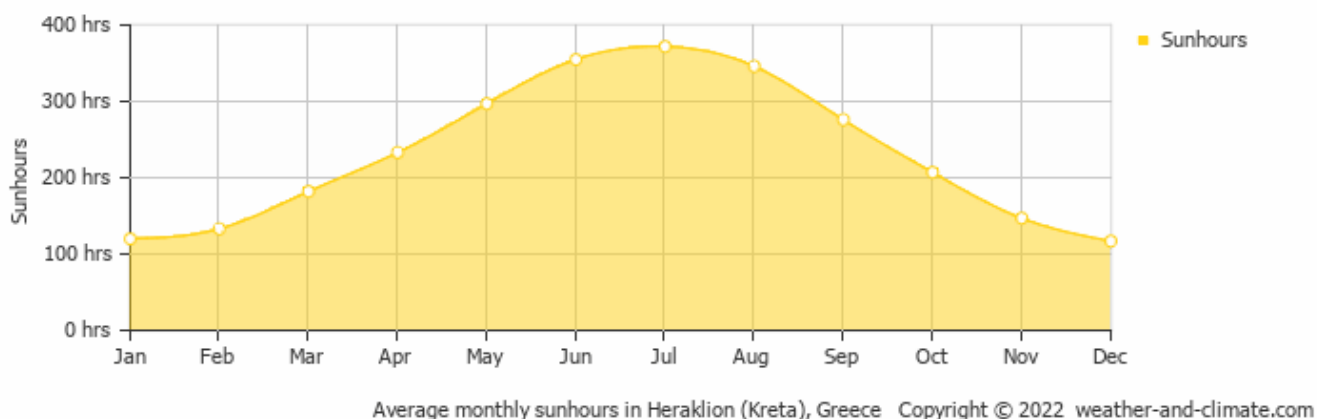
Εικόνα 18. Μέση βροχόπτωση με την χρήση δεδομένων 55 ετών για την πόλη του Ηρακλείου. (ΕΜΥ, 2022)

### 1.11 Περιβαλλοντικά Χαρακτηριστικά της Περιοχής Μελέτης

Το καρστικό υδρογεωλογικό σύστημα των Μαλίων εκτείνεται στο Βορειοανατολικό τμήμα της Κρήτης στον Δήμο Χερσονήσου. Κατά την θερινή περίοδο λόγω της υψηλής ζήτησης του τουρισμού και της γεωργίας η κάλυψη των αναγκών σε ύδρευση και άρδευση καλύπτεται μέσω γεωτρήσεων. Η χρήση του νερού καθ' όλη την διάρκεια του έτους για την υδροδότηση των δήμων του βορείου τμήματος του νησιού της Κρήτης καθώς και του νομού Ηρακλείου προσθέτει πίεση στον υδροφορέα. Η υφαλμύριση του γλυκού νερού που είναι αποτέλεσμα όλων αυτών των ενεργειών αποκαθίσταται σε έναν βαθμό κατά την διάρκεια της χειμερινής περιόδου όπου πραγματοποιείται εμπλουτισμός από τις βροχοπτώσεις. (Περιφέρεια-Κρήτης, 2009)

Στη λεκάνη αυτή επικρατεί γενικά αραιή βλάστηση με την παρουσία μεγάλης έκτασης θάμνων και βοσκότοπων, ενώ συγχρόνως διακρίνεται η ύπαρξη κυρίως ελαιώνων και οπωροφόρων δέντρων. Επίσης οι γεωργικές εκτάσεις είναι περιορισμένες και δεν δρουν επιβαρυντικά στο συγκεκριμένο υδάτινο σώμα σε σχέση με της ξενοδοχειακές μονάδες. (Kosztra et al., 2017) Η ηλιοφάνεια, η ιστορία καθώς οι υπέροχες παραλίες έχουν βοηθήσει στην τουριστική ανάπτυξη της περιοχής. Στην Εικόνα 19 εμφανίζεται η μέση μηνιαία ηλιοφάνεια σε ώρες για την πόλη

του Ηρακλείου της Κρήτης. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα ο μήνας με την μέγιστη ηλιοφάνεια είναι ο Ιούλιος με 372 ώρες ενώ ο Δεκέμβριος είναι ο μήνας με την χαμηλότερη μέση μηνιαία ηλιοφάνεια στις 117 ώρες. Καθ' όλη την χρονιά η μέση ετήσια ηλιοφάνεια είναι 2786 ώρες. (Climate & Weather, 2022)



Εικόνα 19. Μέση μηνιαία ηλιοφάνεια σε ώρες στην περιοχή Ηράκλειο, Κρήτης. (Climate & Weather, 2022)

## 1.12 Κλιματικά Σενάρια

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. (IPCC, 2022)

Τα RCPs ακολουθούν ένα μονοπάτι το οποίο καθορίζεται από τα αέρια του θερμοκηπίου και τις συγκεντρώσεις των αεροζόλ ταυτόχρονα με τις χρήσεις γης. Ο όρος μονοπάτι χρησιμοποιείται για να δώσει έμφαση όχι μόνο στην τελική τιμή της συγκέντρωσης αλλά και στην πορεία μέχρι να φτάσει σε αυτήν την τιμή. (Guanabara et al., n.d.) Θεωρούνται συνεπή και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα από κλιματικά αποτελέσματα τα οποία χρησιμοποιούνται από την επιστημονική κοινότητα η οποία ασχολείται με κλιματικά μοντέλα. Τα RCPs χαρακτηρίζονται



από την ηλιακή ακτινοβολία η οποία θα εκπέμπεται στο τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Ως ηλιακή ακτινοβολία θεωρείται η θερμότητα η οποία θα συγκρατείται στα χαμηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας σαν αποτέλεσμα των αερίων του θερμοκηπίου. Η ενέργεια αυτή έχει μονάδες μέτρησης Watts ανά τετραγωνικό μέτρο (W/m<sup>2</sup>) (Jubb et al., 2013)

Τα κλιματικά σενάρια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το RCP 4.5 και το RCP 8.5. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 20 υπάρχουν και άλλα κλιματικά σενάρια τα οποία έχουν δημιουργηθεί ώστε να καλύψουν όσο το δυνατόν καλύτερα τους πιθανούς μελλοντικούς ρύπους. Τα συνολικά κλιματικά σενάρια είναι το RCP 2.6, το RCP 4.5, το RCP 6 και το RCP 8.5.

Radiative forcing	*Atmospheric CO <sub>2</sub> equivalent (parts per million)	When
8.5	>1370	By 2100, but rising
6	850	Stabilisation after 2100
4.5	650	Stabilisation after 2100
2.6	490	Peak before 2100 then decline

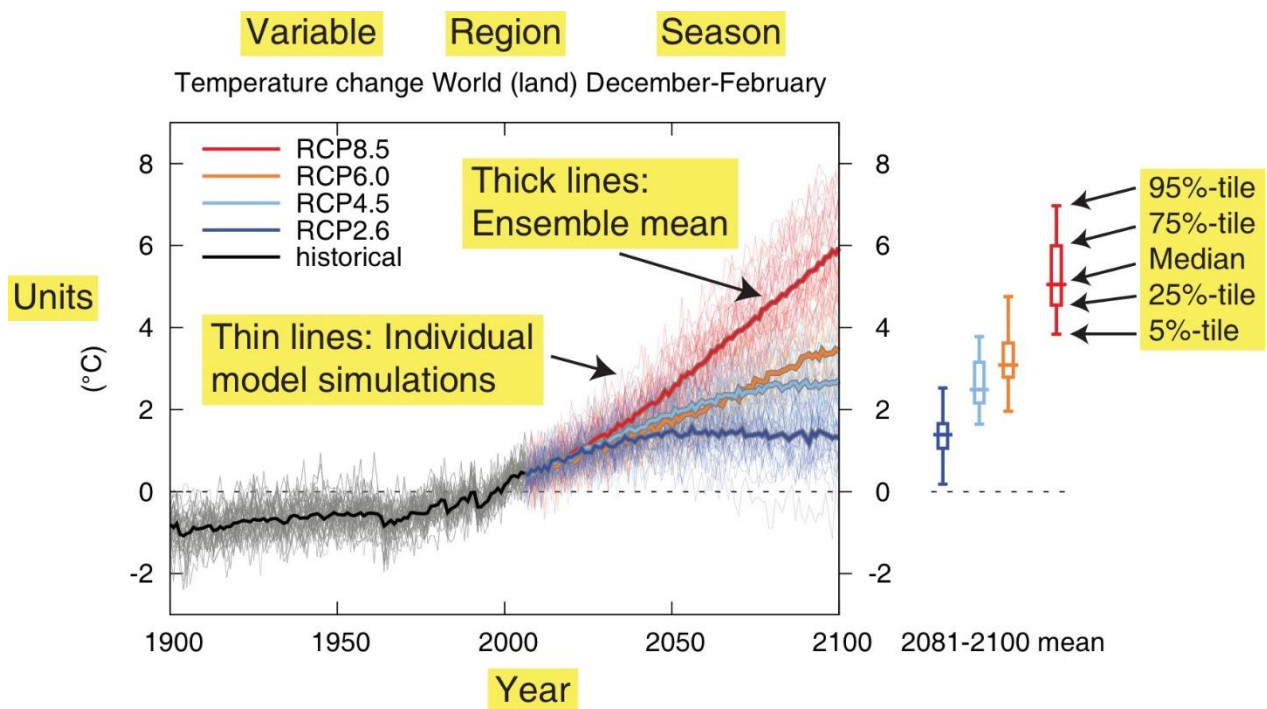
Εικόνα 20. Τα 4 RCPs τα οποία χρησιμοποιούνται από την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα. (Jubb et al., 2013)

Κάθε ένα από τα RCPs αντιπροσωπεύει μία μεγαλύτερη σειρά από σενάρια που χρησιμοποιούνται στην επιστημονική κοινότητα. Η πλήρης γκάμα των αέριων εκπομπών των σεναρίων με ή χωρίς την κλιματική πολιτική περιλαμβάνεται μέσα στο εύρος των RCPs. Η περίοδος η οποία καλύπτεται από αυτά είναι από το 1850 – 2100. (Jubb et al., 2013)

Η εύρεση δεδομένων για το κλιματικό σενάριο RCP 6 αποτελεί ένα σχεδόν αδύνατο στόχο σύμφωνα με το άρθρο του (Bienvenido-Huertas et al., 2022) η παγκόσμια θερμοκρασία για τα άλλα τρία κλιματικά σενάρια θα αυξηθεί μέχρι το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα ως εξής:

- RCP 2.6 : 0.3 έως 1.7 °C
- RCP 4.5 : 1.1 έως 2.6 °C
- RCP 8.5 : 2.6 έως 4.8 °C

Στην Εικόνα 21 εμφανίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας για τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο για ολόκληρο τον 21<sup>ο</sup> αιώνα. Κάθε γραμμή στο διάγραμμα αντιστοιχεί σε κάποιο από τα 4 κλιματικά σενάρια. Η μαύρη γραμμή αντιστοιχεί στα ιστορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των κλιματικών σεναρίων.



Εικόνα 21. Μεταβολή της θερμοκρασίας για κάθε κλιματικό σενάριο για ολόκληρο τον 21<sup>ο</sup> αιώνα για τους μήνες Δεκέμβριο - Ιανουάριο. (IPCC a, 2014)

## RCP 2.6

Το κλιματικό σενάριο RCP 2.6 είναι το πιο φιλόδοξο από τα 4 σενάρια. Σύμφωνα με το σενάριο αυτό οι ρύποι αυξάνονται και φτάνουν την μέγιστη τους τιμή γρήγορα. Στην συνέχεια όμως υπάρχει μείωση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα λόγω των μέτρων που θεωρητικά θα λάβουν όλες οι χώρες. Η συνεργασία που περιγράφεται δεν πραγματοποιείται μόνο μεταξύ των χωρών που είναι οι κύριοι ρυπαντές αλλά και μεταξύ των αναπτυσσόμενων χωρών. Στο σενάριο αυτό η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) αυξάνεται και ισοδυναμεί με 490 ppm. (Jubb et al., 2013)

## RCP 4.5

Το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 είναι ένα μετριοπαθές σενάριο όπου περιγράφει ένα πλανήτη με καμία πληθυσμιακή αύξηση. Παρουσιάζει ραγδαίες εξελίξεις στις οικονομικές δομές των υπηρεσιών, μειώσεις στην χρήση υλικών αγαθών και εφαρμογή πράσινων τεχνολογιών οι οποίες είναι αποτελεσματικότερες στην χρήση των πρώτων υλών. Στο σενάριο αυτό η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) αυξάνεται και ισοδυναμεί με 650 ppm. (Solomon, S. et al., 2007)

## RCP 6

Το κλιματικό σενάριο RCP 6 είναι επίσης ένα μετριοπαθές σενάριο παρόμοιο με το RCP 4.5. Η σταθεροποίηση της αύξησης της θερμοκρασίας του πλανήτη θα πραγματοποιηθεί λίγο μετά το 2100. Στο σενάριο αυτό η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) αυξάνεται και ισοδυναμεί με 850 ppm. (Jubb et al., 2013)

## RCP 8.5

Κλιματικό σενάριο RCP 8.5 είναι το χειρότερο κλιματικό σενάριο και το αποτέλεσμα της αποτυχίας που θα έχει ο πλανήτης μετά το 2100 αν η προσπάθεια μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου είναι η ελάχιστη δυνατή. Στο σενάριο αυτό η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) αυξάνεται και είναι μεγαλύτερη από 1370 ppm. (Jubb et al., 2013)

### 1.13 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 χρησιμοποιεί διάφορες εξισώσεις μοντελοποίησης της ροής και μεταφοράς μέσα σε υδρολογικά συστήματα. Οι κύριες εξισώσεις οι οποίες είναι ενσωματωμένες στο λογισμικό του προγράμματος είναι:

- Εξίσωση μεταφοράς μάζας ( ή εξίσωση αδράνειας) για την μεταφορά ρύπων ή άλλων ουσιών
- Εξίσωση Navier – Stokes για την περιγραφή της ροής του νερού
- Εξίσωση Richards για την μεταφορά νερού σε κοκκώδεις μέσα όπως το έδαφος
- Εξίσωση Darcy για την ροή μέσα από πορώδεις μέσα όπως τα πετρώματα
- Εξίσωση ενέργειας της μοντελοποίησης της θερμικής επίδρασης στη ροή του νερού.

Από της παραπάνω εξισώσεις για την παρούσα διπλωματική εργασίας δεν χρησιμοποιήθηκαν όλες. Η κύρια μαθηματική εξίσωση η οποία περιγράφει την κίνηση ενός ρευστού στον υπόγειο υδροφορέα είναι η εξίσωση του Darcy και βρίσκεται στην μορφή:

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

Στην παραπάνω εξίσωση:

$h = \psi + z$  και είναι το υδραυλικό ύψος,

$\psi$ : συμβολίζει την πίεση του ρευστού

$q$ : συμβολίζει την ταχύτητα Darcy

$K_r(s)$ : συμβολίζει την σχετική υδραυλική αγωγιμότητα

$K$ : συμβολίζει την υδραυλική αγωγιμότητα σε ένα κορεσμένο μέσο

$\chi$ : συμβολίζει τον συντελεστή άνωσης και περιλαμβάνει την επήρεια της πυκνότητας του ρευστού και

$e$ : συμβολίζει την βαρυτική ταχύτητα. (Diersch & Perrochet, 2009)

Η εξίσωση που ακολουθεί είναι η Navier – Stokes όπου περιγράφει την συμπεριφορά του ρευστού στο χώρο και χρόνο λαμβάνοντας υπόψιν την επίδραση της πίεσης, του ιξώδους και των εξωτερικών δυνάμεων.

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{f}$$

Όπου:

$\rho$ : είναι η πυκνότητα του ρευστού

$\frac{\partial v}{\partial t}$ : είναι η μεταβολή της ταχύτητας στον χρόνο

$v$ : είναι η ταχύτητα του ρευστού

$p$ : είναι η πίεση

$\tau$ : είναι ο τανυστής ιξώδους

$f$ : είναι η εξωτερική δύναμη ανά μονάδα όγκου

Το πρόγραμμα FEFLOW υπολογίζει την υπόγεια ροή στις 3 διαστάσεις (x, y, z) και περιλαμβάνει την πληροφορία για την οριζόντια και κάθετη κατανομή κάθε διαφορετικού εδαφικού στρώματος. Αυτοί οι παράμετροι περιγράφονται από τα χαρακτηριστικά ροής και ισορροπίας του υπόγειου εδαφικού συστήματος όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, πορώδες κλπ. (Khalid Awan et al., 2015) η προσέγγιση του FEFLOW επιτρέπει στον χρήστη να αλληλοεπιδρά με το πλέγμα που δημιουργείται και μπορεί να το κάνει πυκνότερο όπου χρειάζεται περισσότερη λεπτομέρεια και πιο αραιό όπου χρειάζεται λιγότερη. (Koukidou & Panagoroulos, 2017) Τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα καθώς και όλες οι παράμετροι εισήχθησαν στο πρόγραμμα με την μορφή shapefile και προετοιμάστηκαν στο πρόγραμμα ArcGIS.

Το πρόγραμμα FEFLOW χρησιμοποιείται κυρίως από μηχανικούς και επιστήμονες περιβάλλοντος για την δημιουργία μοντέλων υδρολογικών συστημάτων. Αυτά τα μοντέλα χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της ροής ή μεταβολής του νερού, της μεταφοράς ρύπων, αλληλεπίδρασης του με γεωλογικά σχήματα κ.α. . Τα αποτελέσματα του μπορούν να συμβάλουν στην λήψη αποφάσεων για την διαχείριση ρύπανσης υδατικών πόρων καθώς και την ανάπτυξη υδραυλικών έργων.

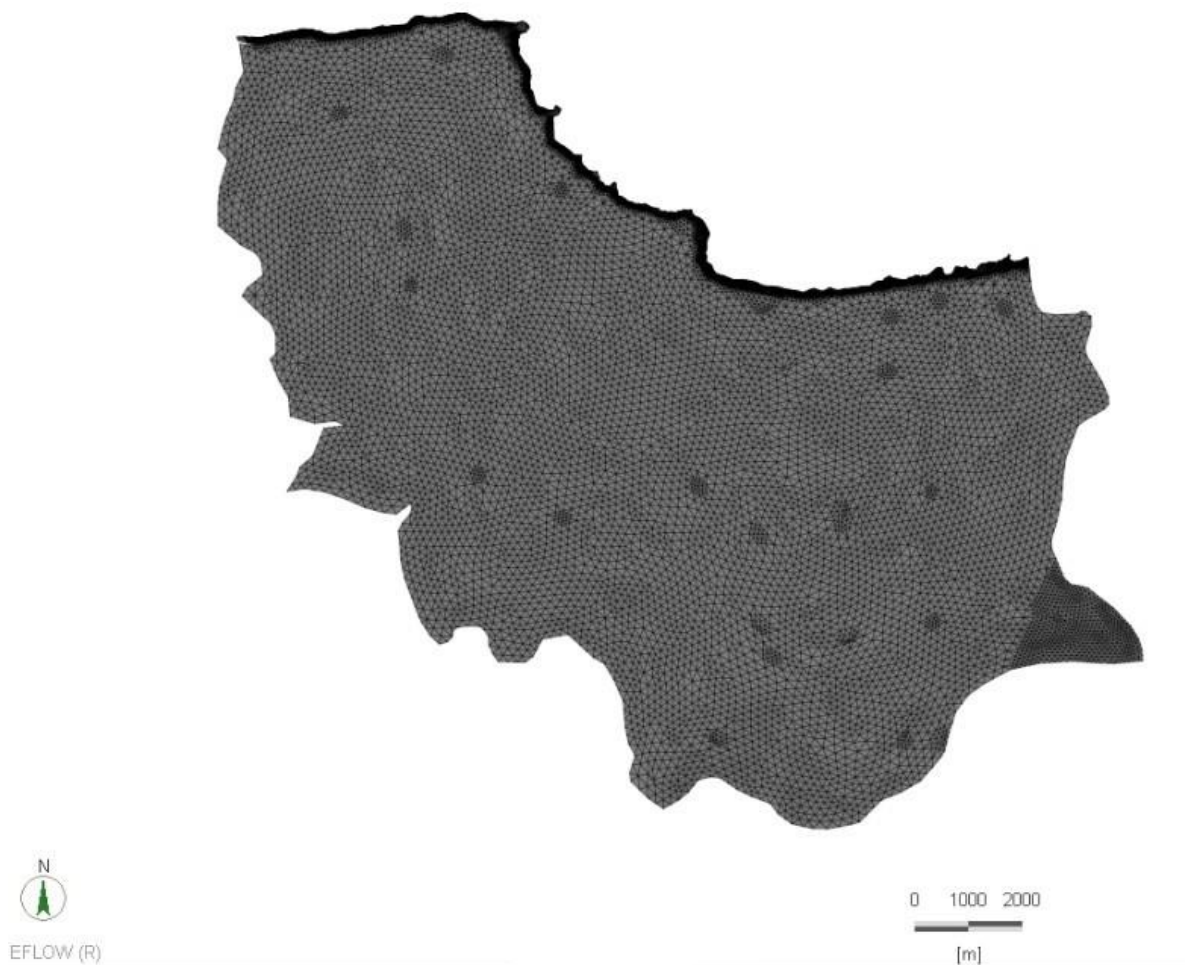
Στην διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε η σχετική υδραυλική αγωγιμότητα είναι ίση με 1 καθώς θεωρείται ότι οι πόροι στο έδαφος είναι πλήρως κορεσμένοι όταν υπάρχει νερό. Δηλαδή δεν υπάρχουν κενά τα οποία δεν επικοινωνούν μεταξύ τους.

## 2. Μεθοδολογία

Για να μπορεί να πραγματοποιηθεί χρήση των αρχείων τα οποία αφορούν τα δεδομένα της περιοχής μελέτης πρέπει να γίνει επεξεργασία αυτών με την χρήση διαφόρων προγραμμάτων. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται έτσι ώστε να μπορεί να γίνει εισαγωγή των δεδομένων αυτών στο πρόγραμμα FEFLOW. Το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως για την επεξεργασία των δεδομένων αυτών είναι το ArcGIS χωρίς όμως να αποκλείεται η χρήση άλλων προγραμμάτων. Στο ArcGIS γίνεται επεξεργασία δεδομένων που αφορά κυρίως χάρτες μπορεί όμως να γίνει χρήση του και για την επεξεργασία δεδομένων. Άλλα προγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η Matlab, το Microsoft excel, το Notepad++ και το Hydrognomon. Τα αρχεία που χρησιμοποιήθηκαν περιείχαν δεδομένα τα οποία δεν χρειάστηκαν για την μοντελοποίηση του υδροφορέα. Για την αποφυγή προβλημάτων από το πρόγραμμα FEFLOW καθώς και για την βέλτιστη χρήση της υπολογιστικής δύναμης του υπολογιστή από όλα τα αρχεία εξάχθηκαν μόνο τα δεδομένα τα οποία απαιτούνται για την μοντελοποίηση. Η περιοχή μελέτης αποτελείται από την λεκάνη απορροής των Μαλίων. Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν εξήχθησαν και αφορούν μόνο την λεκάνη των Μαλίων.

Αρχικά:

- Πραγματοποιήθηκε εισαγωγή του αρχείου στο πρόγραμμα ArcGIS στο οποίο περιέχεται ο χάρτης με τα όρια της περιοχής μελέτης όπως εμφανίζεται και στην Εικόνα 14
- Έπειτα ελέγχθηκε το σύστημα συντεταγμένων στο οποίο βρίσκεται το αρχείο αυτό με σκοπό την μετέπειτα συμφωνία όλων των αρχείων με το αρχικό αρχείο. Στην προκειμένη περίπτωση το προβολικό σύστημα είναι το ΕΓΣΑ 87 (Greek Grid).
- Στην συνέχεια μετά την επεξεργασία το αρχείο αυτό μετατράπηκε σε αρχείο shapefile για να μπορεί να γίνει χρήση του στο πρόγραμμα FEFLOW
- Πραγματοποιήθηκε εισαγωγή στο πρόγραμμα ArcGIS αρχείου το οποίο περιείχε δεδομένα για τα επιφανειακά νερά που βρίσκονται στην περιοχή μελέτης όπως ποτάμια και τεχνητές λίμνες καθώς και η τοποθεσία των γεωτρήσεων χωρίς τα δεδομένα άντληση
- Τα αρχεία αυτά μετά από επεξεργασία μετατράπηκαν επίσης σε αρχεία shapefile
- Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εισαγωγή τους στο πρόγραμμα FEFLOW
- Μετά την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα τα αρχεία αυτά επιλέχθηκαν και μετατράπηκαν σε supermesh στο πρόγραμμα FEFLOW. Το αποτέλεσμα των ενεργειών αυτών εμφανίζεται στην Εικόνα 22



Εικόνα 22. Δημιουργία πλέγματος (Supermesh) με την χρήση του προγράμματος FEFLOW.

Η πυκνότητα του πλέγματος που δημιουργείται εξαρτάται από αρκετούς παράγοντες και επιλέγεται ανάλογα με τις δυνατότητες που έχει ο υπολογιστής που χρησιμοποιείται. Όταν αυξηθεί η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνεται και η ανάγκη για υπολογιστική δύναμη που σε κάποιες περιπτώσεις δεν είναι δυνατόν να καλυφθεί από τον εξοπλισμό που υπάρχει. Επιλέγεται μια ποσότητα από κόμβους η οποία να παράγει αποτελέσματα τα οποία είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην πραγματικότητα χωρίς να δημιουργεί προβλήματα στο εξοπλισμό. Κάποιοι από τους παράγοντες που επηρεάζουν την πυκνότητα του πλέγματος είναι:

- Η παρουσία κάποιου σημειακού στοιχείου όπως για παράδειγμα μίας γεώτρησης
- Η παρουσία ενός γραμμικού στοιχείου όπως για παράδειγμα ενός ποταμιού
- Η παρουσία ενός στοιχείου ακανόνιστου σχήματος το οποίο καλύπτει μία περιοχή μέσα στην περιοχή μελέτης
- Τα όρια της περιοχής μελέτης
- Και διάφορα σημεία που έχουν επιλεγεί από τον χρήστη ως σημεία ενδιαφέροντος όπου το πλέγμα μπορεί να πυκνωθεί δίνοντας εντολές με το χέρι

## 2.1 Υψόμετρο

Ο ορισμός του υψομέτρου της περιοχής μελέτης αποτελεί μια διαδικασία που απαιτεί πολλές ενέργειες. Η εξαγωγή του υψομέτρου της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε με την χρήση δεδομένων από το πρόγραμμα της Ευρωπαϊκής Ένωσης Copernicus. Το Copernicus έχει δεδομένα για ολόκληρη την Ευρώπη και υπάρχουν στην ανοιχτή βιβλιοθήκη που διαθέτει. (Jose Carlos García González, José Antonio Redondo, 2015) Για την εξαγωγή του υψομέτρου της περιοχής μελέτης από το αρχείο EU-dem ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Αρχικά πραγματοποιήθηκε εξαγωγή των κόμβων που δημιουργήθηκαν στο Super-mesh σαν σημεία από το πρόγραμμα FEFLOW
- Στην συνέχεια το αρχείο που περιείχε τις συντεταγμένες των κόμβων αποθηκεύτηκε με την μορφή αρχείου shapefile το οποίο εμφανίζεται στην Εικόνα 23



Εικόνα 23. Οι κόμβοι που δημιουργήθηκαν στο FEFLOW κατά την χρήση τους στο πρόγραμμα ArcGIS.

