



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
« ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ »

**Παρακολούθηση και
προσομοίωση παράκτιων
υδροφόρων συστημάτων για τη
διαχείριση των υπόγειων
υδατικών πόρων: Η περίπτωση
του Αργολικού πεδίου.**

Σοφία Α. Αδάμ

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Μάρτιος 2023

**Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ,
Α. Καλλιώρας**



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
« ΕΠΙΣΤΗΜΗ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ »

**Παρακολούθηση και
προσομοίωση παράκτιων
υδροφόρων συστημάτων για τη
διαχείριση των υπόγειων
υδατικών πόρων: Η περίπτωση
του Αργολικού πεδίου.**

Σοφία Α. Αδάμ

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**

Αθήνα, Μάρτιος 2023

**Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ,
Α. Καλλιώρας**

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των μεταπτυχιακών σπουδών στο ΔΜΠΣ «Επιστήμη & Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το αντικείμενο της διατριβής πραγματεύεται την διαχείριση παράκτιου υδροφόρου συστήματος και την παρακολούθηση και προσομοίωση της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασής του στην περιοχή του Αργολικού πεδίου. Η συγκεκριμένη διατριβή συντελείται από βιβλιογραφική έρευνα, μετρήσεις πεδίου και συλλογή – επεξεργασία των δεδομένων για την κατασκευή του εννοιολογικού και μαθηματικού μοντέλου του υπό μελέτη υδροφόρου συστήματος.

Η ανάθεση και η επίβλεψη του συγκεκριμένου θέματος έγινε από τον κ. Ανδρέα Καλλιώρα, Επίκουρο Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τον οποίο και ευχαριστώ για την καθοδήγηση και την υποστήριξη του αντικειμένου σε επιστημονικό επίπεδο.

Θα ήθελα να ευχαριστώ την κα. Μάρθα Περδικάκη, Διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, για τις υποδείξεις που ήταν καθοριστικές για την ολοκλήρωση του μοντέλου.

Επίσης, ευχαριστώ την κα. Αγγελική Βλασσοπούλου, Ερευνήτρια του προγράμματος MARSoluT, για την βοήθεια της στις μετρήσεις πεδίου και στις χημικές αναλύσεις.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξή τους σε όλες μου τις αποφάσεις και σε επαγγελματικό και σε φιλικό επίπεδο.

Περίληψη

Η διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων σε παράκτια υδροφόρα συστήματα αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά ζητήματα, ιδιαίτερα σε ημί-ξηρές περιοχές όπως αυτή της Μεσογειακής λεκάνης. Το πρόβλημα γίνεται εντονότερο σε περιπτώσεις όπου οι αγροτικές δραστηριότητες εμφανίζονται με ιδιαίτερη ένταση, με την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών να αποτελεί βασική προτεραιότητα για την τοπική κοινωνία. Ως περιοχή μελέτης χρησιμοποιείται το Αργολικό πεδίο, όπου φιλοξενείται ένα ιδιαίτερα επιβαρυνόμενο παράκτιο αγροτικό οικοσύστημα με σημαντικές ανθρωπογενείς παρεμβάσεις.

Η έρευνα περιλαμβάνει μετρήσεις υπαίθρου υδρογεωλογικού ενδιαφέροντος (σταθμημετρήσεις, δειγματοληψία και χημικές αναλύσεις των δειγμάτων των υπόγειων νερών της περιοχής) την περίοδο Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου 2022, με στόχο την παραγωγή πρωτογενών δεδομένων, τα οποία θα τροφοδοτήσουν μοντέλα προσομοίωσης της ροής του υπόγειου νερού αλλά και μεταφοράς μάζας με σκοπό την προσομοίωση της μεταφοράς ρύπων στο υδροφόρο σύστημα. Όσον αφορά τις μετρήσεις πεδίου, πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις σε ιόντα – περιβαλλοντικούς δείκτες για τα υπόγεια νερά. Πιο συγκεκριμένα, έγινε χωρική κατανομή των ιόντων Cl^- , Na^+ που αποτελούν βασικούς δείκτες υφαλμύρισης των υπογείων νερών. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων έγινε σε συνδυασμό με τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και το απόλυτο υψόμετρο στάθμης διαφόρων τμημάτων της περιοχής μελέτης, με στόχο τον εντοπισμό των προσβαλλόμενων περιοχών από την θαλάσσια διείσδυση. Ένας άλλος περιβαλλοντικός δείκτης που εκτιμήθηκε είναι η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων, η οποία ξεπερνά τα όρια για πάνω από το 80% των δειγμάτων σύμφωνα με την οδηγία 91/676/EOK.

Με βάση τα ποιοτικά και ποσοτικά πρωτογενή δεδομένα και από βιβλιογραφικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MODFLOW για την προσομοίωση της υπόγειας ροής του κοκκώδους υδροφορέα της Αργολικής πεδιάδας. Για το μοντέλο μεταφοράς μάζας, που έχει ως στόχο την εκτίμηση της συγκέντρωσης της αλατότητας στα υπόγεια νερά, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας SEAWAT, ο οποίος είναι ένα πακέτο που συνδυάζει τα υδραυλικά δεδομένα της υπόγειας ροής του κώδικα MODFLOW και επιλύεται η εξίσωση μεταφοράς μάζας με την βοήθεια του κώδικα MT3DMS. Αφού πρώτα έγινε η σύλληψη του εννοιολογικού μοντέλου, στην συνέχεια καταστρώθηκε το μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιώντας το λογισμικό ModelMuse της Αμερικανικής Γεωλογικής υπηρεσίας. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων εξήχθησαν από τρία υποθετικά διαχειριστικά σενάρια για την μετρίαση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Η αξιολόγηση των σεναρίων πραγματοποιήθηκε με βάση την κατανομή του υδραυλικού φορτίου και της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σύγκριση και με τις τιμές των ποιοτικών δεικτών (Cl^-) των υπογείων νερών.

Λέξεις – κλειδιά: Αργολικό πεδίο, παράκτιος κοκκώδης υδροφορέας, πιεζομετρικές συνθήκες, χημικές αναλύσεις, τεχνητός εμπλουτισμός, MODFLOW, MT3DMS, SEAWAT, ModelMuse.

Abstract

The management of groundwater resources in coastal aquifers is one of the most important environmental issues, especially in semi-arid areas such as the Mediterranean basin. The problem becomes more acute in cases where agricultural activities occur with particular intensity, with the coverage of irrigation needs being a key priority for the local community. The Argolid basin will be used as the study area, where a particularly overexploiting coastal agricultural ecosystem with significant anthropogenic interventions is hosted.

The research includes field measurements of hydrogeological interest (water level measurements, sampling and chemical analysis of the groundwater samples in the area) with the aim of producing primary data which will be used for simulation models of the groundwater flow and mass transfer in order to simulate the transport of pollutants into the groundwater system. Regarding the field measurements, chemical analysis were performed on specific ions that are environmental indicators of the groundwater resources. More specifically, a spatial distribution of Cl^- , Na^+ ions, which are the main indicators of groundwater salinity, was made. The results of the chemical analysis were interpreted in conjunction with the values of the specific electrical conductivity and the absolute elevation of water table of various parts of the study area, with the aim of identifying the problematic areas from the seawater intrusion.

One other environmental indicator of the qualitative state of the groundwater resources is the estimation of the nitrates concentration in the study area. In the study area, it was found that the concentration of nitrates is over the permitted values for more of the 80% of water samples according to the 91/676/EC European framework, which indicates the excessive agricultural and industrial activities in the particular area.

Based on the qualitative and quantitative primary data and the literature survey, the MODFLOW code was used to simulate the groundwater flow of the granular aquifer of the Argolic plain. For the mass transfer model, which aims to estimate the salinity concentration in the groundwater, the SEAWAT code was used, which is a package that combines the groundwater flow hydraulic data of the MODFLOW code and the mass transport equation is solved with the use of the MT3DMS code. After the construction of the conceptual model, then, the mathematical model was built using ModelMuse of USGS as a graphical user interface. The results of the simulations were extracted from three hypothetical management scenarios for mitigating the effect of seawater intrusion. The evaluation of the scenarios was carried out based on the distribution of the hydraulic head and the specific electrical conductivity in comparison with the values of the environmental indicators (Cl^-) of the groundwater.

Keywords: *Argolid basin, coastal granular aquifer, hydraulic heads, hydrochemical analysis, aquifer recharge, MODFLOW, MT3DMS, SEAWAT, ModelMuse.*

Extended abstract

The coastal granular formations, due to their particular hydrogeological characteristics (porosity and hydraulic conductivity), are used to host different types of aquifers. The hydraulic contact of these formations with the sea level, combined with the overexploitation of the groundwater resources, results in the degradation of water quality and water shortage (Torres - Martinez, Abrahan, Mahlkecht, Kaown, & Barceló, 2021; Boumaiza, et al., 2022). Knowing the hydrogeological conditions of the coastal aquifers, the mitigation of the seawater intrusion and the protection of the groundwater resources are more possible. This master thesis discusses the current state of groundwater resources regarding the water quality and the piezometric conditions of the aquifer of the Argolid basin. Also, based on these data three simulation scenarios were conducted that showed the results of three different water management scenarios.

The granular coastal aquifer of Argolid basin is located in the eastern Peloponnese, in the Argolis prefecture. Specifically, this coastal aquifer system is sited under the Corinth prefecture in the north and next to Arcadia prefecture in the west, while it is bordered in south with the argolic gulf. In general, the Argolid basin is mostly covered by agricultural areas by 77,6%, while its agricultural activities covers the 75,2 % of these kind of activities in the whole prefecture.

The area of Argolid basin is considered to have a semi – arid climate. According to recent meteorological data (2012 – 2022), the average annual temperature is 18,3 °C and the average annual amount of precipitation is 480,9 mm.

The geomorphological setting of the study area consists of low slope gradient in mainland and higher slopes in the western, northern and eastern edges, due to the presence of Ktenias mountain, Dervenakia mountain range and Arachnaio mountain, respectively (Mitropapas, Koumantakis, Vasileiou, Perdikaki, & Kallioras, 2016). As for the geological conditions, the study area is mainly consisted of Tertiary and Neogene deposits that are deposited above the alpine formations. The alpine formations are carbonates, dolomites, karst formations and flysch – flyschoid formation. The latter formation is significant in hydrogeological terms as it can host different types of springs. Also, the alpine formations are deposited above the pre alpine formations that include metamorphic rocks like phyllites, quartzites. In the study area, the Tertiary and Neogene formations will be studied because the overexploitation of the groundwater for agricultural purposes is conducted in the aquifers that exist within these formations.