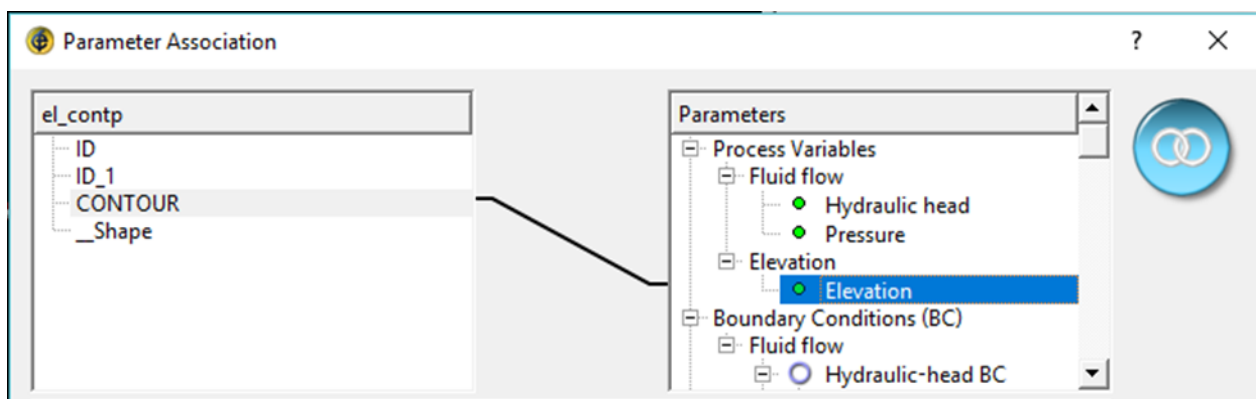
- Έπειτα πραγματοποιήθηκε εισαγωγή του αρχείου raster EU-dem στο πρόγραμμα ArcGIS



- Για την ευκολότερη χρήση του χρησιμοποιήθηκαν τα όρια της περιοχής μελέτης για να αποκοπεί από το μεγάλο αυτό αρχείο το υψόμετρο της περιοχής που χρειάζεται. Η διαδικασία αυτή έγινε με την εντολή του ArcGIS Clip.
- Στην συνέχεια έχοντας το υψόμετρο της περιοχής μελέτης μόνο σε μορφή raster πραγματοποιείται εισαγωγή του αρχείου που περιέχει τους κόμβους που δημιουργήθηκαν στο πρόγραμμα FEFLOW
- Για να πραγματοποιηθεί αντιγραφή των δεδομένων του ύψους από το αρχείο raster στο αρχείο που περιέχει τους κόμβους χρησιμοποιείται η εντολή στο πρόγραμμα ArcGIS From raster to point. Με αυτή την εντολή στα δύο αρχεία τα οποία συμπίπτουν το ένα με το άλλο πραγματοποιείται αντιγραφή των δεδομένων του υψομέτρου για κάθε σημείο του αρχείου raster που έχει αντίστοιχες συντεταγμένες με ένα μοναδικό κόμβο.
- Το νέο αρχείο πλέον περιέχει και τα δεδομένα του υψομέτρου για κάθε έναν από τους κόμβους
- Τέλος πραγματοποιείται αποθήκευση του νέου αρχείου σε μορφή shapefile

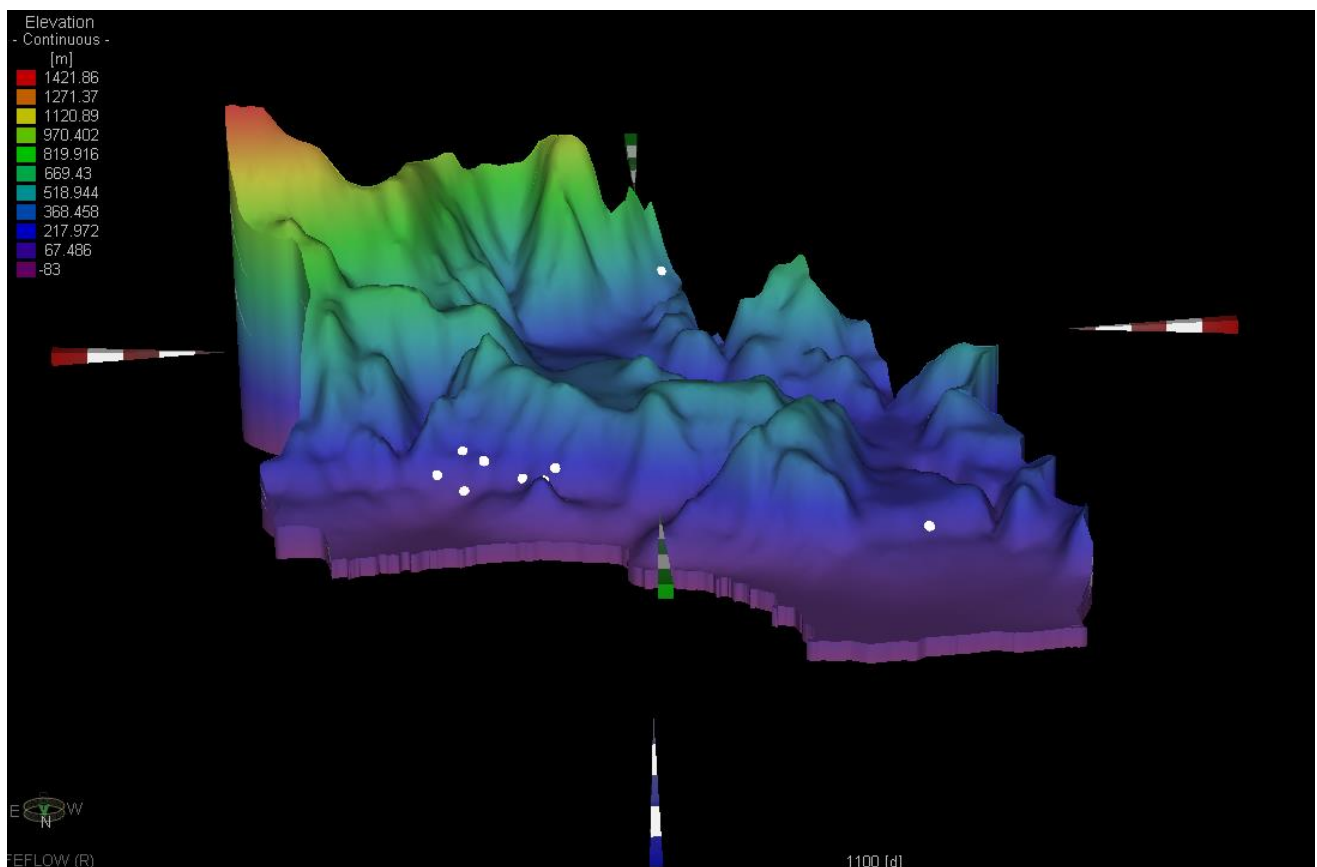
Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε επειδή το πρόγραμμα FEFLOW δεν δέχεται αρχεία raster. Για την εμφάνιση του υψομέτρου στο πρόγραμμα FEFLOW πραγματοποιούνται οι παρακάτω διαδικασίες:

- Γίνεται εισαγωγή του αρχείου στο πρόγραμμα FEFLOW
- Έπειτα επιλέγεται το όνομα του αρχείου πατώντας δεξί κλικ πάνω του και από την λίστα που ανοίγει επιλέγεται η εντολή Link to Parameter
- Στην συνέχεια ανοίγει ένα νέο παράθυρο στο πρόγραμμα FEFLOW όπως αυτό που εμφανίζεται στην Εικόνα 24. Στην αριστερή λίστα της εικόνας εμφανίζονται το όνομα στην κορυφή και οι μεταβλητές του αρχείου που έχει εισαχθεί. Στην δεξιά πλευρά εμφανίζονται οι παράμετροι με τους οποίους μπορούν να αντιστοιχηθούν δεδομένα στο πρόγραμμα FEFLOW.



Εικόνα 24. Σύνδεση των δεδομένων του υψομέτρου με την περιοχή μελέτης στο πρόγραμμα FEFLOW.

- Πατώντας διπλό κλικ επιλέγεται η ονομασία contour όπου περιέχονται τα δεδομένα του υψομέτρου
- Στην συνέχεια πατώντας διπλό κλικ στην παράμετρο Elevation δημιουργείται μία γραμμή μεταξύ τους
- Έπειτα πραγματοποιείται έξοδος από το παράθυρο και στην επιφάνεια του FEFLOW επιλέγεται από την λίστα του material properties η παράμετρος Elevation
- Μαρκάρονται όλοι οι κόμβοι που βρίσκονται στην επιφάνεια του FEFLOW
- Η σύνδεση πραγματοποιείται πατώντας το πράσινο κουμπί (assign) που έχει μέσα ένα τικ (✓)
- Τέλος εμφανίζεται το ανάγλυφο του εδάφους στην επιφάνεια του FEFLOW όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25. Η 3D απεικόνιση της περιοχής μελέτης. Η οπτική γωνία είναι από τον βορρά προς τον νότο.

Στην Εικόνα 25 εμφανίζεται το ανάγλυφο της περιοχής μελέτης όπως φαίνεται από την βόρεια πλευρά της. Οι κουκίδες με το άσπρο χρώμα απεικονίζουν τις θέσεις των πηγαδιών παρατήρησης. Τα πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν είναι 11 στην Εικόνα 25 εμφανίζονται τα 9 από αυτά καθώς το ανώμαλο ανάγλυφο της περιοχής κρύβει την τοποθεσία των άλλων 2.

## 2.2 Υδραυλική Αγωγιμότητα

Ο ορισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας της περιοχής μελέτης αποτελεί ίσως την σημαντικότερη παράμετρο όσο αφορά την μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων. Η υδραυλική αγωγιμότητα της περιοχής βρέθηκε από τα ανοιχτά δεδομένα τα οποία διαθέτει η αποκεντρωμένη διοίκηση Κρήτης στο διαδίκτυο.

Αυτά τα δεδομένα υπάρχει σε αρχεία στην προκειμένη περίπτωση χάρτες οι οποίοι χρησιμοποιούνται στο GIS. Για να πραγματοποιηθεί χρήση του χάρτη ανοίγεται η ιστοσελίδα της αποκεντρωμένης διοίκησης Κρήτης και επιλέγεται η εντολή «Ανοιχτά Δεδομένα». Στην συνέχεια ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο εμφανίζονται διάφορα δεδομένα και επιλέγεται από τον χρήστη η εντολή «Γεωλογικός Χάρτης της Κρήτης» και ανοίγει το παράθυρο που εμφανίζεται στην Εικόνα 26. Η επιλογή έτσι ώστε να «κατέβουν» τα δεδομένα βρίσκεται στο κάτω μέρος της σελίδας.

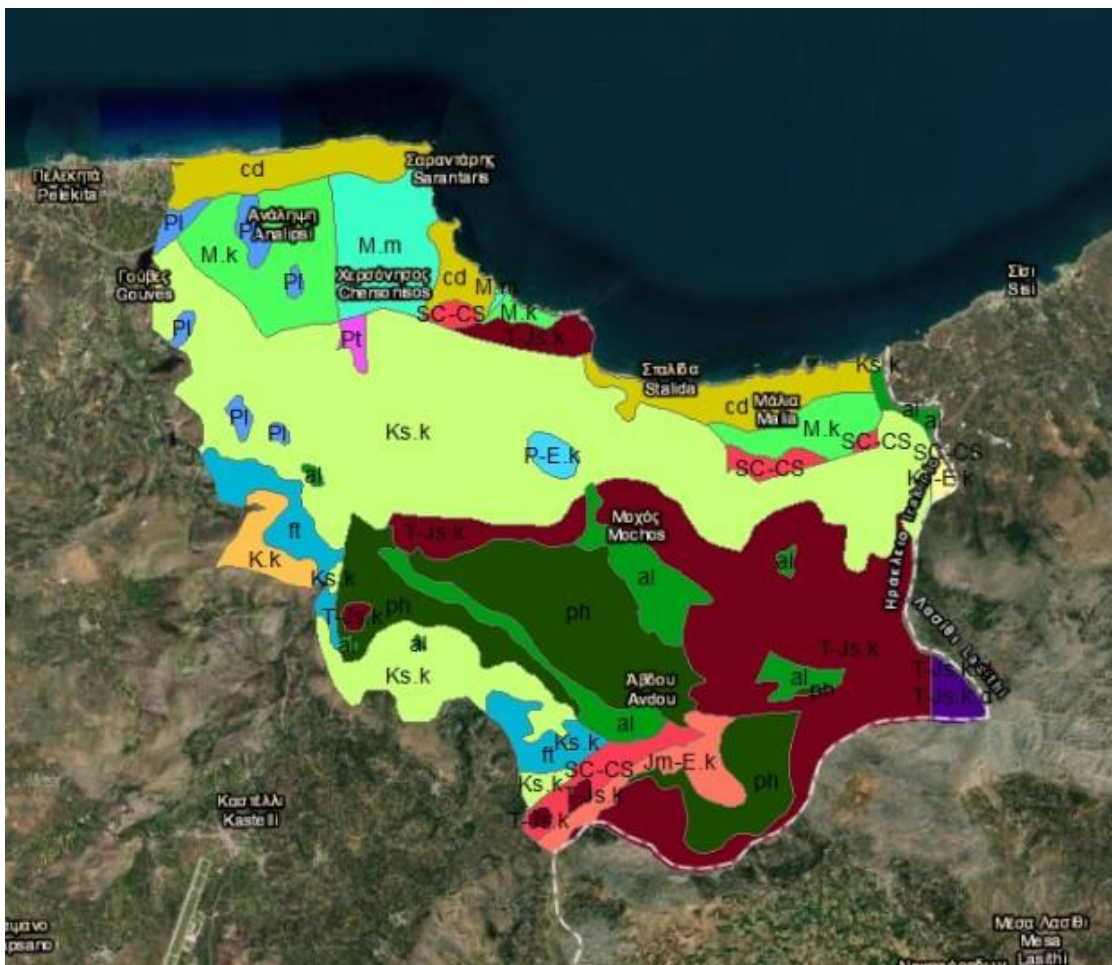
Στον χάρτη υπάρχουν τα δεδομένα για την γεωλογία ολόκληρου του νησιού της Κρήτης. Τα δεδομένα αυτά υπάρχουν με την μορφή διαφόρων σχημάτων πάνω στον χάρτη όπου κάθε ένα από αυτά περιέχει την υδραυλική αγωγιμότητα. Τα σχήματα αυτά εμφανίζονται στην Εικόνα 16.

The screenshot shows the website of the Central Administration of Crete (ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ, Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης). The page is titled 'Γεωλογικός Χάρτης της Κρήτης' (Geological Map of Crete). It features a search bar at the top right and a navigation menu at the top. The main content area includes a sidebar with a building icon and text about the 'Διεύθυνση Πληροφορικής και Επικοινωνιών' (Directorate of Informatics and Communications), and a main section with a map of Crete showing geological data. The map is labeled with 'Bali' and 'Heraklion'. The text describes the project as part of the CRINNO program, aimed at managing natural resources in Crete.

Εικόνα 26. Ιστοσελίδα Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης. (Κρήτης, 2021)

Όταν τα δεδομένα αυτά κατέβουν στον υπολογιστή πραγματοποιείται εισαγωγή του αρχείου στο πρόγραμμα ArcGIS και ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Επιλέγεται από τον χρήστη το σύστημα συντεταγμένων στο οποίο βρίσκεται το αρχείο αυτό με σκοπό τη συμφωνία του με το αρχικό αρχείο. Στην προκειμένη περίπτωση το προβολικό σύστημα είναι το ΕΓΣΑ 87 (Greek Grid).
- Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε εισαγωγή του αρχείου το οποίο περιέχει τα όρια της περιοχής μελέτης.
- Επειδή το αρχείο περιέχει την Γεωλογία ολόκληρης της νήσου της Κρήτης με τα περιττά δεδομένα ίσως δημιουργηθεί πρόβλημα κατά την μοντελοποίηση.
- Με την εντολή του ArcGIS Clip πραγματοποιείται περικοπή των περιττών δεδομένων και παραμένουν τα δεδομένα τα οποία χρειάζονται για την μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης.
- Το αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής εμφανίζεται στην Εικόνα 27.
- Τέλος πραγματοποιείται εξαγωγή των δεδομένων από το πρόγραμμα ArcGIS με την μορφή αρχείου shapfile για να μπορεί να γίνει χρήση του στο πρόγραμμα FEFLOW.



Εικόνα 27. Υδραυλικής αγωγιμότητα περιοχής μελέτης με υπόβαθρο τον δορυφορικό χάρτη της Κρήτης.

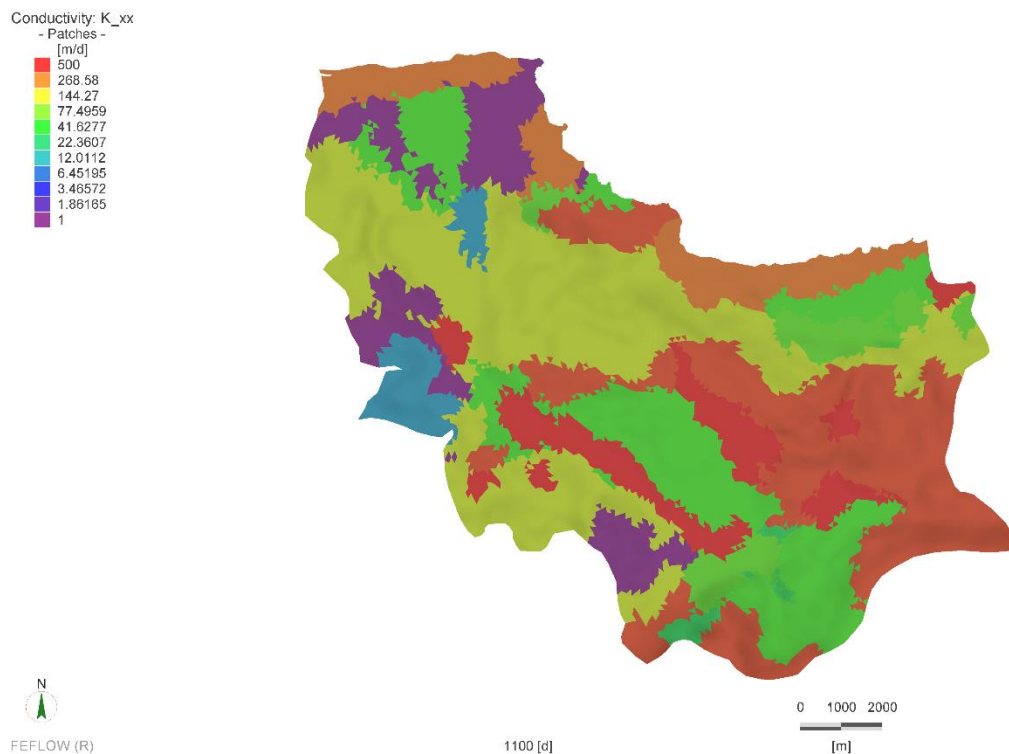
Για την εισαγωγή των δεδομένων της υδραυλικής αγωγιμότητας στο πρόγραμμα FEFLOW πραγματοποιείται η παρακάτω διαδικασία για τους 3 άξονες στους οποίους κινείται το νερό.

### **Εισαγωγή δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας για τον άξονα x'x**

- Ακολουθώντας της εισαγωγή του αρχείου shapfile στο πρόγραμμα FEFLOW πρέπει να πραγματοποιηθεί σύνδεση των δεδομένων του αρχείου με τις εντολές του προγράμματος.
- Από τη λίστα παραμέτρων του προγράμματος FEFLOW επιλέγεται η μεταβλητή η Conductivity
- Πατώντας δεξί κλικ επάνω στο αρχείο το οποίο εισήχθη ανοίγει μία λίστα, από την οποία επιλέγεται η εντολή Link to Parameters
- Στην συνέχεια ανοίγει ένα νέο παράθυρο παρόμοιο με αυτό που εμφανίζεται στην Εικόνα 24
- Από την λίστα των παραμέτρων του προγράμματος η οποία εμφανίζεται στην δεξιά πλευρά του παραθύρου επιλέγεται η εντολή K\_xx η οποία είναι αυτή που αντιστοιχεί στην κατεύθυνση x'x.
- Από την λίστα των πεδίων του πίνακα χαρακτηριστικών του αρχείου shapfile επιλέγεται η στήλη στην οποία υπάρχουν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας της περιοχής μελέτης, στην προκειμένη περίπτωση η στήλη έχει ονομαστεί CONDX.
- Με την πραγματοποίηση της σύνδεση πατώντας κλικ στην εντολή OK γίνεται επιστροφή στο κυρίως παράθυρο του προγράμματος
- Για να ολοκληρωθεί η σύνδεση επιλέγονται οι κόμβοι στους οποίους πρέπει να ανατεθούν οι τιμές από το αρχείο shapfile, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση το σύνολο των κόμβων που υπάρχουν στον μοντέλο.
- Τέλος γίνεται η ανάθεση των τιμών στους επιλεγμένους κόμβους του FEFLOW με την επιλογή Assign

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας πρέπει να εμφανιστεί επάνω στον χάρτη μία εικόνα όπως αυτή στην Εικόνα 28. Τα διαφορετικά χρώματα δείχνουν την κατανομή στην περιοχή μελέτης και η τιμή στην οποία αντιστοιχεί κάθε ένα από αυτά μπορεί να βρεθεί στα αριστερά του χάρτη.





Εικόνα 28. Ο χάρτης της υδραυλικής αγωγιμότητας όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW.

### Εισαγωγή δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας για τον άξονα $y'y$

- Ακολουθώντας της εισαγωγή του αρχείου shapfile στο πρόγραμμα FEFLOW πρέπει να πραγματοποιηθεί σύνδεση των δεδομένων του αρχείου με τις εντολές του προγράμματος.
- Ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως και στην κατεύθυνση  $x'x$
- Από τη λίστα παραμέτρων του προγράμματος FEFLOW επιλέγεται η μεταβλητή η Conductivity
- Πατώντας δεξί κλικ επάνω στο αρχείο το οποίο εισήχθη ανοίγει μία λίστα, από την οποία επιλέγεται η εντολή Link to Parameters
- Στην συνέχεια ανοίγει ένα νέο παράθυρο παρόμοιο με αυτό που εμφανίζεται στην Εικόνα 24
- Από την λίστα των παραμέτρων του προγράμματος η οποία εμφανίζεται στην δεξιά πλευρά του παραθύρου επιλέγεται η εντολή  $K_{yy}$  η οποία είναι αυτή που αντιστοιχεί στην κατεύθυνση  $y'y$ .
- Από την λίστα των πεδίων του πίνακα χαρακτηριστικών του αρχείου shapfile επιλέγεται η στήλη στην οποία υπάρχουν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας της περιοχής μελέτης, στην προκειμένη περίπτωση η στήλη έχει ονομαστεί CONDX.
- Με την πραγματοποίηση της σύνδεση πατώντας κλικ στην εντολή OK γίνεται επιστροφή στο κυρίως παράθυρο του προγράμματος

- Για να ολοκληρωθεί η σύνδεση επιλέγονται οι κόμβοι στους οποίους πρέπει να ανατεθούν οι τιμές από το αρχείο shapfile, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση το σύνολο των κόμβων που υπάρχουν στον μοντέλο.
- Τέλος γίνεται η ανάθεση των τιμών στους επιλεγμένους κόμβους του FEFLOW με την επιλογή Assign
- Τα αποτελέσματα έχουν την ίδια μορφή με την Εικόνα 28 με μόνη διαφορά ότι αντιστοιχούν στην κατεύθυνση  $y'y$

### **Εισαγωγή δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας για τον άξονα $z'z$**

- Ακολουθώντας της εισαγωγή του αρχείου shapfile στο πρόγραμμα FEFLOW πρέπει να πραγματοποιηθεί σύνδεση των δεδομένων του αρχείου με τις εντολές του προγράμματος.
- Ακολουθείται η ίδια διαδικασία όπως και στην κατεύθυνση  $x'x$  με μία μικρή διαφορά
- Από τη λίστα παραμέτρων του προγράμματος FEFLOW επιλέγεται η μεταβλητή η Conductivity
- Πατώντας δεξί κλικ επάνω στο αρχείο το οποίο εισήχθη ανοίγει μία λίστα, από την οποία επιλέγεται η εντολή Link to Parameters
- Στην συνέχεια ανοίγει ένα νέο παράθυρο παρόμοιο με αυτό που εμφανίζεται στην Εικόνα 24
- Από την λίστα των παραμέτρων του προγράμματος η οποία εμφανίζεται στην δεξιά πλευρά του παραθύρου επιλέγεται η εντολή  $K_{zz}$  η οποία είναι αυτή που αντιστοιχεί στην κατεύθυνση  $z'z$ .
- Από την λίστα των πεδίων του πίνακα χαρακτηριστικών του αρχείου shapfile επιλέγεται η στήλη στην οποία υπάρχουν οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας της περιοχής μελέτης, στην προκειμένη περίπτωση η στήλη έχει ονομαστεί CONDX.
- Με την πραγματοποίηση της σύνδεση πατώντας κλικ στην εντολή OK γίνεται επιστροφή στο κυρίως παράθυρο του προγράμματος
- Για να ολοκληρωθεί η σύνδεση επιλέγονται οι κόμβοι στους οποίους πρέπει να ανατεθούν οι τιμές από το αρχείο shapfile, δηλαδή στη συγκεκριμένη περίπτωση το σύνολο των κόμβων που υπάρχουν στον μοντέλο.
- Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας και πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία πηγαίνοντας στο παράθυρο τιμών δίπλα από την εντολή assign ο χρήστης γράφει  $0.1 \times \text{CONDX}$

- Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε καθώς στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας στο άξονα z'z αποτελεί το 10% της τιμή του K στον άξονα x'x
- Τέλος γίνεται η ανάθεση των τιμών στους επιλεγμένους κόμβους του FEFLOW με την επιλογή Assign
- Τα αποτελέσματα έχουν την ίδια μορφή με την Εικόνα 28 με δύο μικρές διαφορές ότι αντιστοιχούν στην κατεύθυνση x'x και ότι οι τιμές είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερες από τον άξονα x'x και y'y.

### 2.3 Πηγάδια Παρατήρησης

Τα πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι 11 σε πλήθος. Τα δεδομένα της στάθμης των υπογείων υδάτων εξήχθησαν από διάφορες πηγές. Για να μπορεί να γίνει χρήση τους ταξινομήθηκαν ανάλογα με τις ημερομηνίες που διέθεταν μετρήσεις και χρησιμοποιήθηκε η περίοδος με τα περισσότερα δεδομένα. Η χρονική περίοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι από το 2000 – 2012. Στην συνέχεια για να μπορεί να γίνει εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα FEFLOW έπρεπε να πραγματοποιηθεί επεξεργασία τους στο πρόγραμμα ArcGIS καθώς οι μετρήσεις βρίσκονταν σε αρχείο excel.

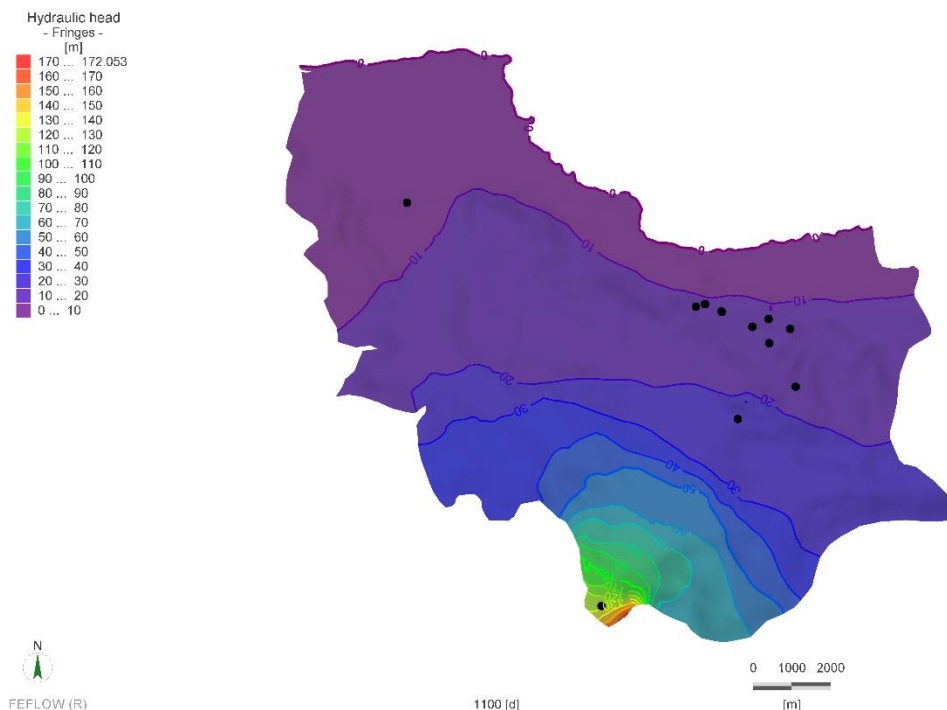
Σε αυτό το αρχείο excel τα δεδομένα που περιέχονται είναι οι συντεταγμένες X και Y των πηγαδιών παρατήρησης, το όνομα του κάθε πηγαδιού και τα δεδομένα για το υδραυλικό ύψος. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για το υδραυλικό ύψος ήταν τυχαίες και το γεγονός αυτό δημιούργησε περιόδους μεγαλύτερες του εξαμήνου όπου δεν υπήρχαν μετρήσεις για κάποια πηγάδια. Ένα παράδειγμα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν εμφανίζεται στην Εικόνα 30. Στο διάγραμμα αυτό στον άξονα x'x εμφανίζονται οι ημέρες της μοντελοποίησης ξεκινώντας από την ημέρα 0 όπου αυτή η μέρα είναι η 1/1/2000 μέχρι την ημέρα 4153 που είναι η μέρα 31/05/2011. Στον άξονα y'y εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος σε m όπου στο συγκεκριμένο πηγάδι παρατήρησης υπάρχει μέγιστη τιμή στα 12 m και ελάχιστη στο 1 m περίπου. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν εμφανίζονται με τις μπλε κουκίδες και είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι υπάρχουν περίοδοι όπου δεν πραγματοποιούνταν μετρήσεις.

Τα βήματα που ακολουθήθηκαν για να μπορεί να γίνει εισαγωγή του αρχείου στο πρόγραμμα FEFLOW είναι τα παρακάτω:

- Πραγματοποιείται εξαγωγή αρχείου .csv από το πρόγραμμα Microsoft excel
- Στην συνέχεια το αρχείο αυτό εισάγεται στο πρόγραμμα ArcGIS



- Πραγματοποιήθηκε σύνδεση των συντεταγμένων του αρχείου με τις συντεταγμένες στο πρόγραμμα ArcGIS
- Έγινε εξαγωγή των δεδομένων με την μορφή αρχείου shapefile
- Πραγματοποιήθηκε εισαγωγή του αρχείου shapefile στο πρόγραμμα FEFLOW
- Πατώντας δεξί κλικ στο όνομα του αρχείου επιλέγεται η εντολή point to observation well
- Μετά την παραπάνω επιλογή ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο επιλέγεται ότι τα πηγάδια παρατήρησης περιέχουν δεδομένα του υδραυλικού ύψους
- Και τέλος πατώντας την εντολή OK εμφανίζονται επάνω στον χάρτη σημεία τα οποία αντιστοιχούν στα πηγάδια παρατήρησης όπως εμφανίζονται στην Εικόνα 29

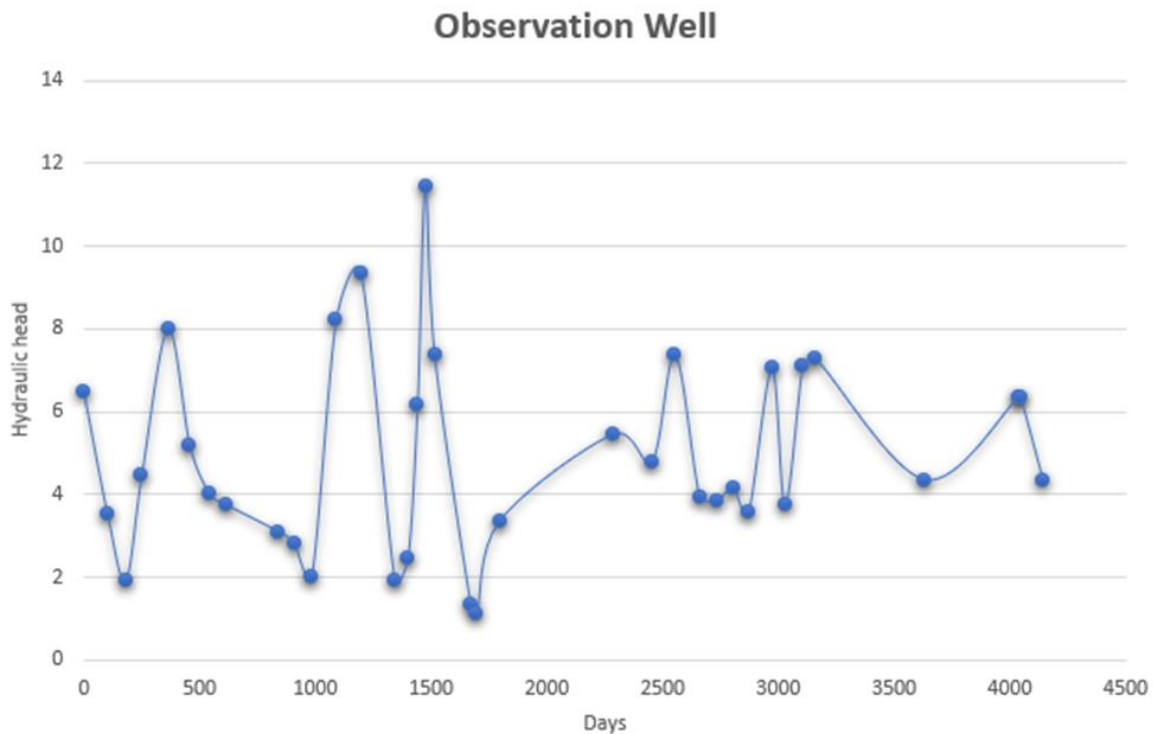


Εικόνα 29. Τα πηγάδια παρατήρησης στην περιοχή μελέτης στο πρόγραμμα FEFLOW. Κάθε μαύρη κουκίδα αντιστοιχεί σε ένα πηγάδι παρατήρησης.

Στον παραπάνω χάρτη εμφανίζονται τα σημεία με μαύρο χρώμα που αντιστοιχούν στα πηγάδια παρατήρησης. Το παραπάνω στιγμιότυπο είναι από μία τυχαία χρονική στιγμή. Τα πηγάδια παρατήρησης μπορούν να εμφανιστούν και με άλλα σύμβολα και χρώματα. Επιλέχθηκε το μαύρο επειδή κάνει αντίθεση και φαίνονται καλύτερα τα σημεία. Παρότι τα σημεία εμφανίστηκαν στον χάρτη δεν περιέχουν ακόμη τα δεδομένα του υδραυλικού ύψους.

- Για να γίνει η αντιστοίχιση τους εισάγονται αρχεία txt τα οποία περιέχουν μόνο τις ημέρες των μετρήσεων και τις μετρήσεις.

- Μόλις γίνει η εισαγωγή τους στο πρόγραμμα FEFLOW εμφανίζεται μία χρονοσειρά αντιστοιχία με αυτή της Εικόνα 30
- Στην συνέχεια κάθε μία από αυτές τις χρονοσειρές παίρνει το όνομα του πηγαδιού που αντιστοιχεί και
- Τέλος πατώντας στην εντολή που αντιστοιχεί στην επεξεργασία των πηγαδιών παρατήρησης επιλέγεται το πηγάδι και τη χρονοσειρά με το αντίστοιχο όνομα.



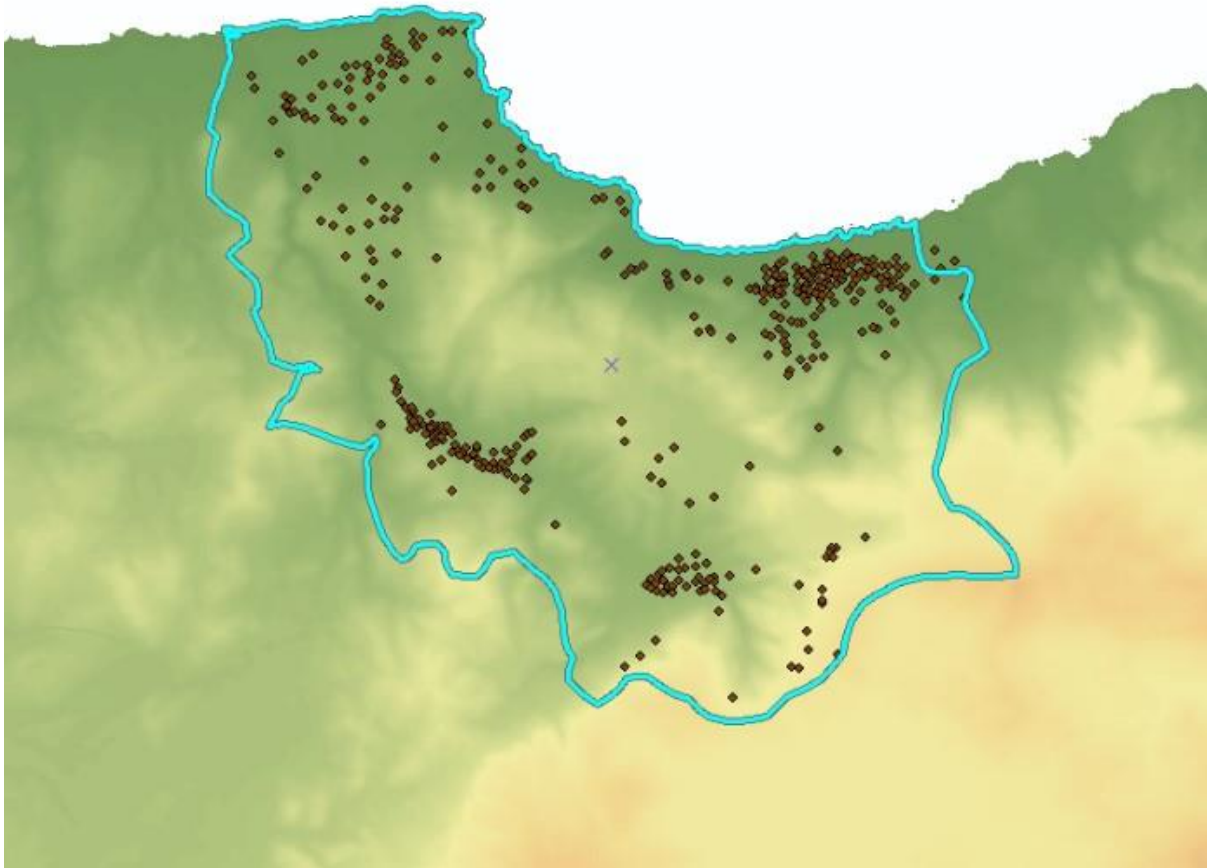
Εικόνα 30. Χρονοσειρά υδραυλικού ύψους σε σχέση με τις ημέρες για ένα τυχαίο πηγάδι παρατήρησης.

## 2.4 Γεωτρήσεις Άντλησης

Στην περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από 407 γεωτρήσεις - πηγάδια άντλησης των οποίων τα δεδομένα εξήχθησαν από την Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης. Το αρχείο excel όπου υπήρχαν τα δεδομένα για τα 407 πηγάδια περιείχε εκτός από τον ρυθμό άντλησης και δεδομένα για την ιδιοκτησία, τις νόμιμες άδειες που είχε το κάθε ένα από αυτά και άλλες πληροφορίες που δεν χρησιμοποιήθηκαν. Για την ευκολότερη διαχείριση των 407 πηγαδιών αποφασίστηκε να ομαδοποιηθούν σε 20. Για να γίνει αυτό ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Αρχικά το αρχείο excel το οποίο περιείχε τα δεδομένα που χρειαζόνταν αποθηκεύτηκε με την μορφή αρχείου .csv

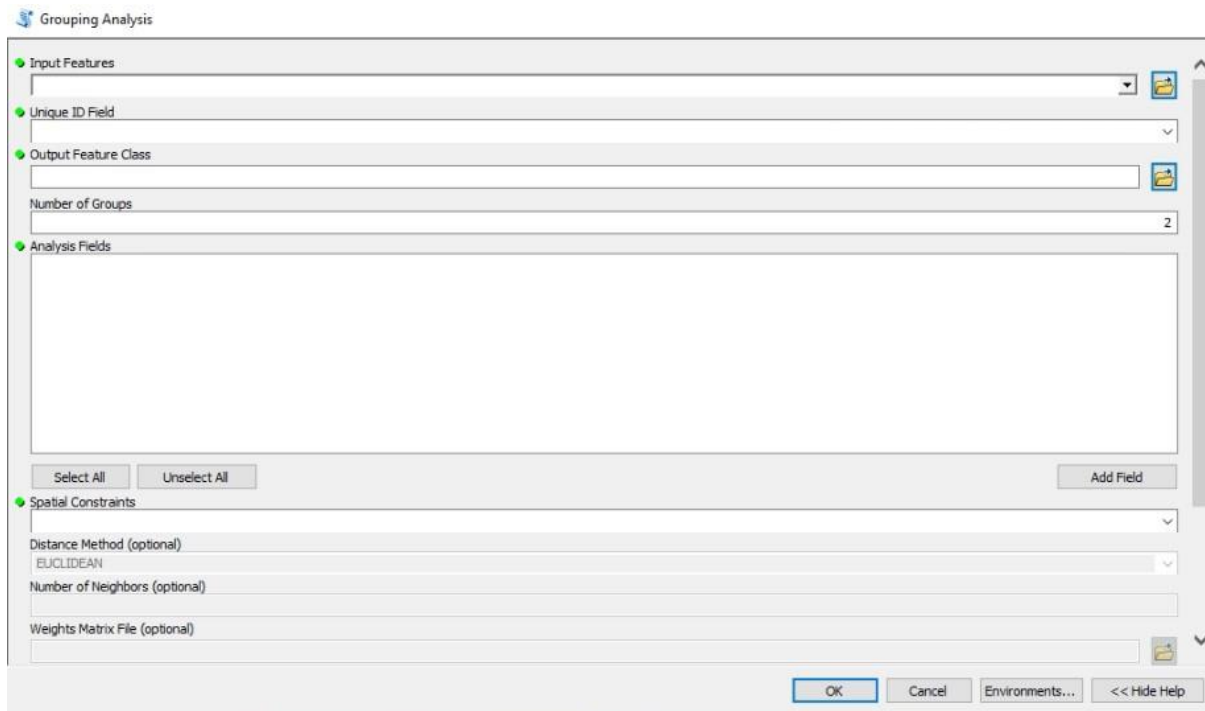
- Στην συνέχεια το αρχείο αυτό εισήχθη στο πρόγραμμα ArcGIS
- Κατά την εισαγωγή του αρχείου πραγματοποιείται σύνδεση με το πρόγραμμα ArcGIS. Η σύνδεση αυτή αφορά τις συντεταγμένες Χ και Υ του προγράμματος με το αρχείο.
- Επιλέγεται στο πρόγραμμα ArcGIS ότι οι συντεταγμένες ανήκουν στο Ελληνικό προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ 87 (Greek Grid).
- Στην συνέχεια δημιουργούνται στον χάρτη κουκίδες σε διάφορα σημεία ανάλογα με τις συντεταγμένες τους και η κάθε κουκίδα περιέχει τα στοιχεία του αντίστοιχου πηγαδιού άντλησης.
- Η κατανομή τους στην περιοχή μελέτης εμφανίζεται στην Εικόνα 31
- Έπειτα πραγματοποιήθηκε διαλογή των πληροφοριών που περιέχονταν σε κάθε ένα από τα πηγάδια άντλησης για να παραμείνουν μόνο αυτές που χρειάζονται από το πρόγραμμα FEFLOW.
- Μετά την επεξεργασία αυτή οι πληροφορίες που παρέμειναν είναι οι συντεταγμένες Χ και Υ, ο ρυθμός άντλησης καθώς και το βάθος του πηγαδιού άντλησης



Εικόνα 31. Η κατανομή των 407 πηγαδιών άντλησης στην περιοχή μελέτης όπως εμφανίζονται στο πρόγραμμα ArcGIS.

Μετά την παραπάνω διαδικασία ακολουθήθηκαν κάποιες εντολές ώστε να πραγματοποιηθεί η ομαδοποίηση των πηγαδιών άντλησης. Αυτές οι διαδικασίες εμφανίζονται στα παρακάτω βήματα:

- Στο πρόγραμμα ArcGIS πληκτρολογήθηκε η εντολή Grouping Analysis στην μπάρα αναζήτησης
- Όταν επιλέχθηκε η εντολή εμφανίστηκε το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 32

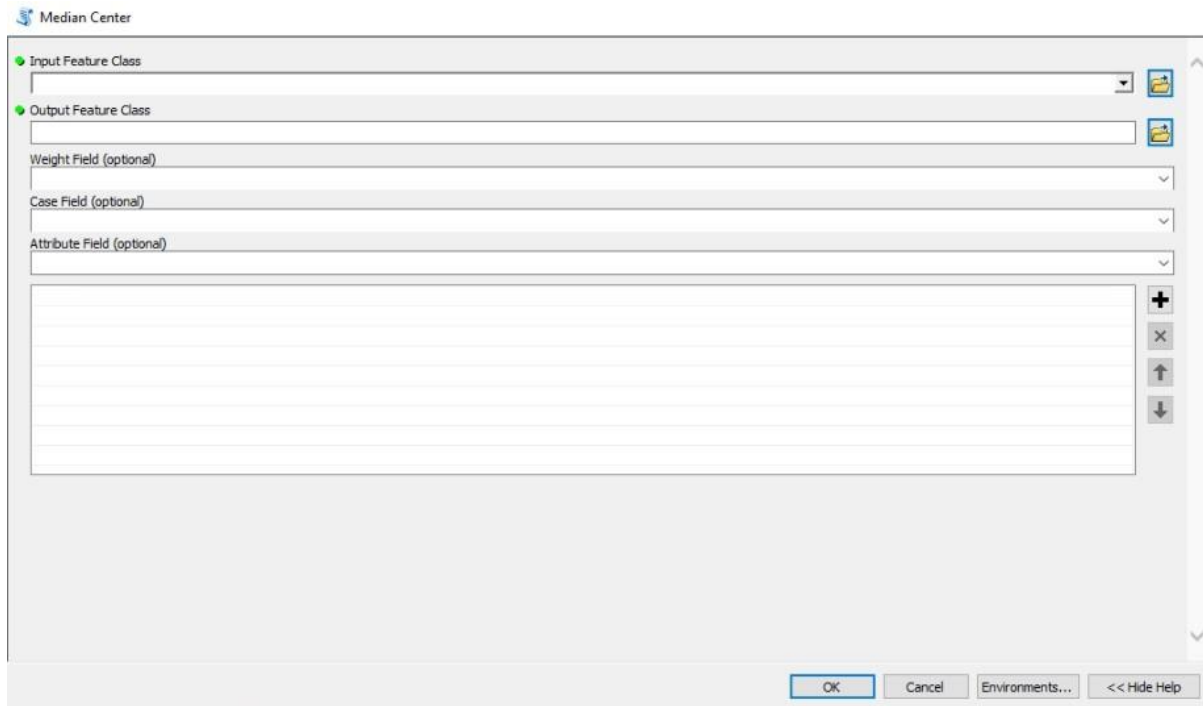


Εικόνα 32. Το παράθυρο με τις εντολές για το Grouping Analysis όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα ArcGIS.

- Στο παράθυρο αυτό επιλέγονται διάφοροι συνδυασμοί ανάλογα με το τι επιθυμεί ο χρήστης έτσι ώστε να δημιουργηθούν τα γκρουπ
- Στην παρούσα περίπτωση στην λίστα Input Features επιλέγεται το αρχείο που θέλει ο χρήστης να ομαδοποιήσει για την παρούσα περίπτωση επιλέχθηκε το όνομα του αρχείου που περιέχει τα πηγάδια άντλησης
- Στην λίστα Unique ID Field επιλέγεται η παράμετρος κατά την οποία επιθυμεί ο χρήστης να γίνει η ομαδοποίηση στην προκειμένη περίπτωση επιλέχθηκε ο ρυθμός άντλησης
- Στο Output Feature Class δίνεται το όνομα του νέου αρχείου που θα δημιουργηθεί
- Στο Number of Groups επιλέγεται το πλήθος των γκρουπ που θα δημιουργηθούν
- Τέλος στην λίστα Distance Method επιλέγεται η εντολή K- nearest neighbors
- Το νέο αρχείο που δημιουργείται περιέχει τα σημεία με διαφορετικά χρώματα όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 34.

Στην συνέχεια για κάθε ένα από τα γκρουπ δημιουργείται ένα θεωρητικό πηγάδι άντλησης το οποίο περιέχει όλα τα δεδομένα των πηγαδιών στο αντίστοιχο γκρουπ που έχει δημιουργηθεί και βρίσκεται στο κέντρο αυτού. Για την δημιουργία του κάθε ενός από τα θεωρητικά πηγάδια άντλησης ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Πληκτρολογήθηκε στο πρόγραμμα ArcGIS η εντολή Median Center στην μπάρα αναζήτησης
- Όταν επιλέχθηκε η εντολή εμφανίστηκε το παράθυρο που φαίνεται στην Εικόνα 33

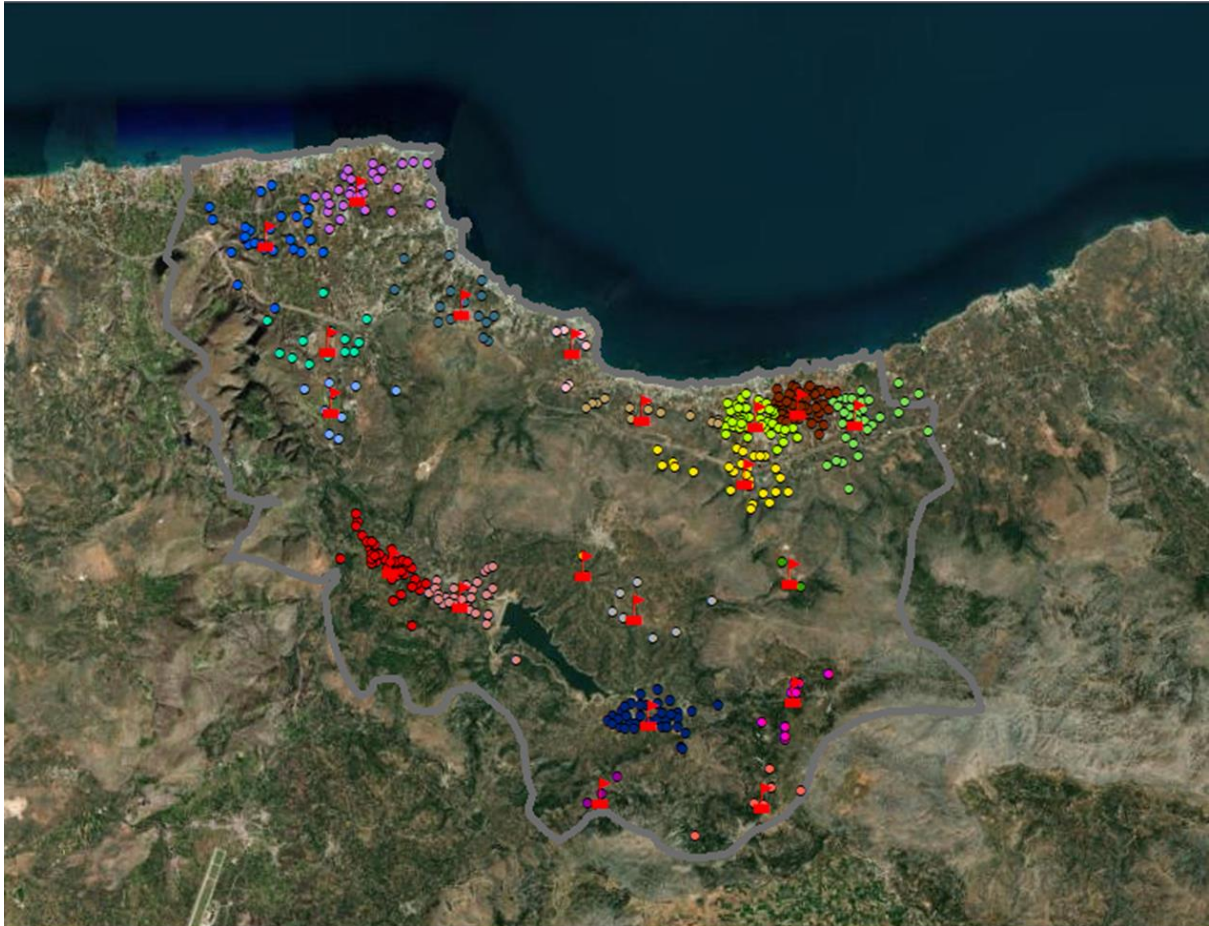


Εικόνα 33. Το παράθυρο με τις εντολές για το Median Center όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα ArcGIS.

- Στο παράθυρο αυτό επιλέγονται διάφοροι συνδυασμοί ανάλογα με το τι επιθυμεί ο χρήστης
- Στην παρούσα περίπτωση στην λίστα Input Features Class επιλέγεται το αρχείο που θέλει ο χρήστης να δημιουργήσει ένα σημείο στο κέντρο που να περιέχει όλες τις πληροφορίες που επιθυμεί. Για την παρούσα περίπτωση επιλέχθηκε το όνομα του αρχείου που δημιουργήθηκε προηγουμένως και περιέχει τα ομαδοποιημένα πηγάδια άντλησης
- Στο Output Feature Class δίνεται το όνομα του νέου αρχείου που θα δημιουργηθεί
- Στο Weight Field επιλέγεται από την λίστα που ανοίγει ο αριθμός του γκρουπ που ανήκει το κάθε γεώτρηση άντλησης.
- Με την προηγούμενη εντολή κάθε ένα νέο πηγάδι που θα δημιουργηθεί θα περιέχει τον συνολικό ρυθμό άντλησης καθώς και ένα μέσο βάθος στο οποίο βρίσκονται τα φίλτρα της γεώτρησης.



- Στην συνέχεια πατώντας το κουμπί OK εμφανίζεται στο παράθυρο του ArcGIS ο χάρτης της Εικόνα 34
- Στον χάρτη αυτό εμφανίζονται κάποια σημεία με κόκκινη σημαία τα οποία αποτελούν τα 20 νέα πηγάδια άντλησης.



*Εικόνα 34. Το αποτέλεσμα της ομαδοποίησης των πηγαδιών άντλησης όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα ArcGIS.*

Στην συνέχεια το νέο αρχείο που δημιουργήθηκε και περιέχει 20 θεωρητικά πηγάδια παρατήρησης εξάγεται από το πρόγραμμα ArcGIS με την μορφή αρχείου shapefile για να μπορεί να πραγματοποιηθεί εισαγωγή του στο πρόγραμμα FEFLOW. Κάθε ένα από τις 20 γεωτρήσεις άντλησης περιέχει τα δεδομένα για τον ρυθμό άντλησης σε  $m^3/d$ , τις συντεταγμένες X και Y καθώς και το βάθος της γεώτρησης.

Το νέο αρχείο εισάγεται στο πρόγραμμα FEFLOW όπου εκεί τα δεδομένα που περιέχονται σε κάθε ένα από τις 20 γεωτρήσεις άντλησης πρέπει να συνδεθεί με την αντίστοιχη παράμετρο του προγράμματος.

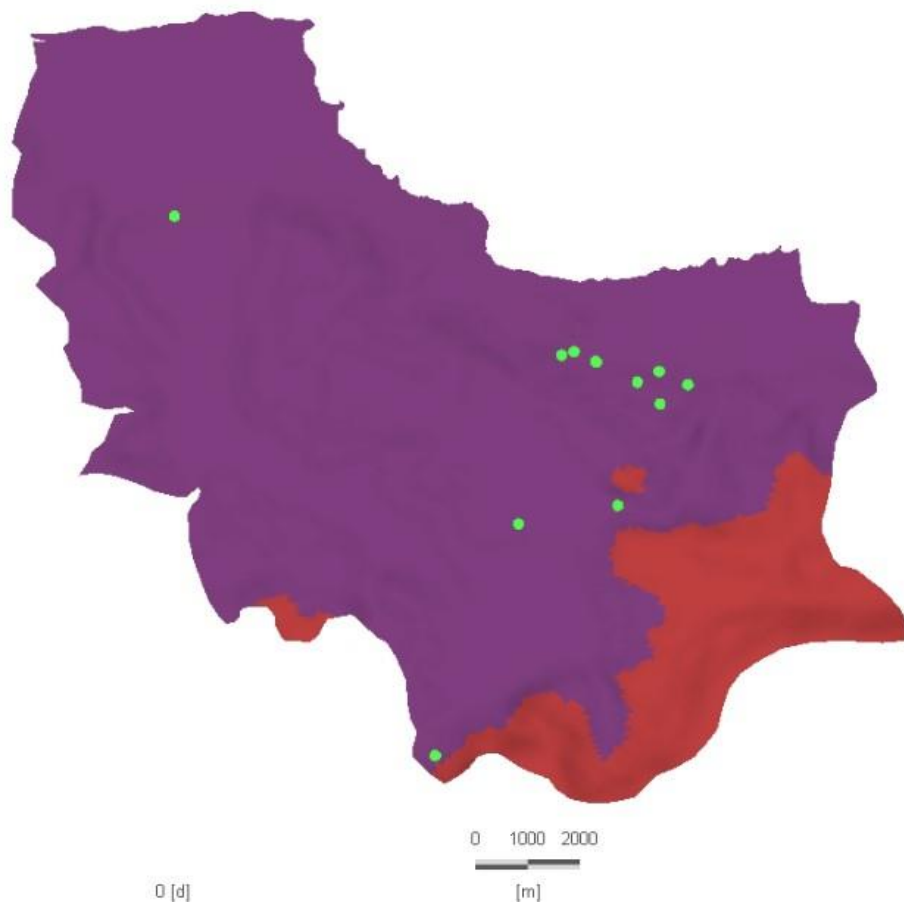
- Κατά την εισαγωγή του αρχείου στο πρόγραμμα FEFLOW οι πρώτες μεταβλητές που αντιστοιχούνται είναι οι συντεταγμένες έτσι ώστε να χωροθετηθούν τα πηγάδια άντλησης μέσα στον χάρτη του προγράμματος.
- Στην συνέχεια επιλέγεται η εντολή multilayer well
- Πατώντας δεξί κλικ επάνω της και από την λίστα που ανοίγει επιλέγεται η εντολή Link to parameters
- Έπειτα ανοίγει ένα παράθυρο αντίστοιχο με αυτό της Εικόνα 24 όπου πραγματοποιείται η αντιστοίχιση των πληροφοριών
- Στο πρόγραμμα FEFLOW υπάρχει η μεταβλητή pumping rate όπου αντιστοιχίζεται με τον ρυθμό άντλησης του αρχείου και επιλέγεται η μονάδα μέτρησης του προγράμματος ώστε να αντιστοιχεί με αυτή του αρχείου. Στην προκειμένη περίπτωση  $m^3/d$ .
- Τέλος επιλέγεται η μεταβλητή του προγράμματος που αντιστοιχεί στο βάθος της γεώτρησης και πραγματοποιείται αντιστοίχιση.
- Πατώντας την εντολή assign η πληροφορία μεταφέρεται στο πρόγραμμα FEFLOW το οποίο πλέον περιέχει τα δεδομένα για τα πηγάδια άντλησης.

## 2.5 Βροχόπτωση

Για την περιοχή περιοχή των Μαλίων βρέθηκαν πολλά δεδομένα που αφορούν την βροχόπτωση. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από βροχομετρικούς σταθμούς οι οποίοι βρίσκονται η μέσα στην περιοχή μελέτης η στα όρια της. Αυτά τα δεδομένα αφορούν διαφορετικές χρονικές περιόδους στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από την περίοδο 2000-2012. Από τους βροχομετρικούς σταθμούς όπου βρέθηκαν δεδομένα που αφορούν την βροχόπτωση περιείχαν ημερήσιες τιμές και μονάδες μέτρησης mm/d (χιλιοστά/ημέρα) χρησιμοποιήθηκαν οι πληροφορίες που αντλήθηκαν από 2 σταθμούς. Ο ένας σταθμός είναι ο βροχομετρικός σταθμός ο οποίος βρίσκεται στην περιοχή που ονομάζεται Νεάπολη. Αυτός ο σταθμός βρίσκεται στα 285 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας και χρησιμοποιήθηκε καθώς περιείχε πληροφορίες για την βροχόπτωση για την περίοδο ενδιαφέροντος και βρίσκεται κοντά στην περιοχή των Μαλίων. Ο δεύτερος βροχομετρικός σταθμός που χρησιμοποιήθηκε βρίσκεται στην περιοχή Τζερμιάδο. Η περιοχή αυτή είναι ορεινή και ο σταθμός βρίσκεται σε υψόμετρο 820 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας.

Οι δύο αυτοί σταθμοί επιλέχθηκαν επειδή η περιοχή μελέτης καλύπτει μία μεγάλη έκταση στην οποία η βροχόπτωση διαφέρει αρκετά από περιοχή σε περιοχή. Υπάρχουν περιοχές οι οποίες βρίσκονται στα ορεινά και δέχονται μεγαλύτερη βροχόπτωση και περιοχές που βρίσκονται λίγα μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας. Το υψόμετρο της περιοχής βρίσκεται σε ένα εύρος τιμών από 0 έως 1421 μέτρα. Για αυτό τον λόγο ανάλογα με το υψόμετρο που βρίσκεται

η κάθε περιοχή χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τον βροχομετρικό σταθμό της Νεάπολης και σε άλλες περιοχές από αυτόν του Τζερμιάδο.



Εικόνα 35. Κατανομή βροχόπτωσης στην περιοχή μελέτης όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW.

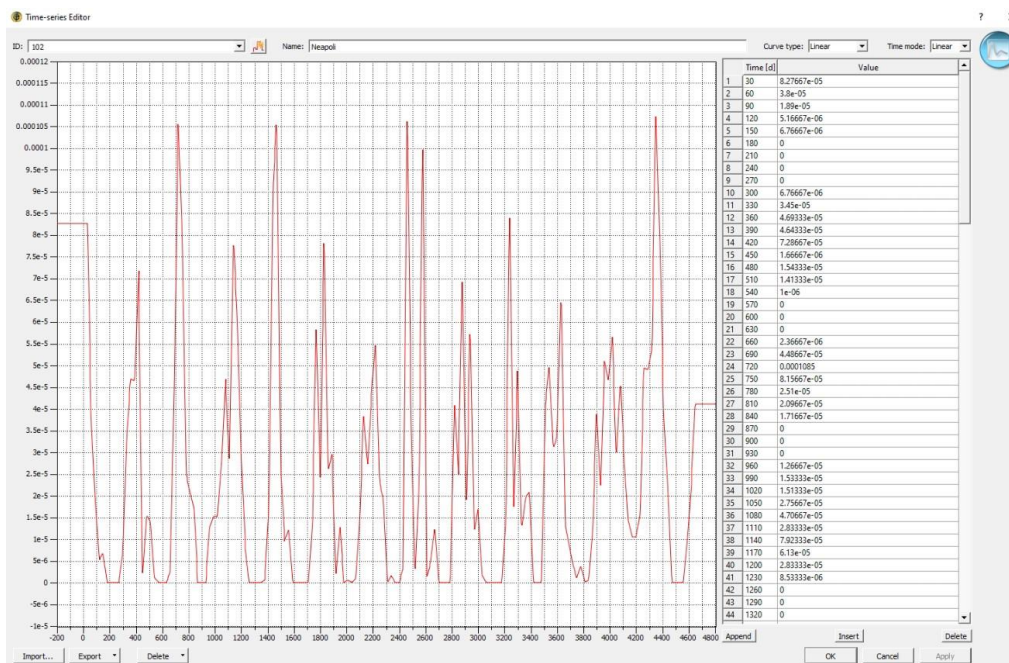
Στην Εικόνα 35 εμφανίζεται με 2 χρώματα η κατανομή της βροχόπτωσης. Η περιοχή με το μωβ χρώμα αντιστοιχεί στην περιοχή που καλύπτει ο βροχομετρικός σταθμός της Νεάπολης. Οι περιοχές αυτές βρίσκονται σε υψόμετρο από 0 m έως τα 700 m. Οι περιοχές με το κόκκινο χρώμα αντιστοιχούν στον βροχομετρικό σταθμό του Τζερμιάδο και βρίσκονται σε υψόμετρο μεγαλύτερο από τα 700 m.

Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Excel. Τα δεδομένα της βροχόπτωσης τα οποία χρησιμοποιήθηκαν περιείχαν μία τιμή της βροχόπτωσης για κάθε μέρα. Για την μοντελοποίηση της περιοχής μελέτης το βήμα που επιλέχθηκε ήταν 10 ημέρες. Ο λόγος που επιλέχθηκαν οι 10 ημέρες ήταν επειδή κατά την εισαγωγή των δεδομένων της βροχόπτωσης τον πρόγραμμα καθυστέρουσε πάρα πολύ καθώς χρειαζόταν παραπάνω υπολογιστική δύναμη. Τα δεδομένα της βροχόπτωσης δέχθηκαν την επεξεργασία που ακολουθεί:

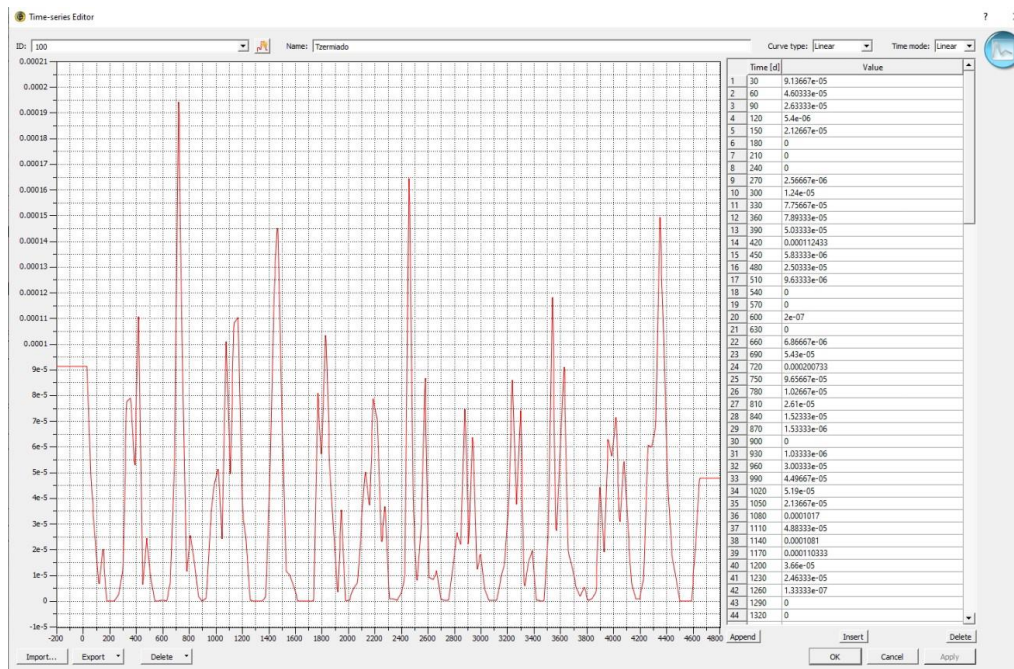
- Αρχικά πραγματοποιήθηκε άθροισμα της ημερήσιας τιμής (mm/d) της βροχόπτωσης για δέκα ημέρες (mm/10d).



- Στην συνέχεια επειδή το πρόγραμμα FEFLOW δέχεται την βροχόπτωση με μονάδες μέτρησης μέτρα ανά ημέρα πραγματοποιήθηκε η μετατροπή μονάδων μέτρησης που ακολουθεί.
- $$\frac{\text{Βροχόπτωση (mm)}}{10 \text{ Ημέρες}} \times \frac{1}{1000} = \text{Βροχόπτωση (m)/ 10 Ημέρες}$$
- Από την βιβλιογραφία βρέθηκε ότι περίπου το 10% της βροχόπτωσης καταλήγει στο υπέδαφος και το υπόλοιπο 90% καταλήγει στην θάλασσα ή σε λίμνη σαν επιφανειακή απορροή οπότε
- Τελική Τιμή = (Βροχόπτωση (m)/ 10 Ημέρες)×0.1
- Η Τελική Τιμή μαζί με το βήμα το οποίο αντιστοιχεί αντιγράφηκε σε μία σελίδα του προγράμματος Notepad++
- Έπειτα το αρχείο txt το οποίο εξήχθη από το πρόγραμμα Notepad++ εισήχθη στο πρόγραμμα FEFLOW
- Στο πρόγραμμα FEFLOW επιλέγεται η εντολή Timeseries με την οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί επεξεργασία ή εισαγωγή χρονοσειράς
- Εκεί επιλέγονται τα αρχεία txt που αντιστοιχούν στην βροχόπτωση της Νεάπολης και του Τζερμιάδο.
- Τέλος επιλέγεται η περιοχή στην οποία αντιστοιχεί η κάθε χρονοσειρά βροχόπτωσης και με την εντολή assign ολοκληρώνεται η διαδικασία.



Εικόνα 36. Χρονοσειρά της βροχόπτωσης όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW για τον βροχομετρικό σταθμό της Νεάπολης.



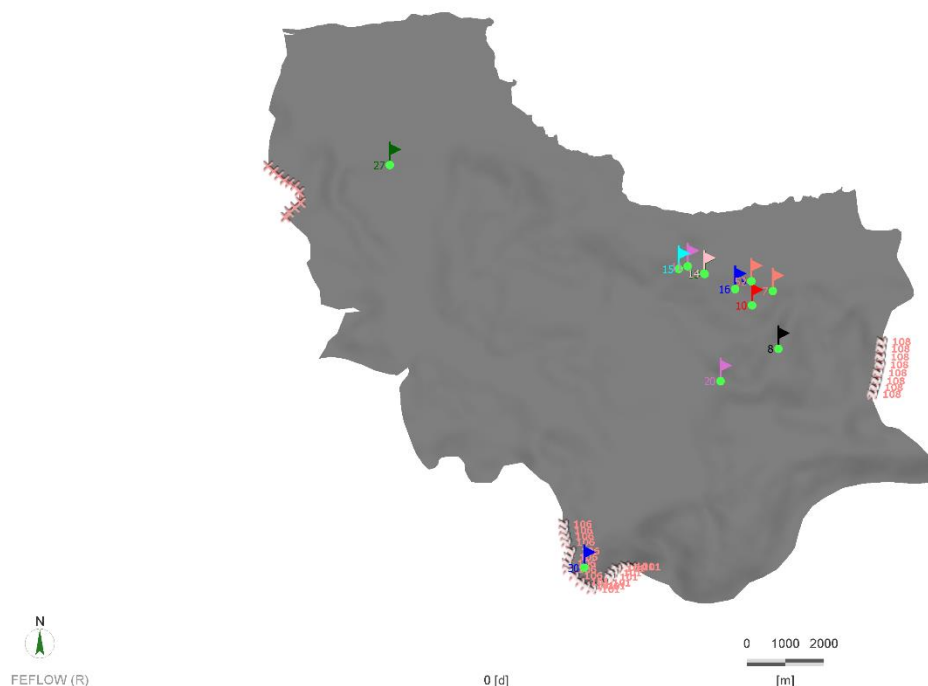
Εικόνα 37. Χρονοσειρά της βροχόπτωσης όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW για τον βροχομετρικό σταθμό του Τζερμιάδο.

Οι χρονοσειρές που εμφανίζονται στην Εικόνα 36 και στην Εικόνα 37 δημιουργούνται μετά την εισαγωγή των δεδομένων από τα αρχεία txt.

## 2.6 Οριακές Συνθήκες

### 2.6.1 Οριακές Συνθήκες 2<sup>ου</sup> Είδους

Για τις οριακές συνθήκες στην περιοχή των Μαλίων αρχικά πραγματοποιήθηκε μία πρόχειρη μελέτη των υδραυλικών υψών έτσι ώστε να γίνει κατανοητό ποια είναι η γενική κατεύθυνση της ροής υπογείων υδάτων. Παρατηρήθηκε ότι η ροή έχει μία γενική κατεύθυνση από τον νότο προς τον βορρά δηλαδή από το βουνό Σελένα προς την θάλασσα. Αρχικά για την οριοθέτηση των οριακών συνθηκών επιλέχθηκε το νοτιότερο σημείο στο οποίο υπήρχαν δεδομένα υδραυλικού ύψους στην περιοχή μελέτης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 38.



Εικόνα 38. Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν οι οριακές συνθήκες 2ου είδους επάνω στον χάρτη όπως εμφανίζονται στο πρόγραμμα FEFLOW.

Για να πραγματοποιηθεί ορισμός των οριακών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω διαδικασία. Αρχικά επιλέχθηκαν τα σημεία στα οποία θέλει ο χρήστης να τοποθετηθεί η οριακή συνθήκη. Αυτά τα σημεία υπάρχει περίπτωση στο τέλος της διαδικασίας να αποδειχθούν εσφαλμένα. Στην συνέχεια με την μέθοδο της δοκιμής και του σφάλματος πραγματοποιήθηκαν δοκιμές έως ότου βρεθεί η τάξη μεγέθους στην οποία οι τιμές του υδραυλικού ύψους πλησιάζουν τις πραγματικές τιμές. Αυτή η διαδικασία δεν πραγματοποιείται με σκοπό τον μηδενισμό του σφάλματος όσο για την εύρεση της τάξης μεγέθους της σταθερής τιμής της οριακής συνθήκης. Για την αντιστοίχιση της χρονοσειράς με την οριακή συνθήκη που θα χρησιμοποιηθεί επιλέγεται η εντολή Timeseries. Στο παράθυρο το οποίο εμφανίζεται επιλέγεται η δημιουργία μίας νέας χρονοσειράς και ονοματίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εύκολη η κατανόηση από τον χρήστη για ποιον σκοπό γίνεται η χρήση της. Στην συνέχεια εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία ορισμού της τιμής πραγματοποιείται αποθήκευση της χρονοσειράς. Μετά την αποθήκευση κλείνει το παράθυρο και επιλέγονται τα σημεία στα οποία αντιστοιχούν οι τιμές οι οποίες ορίστηκαν. Δίπλα από την εντολή Assign επιλέγεται η ονομασία της αντίστοιχης χρονοσειράς και η διαδικασία ολοκληρώνεται.

Για τα σημεία τα οποία βρίσκονται στο νότιο μέρος της περιοχής μελέτης πραγματοποιήθηκε σύνδεση της οριακής συνθήκης με την βροχόπτωση με σκοπό την δημιουργία των αυξομειώσεων της ροής των υπογείων υδάτων. Αυτό έγινε με σκοπό την καλύτερη δυνατή προσομοί-

ωση των πραγματικών συνθηκών. Για την δημιουργία της χρονοσειράς για τις οριακές συνθήκες χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Microsoft Excel. Οι διακυμάνσεις στις οριακές συνθήκες οι οποίες είναι ανάλογες της βροχόπτωσης πραγματοποιήθηκαν με την παρακάτω εξίσωση.

$$BC_{10days} = BC_0 \cdot \frac{P_{10days}}{\bar{P}}$$

Όπου:

$BC_{10days}$  : Είναι η τιμή της οριακής συνθήκης για μία περίοδο 10 ημερών

$BC_0$ : Είναι η τιμή της οριακής συνθήκης η οποία ορίστηκε με την μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος

$P_{10days}$ : Είναι η τιμή της βροχόπτωσης η οποία χρησιμοποιείται κατά την μοντελοποίηση τη περιοχής μελέτης

$\bar{P}$ : Είναι η μέση τιμή της βροχόπτωσης για την συνολική περίοδο της μοντελοποίησης 2000 - 2012

Η νέα τιμή που της οριακής συνθήκης δηλαδή το  $BC_{10days}$  αντιστοιχεί στην ίδια χρονική περίοδο με το  $P_{10days}$ . Μόλις ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα:

- Πραγματοποιείται αντιγραφή των νέων τιμών των οριακών συνθηκών στο πρόγραμμα Notepad++.
- Δίπλα από κάθε νέα τιμή της οριακής συνθήκης βρίσκεται η χρονική περίοδος στην οποία αντιστοιχεί
- Πραγματοποιείται αποθήκευση του αρχείου .txt
- Στην συνέχεια πραγματοποιείται εισαγωγή του αρχείου txt στο πρόγραμμα FEFLOW με την χρήση της εντολής Timeseries
- Με την χρήση αυτής της εντολής ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο βρίσκονται όλες οι χρονοσειρές που έχουν χρησιμοποιηθεί και μπορεί να πραγματοποιηθεί επεξεργασία μίας υπάρχουσας χρονοσειράς ή εισαγωγή μίας νέας.
- Στην προκειμένη περίπτωση πραγματοποιείται επεξεργασία υπάρχουσας χρονοσειράς.
- Επιλέγεται η χρονοσειρά στην οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της δοκιμής και του σφάλματος και αντικαθίσταται από την νέα χρονοσειρά
- Αυτή η διαδικασία γίνεται για την οικονομία χρόνου επειδή η παλιά χρονοσειρά έχει αντιστοιχηθεί με τα επιθυμητά σημεία.

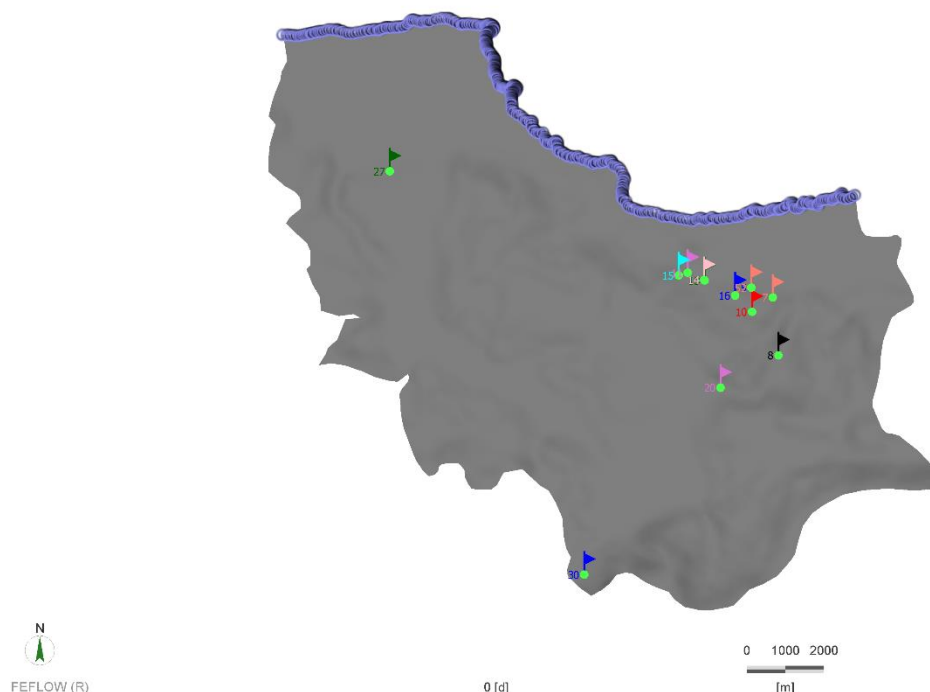
Η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται και για την οριακή συνθήκη η οποία βρίσκεται στο δεξί όριο της περιοχής μελέτης όπως φαίνεται στην Εικόνα 38. Για την οριακή συνθήκη στο

αριστερό όριο της περιοχής μελέτης που εμφανίζεται στην Εικόνα 38 χρησιμοποιήθηκε οριακή συνθήκη δευτέρου είδους χωρίς την δημιουργία χρονοσειράς με την παραπάνω διαδικασία. Στα εξωτερικά όρια της περιοχής μελέτης στην αριστερή περιοχή υπάρχουν τοποθετημένα πηγάδια άντλησης τα οποία επηρεάζουν εντός της περιοχής μελέτης. Για εκείνα τα σημεία επιλέχθηκε μία τιμή χειροκίνητα ανάλογη του ρυθμού άντλησης για την χρονική περίοδο που ήταν ενεργό το κάθε πηγάδι.

Μετά το πέρας της παραπάνω διαδικασίας πραγματοποιείται μία δοκιμαστική προσομοίωση. Εάν το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης είναι ικανοποιητικό ολοκληρώνεται ο ορισμός των οριακών συνθηκών. Αν υπάρχει μεγάλη απόκλιση από τις πραγματικές τιμές η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το σφάλμα ελαχιστοποιηθεί.

### 2.6.2 Οριακές Συνθήκες 1<sup>ου</sup> Είδους

Για τον ορισμό των οριακών συνθηκών πρώτου είδους η διαδικασία είναι πολύ ευκολότερη σε σχέση με του δευτέρου είδους. Για τον ορισμό οριακής συνθήκης πρώτου είδους ο χρήστης θέτει μία σταθερή τιμή υδραυλικού ύψους στα όρια της περιοχής μελέτης. Στην παρούσα περιοχή μελέτης ορίστηκε συνθήκη 1<sup>ου</sup> είδους στα παράλια της περιοχής μελέτης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 39.



Εικόνα 39. Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν οι οριακές συνθήκες 1ου είδους επάνω στον χάρτη όπως εμφανίζονται στο πρόγραμμα FEFLOW.

Για τον ορισμό της οριακής συνθήκης πρώτου είδους ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

- Αρχικά επιλέχθηκαν τα σημεία τα οποία βρίσκονται στα παράλια της περιοχής μελέτης

- Στην συνέχεια επιλέχθηκε η εντολή Hydraulic Head BC
- Δίπλα από την εντολή Assign πληκτρολογείτε ο αριθμός 0
- Τέλος πατώντας αριστερό κλικ στο Assign ολοκληρώνεται η διαδικασία και εμφανίζονται οι μπλε κουκίδες όπως και στην Εικόνα 39.

Για την παράλια περιοχή ορίστηκε υδραυλικό ύψος 0 μέτρα καθώς το υπόγειο νερό βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με την επιφάνεια της θάλασσας.

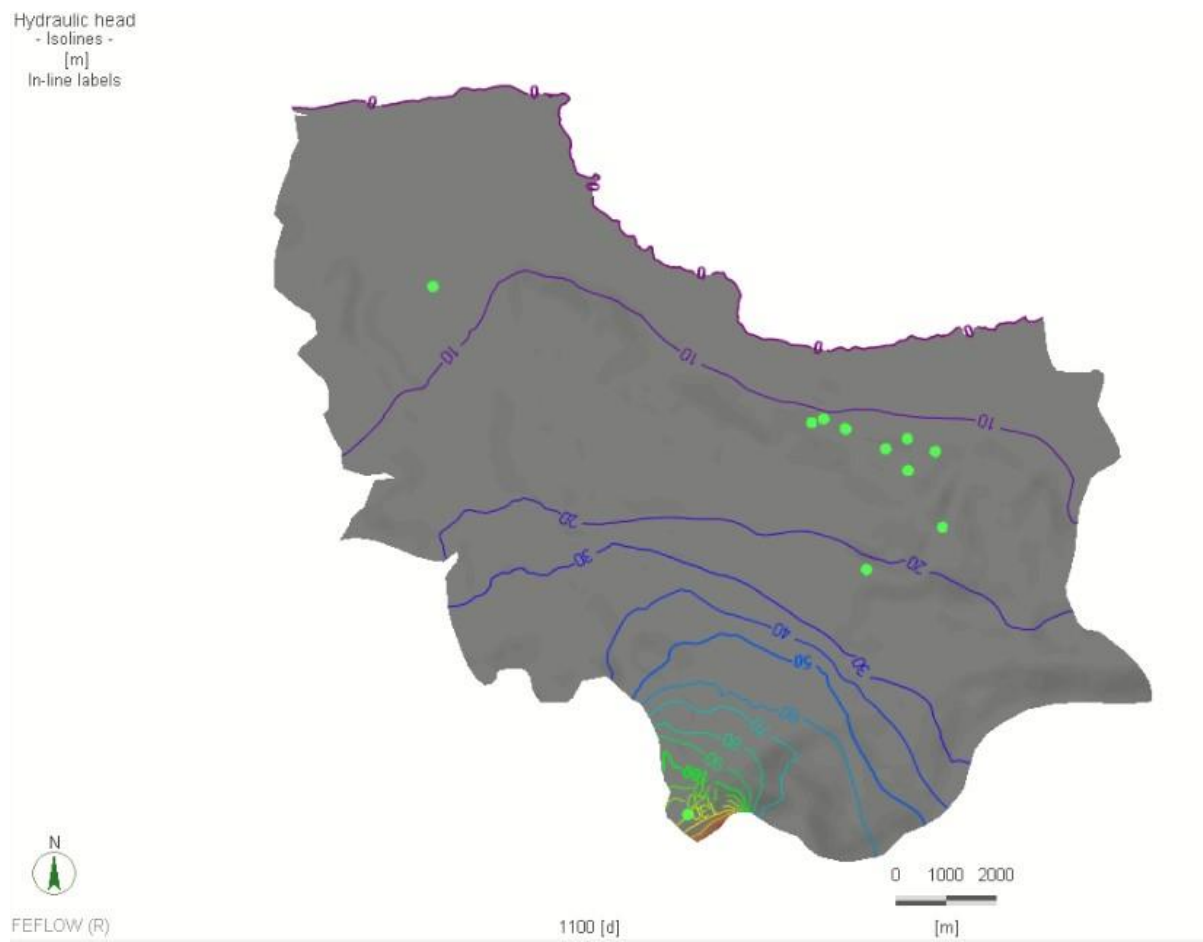
## **2.7 Βαθμονόμηση Προγράμματος FEFLOW**

Μετά από τις ενέργειες που περιεγράφηκαν στα παραπάνω κεφάλαια με την χρήση των δεδομένων δημιουργήθηκε η περιοχή μελέτης στο πρόγραμμα FEFLOW. Στην περιοχή αυτή υπήρχαν τα δεδομένα τα οποία αντιστοιχούν σε διάφορες σημαντικές μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν την ροή των υπογείων υδάτων. Κάποια από τα δεδομένα αποτελούνται από ένα εύρος τιμών όπου μπορεί ο χρήστης να πραγματοποιήσει δοκιμές έως ότου προσομοιώσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τις πραγματικές συνθήκες όπως για παράδειγμα η υδραυλική αγωγιμότητα.

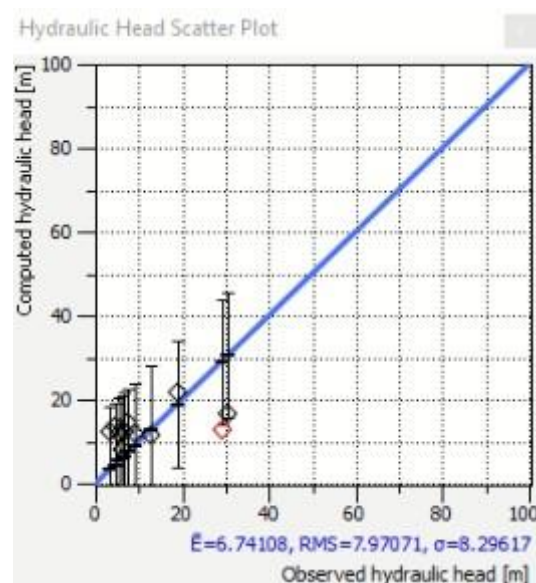
Αρχικά με την μέθοδο της δοκιμή και σφάλματος δημιουργήθηκαν οι οριακές συνθήκες δευτέρου είδους όπως περιγράφεται και στο κεφάλαιο Οριακές Συνθήκες. Μόλις βρεθούν οι τιμές που δημιουργούν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα ακολουθείται η διαδικασία που ακολουθεί. Σύμφωνα με την γεωλογία της περιοχής υπάρχουν διάφορα πετρώματα τα οποία βρίσκονται στο υπέδαφος. Κάθε πέτρωμα έχει βρεθεί μέσω της βιβλιογραφίας ένα εύρος τιμών στο οποίο αντιστοιχεί. Μέσα στο εύρος τιμών που αντιστοιχεί κάθε πέτρωμα με την μέθοδο δοκιμής και σφάλματος μπορεί να βρεθεί η βέλτιστη τιμή για να βελτιωθεί ακόμη περισσότερο το σφάλμα.

Η περίοδος που χρησιμοποιήθηκε για την βαθμονόμηση (calibration) του μοντέλου είναι από 01/2000 έως και τον 12/2006. Η περίοδος για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων (validation) είναι από 01/2007 έως το τέλος της μοντελοποίησης των 12/2012.

Κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW ο χάρτης της περιοχής μελέτης. Επάνω σε αυτό τον χάρτη μπορούν να εμφανιστούν διάφορες παράμετροι ανάλογα με την επιθυμία του χρήστη. Στην Εικόνα 40 εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών καμπύλων μία τυχαία χρονική στιγμή κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Στην Εικόνα 41 εμφανίζεται το σφάλμα κατά την ίδια χρονική περίοδο όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW. Το μέσο σφάλμα κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης του μοντέλου υπογείων υδάτων είναι μικρότερο από το 10% γεγονός που δείχνει ότι οι παράμετροι του μοντέλου και τα αποτελέσματα είναι αξιόπιστα.



Εικόνα 40. Χάρτης υδραυλικού ύψους σε τυχαία χρονική περίοδο κατά την βαθμονόμηση του μοντέλου στο πρόγραμμα FEFLOW.



Εικόνα 41. Σφάλμα υδραυλικού ύψους όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW για την χρονική στιγμή ημέρα 1100.



## 2.8 Κλιματικό Σενάριο RCP 4.5

Για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν εξήχθησαν από τους Ιταλούς συνεργάτες στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα Sustain Coast. Οι συνεργάτες δημιούργησαν τοπικά κλιματικά μοντέλα (Regional Climate Models RCM) μέσα στα πλαίσια του EURO-CORDEX project. Τα μοντέλα αυτά δημιουργήθηκαν με την χρήση ιστορικών δεδομένων από διάφορους βροχομετρικούς σταθμούς γύρω από την περιοχή των Μαλίων από το 1976-2012. Τα δεδομένα από τους βροχομετρικούς σταθμούς περιείχαν μετρήσεις της βροχόπτωσης καθώς και της θερμοκρασίας για την περίοδο αυτή. Αυτά τα RCM τα οποία εξήχθησαν αποτελούν ένα συνδυασμό διαφόρων RCM με διάφορα Μοντέλα που περιγράφουν την κυκλοφορία των αερίων στον πλανήτη (General Circulation Models GCM). Οι συνδυασμοί αυτοί εμφανίζονται στην Εικόνα 42 (Oria et al., 2017)

		RCM					
		CLMcom- CCLM4-8-17	DMI- HIRHAM5	IPSL-INERIS- WRF331F	IPSL- WRF381P	KNMI- RACMO22E	SMHI- RCA4
GCM	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	X				X	X
	ICHEC-EC-EARTH	X	X			X	X
	IPSL-IPSL-CM5A-MR			X	X		X
	MOHC-HadGEM2-ES	X	X			X	X
	MPI-M-MPI-ESM-LR	X					X
	NCC-NorESM1-M		X				

Εικόνα 42. Πίνακας με τους 17 συνδυασμούς για την δημιουργία των κλιματικών σεναρίων.

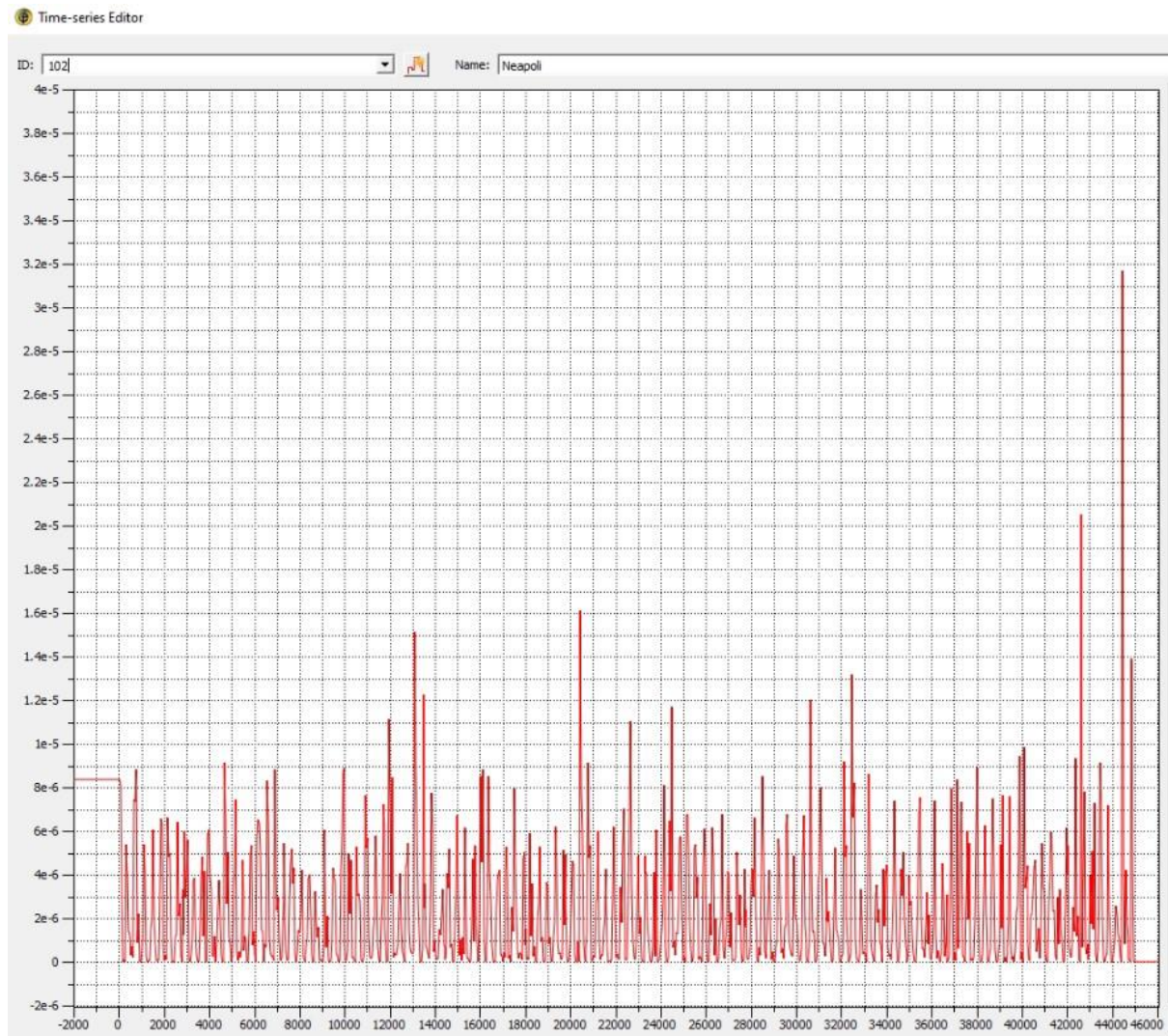
Η περίοδος η για την οποία εξήχθησαν αποτελέσματα από τα παραπάνω 17 κλιματικά σενάρια ξεκινάει την 1 Ιανουαρίου 1976 και καταλήγει μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 2098. Η περίοδος 1976 – 2005 αποτελεί την περίοδο των ιστορικών δεδομένων και από το 2006 -2098 αποτελεί η περίοδος του κλιματικού σεναρίου.

Για την εξαγωγή των δεδομένων για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 χρειάστηκε να δημιουργηθεί κώδικας στην MATLAB καθώς το αρχείο το οποίο εστάλη από τους εταίρους ήταν ένας πίνακας 4 διαστάσεων ο οποίος χρειάστηκε να χωριστεί. Οι διαστάσεις του πίνακα αποτελούνταν από το πλήθος των ημερών (44926), το όνομα του σταθμού (Pstat), το πλήθος των σεναρίων (17) και η τελευταία διάσταση περιείχε τα αποτελέσματα για την βροχόπτωση και για την θερμοκρασία (2).

Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε στην δημιουργία των οριακών συνθηκών καθώς και στα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι ακριβώς ίδια με την μόνη διαφορά ότι τα δεδομένα του κλιματικού σεναρίου είναι περισσότερα σε πλήθος. Αυτό δημιούργησε προβλήματα στο πρόγραμμα FEFLOW καθώς καθυστέρουσε να πραγματοποιήσει το τρέξιμο των 17 διαφορετικών



κλιματικών σεναρίων. Στην Εικόνα 43 εμφανίζεται η χρονοσειρά βροχόπτωσης από τον βροχομετρικό σταθμό της Νεάπολης για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 όπως εστάλη από τους Ιταλούς συνεργάτες. Είναι πολύ εύκολο να παρατηρηθεί η διαφορά στο πλήθος των δεδομένων σε σχέση με το αρχικό μοντέλο όπως φαίνεται στην Εικόνα 36 για τον ίδιο βροχομετρικό σταθμό.



Εικόνα 43. Χρονοσειρά βροχόπτωσης τυχαίου κλιματικού σεναρίου RCP 4.5 όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW.