In order to estimate the current conditions of the groundwater table and the groundwater quality of the aquifer, field measurements were conducted during September – October 2022. Regarding the piezometric conditions of the groundwater table, the measurements showed that the eastern side of the basin is being affected by the seawater intrusion, due to the fact that this area has negative hydraulic heads. The hydrochemical analysis was conducted in order to specify the values of the concentration of some ions that are environmental indicators of the groundwater quality. The ions that were investigated regarding their

spatial distribution in the study area were the Na^+ and Cl^- ions that are indicators of seawater intrusion. The high values of concentration of these ions were distributed to the area that has negative hydraulic head, coming to the conclusion in both hydrochemical and hydraulic terms that this area is being affected by seawater intrusion. Additionally, the values of specific electrical conductivity confirm this assumption. Moreover, the nitrates spatial distribution was studied and it showed that over 80% of the water samples were over the permitted values of nitrates concentration according to the EU framework 91/676/EC. The qualitative and quantitative measurement indicate that the coastal granular aquifer of Argolid basin is being impacted by the seawater intrusion. Hence, it is necessary to implement recharge techniques in order to mitigate this problem.

So as to find the best practices for the aquifer's recharge, it is important to consider the conceptual model of the hydrological setting of the aquifer. As inflows of the system are considered to be the precipitation, the river network infiltration and the groundwater edge feed of the western and eastern carbonate nappes. The outflows are the evapotranspiration and the pumping wells. Based on this simplified conceptual model the mathematical model was made in order to simulate the groundwater flow and the mass transport in the groundwater system. The simulation derived from three different scenarios concerning the management of aquifer recharge. The first case was about redistribution of the pumping rate in the valley. For instance, the pumping rate in the center part of the basin was increased, whereas in the eastern part it was decreased in order to diminish the impact of seawater intrusion in these areas. In the second case the managerial measure was to add recharge wells alongside the coastline maintaining the same first case's pumping rate. The recharge rate was determined at $408 \text{ m}^3/\text{day}$ according to a recent report of the Argolis prefecture that indicates this number as an average recharge rate from the Kefalari springs in the summer months. In the third case, the managerial solution for the groundwater recharge was to add recharge wells in the central part of basin, where seawater intrusion was observed in the current conditions.

The simulations were conducted for the same stress periods. The stress periods were three and included the months September – October. The first period was on steady state flow and the others were on a transient state. The boundary conditions of this model is the evapotranspiration / precipitation, the groundwater edge feed, the coastline and the infiltration of the river network.

For the groundwater flow simulation the MODFLOW code was used in ModelMuse by U.S. Geological Survey. The results of the MODFLOW code were evaluated by the hydraulic heads of each case. In the first case it was observed that the hydraulic heads were lower than the current heads and also, the seawater intrusion was trapped only between PyrgHELLa and Dalamanara settlements without affecting the eastern part of the basin. In the second case, the same picture is depicted but the seawater intrusion is being slightly more diminished. The little difference between the two cases is caused by the small stress periods of the model. Moreover, in the third case all the hydraulic heads of the study area were positive, making it the best case scenario.

For the mass transport in the groundwater flow the SEAWAT code was implemented, which is a package that combines the MODFLOW code for the groundwater flow and the MT3DMS code, which solves the mass transport equation (Guo & Langevin, 2002). For the mass transport the concentration of TDS in kg/m^3 was indicated as the specific species of pollutant. The only boundary condition in SEAWAT is the coastline, in which the concentration of TDS is specified at 35 kg/m^3 . The initial concentration of TDS were defined by values that are dependent to the values of the specific electrical conductivity.

Unlike the groundwater flow models, in all mass transport models two sites of seawater intrusion are depicted. The one is located in the central part and affects mostly the area of Inachos and Ira settlements of the basin and the other in eastern part affecting the area of Tiryns and Nafplion settlements of the basin. The results of the models showed that there are little differences among the three cases and that happens because the time of the stress periods is short and we are not able to detect any significant changes. Another explanation is that the aquifer is overburdened and it is not able to subject to any changes.

This master thesis regarding the simulation models constitutes a simplified assessment of the hypothetical managerial solutions for the seawater intrusion in order to detect the aquifer's response and vulnerability to change.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract.....	6
Extended abstract	7
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή.....	17
1.1 Υδρογεωλογικά Μοντέλα.....	17
1.2 Μηχανισμός θαλάσσιας διείσδυσης.....	18
1.2.1 Μαθηματικά μοντέλα θαλάσσιας διείσδυσης	20
1.3 Μηχανισμός νιτρορύπανσης	23
1.3.1 Ο κύκλος του Ν στο εδαφικό στρώμα	23
1.4 Διεθνής εμπειρία στην περιβαλλοντική διαχείριση παράκτιων υδροφορέων	24
1.4.1 Τυνησία	25
1.4.2 Τανζανία.....	25
1.4.3 Κίνα	26
1.4.4 Μεξικό.....	26
1.4.5 Αλγερία.....	26
1.5 Κατάσταση υπογείων νερών στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.....	27
1.6 Διάρθρωση της εργασίας	27
Κεφάλαιο 2 ^ο : Γεωγραφικά & Στατιστικά στοιχεία της περιοχής μελέτης.....	29
2.1 Γεωγραφικά στοιχεία.....	29
2.2 Δημογραφικά στοιχεία & Χρήσεις γης	30
2.2.1 Δημογραφικά στοιχεία της Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας	30
2.2.2 Δημογραφικά στοιχεία περιοχής μελέτης.....	32
2.2.3 Χρήσεις γης της Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας	35
2.2.4 Χρήσεις γης της περιοχής μελέτης.....	36
Κεφάλαιο 3 ^ο : Γεωμορφολογικά και υδρογραφικά στοιχεία	39
3.1 Γεωμορφολογικό ανάγλυφο	39
3.2 Υδρογραφικά στοιχεία.....	39

Κεφάλαιο 4^ο: Γεωλογική δομή & Τεκτονικό καθεστώς	41
4.1 Γεωλογική δομή.....	41
4.1.1 Προαλπικό υπόβαθρο (Ενότητα Άρνας ή Φυλλιτών – Χαλαζιτών)	42
4.1.2 Αλπικό σύστημα	42
4.1.3 Μεταλικά ιζήματα.....	46
4.2 Τεκτονικά στοιχεία	47
Κεφάλαιο 5^ο: Επιφανειακή Υδρολογία	49
5.1 Υδρομετεωρολογικός σταθμός.....	49
5.2 Βροχομετρικά δεδομένα.....	50
5.3 Θερμοκρασιακά δεδομένα	53
5.4 Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής.....	54
5.5 Κλιματική κατάταξη περιοχής μελέτης.....	55
5.6 Όγκοι κατακρημνισμάτων περιόδου 2012 – 2022.....	57
Κεφάλαιο 6^ο: Υδρογεωλογικές συνθήκες.....	59
6.1 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά σχηματισμών	59
6.1.1 Υδρολιθολογική ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών	59
6.1.2 Υδροφόροι σχηματισμοί	61
6.1.3 Υδροφόρα συστήματα.....	62
6.1.4 Πηγαία ύδατα	64
6.2 Υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφόρου	66
6.3 Στοιχεία υδατικού ισοζυγίου του υδροφόρου συστήματος.....	72
6.3.1 Εισροές.....	72
6.3.2 Εκροές.....	78
6.4 Πιεζομετρικές συνθήκες	80
6.5 Υδροχημικά στοιχεία.....	87
6.5.1 Δειγματοληψία και επί τόπου μετρήσεις.....	87
6.5.2 Χημικές Αναλύσεις.....	92
Κεφάλαιο 7^ο: Προσομοίωση υπογείων νερών της περιοχής του Αργολικού πεδίου	97
7.1 Εννοιολογικό μοντέλο.....	97
7.2 Μαθηματικό μοντέλο	98
7.3 Ο κώδικας MODFLOW.....	99

7.3.1	Η εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών	100
7.3.2	Η υδραυλική αγωγιμότητα	100
7.3.3	Απαιτήσεις δεδομένων	101
7.3.4	Αρχικές και Οριακές συνθήκες	101
7.3.5	Μαθηματική περιγραφή	101
7.4	<i>Ο κώδικας SEAWAT</i>	103
7.4.1	Ο νόμος Darcy	104
7.4.2	Μαθηματική περιγραφή	104
7.4.3	Αρχικές και Οριακές συνθήκες	105
7.5	<i>Μαθηματική προσομοίωση υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας στο αλλουβιακό υδροφόρο σύστημα του Αργολικού πεδίου</i>	106
7.5.1	Εννοιολογικό μοντέλο του υδροφόρου συστήματος της περιοχής μελέτης	106
7.5.2	Χρήση του λογισμικού ModelMuse στην περιοχή μελέτης	107
7.5.3	Αποτελέσματα MODFLOW	111
7.5.4	Εφαρμογή του MT3DMS.....	114
7.5.5	Αποτελέσματα SEAWAT	115
Κεφάλαιο 8 ^ο : Συμπεράσματα & Προοπτικές μεθόδου.....		120
Βιβλιογραφία		123

Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1: Παθητική (I) και Ενεργητική (II) θαλάσσια διείσδυση (Καλλιώρας Α. , 2015; Fetter, 1973).....	20
Εικόνα 2: Μοντέλο της θεωρίας Ghyben-Herzberg για τη διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιο ελεύθερο υδροφόρο (Καλλιώρας Α. , 2015; Todd & Mays, 2005).....	21
Εικόνα 3: Πρότυπο ροής γλυκού νερού σε ελεύθερο παράκτιο υδροφόρο (Καλλιώρας Α. , 2015; Todd & Mays, 2005).	22
Εικόνα 4: Σχήμα απεικόνισης της ανόδου της διεπιφάνειας λόγω άντλησης (Καλλιώρας Α. , 2015; Todd & Mays, 2005; Scmork & Mercado, 1969).....	22
Εικόνα 5: Ο κύκλος του Ν στο εδαφικό στρώμα (Καλλιώρας Α. , 2017).	24
Εικόνα 6: Γεωγραφική θέση της Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας (πρώην Ν. Αργολίδας).	29
Εικόνα 7: Η γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης.	30
Εικόνα 8: Χάρτης χρήσεων γης του Ν. Αργολίδας κατά Corine LandCover (CLC, 2018).	36
Εικόνα 9: Χρήσεις γης της περιοχής μελέτης κατά Corine LandCover (CLC, 2018).....	38
Εικόνα 10: Γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής του Αργολικού πεδίου.	40
Εικόνα 11: Οι γεωτεκτονικές ενότητες της Ελλάδας (Μουντράκης, 2010).....	41
Εικόνα 12: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής (σύνθεση από υφιστάμενους Γεωλογικούς Χάρτες έκδοσης ΙΓΜΕ, κλίμακα 1:50.000 (Γιαννουλόπουλος, 2000).....	48
Εικόνα 13: Χάρτης γεωγραφικής θέσης υδρομετεωρολογικού σταθμού «Άργος».....	50
Εικόνα 14: Χάρτης κλιματικής κατάταξης της Ελλάδας κατά Thornthwaite (Καρράς, 1973).	56
Εικόνα 15: Υπόμνημα του χάρτη κλιματικής κατάταξης της Ελλάδας κατά Thornthwaite (Καρράς, 1973)....	57
Εικόνα 16: Χάρτης υδρολιθολογικών σχηματισμών της υδρολογικής λεκάνης του Αργολικού πεδίου (Γιαννουλόπουλος, 2000).....	60
Εικόνα 17: Χάρτης κατανομής υδροφόρων Αργολικού πεδίου (Γιαννουλόπουλος, 2000).....	63
Εικόνα 18: Χάρτης ισοβαθών καμπυλών του αδιαπέρατου υποβάθρου (σχιστόλιθοι, τόφοι και φλύσχης) (Γιαννουλόπουλος, 2000).....	64
Εικόνα 19: Γεωλογικό σκαρίφημα πηγής Κεφαλαρίου (Δούνας & Ελευθερίου, 1978; Γιαννουλόπουλος, 2000).65	65
Εικόνα 20: Γεωλογικό σκαρίφημα πηγών Λέρνης και Κρόης (Δούνας & Ελευθερίου, 1978; Γιαννουλόπουλος, 2000).	65
Εικόνα 21: Γεωλογικό σκαρίφημα των πηγών Κιβερίου (Παπάκης, 1966; Γιαννουλόπουλος, 2000).....	66
Εικόνα 22: Χάρτης γεωγραφικής θέσεις δοκιμαστικών αντλήσεων, δεδομένα από (Γιαννουλόπουλος, 2000). 70	70
Εικόνα 23: Χάρτης κατανομής συντελεστή μεταβιβαστικότητας (Τ) με δεδομένα από (Γιαννουλόπουλος, 2000).	71
Εικόνα 24: Χάρτης κατανομής υδραυλικής αγωγιμότητας (Κ) με δεδομένα από (Γιαννουλόπουλος, 2000).	71
Εικόνα 25: Σχηματική απεικόνιση του υδατικού ισοζυγίου του αλλουβιακού υδροφόρου συστήματος στο Αργολικό πεδίο (Γιαννουλόπουλος, 2000).	72
Εικόνα 26: Πίνακας ποσοτήτων νερού σε m³ για τον τεχνητό εμπλουτισμό που εφαρμόστηκε την περίοδο 1990 – 1998 (Γιαννουλόπουλος, 2000).....	75
Εικόνα 27: Διαχρονικές χορηγηθείσες ποσότητες νερού (Γιαννούλας Ε. , 2021).....	77

Εικόνα 28: Χάρτης κατανομής αντλήσεων (m^3/d) σε κελιά (500×500) στο Αργολικό πεδίο (Χρυσανθόπουλος, 2018), δεδομένα από (Γιαννουλόπουλος, 2000).	78
Εικόνα 29: Χάρτες μέσης πιεζομετρίας του φθινοπώρου (αριστερά) και της άνοιξης (δεξιά) της περιόδου 1964 - 1975 (Γιαννουλόπουλος, 2000).	81
Εικόνα 30: Πιεζομετρικές καμπύλες – Φθινόπωρο 1990 (δεξιά) και Άνοιξη 1999 (αριστερά) (Γιαννουλόπουλος, 2000).	82
Εικόνα 31: Πιεζομετρικοί χάρτες Οκτωβρίου 2017 (δεξιά) και Μαΐου 2018 (αριστερά) (Μακαρατζή, 2020), δεδομένα από (Χρυσανθόπουλος, 2018).	83
Εικόνα 32: Χάρτης γεωγραφικής θέσης των σταθμημετρήσεων στο Αργολικό πεδίο (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).	85
Εικόνα 33: Πιεζομετρικός χάρτης Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).	86
Εικόνα 34: Απεικόνιση σε 2,5D της στάθμης του υδροφόρου και της γεώτρησης Arg49p στην περιοχή των Μυκητών (πάχος υδροφορέα περίπου στα 60m).	87
Εικόνα 35: Χάρτης γεωγραφικής θέσης των σημείων δειγματοληψίας στο Αργολικό πεδίο (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).	88
Εικόνα 36: Χάρτης κατανομής ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σε $\mu S/cm$, Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).	90
Εικόνα 37: Χάρτης κατανομής θερμοκρασίας αλλουβιακού υδροφορέα Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).	92
Εικόνα 38: Χάρτης κατανομής χλωριόντων του Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).	94
Εικόνα 39: Χάρτης κατανομής ιόντων Na^+ Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).	95
Εικόνα 40: Χάρτης κατανομής νιτρικών ιόντων Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).	96
Εικόνα 41: Χάρτης κατανομής νιτρικών ιόντων σύμφωνα με τα όρια ποιότητας των υδάτων από ΥΠΕΝ.	96
Εικόνα 42: Σχηματική απεικόνιση της βασικής αρχής του κώδικα SEAWAT με τα δύο πιεζόμετρα διαφορετικών πυκνοτήτων (Ζιώγας, 2013; Guo & Langevin, 2002).	103
Εικόνα 43: Δημιουργία καννάβου στο λογισμικό ModelMuse (cell size: 500×500 m).	108
Εικόνα 44: Απεικόνιση των δύο στρωμάτων σε περιβάλλον ModelMuse με κόκκινο χρώμα το αργολικό κάλυμμα και με μωβ το κύριο υδροφόρο στρώμα.	109
Εικόνα 45: Χάρτης οριακών συνθηκών του μοντέλου ροής.	110
Εικόνα 46: Απεικόνιση της κατανομής του ρυθμού άντλησης των γεωτρήσεων σύμφωνα με τις συνθήκες του 1 ^{ου} σεναρίου στο λογισμικό ModelMuse, με κόκκινο χρώμα εντοπίζονται οι τιμές με τον χαμηλότερο ρυθμό άντλησης.	112
Εικόνα 47: Απεικόνιση της κατανομής του ρυθμού άντλησης των γεωτρήσεων σύμφωνα με τις συνθήκες του 2 ^{ου} σεναρίου στο λογισμικό ModelMuse, με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού που προσθέτουν νερό στο σύστημα.	112
Εικόνα 48: Απεικόνιση της κατανομής του ρυθμού άντλησης των γεωτρήσεων σύμφωνα με τις συνθήκες του 3 ^{ου} σεναρίου στο λογισμικό ModelMuse, με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού που προσθέτουν νερό στο σύστημα.	113

Εικόνα 49: Πιεζομετρικός χάρτης προσομοιωμένων τιμών με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι καμπύλες του 1 ^{ου} σεναρίου, με μαύρο οι καμπύλες του 2 ^{ου} σεναρίου με πράσινο του 3 ^{ου}	114
Εικόνα 50: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m ³ κατά την πρώτη περίοδο φόρτισης του 1 ^{ου} σεναρίου.	115
Εικόνα 51: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m ³ κατά την δεύτερη περίοδο φόρτισης στο 1 ^{ου} σεναρίου.	116
Εικόνα 52: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m ³ κατά την πρώτη περίοδο φόρτισης του 2 ^{ου} σεναρίου.	116
Εικόνα 53: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m ³ κατά την δεύτερη περίοδο φόρτισης του 2 ^{ου} σεναρίου.	117
Εικόνα 54: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m ³ κατά την πρώτη περίοδο φόρτισης του 3 ^{ου} σεναρίου.	118
Εικόνα 55: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m ³ κατά την δεύτερη περίοδο φόρτισης του 3 ^{ου} σεναρίου.	118
Εικόνα 56: Χάρτης επιρροής αλατότητας στην περιοχή μελέτης.	119

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1: Διακύμανση πληθυσμών του Ν. Αργολίδας κατά τα έτη 1991, 2001, 2011 και 2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).	31
Σχήμα 2: Διακύμανση πληθυσμών των οικισμών της περιοχής μελέτης 1991 – 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).....	34
Σχήμα 3: Κατανομή πληθυσμού του Αργολικού Πεδίου το 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).....	34
Σχήμα 4: Κατανομή % χρήσεων γης του Ν. Αργολίδας.	35
Σχήμα 5: Κατανομή % των χρήσεων γης της περιοχής του Αργολικού πεδίου.	37
Σχήμα 6: Διακύμανση βροχομετρικών δεδομένων για την περίοδο 2012 – 2022.....	51
Σχήμα 7: Απεικόνιση μέσης, ελάχιστης και μέγιστης τιμής μηνιαίων βροχών σε mm για την περίοδο 2012 – 2022.....	52
Σχήμα 8: Η ετήσια διακύμανση βροχής σε mm για τις περιόδους ηρεμίας και άντλησης για την περίοδο 2012 – 2022.....	52
Σχήμα 9: Η ετήσια θερμοκρασιακή διακύμανση που έχει καταγραφεί από τον σταθμό «Άργος» για την περίοδο 2012 – 2022.	53
Σχήμα 10: Η διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας για την περίοδο 2012 – 2022.....	54
Σχήμα 11: Διακύμανση της μηνιαίας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για την περίοδο 2012 – 2022.	55
Σχήμα 12: Διακύμανση ετήσιου όγκου βροχής σε m ³ για την περίοδο 2012 – 2022.	58
Σχήμα 13: Συσχέτιση τιμών pH – SEC των δειγμάτων της περιοχής μελέτης.	91

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Πληθυσμοί δήμων της Περιφερειακής ενότητας Αργολίδας για το έτος 2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021)...	30
Πίνακας 2: Πληθυσμιακή εξέλιξη κατά Δημοτική Ενότητα της Επαρχιακής Ενότητας Αργολίδας (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).	31
Πίνακας 3: Πληθυσμός οικισμών της περιοχής μελέτης (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).....	32
Πίνακας 4: Πληθυσμιακές μεταβολές των οικισμών της περιοχής μελέτης (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).	33
Πίνακας 5: Κατηγοριοποιημένες χρήσεις γης του Ν. Αργολίδας και οι εκτάσεις αυτών σε km ² και σε % ποσοστό (CLC, 2018)	35
Πίνακας 6: Οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης και οι εκτάσεις αυτών σε km ² και σε % ποσοστό (CLC,2018).....	37
Πίνακας 7: Βροχομετρικά δεδομένα για την περίοδο 2012 - 2022.	50
Πίνακας 8: Στατιστικά στοιχεία των υψών βροχής σε mm για την περίοδο 2012 – 2022.....	51
Πίνακας 9: Θερμοκρασιακά δεδομένα σε °C για την περίοδο 2012 – 2022.....	53
Πίνακας 10: Πίνακας υδραυλικών παραμέτρων Αργολικού πεδίου (Γιαννουλόπουλος, 2000).....	69
Πίνακας 11: Σημεία μέτρησης στάθμης την περίοδο Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου 2022.....	84
Πίνακας 12: Επί τόπου μετρήσεις δειγμάτων του αλλουβιακού υδροφόρου συστήματος στο Αργολικό πεδίο (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).....	89
Πίνακας 13: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων των δειγμάτων της περιοχής μελέτης.	93