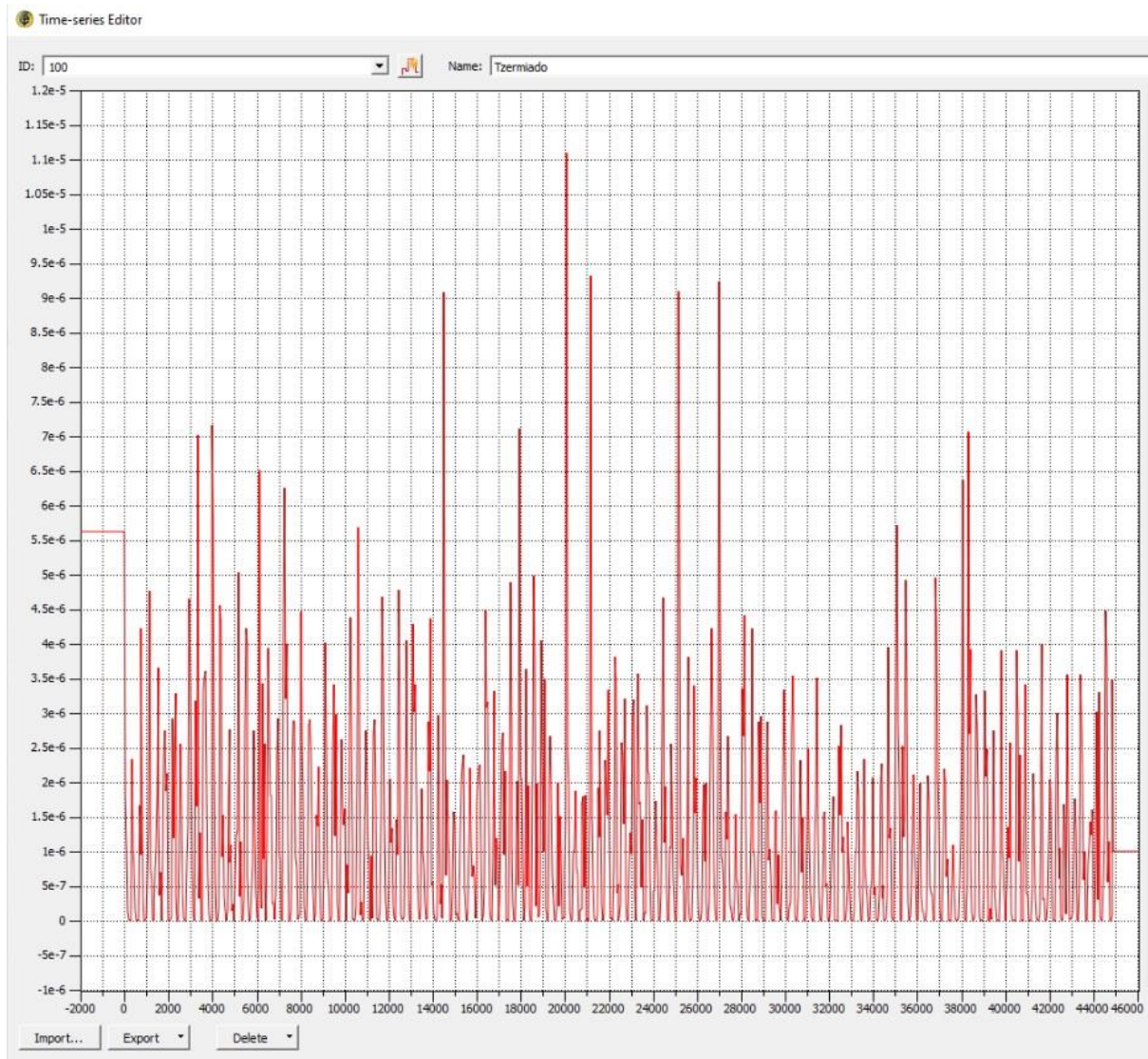
## 2.9 Κλιματικό Σενάριο RCP 8.5

Για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν εξήχθησαν από τους Ιταλούς συνεργάτες στο ευρωπαϊκό πρόγραμμα Sustain Coast. Οι συνεργάτες δημιούργησαν τοπικά κλιματικά μοντέλα ( Regional Climate Models RCM) μέσα στα πλαίσια του EURO-CORDEX project. Τα μοντέλα αυτά δημιουργήθηκαν με την χρήση ιστορικών δεδομένων από διάφορους βροχομετρικούς σταθμούς γύρω από την περιοχή των Μαλίων από το 1976-2012. Τα δεδομένα από τους βροχομετρικούς σταθμούς περιείχαν μετρήσεις της βροχόπτωσης καθώς και της θερμοκρασίας για την περίοδο αυτή. Αυτά τα RCM τα οποία εξήχθησαν αποτελούν ένα συνδυασμό διαφόρων RCM με διάφορα Μοντέλα που περιγράφουν την κυκλοφορία των αερίων στον πλανήτη (General Circulation Models GCM). Οι συνδυασμοί αυτοί εμφανίζονται στην Εικόνα 42 (Oria et al., 2017)

Η περίοδος η για την οποία εξήχθησαν αποτελέσματα από τα παραπάνω 17 κλιματικά σενάρια τα οποία εμφανίζονται στην Εικόνα 42 ξεκινάει την 1 Ιανουαρίου 1976 και καταλήγει μέχρι τις 31 Δεκεμβρίου 2098. Η περίοδος 1976 – 2005 αποτελεί την περίοδο των ιστορικών δεδομένων και από το 2006 -2098 αποτελείται η περίοδος του κλιματικού σεναρίου.

Για την εξαγωγή των δεδομένων για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 χρειάστηκε να δημιουργηθεί κώδικας στην MATLAB καθώς το αρχείο το οποίο εστάλη από τους εταίρους ήταν ένας πίνακας 4 διαστάσεων ο οποίος χρειάστηκε να χωριστεί. Οι διαστάσεις του πίνακα αποτελούνταν από το πλήθος των ημερών (44926), το όνομα του σταθμού (Pstat), το πλήθος των σεναρίων (17) και η τελευταία διάσταση περιείχε τα αποτελέσματα για την βροχόπτωση και για την θερμοκρασία (2).

Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε στην δημιουργία των οριακών συνθηκών καθώς και στα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι ακριβώς ίδια με την μόνη διαφορά ότι τα δεδομένα του κλιματικού σεναρίου είναι περισσότερα σε πλήθος. Αυτό δημιούργησε προβλήματα στο πρόγραμμα FEFLOW καθώς καθυστέρουσε να πραγματοποιήσει το τρέξιμο των 17 διαφορετικών κλιματικών σεναρίων. Στην Εικόνα 44 εμφανίζεται η χρονοσειρά βροχόπτωσης από τον βροχομετρικό σταθμό του Τζερμιάδο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 όπως εστάλη από τους Ιταλούς συνεργάτες. Είναι πολύ εύκολο να παρατηρηθεί η διαφορά στο πλήθος των δεδομένων σε σχέση με το αρχικό μοντέλο όπως φαίνεται στην Εικόνα 37 για τον ίδιο βροχομετρικό σταθμό.



Εικόνα 44. Χρονοσειρά βροχόπτωσης τυχαίου κλιματικού σεναρίου RCP 8.5 όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW.

### 3. Αποτελέσματα

Μετά τις ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν και έγινε αναλυτική περιγραφή τους στο προηγούμενο κεφάλαιο με τον συνδυασμό όλων αυτών των ενεργειών εξήχθησαν κάποια αποτελέσματα που αφορούν τον υδροφορέα στην περιοχή Μάλια Κρήτης. Τα αποτελέσματα για το αρχικό μοντέλο καθώς και για τα κλιματικά σενάρια θα εμφανιστούν με την μορφή διαγραμμάτων καθώς και χαρτών.

#### Αρχικό Μοντέλο

Για το αρχικό μοντέλο η περίοδος για την οποία πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση είναι από τον Ιανουάριο του 2000 έως τον Δεκέμβριο του 2012. Αυτή η περίοδος χωρίστηκε στην περίοδο της βαθμονόμησης και της επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων. Στην Εικόνα 45 εμφανίζεται το διάγραμμα υδραυλικού ύψους σε σχέση με τον χρόνο. Στον άξονα x'x όπου βρίσκεται ο χρόνος οι μονάδες μέτρησης είναι οι ημέρες και η ημέρα 0 είναι η 1 Ιανουαρίου 2000.

Αρχικά παρατηρείται ότι υπάρχει μία αυξομείωση του υδραυλικού ύψους η οποία γίνεται περισσότερο ξεκάθαρη στην μπλε γραμμή η οποία απεικονίζει το πηγάδι παρατήρησης το οποίο βρίσκεται σε μεγάλα υδραυτικά ύψη. Αυτή η αυξομείωση είναι εποχιακή και είναι αναμενόμενη σε μία τέτοια περιοχή όπου οι βροχές διαρκούν λίγο χρονικό διάστημα. Μέχρι την ημέρα 1600 περίπου παρατηρείται σταθερότητα σχετικά με το μέγιστο και ελάχιστο υδραυλικό ύψος. Μόλις περάσει αυτή η περίοδος είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι υπάρχει μία μεγάλη μείωση στο υδραυλικό ύψος γεγονός που οφείλεται σε έναν συνδυασμό όπως στην μεγάλη μείωση της βροχόπτωσης για εκείνη την περίοδο καθώς και στις μεγάλες απαιτήσεις για άρδευση ή για ψυχαγωγία (π.χ. πισίνες).

Στα χαμηλά υδραυτικά ύψη όπου απεικονίζουν την στάθμη των πηγαδιών παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στην ακτή παρατηρείται και εκεί μεγάλη μείωση. Συγκεκριμένα στην χαμηλότερη στάθμη που εμφανίζεται η οποία βρίσκεται στα 17 μέτρα στην αρχή της μοντελοποίησης, στο τέλος αυτής η στάθμη είναι μόνιμα κάτω από τα 10 μέτρα και συγκεκριμένα περίπου στα 6 μέτρα. Στα υψηλά υδραυτικά ύψη η πτώση στάθμης είναι ακόμα μεγαλύτερη σε απόλυτο αριθμό καθώς είναι περίπου 30 μέτρα. Η μέση στάθμη για την χρονιά 200 είναι περίπου στα 120 μέτρα και την χρονιά 2012 είναι περίπου στα 90 μέτρα. Ποσοστιαία όμως η πτώση στάθμης στα χαμηλά υδραυτικά ύψη είναι μεγαλύτερη και σημαντικότερη καθώς με την πτώση της στάθμης γίνεται εισροή του θαλασσινού νερού στον υδροφορέα.



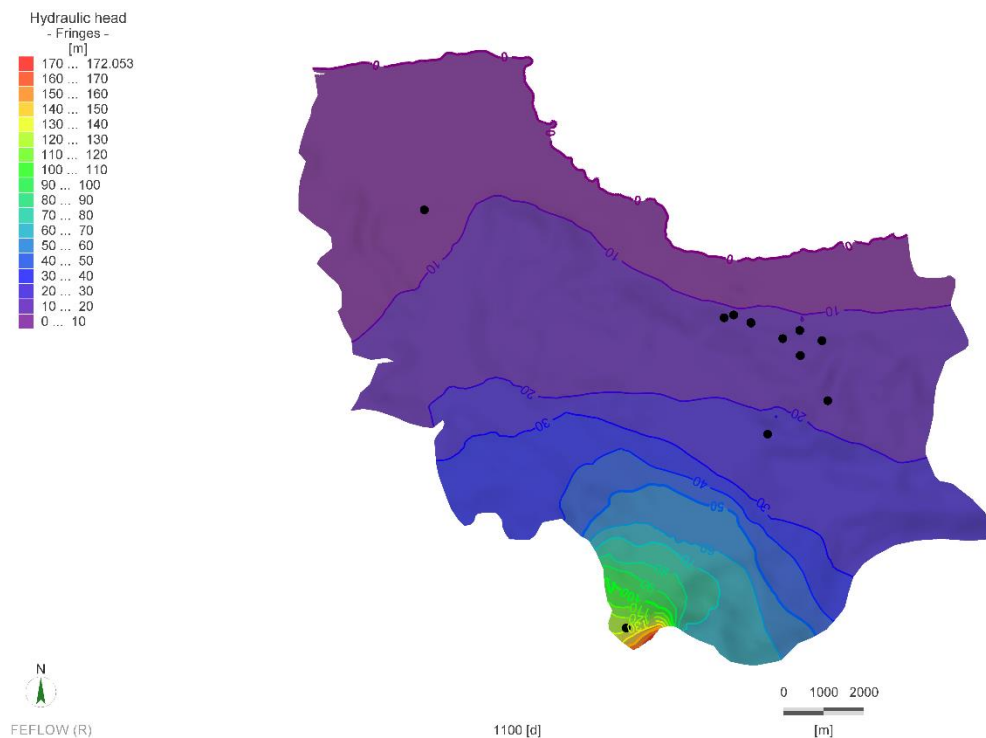


Εικόνα 45. Αποτελέσματα αρχικού μοντέλου. Διάγραμμα Υδραυλικού ύψους – Χρόνου (2000 – 2012)..

Στην Εικόνα 46 εμφανίζεται η περιοχή μελέτης όπως απεικονίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW. Στον χάρτη έχει επιλεγθεί να εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος με έναν συνδυασμό διαφορετικών χρωμάτων καθώς και ισοϋψών για καλύτερη κατανόηση. Επίσης με μαύρες κουκίδες εμφανίζονται και τα σημεία όπου βρίσκονται τα 11 πηγάδια παρατήρησης. Στην αριστερή επάνω γωνία του χάρτη εμφανίζεται το υπόμνημα το οποίο εμφανίζει την διαβάθμιση των χρωμάτων ανάλογα με την τιμή του υδραυλικού ύψους.

Ο χάρτης απεικονίζει μία τυχαία χρονική στιγμή την ημέρα 1100 για την οποία έχουν επιλεγεί όλα τα στιγμιότυπα των χαρτών. Στην Εικόνα 41 εμφανίζεται το σφάλμα την ίδια χρονική στιγμή. Τα αποτελέσματα για το αρχικό μοντέλο έχουν μέσο σφάλμα μικρότερο από το 10% γεγονός που δείχνει ότι τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι αξιόπιστα.

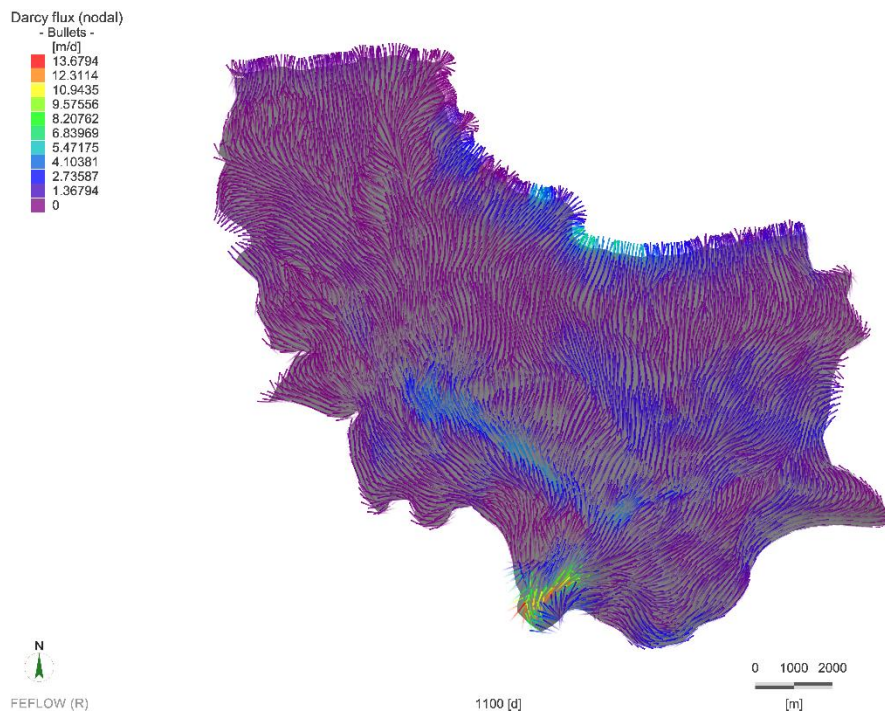
Η μέγιστη τιμή του υδραυλικού ύψους για την χρονική στιγμή βρίσκεται στα 172 μέτρα περίπου και το μέγιστο σημείο είναι στα νότια της περιοχής μελέτης και απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Στα παράλια της περιοχής μελέτης το χρώμα είναι μωβ και απεικονίζει το υδραυλικό ύψος από 0 έως 10 μέτρα. Στην αριστερή πλευρά της περιοχής μελέτης το μωβ χρώμα είναι έντονο πράγμα που σημαίνει ότι το υδραυλικό ύψος είναι χαμηλό για πολύ μεγάλο σημείο όχι μόνο στα παράλια.



Εικόνα 46. Υδραυλικό ύψος με την μορφή ισοϋψών κατά την διάρκεια του αρχικού μοντέλου όπως απεικονίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW.

Στην Εικόνα 47 εμφανίζεται ο χάρτης με την ταχύτητα Darcy. Η ταχύτητα απεικονίζεται με βέλη με διάφορα χρώματα. Το υπόμνημα του χάρτη εμφανίζεται στην επάνω αριστερή γωνία. Ομοίως με το υδραυλικό ύψος το κόκκινο απεικονίζει τις μεγάλες ταχύτητες και το μωβ τις μικρές. Υπάρχουν διάφορες χρωματικές διαβαθμίσεις για τις ενδιάμεσες τιμές της ταχύτητας Darcy.

Παρατηρείται ότι η μέγιστη ταχύτητα εμφανίζεται στα νότια της περιοχής μελέτης και είναι πολύ εύκολο να εξηγηθεί αυτό αν παρατηρήσει κανείς τον χάρτη με την υδραυλική αγωγιμότητα της περιοχής ο οποίος εμφανίζεται στην Εικόνα 28 όπως εμφανίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW όμως και στον γεωλογικό χάρτη ο οποίος εμφανίζεται στην Εικόνα 16. Στα σημεία όπου η ταχύτητα Darcy εμφανίζεται με κάποιο βελάκι με διαφορετικό χρώμα εκτός του μωβ η υδραυλική αγωγιμότητα έχει μεγάλες τιμές. Αυτό επιτρέπει στο νερό να περάσει ευκολότερα μέσα από το έδαφος οπότε αναπτύσσονται και μεγαλύτερες ταχύτητες.



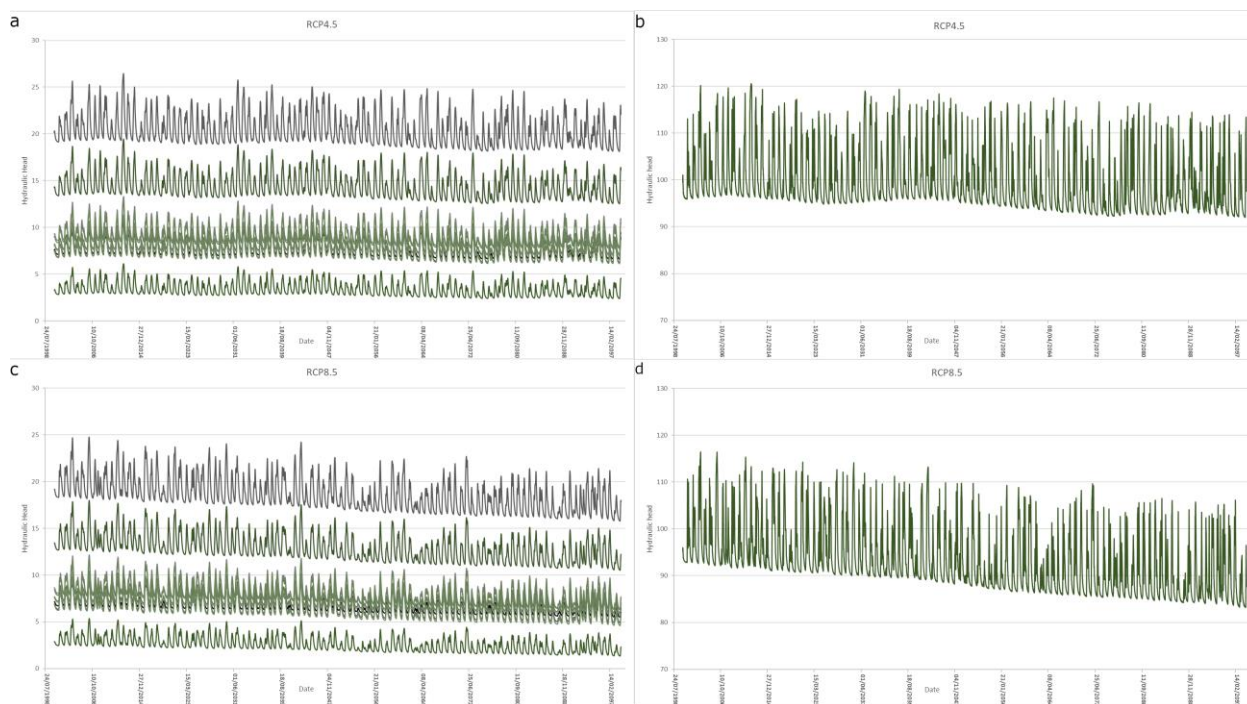
Εικόνα 47. Η ταχύτητα Darcy κατά την διάρκεια του αρχικού μοντέλου όπως απεικονίζεται στο πρόγραμμα FEFLOW.

## Αποτελέσματα κλιματικών σεναρίων

Το 1<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_CCLM4\_8\_17. Στην Εικόνα 48 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα α και β εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα γ και δ εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα β και δ βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα α και γ βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 υπάρχει μία μικρή πτώση στην στάθμη σχεδόν αμελητέα. Φαίνεται ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα παραμένει σχεδόν σταθερή καθ' όλη την διάρκεια του κλιματικού σεναρίου. Στο διάγραμμα β μπορούν να παρατηρηθούν κάποιες μικρές αυξομειώσεις και μία μείωση της μέσης στάθμης της τάξεως των 5 μέτρων περίπου.

Για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 είναι εύκολο να παρατηρηθεί ότι υπάρχει μείωση στην στάθμη των υπογείων υδάτων. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς αποτελεί το χειρότερο σενάριο που θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί. Η μείωση είναι αρκετά μεγάλη που οδηγεί τα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται πιο κοντά στα παράλια να φτάνουν κοντά στην στάθμη της θάλασσας. Στο διάγραμμα d η πτώση της μέσης στάθμης σε σχέση με το αντίστοιχο πηγάδι παρατήρησης του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο διάγραμμα b είναι περίπου 10 μέτρα χαμηλότερα.



Εικόνα 48. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_CCLM4\_8\_17'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

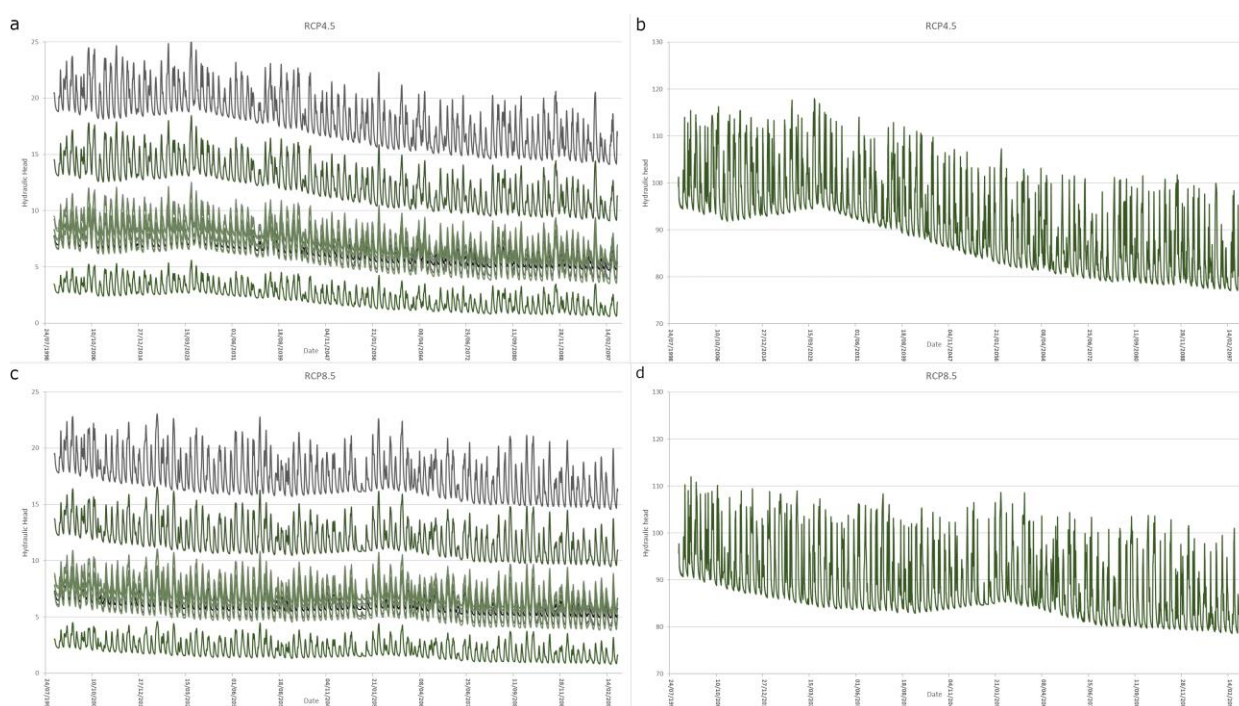
Το 2<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχοπτώσης είναι το CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_RCA4. Στην Εικόνα 49 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης



στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Το 2<sup>ο</sup> κλιματικό σενάριο RCP 4.5 εμφανίζει μία απότομη μείωση στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα περίπου στο έτος 2030 μέχρι 2065. Αυτή η μεγάλη πτώση φαίνεται στο διάγραμμα α ακόμα και στα πηγάδια παρατήρησης με υδραυλικό ύψος μικρότερο των δέκα μέτρων. Στο διάγραμμα β η πτώση της μέσης στάθμης είναι της τάξεως των 15 μέτρων. Μετά από το πέρας αυτής της περιόδου φαίνεται η στάθμη να σταθεροποιείται σε πολύ χαμηλά επίπεδα για την περιοχή.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 η πτώση της στάθμης είναι μικρότερη σε σχέση με το RCP 4.5 όμως η στάθμη των υπογείων υδάτων βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης. Στο πηγάδι παρατήρησης στο διάγραμμα δ μπορεί να παρατηρηθεί ότι η στάθμη βρίσκεται συνεχώς κάτω από τα 100 μέτρα σε σχέση το αντίστοιχο πηγάδι στο διάγραμμα β. Επίσης η πτώση της μέσης στάθμης είναι στα 10 μέτρα και το τέλος της προσομοίωσης αυτής βρίσκει και το RCP 8.5 σε πολύ χαμηλά επίπεδα.



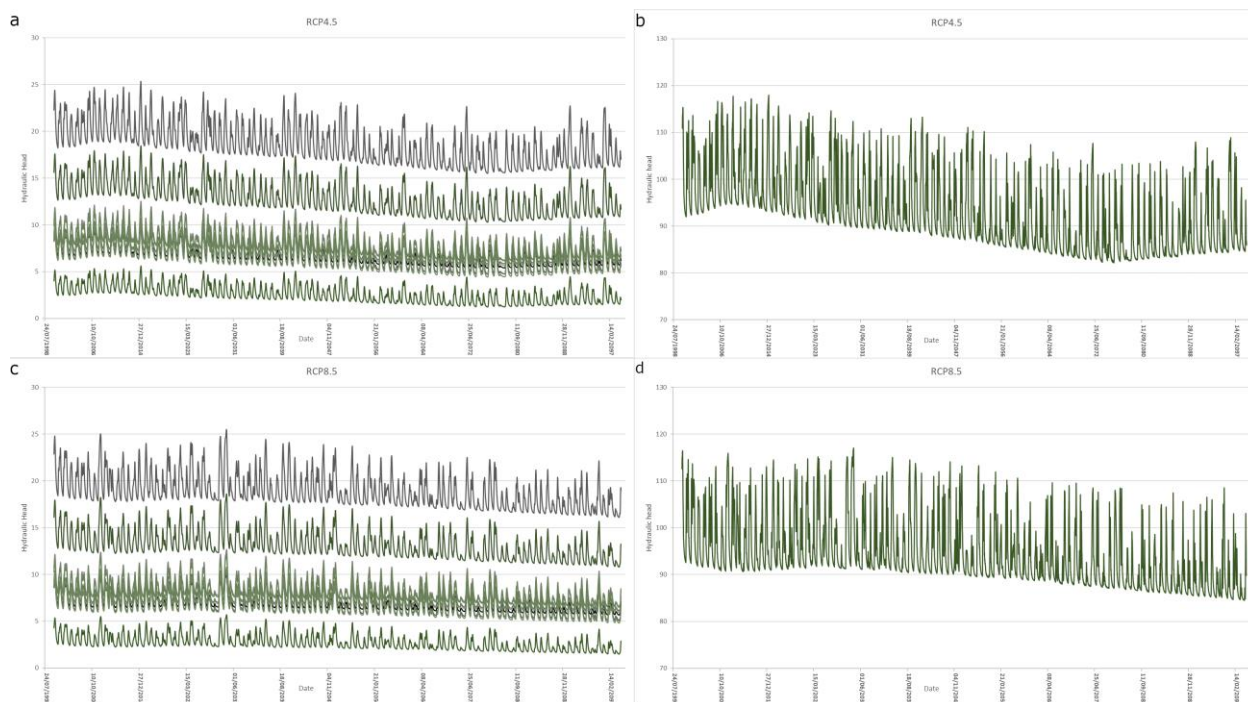
Εικόνα 49. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_RCA4'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 3<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το DMI-MOHC\_HadGEM2-ES\_HIRHAM5. Στην Εικόνα 50 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για

τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 εμφανίζει αντίστοιχη συμπεριφορά με το κλιματικό μοντέλο CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_RCA4 το οποίο εμφανίζεται στην Εικόνα 49. Οι μεταβολές είναι ηπιότερες όμως παρατηρείται από την αρχή μία μείωση στην στάθμη του υδροφορέα η οποία διαρκεί αρκετά χρόνια συγκεκριμένα από το 2020 μέχρι το 2070. Αντίθετα με το κλιματικό μοντέλο CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_RCA4 η στάθμη βρίσκεται γενικά σε υψηλότερα επίπεδα. Μάλιστα μετά το 2070 μέχρι και το πέρας του κλιματικού σεναρίου ακολουθεί μία μικρή αύξηση στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 στο διάγραμμα c παρατηρείται μία συνεχής σχεδόν ανεπαίσθητη μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Η μείωση αυτή εμφανίζεται καλύτερα στο διάγραμμα d στο οποίο παρατηρείται ότι υπάρχει μία πτώση στην μέση στάθμη της τάξεως των 10 μέτρων. Το συγκεκριμένο κλιματικό σενάριο παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες και παρόμοια αποτελέσματα με το κλιματικό μοντέλο CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_CCLM4\_8\_17 του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 48.