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

Το νερό από την αρχή της ανθρώπινης ύπαρξης μέχρι και σήμερα αποτελεί ύψιστο ανθρώπινο και περιβαλλοντικό αγαθό. Ωστόσο, με την πάροδο των χρόνων και την τεχνολογική εξέλιξη το νερό έχει αποκτήσει και οικονομική αξία ως φυσικός πόρος. Ένα από τα διεθνή προβλήματα που διατυπώθηκαν στο COP 26, διοργανωμένο από το United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), αποτελεί η διαχείριση των υδατικών πόρων. Η σωστή διαχείριση των υδατικών πόρων κρίνεται απολύτως αναγκαία, ώστε όλοι οι άνθρωποι να έχουν πρόσβαση σε καλής ποιότητας και αρκετής ποσότητας πόσιμου νερού. Όμως, η ζήτηση του νερού για διάφορες χρήσεις όπως (βιομηχανική, αστική, γεωργία, κτηνοτροφία, κλ.π.) είναι αρκετά αυξημένη, ενώ τα αποθέματα των υδατικών πόρων δεν αναπληρώνονται με τόσο γρήγορο ρυθμό και είναι και αρκετές οι φορές που τα αποθέματα κοντεύουν να εξαντληθούν. Η εξάντληση των υδατικών αποθεμάτων δεν επηρεάζει μόνο την ανθρώπινη διαβίωση αλλά και το περιβάλλον. Μία από τις σημαντικές συνέπειες υπεράντλησης των υδροφορέων είναι η θαλάσσια διείσδυση, που μπορεί να συμβαίνει ταυτόχρονα και με την νιτρορύπανση αγροτικών περιοχών σε παράκτιους υδροφορείς (Καλλιώρας Α. , 2015; Torres - Martinez, Abrahan, Mahlknecht, Kaown, & Barceló, 2021).

Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτια υδροσυστήματα οφείλεται στην διατάραξη της ισορροπίας του μετώπου γλυκού – αλμυρού νερού λόγω της υπεράντλησης των παράκτιων υδροφορέων. Η νιτρορύπανση συνήθως συνδυάζεται με το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης όταν υπάρχουν παράκτιες αγροτικές περιοχές και βασίζεται στην υπερβολική χρήση νιτρικών λιπασμάτων στις αγροτικές καλλιέργειες, με αποτέλεσμα τα νιτρικά να διαλύονται στο νερό και να καταλήγουν στον υπόγειο υδροφόρο (Καλλιώρας Α. , 2015).

Η παρατήρηση των δύο αυτών φαινομένων γίνεται χωροχρονικά με συσχέτιση της χωροχρονικής μεταβολής της στάθμης στην πρώτη περίπτωση και την παρακολούθηση της ποιότητας των υπογείων υδάτων και για τις δύο περιπτώσεις ανιχνεύοντας χημικά στοιχεία – δείκτες για την ποιοτική τους αξιολόγηση. Η μελέτη της μεταβολής των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών των υπογείων νερών είναι εφικτό να γίνει με πραγματικά δεδομένα από γεωτρήσεις παρακολούθησης ή/και με μοντελοποίηση των υπαρχουσών συνθηκών σε μελλοντικές μεταβολές. Τέτοιου είδους μοντέλα αποτελούν πολύ σημαντικά εργαλεία για την πρόβλεψη και πρόληψη της περιβαλλοντικής υποβάθμισης των υπογείων νερών, που οδηγούν σε περιβαλλοντικά και οικονομικά κυρίως ζητήματα.

1.1 Υδρογεωλογικά Μοντέλα

Η επιστήμη της Υδρολογίας είναι ένα σύνθετο αντικείμενο μελέτης που αποσκοπεί στην κατανόηση υδρολογικών διεργασιών που έχουν σημασία για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, αναφέροντας την λέξη «σύνθετο» εννοούμε ότι η επιστήμη της Υδρολογίας περιλαμβάνει πολλές φυσικές

διεργασίες, όπως ο κύκλος του νερού, καθώς και ανθρωπογενείς διεργασίες, οι οποίες επηρεάζουν την ισορροπία των επίγειων και υπογείων νερών (π.χ. φράγματα, τεχνητές λίμνες, εμπλουτισμός νερών, κ.λπ.). Η κατανόηση της υδρολογίας σε κάθε περιοχή μελέτης βοηθά στην επίλυση ζητημάτων ύδρευσης και άρδευσης, στον έλεγχο φυσικών καταστροφών (πλημμυρικά φαινόμενα), στην παρακολούθηση και στον περιορισμό της ρύπανσης – μόλυνσης (νιτρορύπανση, θαλάσσια διείσδυση), στην διαχείριση των υγρών αποβλήτων και στην προστασία της χλωρίδας και της πανίδας (Oude Essink, 2000; Καλλιώρας Α. , 2015). Ένα από τα πιο απλουστευμένα εννοιολογικά υδρολογικά μοντέλα αποτελεί ο κύκλος του νερού. Ωστόσο, η υδρολογία των υπογείων νερών είναι ένα περίπλοκο εννοιολογικό και υδρολογικό μοντέλο και για να γίνει κατανοητό χρειάζεται η κατασκευή των υδρογεωλογικών μοντέλων. Τα υδρογεωλογικά μοντέλα είναι πρακτικά και χρήσιμα εργαλεία μελέτης διότι (Oude Essink, 2000): (α) αποσκοπούν στην πρόβλεψη & προσομοίωση συγκεκριμένων μετρήσεων και δραστηριοτήτων, (β) βοηθούν στην κατάστρωση σεναρίων βασισμένων σε επιλεγμένους παράγοντες ενδιαφέροντος και (γ) στοχεύουν στην βελτιστοποίηση του υδατικού προβλήματος του μοντέλου. Με βάση τα παραπάνω πλεονεκτήματα τα υδρογεωλογικά μοντέλα έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα για την μελέτη των εξής προβλημάτων (Καλλιώρας Α. , 2015):

- Αναγνώριση περιοχών τεχνητού εμπλουτισμού με προσομοίωση υδροφορέων
- Παρακολούθηση της υφιστάμενης πίεσης που δέχονται οι υδροφορείς καθώς και την προσομοίωση αυτών σε μελλοντικές αλλαγές
- Υποχωρήσεις εδάφους (λόγω υπεράντλησης υδροφορέων)
- Προσομοίωση υδρογεωλογικών διεργασιών των υπογείων νερών
- Θαλάσσια διείσδυση
- Προσομοίωση ρύπων – μεταφοράς μάζας στα υπόγεια νερά

Η μοντελοποίηση των υδρογεωλογικών μοντέλων ανάλογα με το υπό εξέταση πρόβλημα ορίζεται ως ποσοτική ή ποιοτική ομοίωση. Η ποσοτική ομοίωση αναφέρεται στα μοντέλα που αφορούν την χρήση μαθηματικών εξισώσεων για την ανάλυση και ερμηνεία της ροής του υπογείου νερού, όπως τα υδραυλικά μοντέλα. Αντιθέτως η ποιοτική ομοίωση αφορά τα μοντέλα μεταφοράς ρυπαντών, χρησιμοποιώντας την εξίσωση μεταγωγής – διασποράς και τα μοντέλα μεταφοράς θερμότητας, με την εξίσωση συναγωγής – διάχυσης (Καλλιώρας Α. , 2015).

1.2 Μηχανισμός θαλάσσιας διείσδυσης

Ως θαλάσσια διείσδυση σε παράκτιους υδροφορείς ορίζεται η με οποιονδήποτε τρόπο αλμύριση και αύξηση των αλάτων του υπογείου νερού στο παράκτιο υδροφόρο σύστημα, η οποία προκαλείται από ανθρωπογενείς ή/ και φυσικές διεργασίες. Οι κύριες αιτίες εκδήλωσης της θαλάσσιας διείσδυσης είναι (Καλλέργης, 2000; Καλλιώρας Α. , 2015):

- Η υπεράντληση του παράκτιου υδροφορέα, με αποτέλεσμα την διατάραξη της ισορροπίας του

μετώπου γλυκού – αλμυρού νερού και την μετατόπιση του προς το παράκτιο υδροφόρο σύστημα.

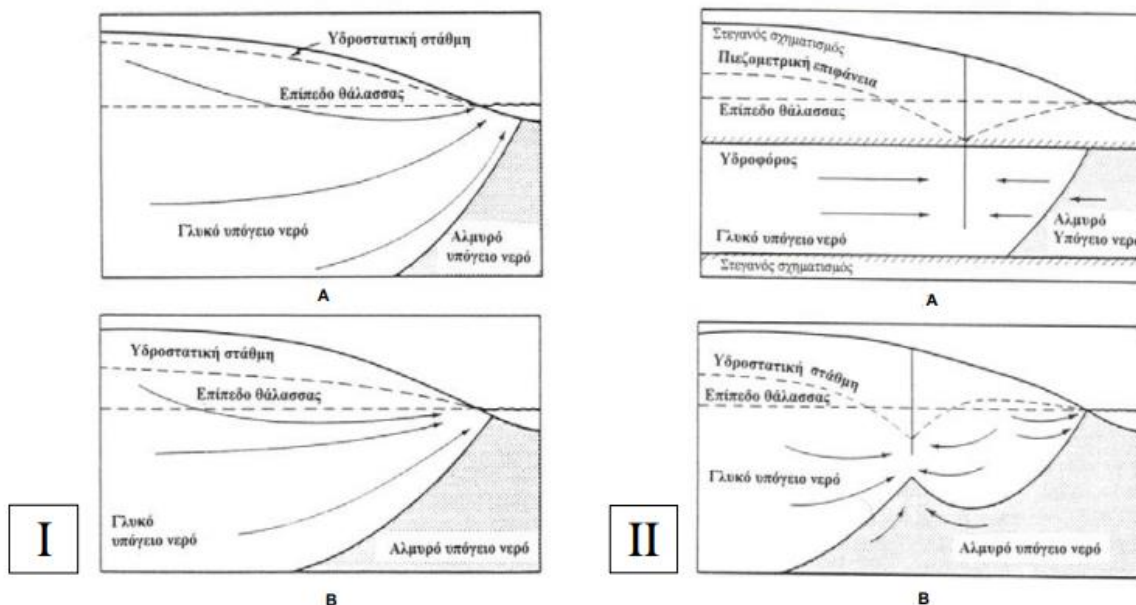
- Η έντονη εξατμισοδιαπνόμενη που λαμβάνει χώρα στα παράκτια πεδία σε εντελώς αβαθείς φρεάτιους υδροφόρους.
- Το υπολειμματικό νερό που προέρχεται είτε από την κατάκλυση από θάλασσα της περιοχής, σε παλαιότερες εποχές, λόγω ευστατικών συνθηκών ή από διάλυση ορυκτών ή προϋπαρχόντων αλάτων.
- Οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής (λεπτόκοκκος υδροφόρος). Η παρουσία των αλάτων στους συγκεκριμένους υδροφόρους είναι αυξημένη λόγω της μικρής υδροπερατότητας και του αυξημένου ενεργού πορώδους.
- Η παρουσία γύψου ή ανυδρίτη ή ορυκτού αλατιού στον υδροφόρο.
- Η παρουσία συγγεντικού νερού σε μικρό βάθος.

Είναι σημαντικό να αναγνωριστεί η αιτία της αλμύρισης των υπογείων νερών, για να αξιολογηθεί αν η ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου υδροφορέα είναι εφικτό να βελτιωθεί. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των θαμμένων αλμυρών, η ποιότητα του νερού, είτε παραμένει σταθερή, είτε βελτιώνεται με τα χρόνια, ενώ στην περίπτωση της θάλασσας κατά την περίοδο άντλησης τα άλατα αυξάνουν υπερβολικά και μπορεί να παραμένουν αυξημένα και στην συνέχεια (Καλλιώρας Α. , 2015). Γι' αυτό η θαλάσσια ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων αποτελεί την ουσιαστικότερη και την μονιμότερη πηγή ρύπανσης (Torres - Martinez, Abrahan, Mahlknecht, Kaown, & Barceló, 2021; Sbai, Larabi, Fahs, & Doummar, 2021; Καλλιώρας Α. , 2015).

Ανάλογα με την δυναμική ισορροπία που επικρατεί ανάμεσα στο γλυκό και το αλμυρό νερό, η θαλάσσια διείσδυση χαρακτηρίζεται ως *παθητική* ή *ενεργητική* (Καλλιώρας Α. , 2015; Custodio & Bruggeman, 1987; Fetter, 1973):

- Η παθητική θαλάσσια διείσδυση αφορά την υδραυλική ισορροπία μεταξύ των δύο ρευστών, χωρίς να προκαλείται αναστροφή της υδραυλικής κλίσης του υδροφόρου, η οποία διατηρείται προς το σημείο επαφής των δυο διαφορετικών ρευστών (γλυκό – αλμυρό νερό). Συνήθως, η παθητική θαλάσσια διείσδυση λαμβάνει χώρα σε παράκτιους υδροφόρους, οι οποίοι εκμεταλλεύονται με αρκετά αργό ρυθμό. Επομένως, η διεπιφάνεια των δύο ρευστών μετατοπίζεται και αυτή με αργό ρυθμό προς τον υδροφόρο μέχρι να βρεθεί το σημείο όπου θα υπάρξει νέα υδραυλική ισορροπία. Όμως, μικρές αλλαγές παρατηρούνται με τις εποχιακές ή ετήσιες διακυμάνσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, όπως επίσης αλλαγές μπορεί να προκύψουν μετά από μακροχρόνιες αλλαγές στο κλίμα ή στο μέσο υψόμετρο του επιπέδου της θάλασσας.
- Η ενεργητική θαλάσσια διείσδυση είναι πιο επικίνδυνη από την παθητική, διότι προκαλεί αναστροφή της υδραυλικής κλίσης. Αυτό συμβαίνει όταν το γλυκό νερό δεν προλαβαίνει να αναπληρωθεί στον υπόγειο υδροφόρο, με αποτέλεσμα το μέτωπο της θάλασσας να προχωράει προς

την ενδοχώρα αναζητώντας νέα υδραυλική ισορροπία.



Εικόνα 1: Παθητική (I) και Ενεργητική (II) θαλάσσια διείσδυση (Καλλιώρας Α. , 2015; Fetter, 1973).

1.2.1 Μαθηματικά μοντέλα θαλάσσιας διείσδυσης

Για την κατανόηση και παρακολούθηση της θαλάσσιας διείσδυσης έχουν προταθεί διάφορα μαθηματικά μοντέλα που βασίζονται στην οριοθέτηση της κατάλληλης υπόγειας υδραυλικής ισορροπίας μεταξύ των δύο διαφορετικών ρευστών (Καλλιώρας Α. , 2015):

1. Σχέση Ghyben – Herzberg μεταξύ γλυκού – αλμυρού νερού

Η έρευνα των συγκεκριμένων επιστημόνων αφορούσε τη διεπιφάνεια που σχηματίζεται ανάμεσα στα δύο υγρά (αλμυρό και γλυκό νερό) διαφορετικής πυκνότητας, και αποσκοπούσε στον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ του σχήματος και της θέσης της διεπιφάνειας, καθώς και στις υδραυλικές συνιστώσες της ισορροπίας του υπόγειου νερού σε μια παράκτια περιοχή. Επομένως, προκύπτει η εξής σχέση:

Υδροστατική πίεση θαλασσινού νερού = Υδροστατική πίεση γλυκού νερού

$$\rho_s z g = \rho_f (z + h) g \leftrightarrow z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f$$

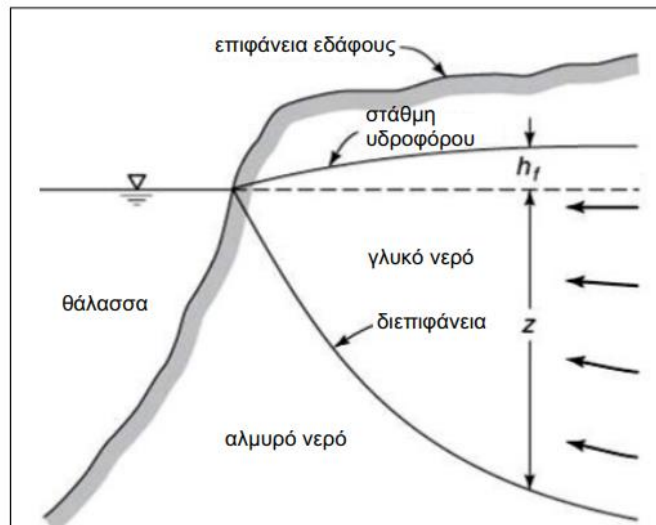
Όπου,

z είναι το βάθος (m) της διεπιφάνειας κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας

h_f είναι η ανύψωση (m) της στάθμης του υδροφόρου πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας

ρ_f (g/cm³) είναι η πυκνότητα του γλυκού υπόγειου νερού

ρ_s (g/cm³) είναι η πυκνότητα του αλμυρού (θαλάσσιου) νερού.



Εικόνα 2: Μοντέλο της θεωρίας Ghyben-Herzberg για τη διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιο ελεύθερο υδροφόρο (Καλλιώρας Α. , 2015; Todd & Mays, 2005).

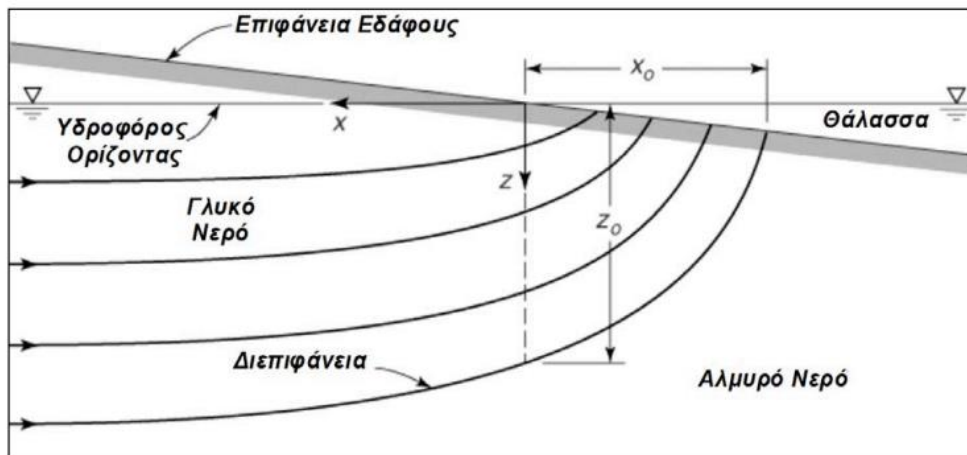
Επεκτείνοντας τη σχέση Ghyben-Herzberg, θεωρούμε την ύπαρξη μιας δυναμικής ισορροπίας ανάμεσα στα δύο υγρά, δηλαδή, σταθερές συνθήκες ροής, αλλά με οριζόντια ροή στην περιοχή του γλυκού νερού, και κάθετες προς αυτήν τις ισοδυναμικές γραμμές.

2. Σχήμα της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού

Οι Todd and Mays (2005) αναφέρουν ότι ο Glover κατέληξε στην παρακάτω εξίσωση σχετικά με το σχήμα της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού:

$$z^2 = \frac{2\rho q x}{\Delta\rho K} + \left(\frac{\rho q}{\Delta\rho K}\right)^2$$

Όπου $\Delta\rho$ η διαφορά πυκνότητας των δύο ρευστών, K η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου και q η ροή γλυκού νερού ανά μονάδα μήκους ακτογραμμής. Η παραπάνω σχέση ερμηνεύεται με βάση το παρακάτω σχήμα.

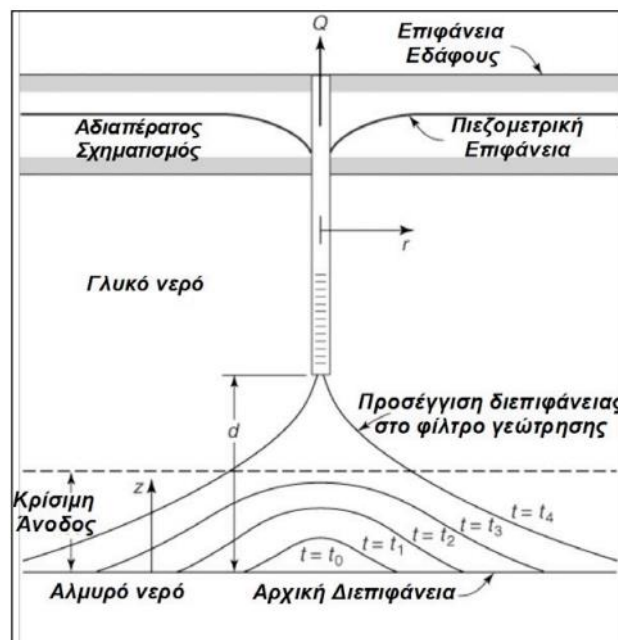


Εικόνα 3: Πρότυπο ροής γλυκού νερού σε ελεύθερο παράκτιο υδροφόρο (Καλλιώρας Α. , 2015; Todd & Mays, 2005).