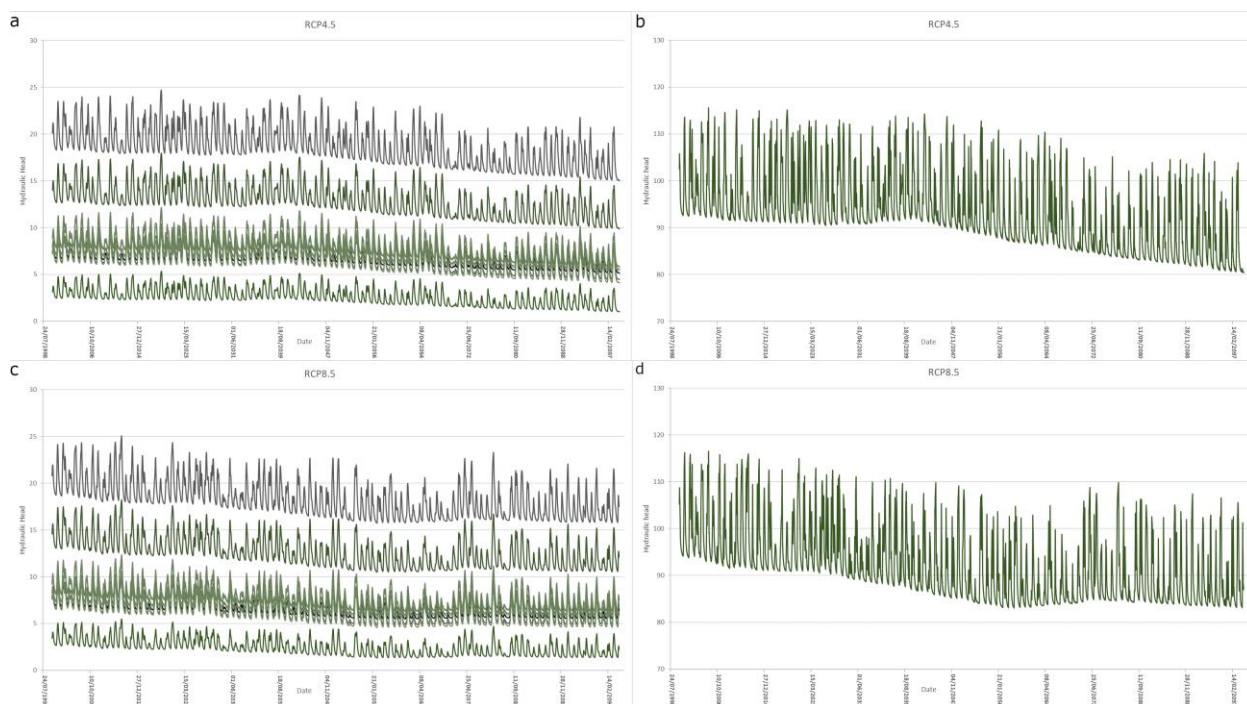


Εικόνα 50. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'DMI-MOHC\_HadGEM2-ES\_HIRHAM5'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 4<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το DMI\_HIRHAM5\_NorESM1-M. Στην Εικόνα 51 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαινόταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 4.5 παρατηρείται μέχρι το 2040 η στάθμη να παραμένει σχεδόν σταθερή με κάποιες μικρές αυξομειώσεις. Μετά από αυτή την περίοδο ακολουθεί μία διαρκής μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα μέχρι το πέρας της προσομοίωσης. Στο διάγραμμα a η πτώση της στάθμης φαίνεται εντονότερα στα πηγάδια παρατήρησης των οποίων το υδραυλικό ύψος βρίσκεται πάνω από τα 15 μέτρα. Στο διάγραμμα b ενώ η στάθμη είναι σε υψηλά επίπεδα στο τέλος της προσομοίωσης βρίσκεται στα 80 μέτρα περίπου.

Για το κλιματικό σενάριο RC 8.5 η πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα ξεκινάει από την αρχή της προσομοίωσης και διαρκεί μέχρι το 2060 περίπου. Μετά από αυτό το χρονικό σημείο παρατηρούνται αρκετές αυξομειώσεις στην στάθμη του υδροφορέα. Αντίθετα με το υπόλοιπο κλιματικό σενάριο η στάθμη των υπογείων υδάτων την τελευταία δεκαετία της προσομοίωσης για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με το κλιματικό σενάριο RCP 4.5.



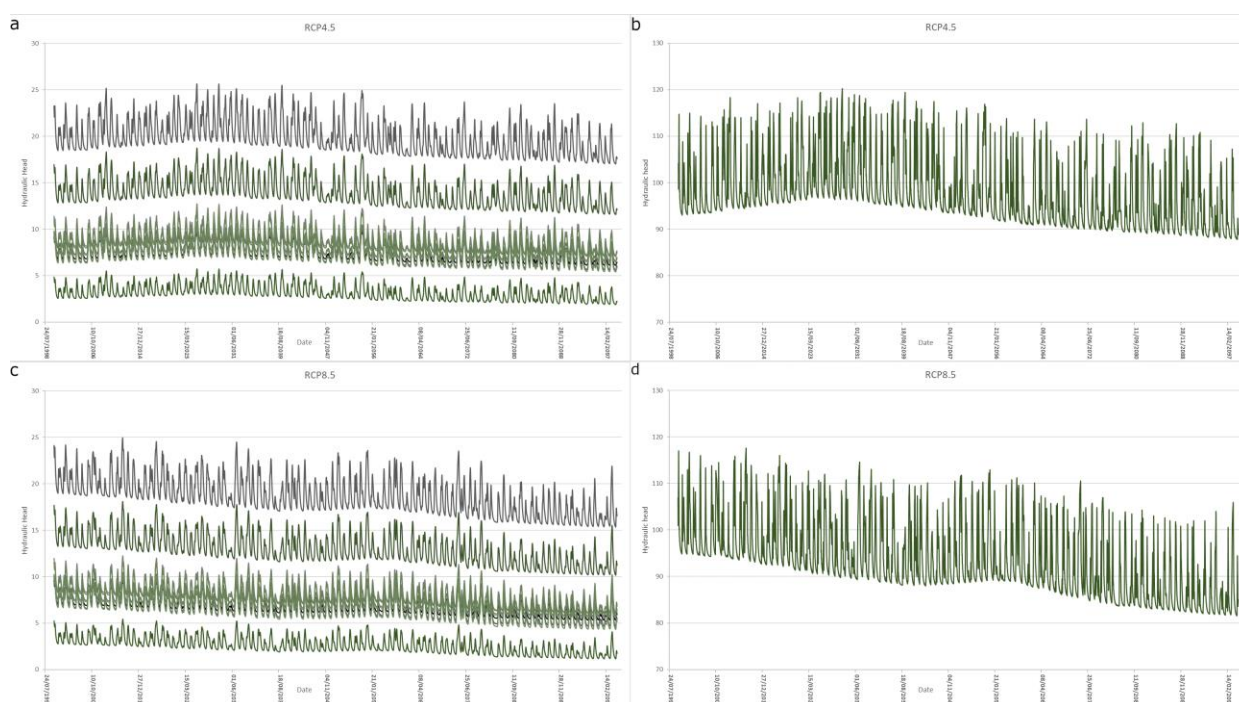
Εικόνα 51. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'DMI\_HIRHAM5\_NorESM1-M'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 5<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το ICHEC-EC-EARTH\_RACMO22E. Στην Εικόνα 52 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυτικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυτικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυτικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυτικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.



Στο κλιματικό σενάριο RCP 4.5 παρατηρείται μία σημαντική αύξηση μέχρι το 2030 περίπου. Η μέγιστη στάθμη κατά την περίοδο αυτή βρίσκεται στα 120 μέτρα περίπου. Μετά την αύξηση αυτή στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ακολουθεί η μείωση της στάθμης. Παρότι η χρονική διάρκεια της ταπείνωσης της στάθμης των υπογείων υδάτων είναι μεγάλη μετά το πέρας της προσομοίωσης μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η στάθμη παραμένει σε υψηλά επίπεδα καθώς το μικρότερο υδραυλικό ύψος βρίσκεται στα 88 μέτρα περίπου.

Αντίθετα με το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 στο RCP 8.5 παρατηρείται στο διάγραμμα d μία μεγάλη μείωση στην μέση στάθμη του υδροφορέα της τάξεως των 18 μέτρων περίπου. Στο διάγραμμα c στο πηγάδι παρατήρησης με την χαμηλότερη στάθμη παρατηρείται σημαντική μείωση με την στάθμη να φτάνει 2 μέτρα επάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Η ίδια συμπεριφορά στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα εμφανίζεται και στα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης στο διάγραμμα c.



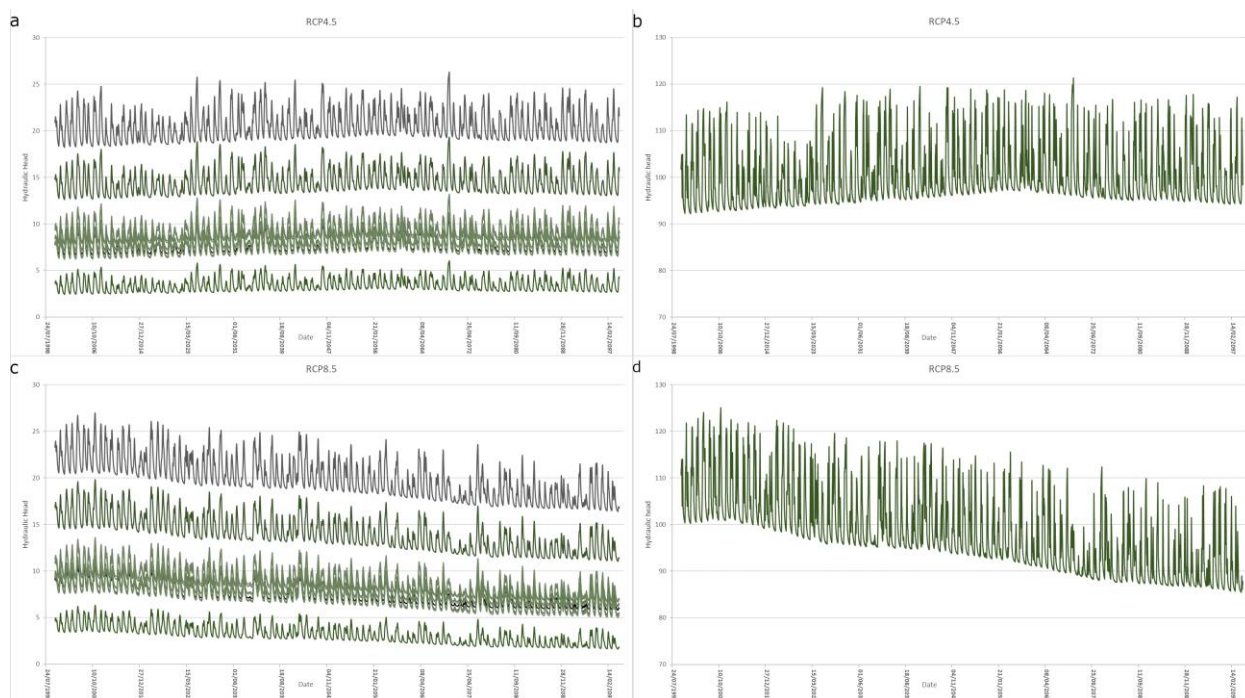
Εικόνα 52. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'ICHEC-EC-EARTH\_RACMO22E'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 6<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το ICHEC-EC-EARTH\_RCA4. Στην Εικόνα 53 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι

στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα α και γ βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 4.5 παρατηρείται μία περίεργη συμπεριφορά του κλιματικού μοντέλου σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κλιματικά σενάρια. Όπως φαίνεται και στα διαγράμματα α και β η στάθμη του υδραυλικού ύψους είναι πολύ χαμηλά στα πρώτα χρόνια του σεναρίου, όμως με το πέρασμα του χρόνου φαίνεται η στάθμη να αυξάνεται σχεδόν συνεχόμενα μέχρι το 2060 περίπου. Μετά από εκεί ακολουθεί μία πτώση στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Η στάθμη στο τέλος του κλιματικού σεναρίου φαίνεται να είναι σχεδόν στα ίδια επίπεδα με την αρχή του σεναρίου.

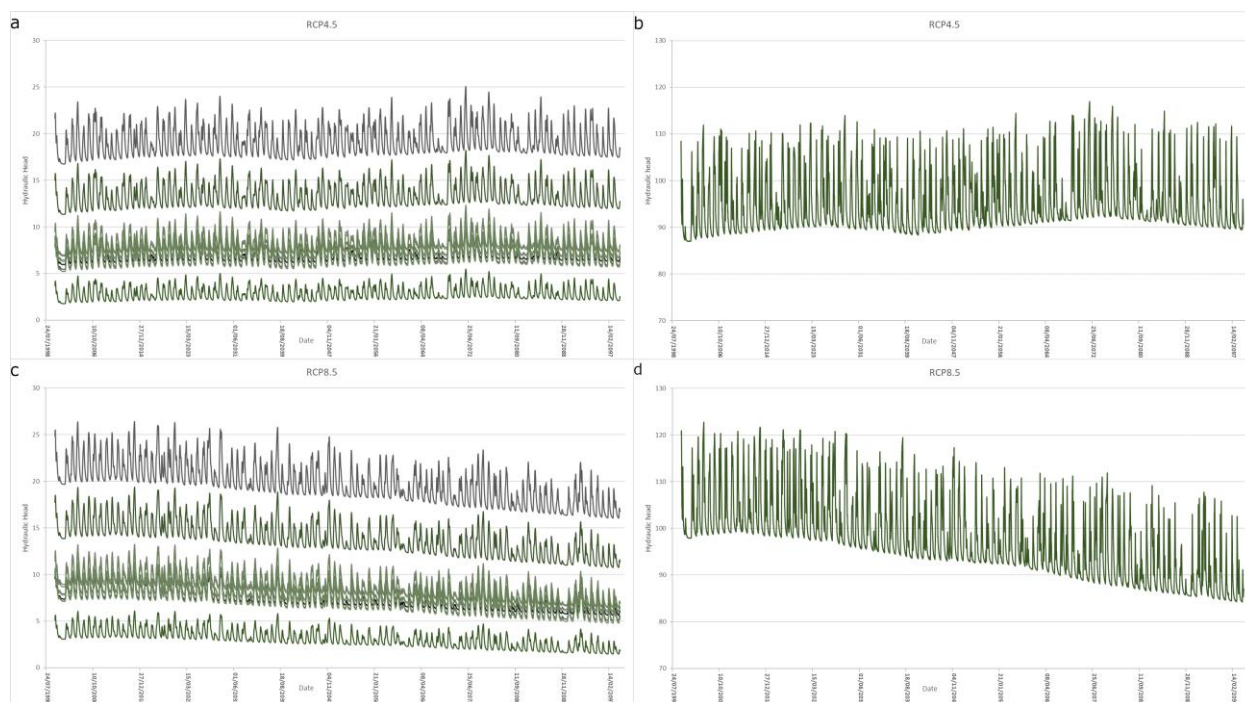
Στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 φαίνεται να υπάρχει μία μεγάλη πτώση στην στάθμη των υπογείων υδάτων. Σε αντίθεση με το αντίστοιχο κλιματικό σενάριο RCP 4.5 η στάθμη του υδραυλικού ύψους βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα. Στην συνέχεια όμως ακολουθεί μία μεγάλη πτώση η οποία διαρκεί καθ' όλη την διάρκεια του σεναρίου. Στο διάγραμμα δ στο οποίο εμφανίζεται το υδραυλικό ύψος από το πηγάδι παρατήρησης το οποίο βρίσκεται στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης φαίνεται ότι η πτώση της μέσης στάθμης είναι της τάξεως των 15 μέτρων περίπου.



Εικόνα 53. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'ICHEC-EC-EARTH\_RCA4'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 7<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το ICHEC\_EC\_EARTH\_CCLM4\_8\_17. Στην Εικόνα 54 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα α και β εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα γ και δ εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα β και δ βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα α και γ βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη..

Το κλιματικό μοντέλο ICHEC\_EC\_EARTH\_CCLM4\_8\_17 παρατηρείται να έχει την ίδια συμπεριφορά για το RCP 4.5 καθώς και για το RCP 8.5 με το κλιματικό μοντέλο ICHEC-EC-EARTH\_RCA4 του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 53. Για το RCP 4.5 παρατηρείται να υπάρχει αύξηση του υδραυλικού ύψους και στα 2 κλιματικά σενάρια κατά την μεγαλύτερη περίοδο της μοντελοποίησης. Αντίθετα στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 παρατηρείται ότι ενώ η στάθμη ξεκινάει από υψηλότερο επίπεδο σε σχέση με το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, στην συνέχεια παρατηρείται να υπάρχει σημαντική μείωση στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.



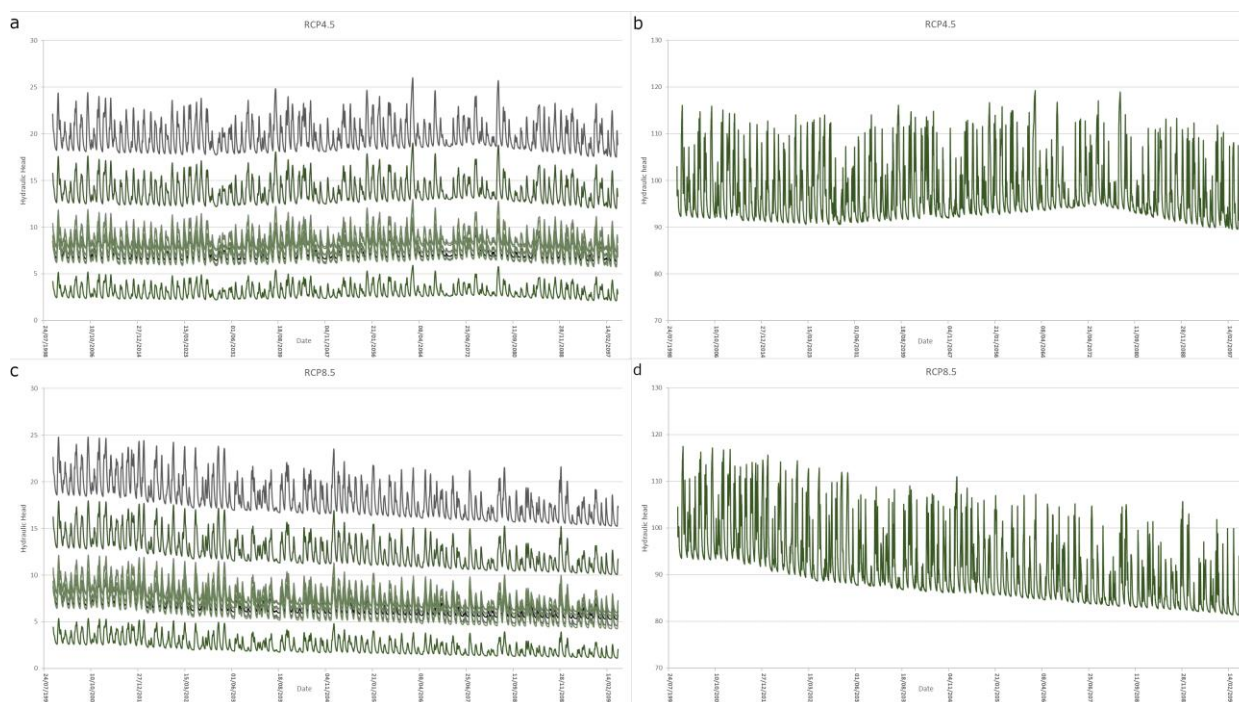
Εικόνα 54. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'ICHEC\_EC\_EARTH\_CCLM4\_8\_17'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 8<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το ICHEC\_EC\_EARTH\_HIRHAM5. Στην Εικόνα 55 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα με το κλιματικό μοντέλο CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_CCLM4\_8\_17 του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 48. Το υδραυλικό ύψος παρουσιάζει αρκετές αυξομειώσεις αλλά η μέση στάθμη παραμένει σχεδόν σταθερή καθ' όλη την περίοδο της μοντελοποίησης. Στο διάγραμμα b οι αυξομειώσεις αυτές είναι ευκολότερο να παρατηρηθούν σε σχέση με το διάγραμμα a.



Το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 φαίνεται να παρουσιάζει και αυτό παρόμοια συμπεριφορά με το κλιματικό μοντέλο CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_CCLM4\_8\_17 του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 48. Η μείωση είναι αρκετά μεγάλη που οδηγεί τα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται πιο κοντά στα παράλια να φτάνουν κοντά στην στάθμη της θάλασσας. Στο διάγραμμα d η πτώση της μέσης στάθμης σε σχέση με την αρχή της μοντελοποίησης είναι περίπου 12 μέτρα.



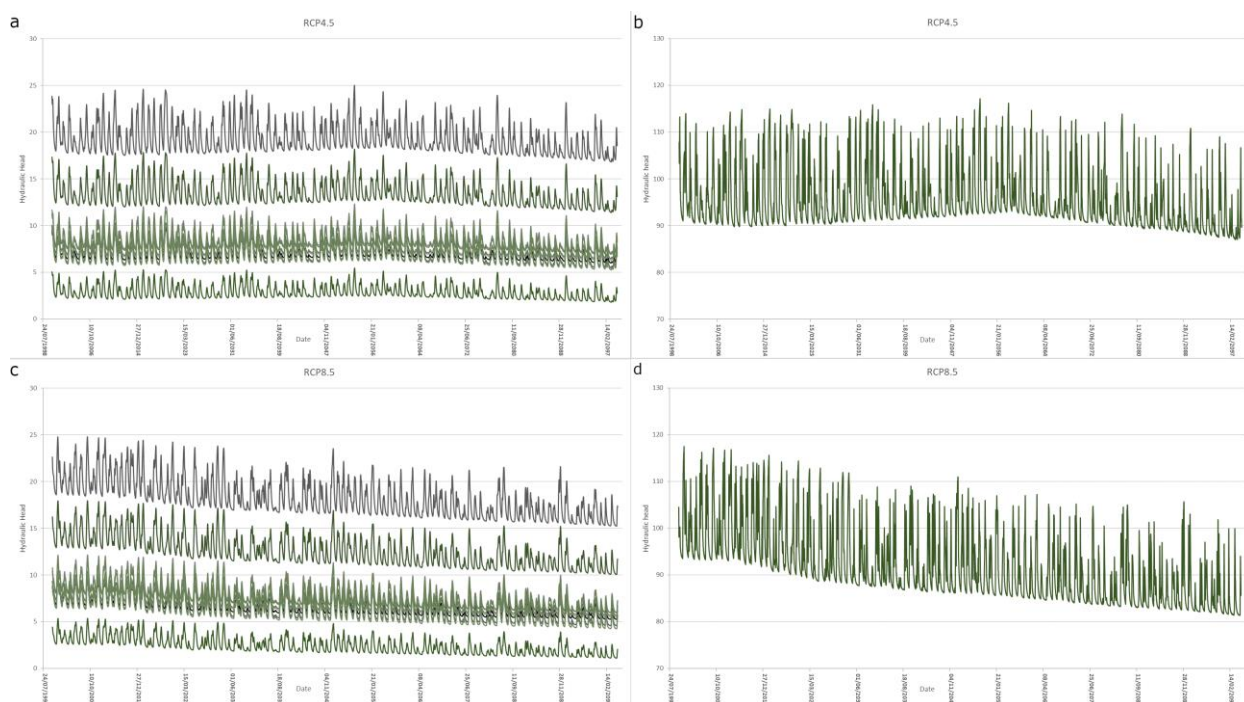
Εικόνα 55. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'ICHEC\_EC\_EARTH\_HIRHAM5'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 9<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το IPSL-INERIS\_WRF381P\_IPSL-CM5A-MR. Στην Εικόνα 56 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Το κλιματικό μοντέλο IPSL-INERIS\_WRF381P\_IPSL-CM5A-MR έχει παρόμοια αποτελέσματα για το RCP 4.5 και για το RCP 8.5 με το ICHEC\_EC\_EARTH\_HIRHAM5 του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 55 και με το CNRM\_CERFACS\_CNRM\_CM5\_CCLM4\_8\_17 του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 48.

Το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 παρουσιάζει αρκετές αυξομειώσεις την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα με την μέση στάθμη όμως να παραμένει σχεδόν σταθερή. Οι αυξομειώσεις αυτές είναι πιο ξεκάθαρες στο διάγραμμα b. Στο διάγραμμα a η στάθμη φαίνεται να μην έχει σχεδόν καμία διαφορά ειδικά στα πηγάδια παρατήρησης με την χαμηλότερη στάθμη τα οποία βρίσκονται κοντά στην θάλασσα.

Το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 παρουσιάζει αρχικά υψηλή στάθμη και φαίνεται σχεδόν σταθερή για την πρώτη περίπου δεκαετία της μοντελοποίησης. Μετά από την περίοδο αυτή ακολουθεί μία συνεχής ταπείνωση της στάθμης τους υδροφορέα. Στο διάγραμμα c η στάθμη του πηγαδιού παρατήρησης το οποίο βρίσκεται πιο κοντά στα παράλια, στο τέλος της μοντελοποίησης βρίσκεται μόλις στα 2 μέτρα πάνω από την στάθμη της θάλασσας. Στο διάγραμμα d η πτώση της μέσης στάθμης του υδροφορέα είναι περίπου 13 μέτρα.

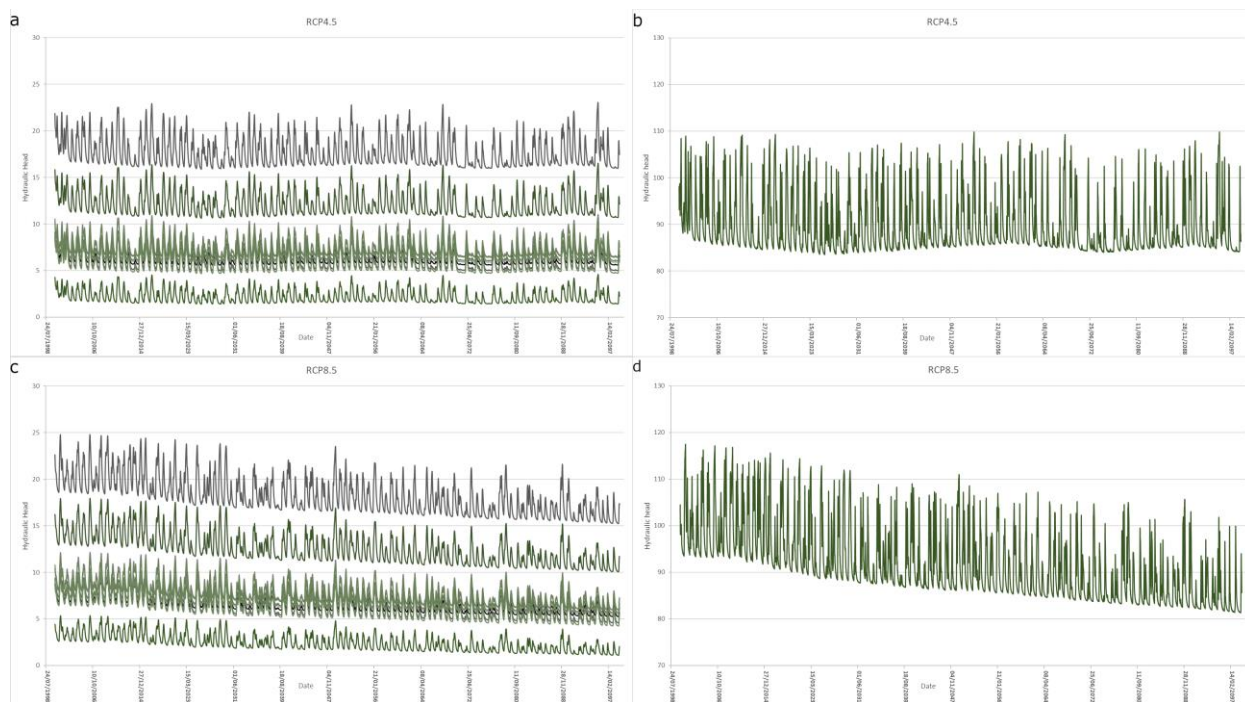


Εικόνα 56. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'IPSL-INERIS\_WRF381P\_IPSL-CM5A-MR'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 10<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το IPSL\_IPSL\_CM5A\_MR\_RCA4 . Στην Εικόνα 57 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 4.5 η στάθμη των υπογείων υδάτων βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα σε σχέση με τις μετρήσεις που υπάρχουν για τα συγκεκριμένα πηγάδια παρατήρησης. Επίσης η μέση στάθμη εμφανίζεται να είναι σχεδόν σταθερή καθ' όλη την διάρκεια την μοντελοποίησης. Με το πέρας του χρόνου υπάρχουν πολλές αυξομειώσεις στην στάθμη αλλά η μέση στάθμη παραμένει σχεδόν σταθερή.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 ομοίως με το σενάριο RCP 4.5 βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα. Όμως σε αντίθεση με το RCP 4.5 στο σενάριο RCP 8.5 υπάρχει μεγάλη πτώση στην στάθμη των υπογείων υδάτων. Η πτώση είναι σημαντική και μπορεί να παρατηρηθεί στο διάγραμμα c καθώς και στο d. Μάλιστα στο διάγραμμα d η πτώση της μέσης στάθμης είναι της τάξεως των 15 μέτρων και η χαμηλότερη τιμή της στάθμης των υπογείων υδάτων στο συγκεκριμένο πηγάδι παρατήρησης φτάνει στα 80 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας.



Εικόνα 57. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'IPSL\_IPSL\_CM5A\_MR\_RCA4'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

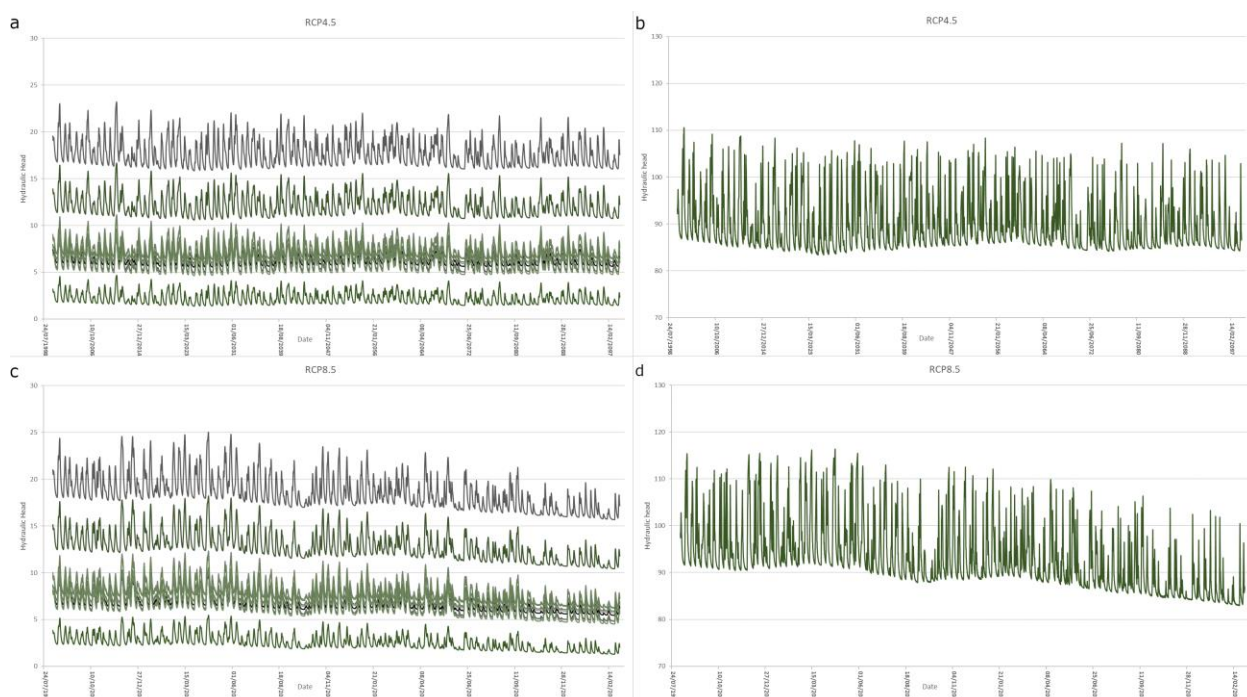
Το 11<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το IPSL\_IPSL\_CM5A\_MR\_WRF331F . Στην Εικόνα 58 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Το κλιματικό μοντέλο IPSL\_IPSL\_CM5A\_MR\_WRF331F του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 58 εμφανίζει παρόμοια αποτελέσματα με το κλιματικό μοντέλο IPSL\_IPSL\_CM5A\_MR\_RCA4 του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην Εικόνα 57.