3. Ανόδος διεπιφάνειας αλμυρού – γλυκού νερού

Μια προσεγγιστική αναλυτική επίλυση της ανόδου της διεπιφάνειας κάτω από τη γεώτρηση, βασισμένη στην υπόθεση Dupuit και στην σχέση Ghyben – Herzberg, διατυπώθηκε από τους (Scmork & Mercado, 1969):

$$z = \frac{Q}{2\pi dK \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_f}\right)}$$



Εικόνα 4: Σχήμα απεικόνισης της ανόδου της διεπιφάνειας λόγω άντλησης (Καλλιώρας Α. , 2015; Todd & Mays, 2005; Scmork & Mercado, 1969).

Έχει εκτιμηθεί εμπειρικά ότι το ύψος της κρίσιμης ανόδου της διεπιφάνειας, z , σχετίζεται με το ύψος του φίλτρου της γεώτρησης, d , σύμφωνα με τη σχέση $0,3 \leq z / d \leq 0,5$. Έτσι θεωρώντας ένα ανώτατο όριο της τάξης του $z / d = 0,5$, προκύπτει ότι ο μέγιστος επιτρεπόμενος ρυθμός άντλησης χωρίς την απόληψη

αλμυρού νερού έχει ως εξής (Καλλιώρας Α. , Ειδικά θέματα Αξιοποίησης και Διαχείρισης Υπογείων Νερών: Παράκτια Υδροφόρα Συστήματα, 2015; Todd & Mays, 2005):

$$Q_{max} \leq \pi d^2 K \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_f} \right)$$

1.3 Μηχανισμός νιτρορύπανσης

Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (Υ.Π.ΕΝ.) ως νιτρορύπανση ορίζεται η άμεση ή έμμεση απόρριψη στο υδάτινο περιβάλλον αζωτούχων ενώσεων, η οποία προκαλεί σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία και στα υδάτινα οικοσυστήματα. Οι κύριες πηγές νιτρορύπανσης προέρχονται κυρίως από ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως: αγροτικές, γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Επομένως, υψηλές τιμές νιτρικών ενώσεων παρατηρούνται σε περιοχές με αυξανόμενη γεωργική δραστηριότητα, όπου γίνεται εντατική χρήση αζωτούχων λιπασμάτων, καθώς και σε περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση ζωικών αποβλήτων. Άλλες πηγές αποτελούν η διάθεση αστικών και βιομηχανικών λυμάτων (Υ.Π.ΕΝ., 2021).

1.3.1 Ο κύκλος του Ν στο εδαφικό στρώμα

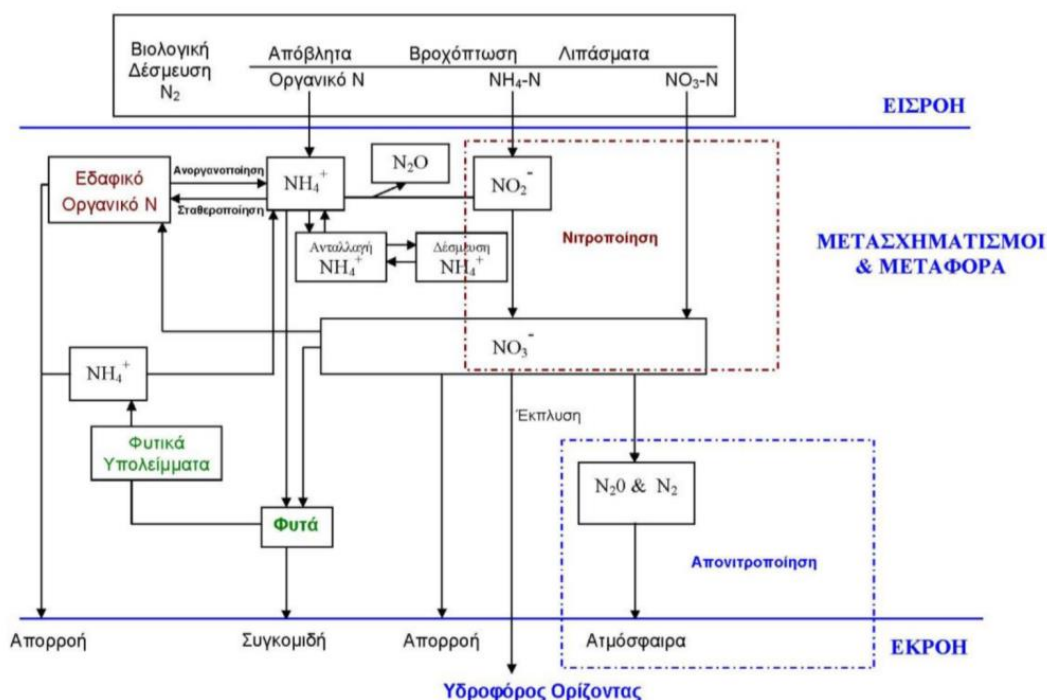
Η εισαγωγή του αζώτου στην τροφική αλυσίδα γίνεται μέσω της διαδικασίας της αζωτοδέσμευσης, κατά την οποία το αέριο αδρανές άζωτο μετατρέπεται σε μορφές αξιοποιήσιμες από τα φυτά και τα ζώα. Η αζωτοδέσμευση διακρίνεται σε α) ατμοσφαιρική, β) βιολογική, γ) βιομηχανική. Στο εδαφικό στρώμα πραγματοποιείται κατά 90% η βιολογική αζωτοδέσμευση (Καλλιώρας Α. , 2017).

Το N₂ αποτελεί περίπου το 80% του ατμοσφαιρικού αέρα και προσλαμβάνεται από τα φυτά αφού πρώτα αναχθεί σε αμμωνιακό άζωτο μέσω της δράσης συγκεκριμένων μικροοργανισμών (βακτηρίων και κυανοφυκών) που ζουν συμβιωτικά με τα φυτά στους ιστούς των ριζών τους σε ειδικά εξογκώματα που λέγονται φυμάτια. Τα φυτά δεν μπορούν να δεσμεύσουν απευθείας το άζωτο της ατμόσφαιρας και δεν υπάρχουν πετρώματα στα εδάφη που να περιέχουν άζωτο σε ανόργανη μορφή, οπότε η διεργασία αυτή είναι απαραίτητη για την επιβίωσή τους. Οι μικροοργανισμοί για να παράξουν την απαραίτητη ενέργεια για την αναγωγή του αερίου αζώτου σε αμμωνιακό άζωτο χρησιμοποιούν τη γλυκόζη που λαμβάνουν από τα φυτά που είναι προϊόν της φωτοσύνθεσης. Ο κύκλος του αζώτου σε εδαφικό στρώμα λαμβάνει χώρα ως εξής (Καλλιώρας Α. , 2017):

Στην ακόρεστη ζώνη όσον αφορά τον κύκλο του αζώτου συντελούνται οι διεργασίες της αμμωνιοποίησης και της νιτροποίησης (**Εικόνα 5**). Με την πρώτη γίνεται μετατροπή του οργανικού αζώτου σε αμμωνιακό άζωτο μέσω της διεργασίας της αμμωνιοποίησης στην οποία συμμετέχουν βακτήρια και μύκητες. Με τη δεύτερη το αμμωνιακό άζωτο οξειδώνεται σε νιτρικό με τη δράση αερόβιων μικροοργανισμών που λέγονται νιτροβακτήρια. Στη νιτροποίηση συντελούνται δύο διακριτές διεργασίες που είναι η οξείδωση της αμμωνίας σε νιτρώδη μέσω της δράσης των Nitrosomonas και η οξείδωση των νιτρώδων σε νιτρικά

μέσω της δράσης των Nitrobacter.

Στην κορεσμένη ζώνη λαμβάνουν χώρα τέσσερις τρόποι διανομής των νιτρικών ιόντων στο σύστημα (Εικόνα 5). Η πρώτη διαδρομή είναι η απευθείας έκπλυση των νιτρικών ιόντων στην επιφανειακή απορροή και διάλυση τους στον υπόγειο υδροφόρο. Η δεύτερη αφορά την δέσμευση των νιτρικών από τα φυτά. Η τρίτη διαδρομή αναφέρεται στην μετατροπή των νιτρικών ιόντων σε εδαφικό οργανικό άζωτο μέσω της απονιτροποίησης επιστρέφοντας στο αρχικό κύκλο του συστήματος. Τέλος, η τελευταία διαδρομή αποτελεί η μετατροπή των νιτρικών σε υποξείδιο του αζώτου και μοριακό άζωτο κατά την διαδικασία της απονιτροποίησης με τελικό αποδέκτη αυτών την ατμόσφαιρα.



Εικόνα 5: Ο κύκλος του Ν στο εδαφικό στρώμα (Καλλιώρας Α. , 2017).

Η νιτρορύπανση στους επιφανειακούς αποδεκτές μπορεί να προκαλέσει ευτροφισμό, οδηγώντας στην αποξυγάνωση του περιβάλλοντος του αποδέκτη και εν τέλει στην υποβάθμιση της βιοποικιλότητας. Στους υπόγειους αποδεκτές, η νιτρορύπανση εμφανίζεται κυρίως με τη μορφή αθροιστικής συσσώρευσης νιτρικών, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις φθάνουν σε επίπεδα που είναι απαγορευτικά για τη χρήση του νερού για σκοπούς ύδρευσης. Ως οριακή τιμή έχει καθορισθεί από την Ελληνική και Διεθνή νομοθεσία η συγκέντρωση των 50 mg/l, ωστόσο ακόμα και σε μικρότερες συγκεντρώσεις (μεγαλύτερες από 25 mg/l) δημιουργείται προβληματισμός για μακροχρόνια χρήση του νερού για πόση (Υ.Π.Ε.Ν., 2021).

1.4 Διεθνής εμπειρία στην περιβαλλοντική διαχείριση παράκτιων υδροφορέων

Τα παράκτια υδροσυστήματα τα τελευταία 20 χρόνια έχουν μελετηθεί εκτενώς για την διαχείριση των υπογείων υδατικών πόρων (Zghibi, Tarhouni, & Zouhri, 2013; Mtoni, et al., 2013; Wu, Lu, Zhang, & Lin,

2019; Torres - Martinez, Abrahan, Mahlknecht, Kaown, & Barceló, 2021; Boumaiza, et al., 2022). Οι παραπάνω βιβλιογραφίες εστιάζουν στην παρακολούθηση των εκάστοτε υδροσυστημάτων, αναλύοντας τις ρυπογόνες πηγές με βάση τους μηχανισμούς θαλάσσιας διείσδυσης και νιτρορύπανσης.

1.4.1 Τυνησία

Ο παράκτιος υδροφόρος της περιοχής μελέτης βρίσκεται στην βορειανατολική Τυνησία και συγκεκριμένα εκτείνεται από την περιοχή Nabeul στα νότια έως την περιοχή Kelibia στα βόρεια. Ο υδροφόρος Korba είναι ένας αλλουβιακού τύπου υδροφόρος που αποτελείται από Τεταρτογενείς αποθέσεις Πλειοκαίνου και Άνω – Μειοκαίνου, που καλύπτουν με στρωματογραφική ασυνέχεια ιζήματα Μέσου – Μειοκαίνου (ψαμμίτες και μάργες), που αποτελούν το υπόβαθρο του υδροφόρου. Ο υδροφόρος αυτός χρησιμοποιείται για να καλυφθούν και γεωργικές και υδρευτικές ανάγκες.

Ο υδροφόρος απορρέει φυσικά προς την Μεσόγειο Θάλασσα. Ωστόσο, σύμφωνα με τους (Zghibi, Tarhouni, & Zouhri, 2013), παρατηρούνται πτώσεις στάθμης κυρίως στο κεντρικό κομμάτι της αλλουβιακής πεδιάδας και συγκεκριμένα στο 62% του υδροφόρου συστήματος, στοιχείο που υποδηλώνει θαλάσσια διείσδυση. Οι πτώσεις στάθμης οφείλονται κυρίως στο γεγονός ότι οι αγρότες υπερεκμεταλλεύονται τα αποθέματα του υδροφόρου και επειδή ανάντη της πεδιάδας υπάρχουν 2 φράγματα που δεν επιτρέπουν τον φυσικό επιφανειακό εμπλουτισμό. Επίσης, η περιοχή αυτή είναι έντονα επιβαρυνόμενη και από συγκεντρώσεις νιτρικών που προέρχονται όχι μόνο από αγροτικές δραστηριότητες αλλά και από βόθρους.

Η ζώνη του γλυκού νερού περιορίζεται στις νότιες και βόρειες παρυφές της πεδιάδας με αποτέλεσμα το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης να έχει προχωρήσει εκατοντάδες μέτρα προς την ενδοχώρα. Επομένως, φαίνεται αναγκαία η χρήση των υδρογεωλογικών μοντέλων για την πρόβλεψη του υδροδυναμικού καθεστώτος στον υδροφόρο και για την βέλτιστη διαχείριση των υδατικών πόρων.

1.4.2 Τανζανία

Ο Τεταρτογενής παράκτιος υδροφόρος Dar es Salaam αποτελεί την σημαντικότερη πηγή νερού για ύδρευση, άρδευση και βιομηχανική χρήση στην πόλη Dar es Salaam. Η πόλη αυτή βρίσκεται στην Τανζανία και συγκεκριμένα ανατολικά της Αφρικής, συνορεύοντας με τον Ινδικό Ωκεανό. Η περιοχή αποτελείται από Τεταρτογενή και Νεογενή ιζήματα. Οι υδροφόροι που αναπτύσσεται πάνω στα Τεταρτογενή και έχουν χαρακτηριστικά αλλουβιακού τύπου είναι οι πιο σημαντικοί στην περιοχή για τις προαναφερθείσες χρήσεις. Σύμφωνα με τους (Mtoni, et al., 2013) εντοπίζονται τρία υδροφόρα συστήματα που δείχνουν έως και 50 m θαλάσσια διείσδυση σε μερικώς υπό – πίεση υδροφόρο και τα νούμερα αυτά ποικίλουν λόγω της λιθολογικής ετερογένειας.

Σύμφωνα με την επεξεργασία των χημικών αναλύσεων χρησιμοποιώντας το λογισμικό PHREEQC, ανέλυσαν ποια από τα ιόντα Na, Ca, Cl, Mg, SO₄, HCO₃ και NO₃ μπορούν να διαλυθούν ή να αιωρούνται στο νερό επί παρουσία άλλων. Σύμφωνα με αυτές τις αναλύσεις ποιοτικά ο υδροφόρος επιβαρύνεται

περισσότερα από NO_3 παρά από τη θαλάσσια διείσδυση καθώς περιορίζεται στην παράκτια ζώνη και δεν έχει προχωρήσει προς την ενδοχώρα.

1.4.3 Κίνα

Ο παράκτιος υδροφόρος βρίσκεται στην παράκτια ζώνη της παραλίας Laizhou της Κίνας και αποτελεί ένα τυπικό αλλουβιακό παράκτιο σύστημα, το οποίο εδράζεται σε Τεταρτογενή ιζήματα. Σύμφωνα με τους (Wu, Lu, Zhang, & Lin, 2019) το σύστημα αυτό είναι πολύ επιβαρυνμένο ποιοτικά, καθώς το 87,6 % της περιοχής αποτελείται από μη πόσιμα υπόγεια νερά. Πιο συγκεκριμένα, ο μέση τιμή της συγκέντρωσης των νιτρικών είναι τα 173,70 mg/l πολύ πιο πάνω από το όριο που έχει θεσμοθετηθεί από τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας. Οι κύριες πηγές των νιτρικών ιόντων αποτελούν ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως: αγροτικές δραστηριότητες, κτηνοτροφικές δραστηριότητες και λύματα.

Οι ερευνητές έδειξαν ενδιαφέρον για το αν η θαλάσσια διείσδυση αποτελεί δυναμικός παράγοντας για την αύξηση των νιτρικών ιόντων στο συγκεκριμένο σύστημα, αλλά αποδείχθηκε ότι και άλλοι παράγοντες οφείλονται στην αύξηση της συγκέντρωσης των νιτρικών ιόντων.

1.4.4 Μεξικό

Το παράκτιο υδροφόρο σύστημα του La Paz στην βορειανατολική περιοχή του Μεξικό χαρακτηρίζεται μορφολογικά ως μια πεδιάδα με πλατώ και ορεινούς όγκους που φτάνουν τα 1266 m. Η περιοχή γεωλογικά αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα στο υπόβαθρο, ηφαιστειογενή πετρώματα που επωθούνται πάνω από τα μεταμορφωμένα στο ανατολικό μέρος της περιοχής μελέτης και στο ανατολικό μέρος εντοπίζονται οι νεογενείς σχηματισμοί (κυρίως ψαμμίτες και κροκαλοπαγή) και διαβρωμένα ηφαιστειακά πετρώματα. Κεντρικά της πεδιάδας επικρατούν σχηματισμοί του Ολοκαίνου κυρίως μη συνεκτικοί αλλουβιακοί σχηματισμοί. Ο ελεύθερος υδροφόρος ορίζοντας εδράζεται μεταξύ των σχηματισμών του ολοκαίνου και των ηφαιστειακών σχηματισμών.

Σύμφωνα με τους ερευνητές (Torres - Martinez, Abrahan, Mahlkecht, Kaown, & Barceló, 2021) το υδροφόρο σύστημα είναι επιβαρυνμένο και ποσοτικά και ποιοτικά αφού η περιοχή αυτή διατίθεται κυρίως για γεωργικές δραστηριότητες. Για την ανάλυση των ρυπογόνων πηγών έγιναν αναλύσεις ισοτόπων H_2O , NO_3 και SO_4 . Βάσει των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης έρευνας αποδείχθηκε ότι στο συγκεκριμένο σύστημα το 81,5% της συγκέντρωσης των νιτρικών οφείλεται από τις γεωργικές δραστηριότητες, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό ανήκει στα λύματα. Επίσης, η αυξημένες συγκεντρώσεις θειϊκών ιόντων οφείλονται κυρίως στην θαλάσσια διείσδυση και στο ρυπασμένο έδαφος.

1.4.5 Αλγερία

Το παράκτιο υδροφόρο σύστημα είναι μια αγροτική πεδιάδα στο El – Tahir της επαρχίας Jijel στην νοτιοανατολική Αλγερία. Η πεδιάδα αυτή αποτελείται από Τεταρτογενή ιζήματα και την περιβάλλουν ορεινοί όγκοι από μεταμορφωμένα πετρώματα. Το υδατικό σύστημα της περιοχής αυτής, σύμφωνα με τους ερευνητές (Boumaiza, et al., 2022) ,είναι ιδιαίτερα επιβαρυνμένο και ως προς την συγκέντρωση των

νιτρικών και ως την ποιότητα του νερού λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης.

Για την ανάλυση των πηγών ρύπανσης εξετάστηκαν τα ισότοπα $\delta^2\text{H}_{\text{H}_2\text{O}}$ και $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ για την θαλάσσια διείσδυση και $\delta^{15}\text{N}_{\text{NO}_3}$ και $\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3}$ για την νιτρορύπανση. Τα υδροχημικά στοιχεία έδειξαν ότι μελλοντικά η θαλάσσια διείσδυση δύναται να επηρεάσει και την επιφανειακή υδρολογία. Επίσης, η νιτρορύπανση προέρχεται κυρίως από κτηνοτροφικά απόβλητα, καθιστώντας το νερό απαγορευτικά πόσιμο.

1.5 Κατάσταση υπογείων νερών στην ευρύτερη περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης αποτελεί το παράκτιο αλλουβιακού τύπου υδροφόρο σύστημα του Αργολικού πεδίου. Από γεωμορφολογικής άποψης το Αργολικό πεδίο αποτελεί ένα τεκτονικό βύθισμα, δημιουργώντας μια εύφορη αλλουβιακή πεδιάδα με ποικίλα υδροσυστήματα. Η περιοχή μελέτης παρουσιάζει ενδιαφέρον καθώς το Αργολικό πεδίο δέχεται έντονες ανθρωπογενείς πιέσεις στο υδατικό ισοζύγιο σε συνδυασμό με την κλιματική μεταβλητότητα.

Με την εντατική γεωργία στον Αργολικό κάμπο από τις αρχές της δεκαετίας του '50, το φαινόμενο της υφαλμύρωσης γινόταν αισθητό, καθώς η στάθμη του υδροφόρου άρχισε να πέφτει με ρυθμό επτά μέτρα τον χρόνο, με αποτέλεσμα το μέτωπο της θάλασσας να εισχωρήσει προς την ενδοχώρα. Το φαινόμενο αυτό εμφανίστηκε αρχικά στις ανατολικές περιοχές της παράκτιας ζώνης και συγκεκριμένα στις περιοχές των οικισμών Ν. Τίρυνθα και Άρια και ανατολικότερα στις περιοχές Ασίνης – Δρεπάνου – Τολού. Την τελευταία δεκαετία έχει εκδηλωθεί και ένα άλλο μέτωπο υφαλμύρισης στα κεντρικά της πεδιάδας κοντά στους οικισμούς Μοναστηράκι – Μιδέα – Αμυδαλίτσα.