Για το σενάριο RCP 4.5 η στάθμη βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα σε σχέση με τις μετρήσεις που υπάρχουν για τα συγκεκριμένα πηγάδια παρατήρησης. Επίσης η μέση στάθμη

εμφανίζεται να είναι σχεδόν σταθερή καθ' όλη την διάρκεια την μοντελοποίησης παρά τις πολλές αυξομειώσεις που υπάρχουν με το πέρασ του χρόνου στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 ομοίως με το σενάριο RCP 4.5 βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα σε σύγκριση με τα δεδομένα που υπάρχουν για το υδραυλικό ύψος. Όμως σε αντίθεση με το RCP 4.5 στο σενάριο RCP 8.5 υπάρχει μεγάλη πτώση στην στάθμη των υπογείων υδάτων. Η πτώση είναι σημαντική και μπορεί να παρατηρηθεί στο διάγραμμα c καθώς και στο d. Μάλιστα στο διάγραμμα d η πτώση της μέσης στάθμης είναι της τάξεως των 9 μέτρων .



Εικόνα 58. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'IPSL\_IPSL\_CM5A\_MR\_WRF331F'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

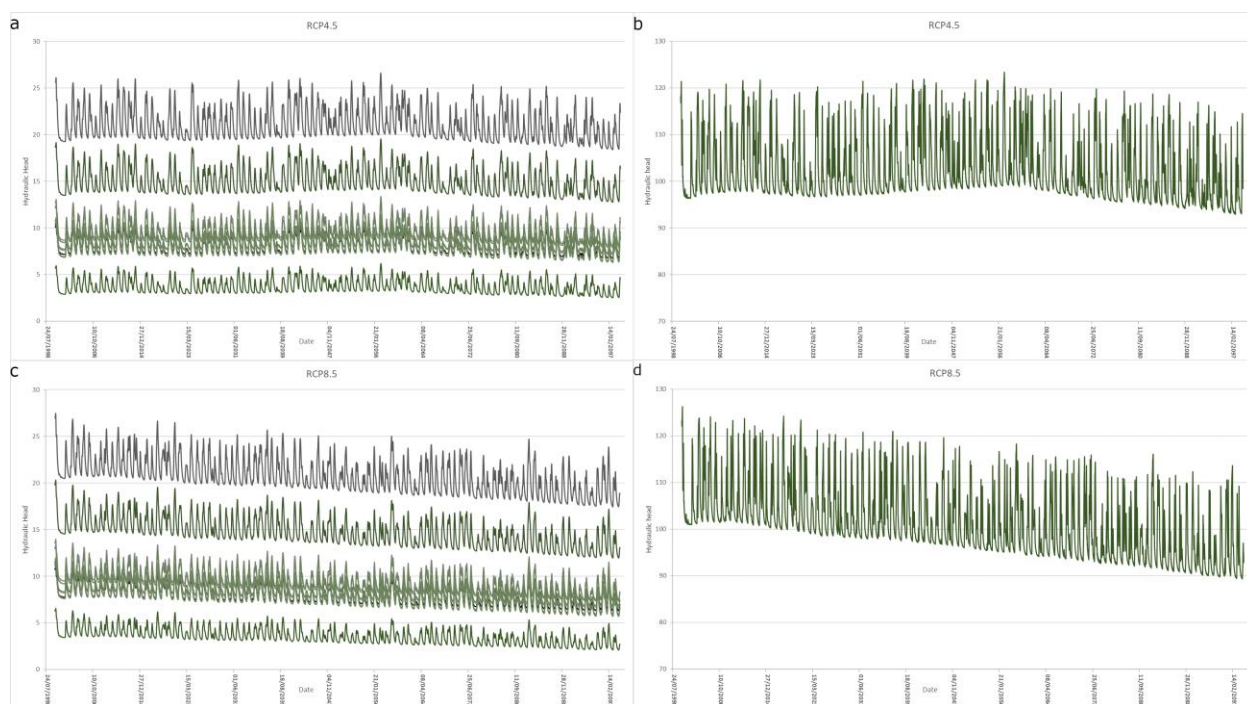
Το 12<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το KNMI\_CNRM-CM5. Στην Εικόνα 59 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγά-



δια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 παρουσιάζει αρκετές αυξομειώσεις στην στάθμη του υδραυλικού ύψους της περιοχής μελέτης με μικρή αύξηση της μέσης στάθμης μέχρι το 2065 περίπου. Οι αυξομειώσεις αυτές εμφανίζονται στα διαγράμματα α και β. Στο διάγραμμα β οι αυξομειώσεις αυτές εμφανίζονται με μεγαλύτερες διακυμάνσεις. Μετά το 2065 ακολουθεί μείωση στην μέση στάθμη του υδραυλικού ύψους στην περιοχή μελέτης η οποία όμως παραμένει σε υψηλά επίπεδα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κλιματικά σενάρια.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στα διαγράμματα γ και δ παρουσιάζει τελείως διαφορετική εικόνα σε σχέση με το RCP 4.5. Το μέσο υδραυλικό ύψος βρίσκεται σε πολύ υψηλά επίπεδα στα αρχικά χρόνια του κλιματικού σεναρίου. Στην συνέχεια υπάρχει συνεχής μείωση στην στάθμη του υδραυλικού ύψους καθ' όλη την διάρκεια του κλιματικού σεναρίου. Η μέση στάθμη αρχικά βρίσκεται στα 112 μέτρα περίπου και στο τέλος του κλιματικού σεναρίου βρίσκεται λίγο πάνω από τα 90 μέτρα.

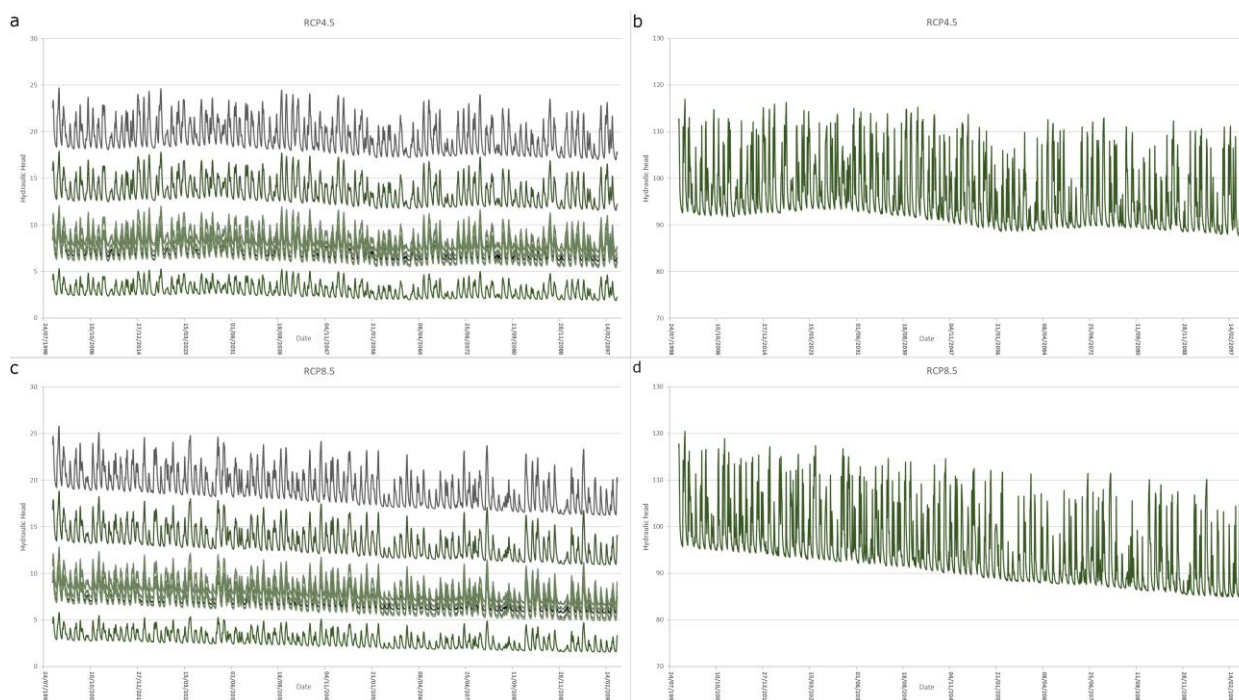


Εικόνα 59. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'KNMI\_CNRM-CM5'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 13<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το MOHC\_HadGEM2\_ES\_CCLM4\_8\_17. Στην Εικόνα 60 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Σε ολόκληρο το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 εμφανίζεται σχεδόν σταθερή μέση στάθμη υδραυλικού ύψους σε όλη την περιοχή μελέτης και αυτό φαίνεται στα διαγράμματα a και b. Στο διάγραμμα a οι διακυμάνσεις του υδραυλικού ύψους είναι μικρές όμως είναι εμφανείς με γυμνό μάτι. Στο διάγραμμα b οι διακυμάνσεις είναι μεγαλύτερες και εντονότερες όμως η μέση στάθμη παρουσιάζει μία μικρή μείωση της τάξεως των 5 μέτρων περίπου.

Το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 έχει παρόμοια συμπεριφορά με το αντίστοιχο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 του μοντέλου KNMI\_CNRM-CM5. Η μέση στάθμη του υδροφόρου ορίζονται παρουσιάζει συνεχή πτώση. Η διαφορά με το μοντέλο KNMI\_CNRM-CM5 είναι ότι η πτώση της μέσης στάθμης είναι μικρότερη και βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα. Στο διάγραμμα d όπου οι εποχιακές διακυμάνσεις είναι μεγαλύτερες στα πρώτα χρόνια του κλιματικού σεναρίου η μέση στάθμη βρίσκεται στα 102 μέτρα περίπου και στα τελευταία χρόνια η στάθμη βρίσκεται στα 90 μέτρα περίπου.

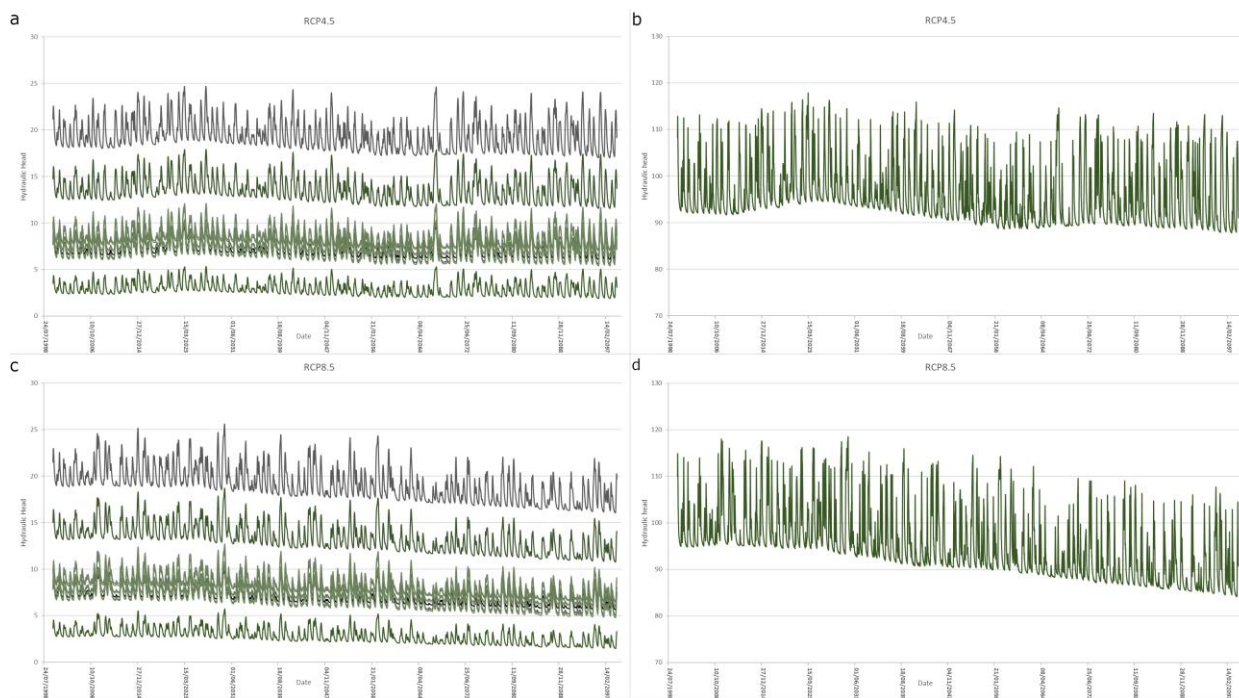


Εικόνα 60. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'MOHC\_HadGEM2\_ES\_CCLM4\_8\_17'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 14<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το MOHC\_HadGEM2\_ES\_RACMO22E. Στην Εικόνα 61 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Τα αποτελέσματα των κλιματικών σεναρίων RCP 4.5 και RCP 8.5 του κλιματικού μοντέλου MOHC\_HadGEM2\_ES\_RACMO22E έχουν σχεδόν ίδια συμπεριφορά με τα αποτελέσματα του κλιματικού μοντέλου MOHC\_HadGEM2\_ES\_CCLM4\_8\_17. Η μέση στάθμη του υδροφόρου βρίσκεται στα ίδια επίπεδα στα 2 κλιματικά μοντέλα και για τα 2 κλιματικά σενάρια. Ακόμη και οι διακυμάνσεις που παρουσιάζονται και για τα 2 κλιματικά μοντέλα ακολουθούν ένα παρόμοιο μοτίβο.



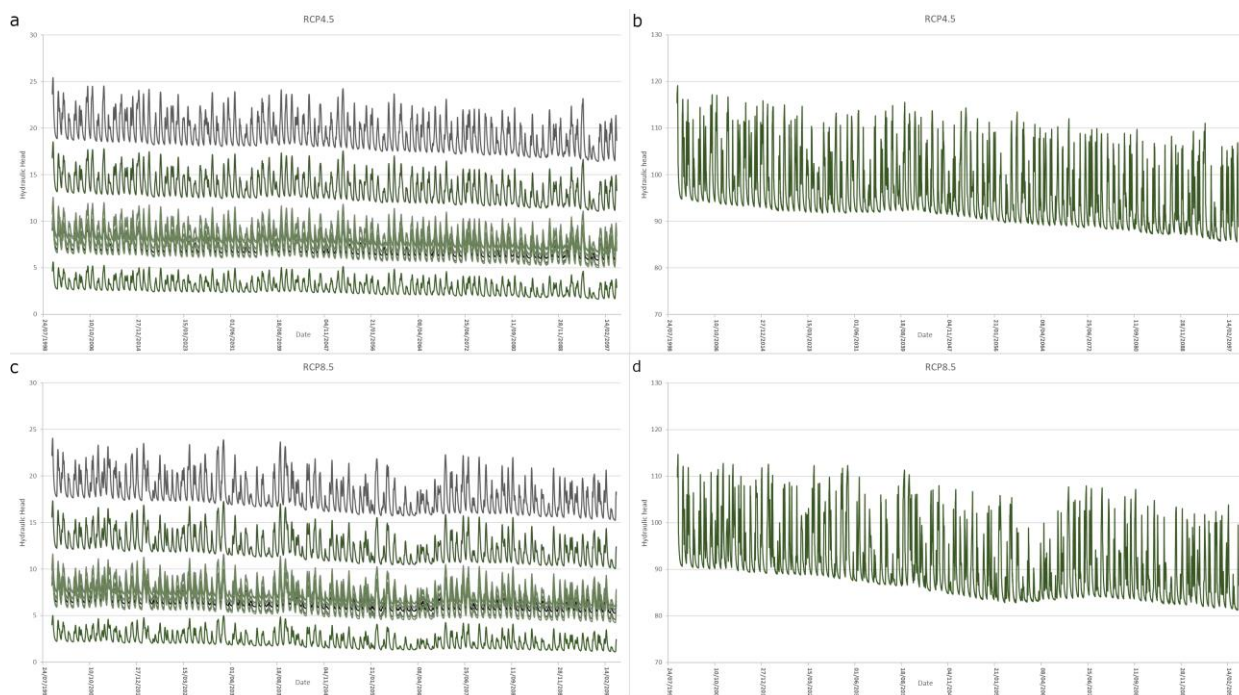


Εικόνα 61. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'MOHC\_HadGEM2\_ES\_RACMO22E'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 15<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το MOHC\_HadGEM2\_ES\_RCA4. Στην Εικόνα 62 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα α και β εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα γ και δ εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα β και δ βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα α και γ βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Στο κλιματικό μοντέλο MOHC\_HadGEM2\_ES\_RCA4 στο σενάριο RCP 4.5 παρατηρείται μία διαφορετική εικόνα του υδροφορέα σε σχέση με τα υπόλοιπα κλιματικά μοντέλα. Η στάθμη του υδροφόρου ορίζονται εμφανίζεται να μειώνεται συνεχώς. Αρχικά η μείωση στην μέση στάθμη μέχρι το 2040 περίπου είναι πολύ μικρή στην συνέχεια όμως εμφανίζεται να είναι μεγαλύτερη.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 η μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζονται εμφανίζει μία μεγάλη μείωση μέχρι το 2050 περίπου. Στην συνέχεια η μέση στάθμη παραμένει σταθερή μέχρι και το τέλος του κλιματικού σεναρίου. Σε σχέση με το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 κ στάθμη βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα περίπου 10 μέτρα χαμηλότερα.



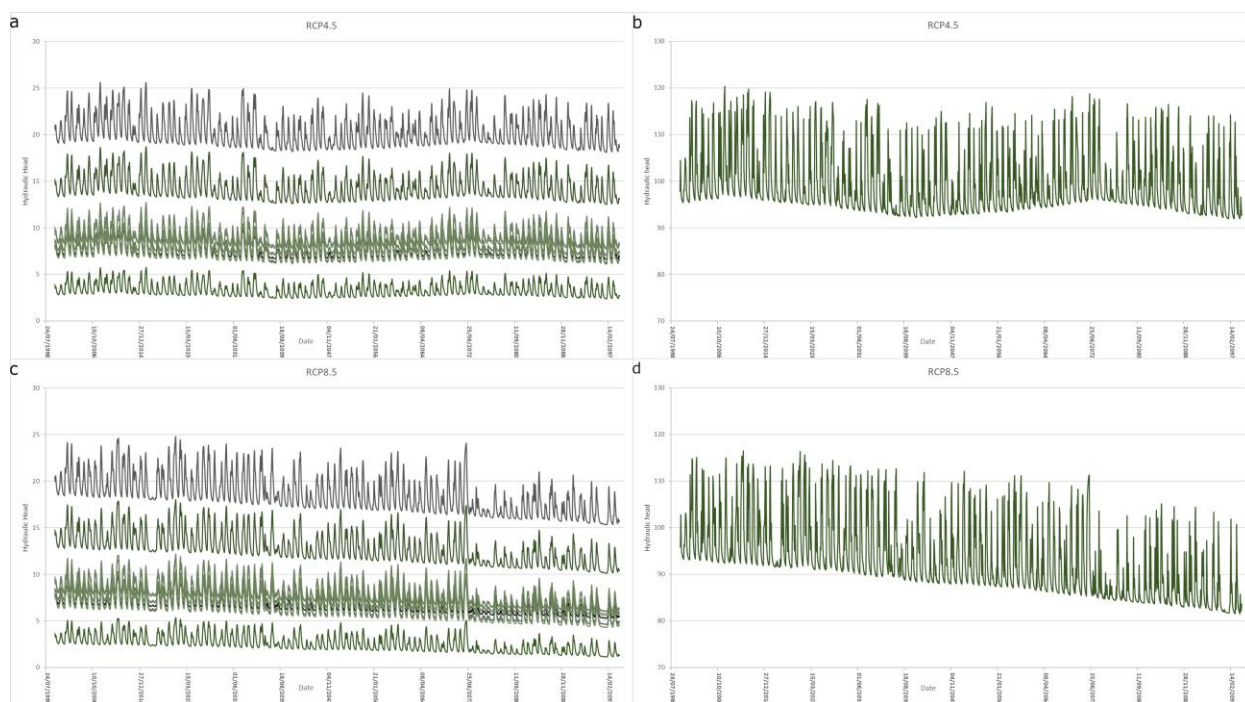
Εικόνα 62. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'MOHC\_HadGEM2\_ES\_RCA4'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Το 16<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχοπτώσης είναι το MPI\_M\_MPI\_ESM\_LR\_CCLM4\_8\_17. Στην Εικόνα 63 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα a και b εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα c και d εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα b και d βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα a και c βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 4.5 παρατηρούνται αρκετές αυξομειώσεις κατά την διάρκεια του σεναρίου. Το υδραυλικό ύψος παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το κλιματικό μοντέλο

ΜΟΗC\_HadGEM2\_ES\_RACMO22E. Αρχικά υπάρχει μία αύξηση στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα μέχρι την χρονιά 2015 περίπου και στην συνέχεια ακολουθεί μία πτώση στην μέση στάθμη η οποία διαρκεί μέχρι το 2040. Έπειτα ακολουθεί μία σταδιακή αύξηση στο μέσο υδραυλικό ύψος μέχρι την χρονιά 2073 και τέλος παρουσιάζεται πτώση με την μέση στάθμη να φτάνει στο πηγάδι του οποίου τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο διάγραμμα b στα 98 μέτρα περίπου.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 παρατηρείται πάλι η ίδια εικόνα όπως και στο κλιματικό μοντέλο ΜΟΗC\_HadGEM2\_ES\_RACMO22E. Υπάρχει μία συνεχής ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα. Την τελευταία 20ετία του κλιματικού σεναρίου η εικόνα που παρουσιάζει ο υδροφόρος είναι αποτέλεσμα των πολύ χαμηλών βροχοπτώσεων που δέχεται η περιοχή μελέτης και η στάθμη φτάνει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Το χαμηλότερο σημείο που φτάνει η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχή είναι σχεδόν στην επιφάνεια της θάλασσας ενώ στο πηγάδι παρατήρησης το οποίο βρίσκεται επάνω στα βουνά είναι σχεδόν στα 80 μέτρα.

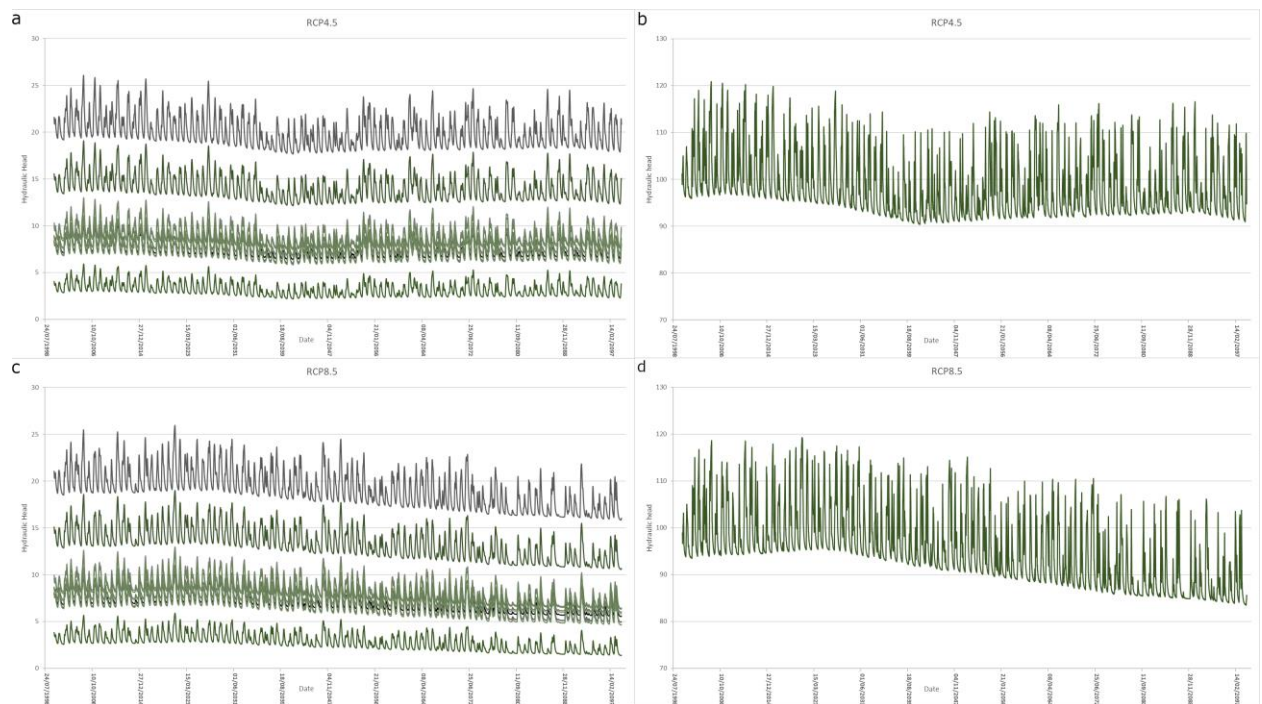


Εικόνα 63. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'MPI\_M\_MPI\_ESM\_LR\_CCLM4\_8\_17'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

Τέλος το 17<sup>ο</sup> κλιματικό μοντέλο του οποίου χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα της βροχόπτωσης είναι το MPI\_M\_MPI\_ESM\_LR\_RCA4. Στην Εικόνα 64 εμφανίζονται τα αποτελέσματα για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 και RCP 8.5. Στα διαγράμματα α και β εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5, για τα 11 πηγάδια παρατήρησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο αρχικό μοντέλο. Για τα διαγράμματα γ και δ εμφανίζονται τα υδραυλικά ύψη σε σχέση με τον χρόνο για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 για τα ίδια 11 πηγάδια παρατήρησης. Στο διάγραμμα β και δ βρίσκεται μόνο το πηγάδι του οποίου η τοποθεσία είναι στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και στο διάγραμμα α και γ βρίσκονται τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης τα οποία βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης. Τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν με αυτό τον τρόπο επειδή το πηγάδι παρατήρησης στην νότια πλευρά έχει πολύ μεγάλο υδραυλικό ύψος σε σχέση με τα υπόλοιπα πηγάδια παρατήρησης δεν φαίνονταν καλά οι λεπτομέρειες στα χαμηλά υδραυλικά ύψη επειδή η μία καμπύλη σχεδόν συμπίπτει με την άλλη.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 4.5 παρατηρούνται αρκετές αυξομειώσεις κατά την διάρκεια του σεναρίου. Το υδραυλικό ύψος παρουσιάζει στα πρώτα 40 χρόνια περίπου παρόμοια συμπεριφορά με το κλιματικό μοντέλο MPI\_M\_MPI\_ESM\_LR\_CCLM4\_8\_17. Η μέση στάθμη εμφανίζει μία απότομη μείωση μέχρι να φτάσει στην χαμηλότερη στάθμη η οποία στα πηγάδια παρατήρησης κοντά στα παράλια των οποίων το υδραυλικό ύψος εμφανίζεται στο διάγραμμα α είναι στα 3 μέτρα περίπου. Στην συνέχεια παρουσιάζει μία σταδιακή μικρή αύξηση σχεδόν μέχρι το τέλος του κλιματικού σεναρίου. Την τελευταία 5ετία του σεναρίου ακολουθεί μία απότομη πτώση η οποία οδηγεί την στάθμη του υδραυλικού ύψους για το πηγάδι παρατήρησης στο διάγραμμα β λίγο πάνω από τα 90 μέτρα.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 μέχρι την χρονολογία 2020 υπάρχει μία αύξηση στην μέση στάθμη του υδροφορέα. Στην συνέχεια ακολουθεί μία μεγάλη πτώση στην μέση στάθμη της οποίας τα αποτελέσματα εμφανίζονται καλύτερα στο διάγραμμα δ. Η μέση στάθμη φαίνεται να ταπεινώνεται κατά 15 μέτρα περίπου. Τα πηγάδια παρατήρησης κοντά στα παράλια παρουσιάζουν παρόμοια εικόνα με την πτώση της μέσης στάθμης να είναι από 3 έως και 5 μέτρα.



Εικόνα 64. Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου 'MPI\_M\_MPI\_ESM\_LR\_RCA4'. Διαγράμματα υδραυλικού ύψους - χρόνου προσομοίωσης.

#### 4. Συζήτηση

Το αποδεκτό σφάλμα (RMS) κατά την βαθμονόμηση του υδροφορέα προκύπτει από την εξίσωση:

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

Όπου:

SRMS: είναι το μέγιστο αποδεκτό σφάλμα επί της 100

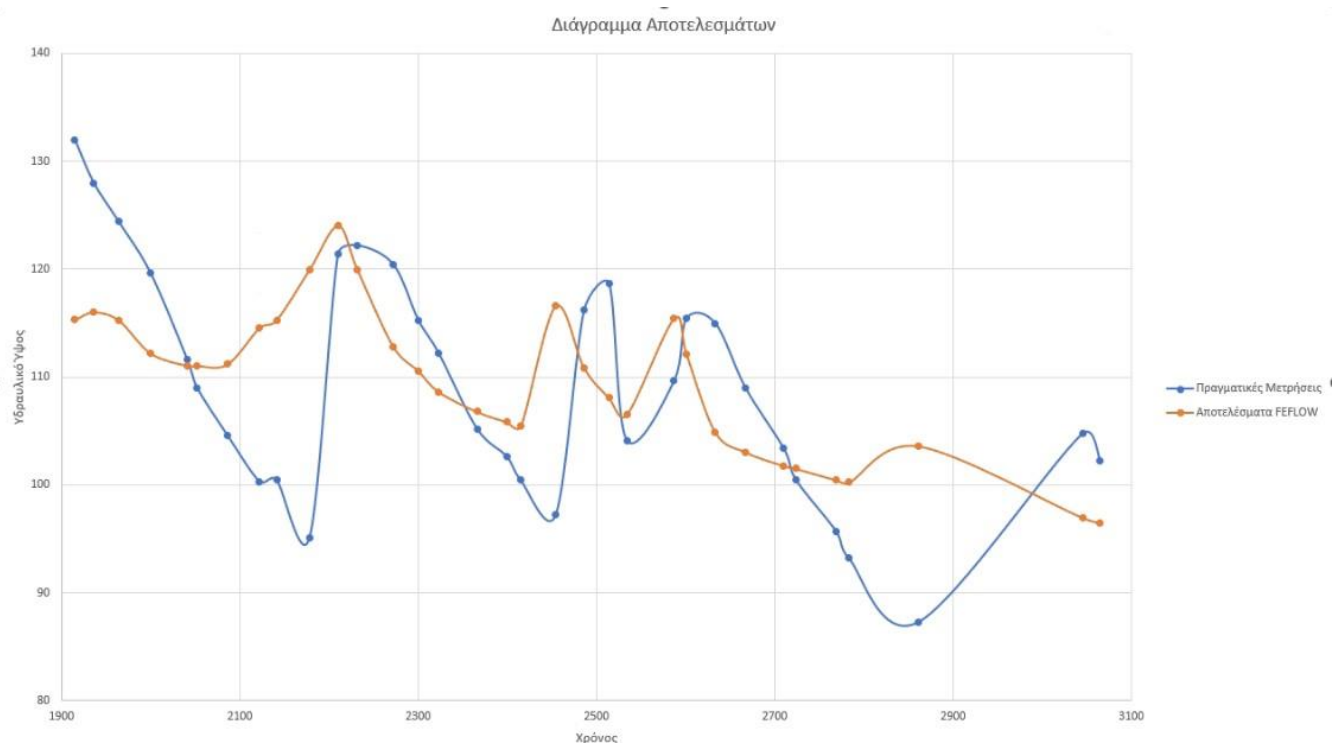
RMS: είναι η τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος

$\Delta H$ : είναι η διαφορά του μέγιστου με το ελάχιστο υδραυλικό ύψος

Για κάθε περίπτωση που πρέπει να εξεταστεί αντικαθίσταται στο SRMS% το ποσοστό 10% και στο  $\Delta H$  αντικαθίσταται 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.

Στο διάγραμμα το οποίο εμφανίζεται στην Εικόνα 65 εμφανίζονται με την μπλε καμπύλη οι πραγματικές μετρήσεις για το πηγάδι παρατήρησης το οποίο βρίσκεται στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης. Με την καμπύλη με το πορτοκαλί χρώμα εμπλανίζονται τα αποτελέσματα του ποργράμματος FEFLOW για το ίδιο πηγάδι παρατήρησης. Από το πρόγραμμα FEFLOW εξήχθησαν τα υδραυλικά ύψη για τις ημερομηνίες τις οποίες υπάρχουν οι πραγματικές μετρήσεις. Το παρακάτω διάγραμμα αποτελεί το παράδειγμα καθώς υπάρχουν δεδομένα για όλη την περίοδο και δεν υπάρχουν κενές περίοδοι χωρίς μετρήσεις.





Εικόνα 65. Διάγραμμα σύγκρισης πραγματικών μετρήσεων - αποτελεσμάτων FEFLOW για το νοτιότερο πηγάδι παρατήρησης στην περιοχή μελέτης.

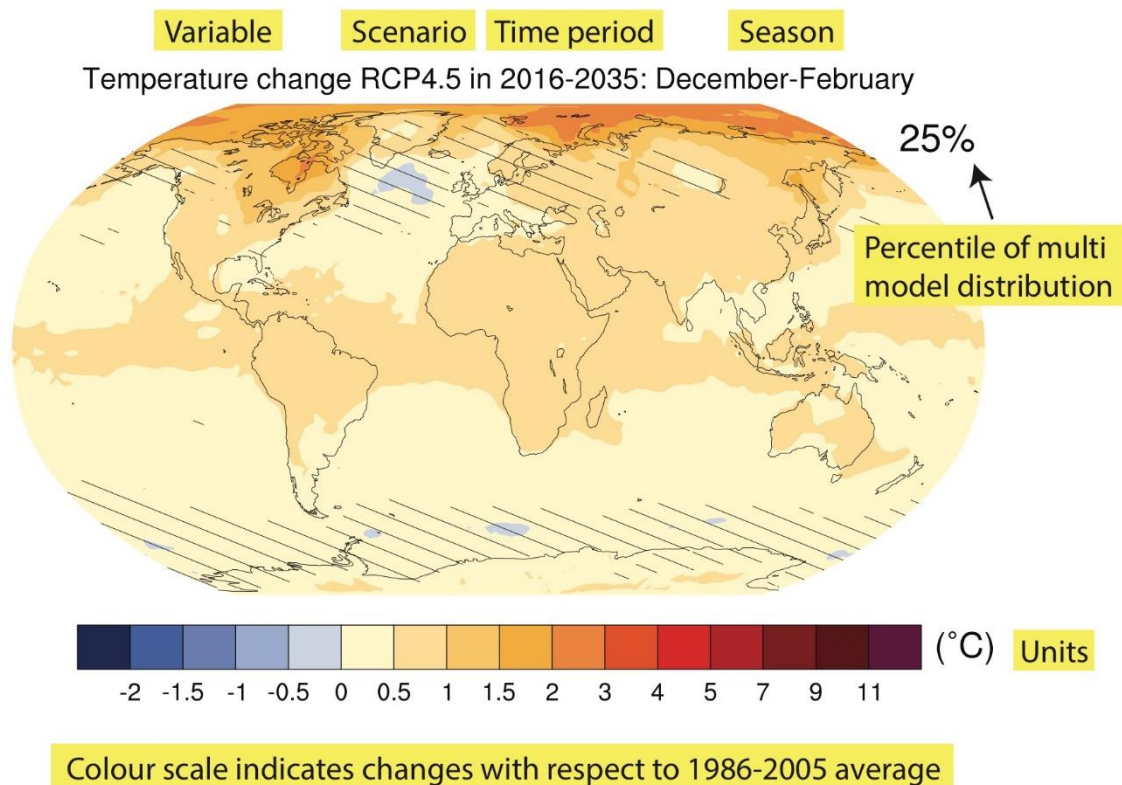
Στην Εικόνα 65 παρατηρείται ότι υπάρχει μία μικρή διαφορά μεταξύ των πραγματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων όμως η πορτοκαλί καμπύλη ακολουθεί τις διακυμάνσεις της μπλε καμπύλης. Η διαφορά αυτή είναι μέσα στα επιθυμητά πλαίσια δηλαδή μικρότερη από το 10% όπως μπορεί να βρεθεί στην βιβλιογραφία. Παρακάτω ακολουθεί ο αναλυτικός πίνακας με τις πραγματικές μετρήσεις σε μέτρα, τα αποτελέσματα στο πρόγραμμα FEFLOW σε μέτρα, την διαφορά σε μέτρα καθώς και την ποσοστιαία διαφορά επί τοις 100 μεταξύ των δύο τιμών.

Ημέρα	Πραγματικές Μετρήσεις (m)	Αποτελέσματα FEFLOW (m)	Διαφορά (m)	Ποσοστιαία Διαφορά (%)
1915	132	115.32	16.68	0.14
1936	128	116.03	11.97	0.10
1964	124.4	115.28	9.12	0.08
2000	119.6	112.21	7.39	0.07
2041	111.6	111.06	0.54	0.00
2052	109	111.06	2.06	0.02
2086	104.6	111.19	6.59	0.06
2122	100.32	114.58	14.26	0.12
2141	100.5	115.28	14.78	0.13

2210	121.42	124.04	2.62	0.02
2232	122.21	119.93	2.28	0.02
2272	120.44	112.84	7.60	0.07
2300	115.29	110.59	4.70	0.04
2323	112.2	108.64	3.56	0.03
2366	105.2	106.79	1.59	0.01
2399	102.65	105.86	3.21	0.03
2415	100.44	105.43	4.99	0.05
2486	116.2	110.87	5.33	0.05
2514	118.68	108.07	10.61	0.10
2534	104.12	106.53	2.41	0.02
2587	109.66	115.45	5.79	0.05
2601	115.45	112.1	3.35	0.03
2633	115	104.91	10.09	0.10
2667	109	103.05	5.95	0.06
2710	103.37	101.78	1.59	0.02
2724	100.43	101.51	1.08	0.01
2769	95.67	100.47	4.80	0.05
2783	93.19	100.24	7.05	0.07
2861	87.3	103.62	16.32	0.16
3045	104.75	96.98	7.77	0.08
3065	102.2	96.46	5.74	0.06
<b>Μέσο Σφάλμα</b>			<b>6.51</b>	<b>0.06</b>

Το μέσο σφάλμα σε μέτρα μεταξύ των πραγματικών μετρήσεων και των αποτελεσμάτων του προγράμματος FEFLOW για το μοντέλο της περιοχής των Μαλίων είναι 6.51 m το οποίο σε ποσοστιαία μεταβολή είναι το 0.06%.





Εικόνα 66. Μεταβολή της θερμοκρασίας στον πλανήτη σύμφωνα με το κλιματικό σενάριο RCP 4.5 (IPCC a, 2014).

Στην Εικόνα 66 εμφανίζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στον πλανήτη με διαφορετικές αποχρώσεις του κόκκινου και του μπλε για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5. Ο χάρτης αυτό υπάρχει στην ιστοσελίδα του IPCC (IPCC a, 2014). Στην περιοχή του νησιού της Κρήτης για τις πρώτες δεκαετίες παρατηρείται ότι θα υπάρχει μία αύξηση της θερμοκρασίας της τάξεως του 0.5 - 1°C.

Τα αποτελέσματα για τα κλιματικά μοντέλα 1, 9, 10, 11, 13, 14, 15 και 16 έχουν παρόμοια εικόνα καθώς εμφανίζουν πολύ μικρή μείωση της στάθμης του υδραυλικού ύψους με συνεχείς αυξομειώσεις στο μέσο υδραυλικό ύψος κατά την διάρκεια του κάθε ενός από τα κλιματικά μοντέλα για το κλιματικό σενάριο RCP 4.5. Το υδραυλικό ύψος βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα από το μοντέλο με τις πραγματικές μετρήσεις παρότι το υδραυλικό ύψος παραμένει σταθερό σε σχετικά υψηλά επίπεδα.

Για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 στα κλιματικά μοντέλα 1, 9, 10, 11, 13, 14, 15 και 16 παρατηρείται μία συνεχής μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα από την αρχή του σεναρίου μέχρι και το τέλος αυτού. Η μείωση αυτή είναι ομαλή και δεν παρατηρούνται απότομες μεταβολές στην μέση στάθμη του υδροφορέα. Τα επίπεδα της μέσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα ιδιαίτερα στις τελευταίες δεκαετίες του κλιματικού σεναρίου.

Τα αποτελέσματα για τα κλιματικά μοντέλα 2, 3, 4, 5 και 17 εμφανίζουν παρόμοια εικόνα η οποία είναι διαφορετική από την προηγούμενη. Στα πρώτα 10 με 15 χρόνια του κλιματικού

σεναρίου RCP 4.5 παρατηρείται η μέση στάθμη του υδροφορέα να παραμένει σταθερή ή να έχει μία μικρή αύξηση η οποία όμως ακολουθείται από μία απότομη μείωση. Με την μείωση αυτή η στάθμη του υδροφορέα φτάνει σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Την δεκαετία 2060 έως 2070 φαίνεται να φτάνει στο χαμηλότερο σημείο της, όπου στην συνέχεια σταθεροποιείται μέχρι το τέλος της μοντελοποίησης.

Στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 τα κλιματικά μοντέλα 2, 3, 4, 5 και 17 έχουν παρόμοια εικόνα με τα κλιματικά μοντέλα που αναφέρονται στην παραπάνω παράγραφο. Καθ' όλη την διάρκεια του κλιματικού σεναρίου παρατηρείται μείωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Σε όλα τα κλιματικά μοντέλα η στάθμη στα τελευταία βήματα του κλιματικού σεναρίου βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Ιδιαίτερα στο κλιματικό μοντέλο 2 σημειώνεται η χαμηλότερη στάθμη σε σύγκριση με όλα τα κλιματικά μοντέλα.

Τέλος τα κλιματικά μοντέλα 6, 7, 8 και 12 εμφανίζουν αποτελέσματα στο κλιματικό σενάριο RCP 4.5 διαφορετικά σε σύγκριση με τα προηγούμενα κλιματικά μοντέλα. Σε αυτά τα κλιματικά μοντέλα εμφανίζονται μεγάλοι περίοδοι κατά τις οποίες η μέση στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα έχει αυξητική τάση. Αυτό παρατηρείται κυρίως στα αρχικά χρόνια του κλιματικού σεναρίου καθώς σε όλες τις περιπτώσεις μετά το 2050 με 2060 ακολουθεί μείωση του υδροφόρου ορίζοντα. Η μέση στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα για τα κλιματικά μοντέλα 6, 7, 8 και 12 παραμένει σε υψηλά επίπεδα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα κλιματικά μοντέλα. Στα κλιματικά μοντέλα 6 και 7 εμφανίζεται και μία μικρή αύξηση στην μέση στάθμη.

Όπως αναφέρεται και στις προηγούμενες παραγράφους στο κλιματικό σενάριο RCP 8.5 στα κλιματικά μοντέλα 6, 7, 8 και 12 παρατηρείται μεγάλη μείωση στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα η οποία διαρκεί σχεδόν σε όλη την περίοδο της μοντελοποίησης.

## 5. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα του αρχικού μοντέλου (Calibration & Validation) μπορούν να χαρακτηριστούν αποδεκτά. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία για να μπορούν να χαρακτηριστούν αποδεκτά πρέπει το σφάλμα μεταξύ των πραγματικών μετρήσεων και του μοντέλου να είναι μικρότερο του 10%. Στην παρούσα διπλωματική το μέσο σφάλμα είναι της τάξεως του 5%. Η μικρότερη τιμή του σφάλματος καταγράφεται στο πηγάδι παρατήρησης το οποίο βρίσκεται στην νότια πλευρά της περιοχής μελέτης και είναι περίπου 0.06 % και το μεγαλύτερο είναι περίπου στο 9%.

Για την βροχόπτωση χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από 2 βροχομετρικούς σταθμούς οι οποίοι βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα μεταξύ τους. Ο ένας βροχομετρικός σταθμός βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας και ο άλλος βρίσκεται επάνω στα βουνά σε μεγάλο υψόμετρο. Με αυτόν τον τρόπο έγινε προσπάθεια να καλυφθεί η διαφορά στα χιλιοστά κατακρήμνισης που δέχονται διάφορα σημεία της περιοχής μελέτης ανάλογα με το υψόμετρο στο οποίο βρίσκονται. Ιδανικά θα ήταν χρήσιμο να υπήρχε και ένας επιπλέον βροχομετρικός σταθμός στην αριστερή πλευρά της περιοχής μελέτης σε ενδιάμεσο υψόμετρο για να καλυφθεί και αυτό το ενδεχόμενο.

Το μεγαλύτερο πρόβλημα το οποίο συναντήθηκε κατά την διάρκεια της μοντελοποίησης της περιοχής μελέτης ήταν η εύρεση αρκετών δεδομένων για το υδραυλικό ύψος της περιοχής μελέτης. Υπήρχαν αρκετά σημεία στα οποία τα πηγάδια παρατήρησης είχαν μόνο μία μέτρηση ή άλλα σημεία που τα δεδομένα τους εμφανίζονταν λάθος. Η εύρεση των λάθους μετρήσεων πραγματοποιήθηκε μελετώντας κάθε μέτρηση. Σε κάποια πηγάδια παρατήρησης εμφανιζόταν το υδραυλικό ύψος να βρίσκεται σε κάποιες περιπτώσεις πάνω από την στάθμη του εδάφους. Υπήρχαν περιπτώσεις όπου το υδραυλικό ύψος είχε μεγάλες διακυμάνσεις σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα στο οποίο μπορεί να δοθεί η εξήγηση ότι το πηγάδι δεν βρισκόταν σε ηρεμία και πραγματοποιούνταν άντληση την στιγμή της μέτρησης. Από αυτά επιλέχθηκαν τα σημεία στα οποία υπήρχαν αρκετά δεδομένα με τα οποία μπορούσε να πραγματοποιηθεί σωστή βαθμονόμηση του μοντέλου. Το ιδανικό σενάριο σε αυτή την περίπτωση θα ήταν τα πηγάδια παρατήρησης να ήταν διασκορπισμένα στην περιοχή μελέτης έτσι ώστε να υπάρχει μία καλύτερη εικόνα για την στάθμη του υδραυλικού ύψους σε ολόκληρη την περιοχή μελέτης.

Κατά τις διάρκεια της μοντελοποίησης (Calibration – Validation) παρατηρήθηκε μείωση στην στάθμη των υπογείων υδάτων. Αυτό οφείλεται στην μεγάλη τουριστική ανάπτυξη της περιοχής μελέτης συνδυαστικά με την αγροτική ενασχόληση των κατοίκων της περιοχής. Θα πρέπει να ληφθούν μέτρα από την πολιτεία για την σπατάλη νερού που πραγματοποιείται στην περιοχή από τις ξενοδοχειακές μονάδες (π.χ. πισίνες) και τους αγρότες.

Για τα κλιματικά σενάρια RCP 4.5 παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά σε όλα τα αποτελέσματα. Παρατηρείται να παραμένει σχεδόν σταθερή η μέση στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα με το πέρασμα των ετών. Σε κάποια κλιματικά σενάρια παρατηρείται να υπάρχει μείωση στην μέση στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στις πρώτες δεκαετίες του κλιματικού σεναρίου και μετά από μία περίοδο επανέρχεται σχεδόν στα αρχικά επίπεδα. Στα υπόλοιπα παραμένει σταθερή στις αρχικές δεκαετίες και μετά παρατηρούνται αυξομειώσεις στην μέση στάθμη με το τέλος του κλιματικού σεναρίου η μέση στάθμη να βρίσκεται στα αρχικά επίπεδα. Η μέση στάθμη σε όλα τα κλιματικά σενάρια στο τέλος του κλιματικού σεναρίου φτάνει σε παρόμοια επίπεδα. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 66 η μεταβολή της θερμοκρασίας και κατά συνέπεια και της βροχόπτωσης επηρεάζει διαφορετικά κάθε περιοχή του πλανήτη. Στην Μεσόγειο σύμφωνα με τον IPCC ( Intergovernmental Panel on Climate Change) η μεταβολή της θερμοκρασίας θα είναι της τάξεως του 0 – 0.5 °C και οι μεταβολές δεν θα είναι τόσο έντονες σε σύγκριση με άλλες περιοχές του πλανήτη.

Για το κλιματικό σενάριο RCP 8.5 το οποίο είναι ένα ακραίο σενάριο σε όλα τα αποτελέσματα παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές στην μέση στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα είναι είτε σταδιακή με το πέρασμα των δεκαετιών είτε απότομη κατά την διάρκεια μίας δεκαετίας. Στα πηγάδια παρατήρησης που βρίσκονται κοντά στα παράλια της περιοχής μελέτης η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα πλησιάζει το επίπεδο της θάλασσας γεγονός που θα δημιουργήσει ακόμα εντονότερο το πρόβλημα της εισροής αλμυρού νερού στον υδροφόρο.

Σε μελλοντικές διπλωματικές εργασίες οι οποίες αφορούν την περιοχή των Μαλίων 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 υδροφόρου ορίζοντα. Ένα εναλλακτικό σενάριο θα μπορούσε να είναι η εντατικότερη χρήση του νερού από το φράγμα Αποσελέμη ειδικά τους καλοκαιρινούς μήνες. Σε αυτό το σενάριο μπορεί να μελετηθεί συνδυαστικά και η μεταβολή της στάθμης του φράγματος με κάποιο μοντέλο επιφανειακών υδάτων.

Η μοντελοποίηση καθώς και τα κλιματικά σενάρια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν στα πλαίσια Ευρωπαϊκού προγράμματος.

## 6. Βιβλιογραφία

- Bienvenido-Huertas, D., Sánchez-García, D., & Rubio-Bellido, C. (2022). Influence of the RCP scenarios on the effectiveness of adaptive strategies in buildings around the world. *Building and Environment*, 208(October 2021). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108631>
- Bonneau, M. (1984). Correlation of the Hellenide nappes in the south-east Aegean and their tectonic reconstruction. *Geological Society Special Publication*, 17, 517–527. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1984.017.01.38>
- Boumaza, B., Chekushina, T. V., Vorobyev, K. A., & Schesnyak, L. E. (2021). The heavy metal pollution in groundwater, surface and spring water in phosphorite mining area of Tebessa (Algeria). *Environmental Nanotechnology, Monitoring and Management*, 16(September). <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2021.100591>
- Canada.ca. (2022). *Government of Canada*. Water Sources: Groundwater. <https://www.canada.ca/en.html>
- Cheremisinoff, N. P. (1997a). 3 - *Principles of Hydrogeology* (N. P. B. T.-G. R. and T. T. Cheremisinoff (ed.); pp. 85–126). William Andrew Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-081551411-4.50005-3>
- Cheremisinoff, N. P. (1997b). 4 - *Groundwater Contamination* (N. P. B. T.-G. R. and T. T. Cheremisinoff (ed.); pp. 127–168). William Andrew Publishing. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-081551411-4.50006-5>
- Climate & Weather. (2022). *Weather & Climate*. <https://weather-and-climate.com/>
- Collins, S., Singh, R., Rivas, A., Palmer, A., Horne, D., Manderson, A., Roygard, J., & Matthews, A. (2017). Transport and potential attenuation of nitrogen in shallow groundwaters in the lower Rangitikei catchment, New Zealand. *Journal of Contaminant Hydrology*, 206(October), 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2017.10.002>
- Diersch, H. J. G., & Perrochet, P. (2009). Error norms used in FEFLOW. *FEFLOW White Papers*, 1, 117–119.
- European Commission. (2006). [https://ec.europa.eu/info/index\\_en](https://ec.europa.eu/info/index_en)
- Feng, B., Ma, Y., Qi, Y., Zhong, Y., & Sha, X. (2022). Health risk assessment of groundwater nitrogen pollution in Yinchuan plain. *Journal of Contaminant Hydrology*, 249(May), 104031. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104031>
- Ferré, T. P. A., & Warrick, A. W. (2004). Infiltration. *Encyclopedia of Soils in the Environment*,

- 4(1977), 254–260. <https://doi.org/10.1016/B0-12-348530-4/00382-9>
- Gao, Z., & Chai, J. (2022). Method for predicting unsaturated permeability using basic soil properties. *Transportation Geotechnics*, 34(February), 100754. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2022.100754>
- Gleick, P. H. (1996). Water resources. *Encyclopedia of Climate, Weather*, 817–823.
- Guanabara, E., Ltda, K., Guanabara, E., & Ltda, K. (n.d.). No 主観的健康感を中心とした在宅高齢者における健康関連指標に関する共分散構造分析Title.
- Hall, R., & Audley-Charles, M. G. (1983). The structure and regional significance of the Talea Ori, Crete. *Journal of Structural Geology*, 5(2), 167–179. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(83\)90042-1](https://doi.org/10.1016/0191-8141(83)90042-1)
- Indoria, A. K., Sharma, K. L., & Reddy, K. S. (2020). Chapter 18 - Hydraulic properties of soil under warming climate (M. N. V. Prasad & M. B. T.-C. C. and S. I. Pietrzykowski (Eds.); pp. 473–508). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818032-7.00018-7>
- IPCC. (2022). IPCC. <https://www.ipcc.ch/about/>
- IPCC a. (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers. *Ipcc*, 31.
- Jose Carlos García González, José Antonio Redondo, A. G. (2015). EU-Hydro / EU-DEM Upgrade Documentation EEA User Manual. *Indra Systems S.A.*
- Jubb, I., Canadell, P., & Dix, M. (2013). *Representative Concentration Pathways*. Australian Government, Department of the Environment. 1–19.
- Kett, H. (2017). *Two-minyte takeaway: What is infiltration?* <https://www.washingtonnature.org/>
- Khalid Awan, U., Tischbein, B., & Martius, C. (2015). Simulating groundwater dynamics using feflow-3D Groundwater model under complex irrigation and drainage network of dryland ecosystems of Central Asia. *Irrigation and Drainage*, 64(2), 283–296. <https://doi.org/10.1002/ird.1897>
- Kirkham, M. B. (2014). Chapter 13 - Infiltration (M. B. B. T.-P. of S. and P. W. R. (Second E. Kirkham (Ed.); pp. 201–227). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-420022-7.00013-6>
- Kosztra, B., Büttner, G., Hazeu, G., & Arnold, S. (2017). Updated CLC illustrated nomenclature guidelines. *Final Report by European Environmental Agency*, 3436.
- Koukidou, I., & Panagopoulos, A. (2017). Application of Feflow for the Simulation of

- Groundwater Flow At the Tirnavos (Central Greece) Alluvial Basin Aquifer System. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(4), 1747. <https://doi.org/10.12681/bgsg.11360>
- Lambrakis, N. J. (1998). The impact of human activities in the Malia coastal area (Crete) on groundwater quality. *Environmental Geology*, 36(1–2), 87–92. <https://doi.org/10.1007/s002540050323>
- Lambrakis, N., & Kallergis, G. (2001). Reaction of subsurface coastal aquifers to climate and land use changes in Greece: Modelling of groundwater refreshing patterns under natural recharge conditions. *Journal of Hydrology*, 245(1–4), 19–31. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00334-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00334-1)
- Lespez, L., Dalongeville, R., Pastre, J. F., Darmon, F., Mathieu, R., & Poursoulis, G. (2003). Late-Middle-Holocene palaeo-environmental evolution and coastline changes of Malia (Crete). *The Mediterranean World Environment and History. Elsevier*, 439–452.
- Lu, J. (2015). Identification of Forensic Information from Existing Conventional Site-Investigation Data. In *Introduction to Environmental Forensics: Third Edition* (Third Edit). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-404696-2.00006-0>
- Ma, J. (2015). Review of permeability evolution model for fractured porous media. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 7(3), 351–357. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.12.003>
- Molly, S. (2019). *No Title*. Biological Roles of Water: Why Is Water Necessary for Life? <https://sitn.hms.harvard.edu/uncategorized/2019/biological-roles-of-water-why-is-water-necessary-for-life/>
- Niu, Q., & Zhang, C. (2019). Permeability Prediction in Rocks Experiencing Mineral Precipitation and Dissolution: A Numerical Study. *Water Resources Research*, 55(4), 3107–3121. <https://doi.org/10.1029/2018WR024174>
- Oria, M. D., Ferraresi, M., & Tanda, M. G. (2017). Historical trends and high-resolution future climate projections in Northern Tuscany (Italy). *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.10.054>
- Papaioannou, A., Plageras, P., Dovriki, E., Minas, A., Krikelis, V., Nastos, P. T., Kakavas, K., & Paliatsos, A. G. (2007). Groundwater quality and location of productive activities in the region of Thessaly (Greece). *Desalination*, 213(1–3), 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.610>
- Papazotos, P., Koumantakis, I., & Vasileiou, E. (2019). Hydrogeochemical assessment and



- suitability of groundwater in a typical Mediterranean coastal area: A case study of the Marathon basin, NE Attica, Greece. *HydroResearch*, 2, 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.11.002>
- Petalas, C., Pisinaras, V., Gemitzi, A., Tsihrintzis, V. A., & Ouzounis, K. (2009). Current conditions of saltwater intrusion in the coastal Rhodope aquifer system, northeastern Greece. *Desalination*, 237(1–3), 22–41. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.12.020>
- Saravanan, S., Parthasarathy, K. S. S., & Sivaranjani, S. (2018). Assessing Coastal Aquifer to Seawater Intrusion: Application of the GALDIT Method to the Cuddalore Aquifer, India. In *Coastal Zone Management: Global Perspectives, Regional Processes, Local Issues*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814350-6.00010-0>
- Sharma, K., Raju, N. J., Singh, N., & Sreekesh, S. (2022). Urban Climate Heavy metal pollution in groundwater of urban Delhi environs: Pollution indices and health risk assessment. *Urban Climate*, 45(July), 101233. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101233>
- Solomon, S., D., Qin, M., Manning, Z., Chen, M., Marquis, K. B., Averyt, M. T., Miller HL, Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., & Miller, H. L. (2007). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. D Qin M Manning Z Chen M Marquis K Averyt M Tignor and HL Miller New York Cambridge University Press Pp, Geneva, 996. <https://doi.org/10.1038/446727a>
- Steiakakis, E., Vavadakis, D., Kritsotakis, M., Voudouris, K., & Anagnostopoulou, C. (2016). Drought impacts on the fresh water potential of a karst aquifer in Crete, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 75(6), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5509-5>
- Sustain\_Coast. (2022). *Sustain Coast*. <https://www.sustain-coast.tuc.gr/>
- Taylor, S. G. (1950). *The permeability of porous materials*. 392–405.
- Telahigue, F., Mejri, H., Mansouri, B., Souid, F., Agoubi, B., Chahlaoui, A., & Kharroubi, A. (2020). Assessing seawater intrusion in arid and semi-arid Mediterranean coastal aquifers using geochemical approaches. *Physics and Chemistry of the Earth*, 115(November 2019), 102811. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2019.102811>
- Theodorakopoulou, K., Pavlopoulos, K., Tsourou, T., Triantaphyllou, M., Kouli, K., Vandarakis, D., Bassiakos, Y., & B, H. (2005). Coastal changes and human activities at Istron-Kalo Chorio (NE Crete, Greece) during the Upper Holocene. *Rivista de Geomorphologie*, 7, 21–31.

- UNESCO. (1978). *World water balance and water resources of the earth* (World water). UNESCO.
- UNESCO. (2018). *2018 UN World Water Development Report, Nature-based Solutions for Water*.
- USGS, U. S. G. S. (2022). USGS. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/o-ydrologikos-kyklos-water-cycle-greek>
- Uugwanga, M. N., & Kgabi, N. A. (2021). Heavy metal pollution index of surface and groundwater from around an abandoned mine site, Klein Aub. *Physics and Chemistry of the Earth*, 124(P1), 103067. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103067>
- Vavoulidou, E., Charoulis, A., Soulis, K., Karyotis, T., & Kavvadias, V. (2009). Soil survey for improvement of farming practices in Malia municipality, Greece. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40(1–6), 1020–1033. <https://doi.org/10.1080/00103620802698010>
- Vegan-to-be. (2018). *Vegan to be*. <https://www.vegantobe.gr/>
- Zhai, Q., Rahardjo, H., & Satyanaga, A. (2018). A pore-size distribution function based method for estimation of hydraulic properties of sandy soils. *Engineering Geology*, 246(September), 288–292. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.031>
- Βουδούρης, Κ. (2011). *Εκμετάλλευση και Διαχείριση Υπογείου Νερού*.
- Βουδούρης, Κ. (2019). *Σημειώσεις Υδρογεωλογίας*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- ΕΜΥ. (2022). ΕΜΥ. [http://www.emy.gr/emyl/climatology/climatology\\_city?perifereia=Crete&poli=Heraklion](http://www.emy.gr/emyl/climatology/climatology_city?perifereia=Crete&poli=Heraklion)
- Καρατζάς, Γ. Π. (2022). *Πανεπιστημιακές Σημειώσεις*. <https://www.eclass.tuc.gr/courses/MHPER357/>
- Κρήτης, Α. διοίκηση. (2021). *Γεωλικός Χάρτης της Κρήτης*. <https://www.apdkritis.gov.gr/>
- Περιφέρεια-Κρήτης. (2009). *Κατάσταση υπόγειων υδροφορέων Κρήτης. Παρατηρήσεις για το υδρολογικό έτος από την 1η Μαΐου 2009 έως και 30η Σεπτεμβρίου 2009*.
- Φυτρολάκης, Ν. (1978). Συμβολή Στη Γεωλογική Έρευνα Της Κρήτης. *Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας*, XIII(2), 101–115.