Επιπλέον, σύμφωνα με έκθεση του ΥΠΕΝ για την ποιότητα των υπογείων νερών των υδροσυστημάτων της Ελλάδας την περίοδο 2016 – 2019, η Αργολική πεδιάδα ορίζεται ως ευπρόσβλητη περιοχή νιτρορύπανσης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην ρύπανση από επιστρεφόμενες αρδευτικές ροές καθώς επίσης και σε ρύπανση από ανεξέλεγκτη διάθεση διαφόρων ειδών αποβλήτων (αστικών, αγροχημικών, κτηνοτροφικών, βιομηχανικών, κ.ά.) σε υδάτινους αποδέκτες, όπως οι κοίτες χειμάρρων. Οι χημικές αναλύσεις των υπογείων νερών αποδεικνύουν την υποβάθμιση της ποιότητας των νερών του Αργολικού πεδίου, καθιστώντας το νερό σχεδόν σε όλη την περιοχή της πεδιάδας μη πόσιμο.

Οι αρμόδιοι φορείς της Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας βλέποντας την ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση των υπογείων νερών έκαναν προσπάθειες για την βελτίωση της επικρατούσας κατάστασης με εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού σε συγκεκριμένα τμήματα της πεδιάδας από το 1965. Ωστόσο, τα προβλήματα αυτά συνεχίζουν να επιμένουν και η διαχείριση των υδατικών πόρων στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης αποτέλεσε και αποτελεί έναυσμα ερευνητικής μελέτης από το 1996 μέχρι και σήμερα.

1.6 Διάρθρωση της εργασίας

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή απαρτίζεται από οχτώ κεφάλαια, τα οποία είναι τα εξής:

- Κεφάλαιο 1^ο, στο οποίο αναφέρονται κάποια εισαγωγικά και θεωρητικά στοιχεία που πλαισιώνουν το θέμα της εργασίας. Επίσης, αναφέρεται ο στόχος της εργασίας και το πρόβλημα της ρύπανσης των υπογείων νερών στην περιοχή μελέτης.
- Κεφάλαιο 2^ο, στο οποίο περιγράφονται τα γεωγραφικά και κάποια στατιστικά στοιχεία για την περιοχή μελέτης.
- Κεφάλαιο 3^ο, στο οποίο παρουσιάζεται το γεωμορφολογικό πλαίσιο της περιοχής που αφορά το υδρογραφικό δίκτυο και το μορφολογικό ανάγλυφο της.
- Κεφάλαιο 4^ο, στο οποίο περιγράφεται η γεωλογική δομή της περιοχής μελέτης.
- Κεφάλαιο 5^ο, στο οποίο αναλύεται η επιφανειακή υδρολογία της υπό μελέτη περιοχής, η οποία αφορά μελέτη βροχομετρικών και θερμοκρασιακών δεδομένων και διεξαγωγή συμπερασμάτων για το κλιματικό καθεστώς της περιοχής.
- Κεφάλαιο 6^ο, στο οποίο μελετάται βιβλιογραφικά η υδρογεωλογία της περιοχής, η οποία αφορά την υδρογεωλογική συμπεριφορά των γεωλογικών σχηματισμών, καθώς και την αξιολόγηση της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης των υπογείων νερών.
- Κεφάλαιο 7^ο, στο οποίο πραγματοποιείται η προσομοίωση της ροής των υπογείων νερών με τον κώδικα MODFLOW και μεταφοράς μάζας στα υπόγεια νερά με τον κώδικα SEAWAT, χρησιμοποιώντας το λογισμικό ModelMuse.
- Κεφάλαιο 8^ο, στο οποίο συνοψίζονται τα συμπεράσματα των προσομοιώσεων και αναφέρονται ορισμένα σημεία που χρήζουν περαιτέρω έρευνας.

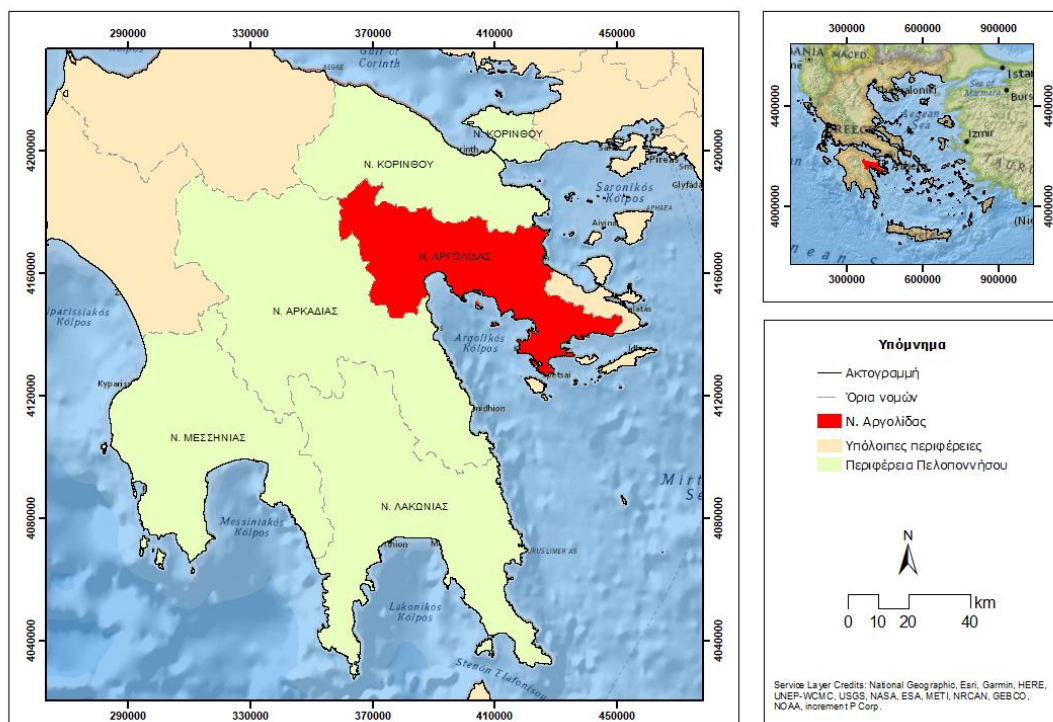
Κεφάλαιο 2^ο: Γεωγραφικά & Στατιστικά στοιχεία της περιοχής μελέτης

2.1 Γεωγραφικά στοιχεία

Η περιοχή μελέτης αποτελεί το Αργολικό πεδίο, το οποίο υπάγεται στην Περιφέρεια Πελοποννήσου και στην Περιφερειακή Ενότητα Αργολίδας με πρωτεύουσα το Ναύπλιο. Η Περιφερειακή Ενότητα Αργολίδας βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα της Πελοποννήσου και συνορεύει στα βόρεια με την Κορινθία, στα δυτικά και νότια με την Αρκαδία και στα βορειοανατολικά με την Αττική. Στα ΝΑ βρέχεται από τον Αργολικό κόλπο και ΒΑ από τον Σαρωνικό.

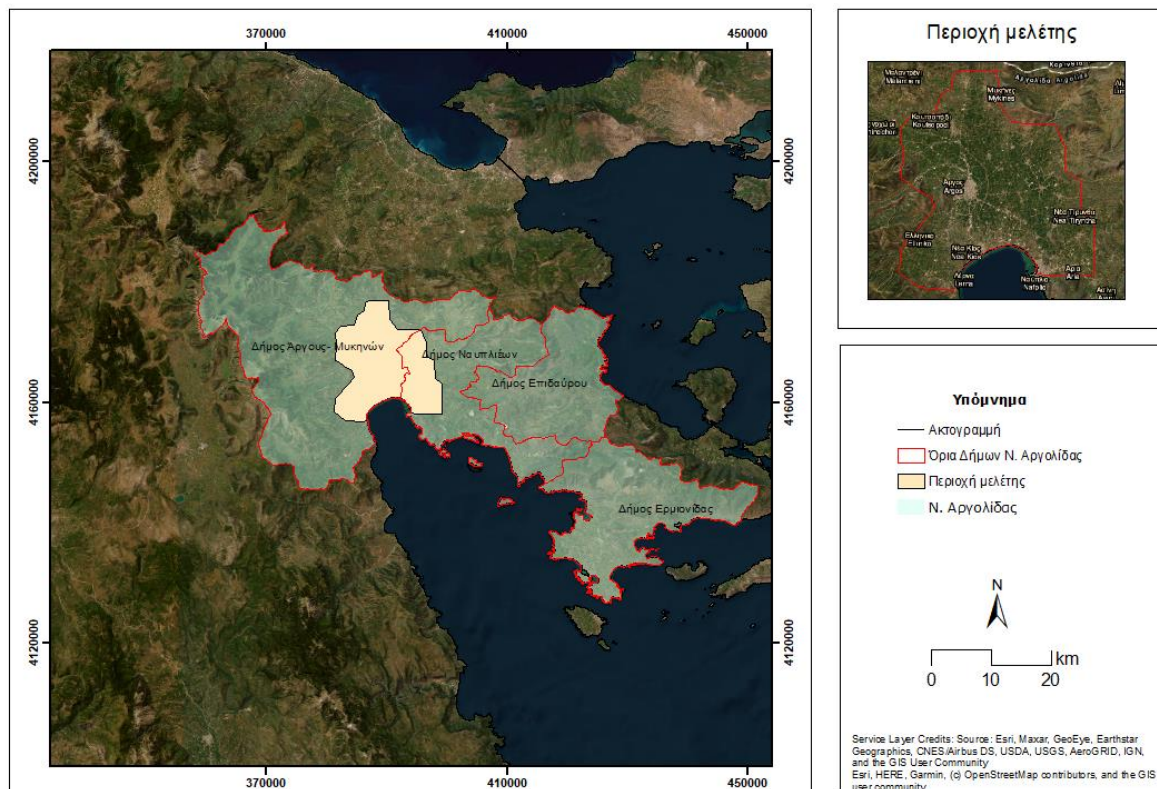
Η Περιφερειακή Ενότητα Αργολίδας έχει συνολική έκταση 2.156 km² και αποτελείται από 4 δήμους: Άργους, Ναυπλίων, Επιδαύρου και Ερμιονίδας. Το Αργολικό πεδίο, που βρίσκεται κεντρικά της Περιφερειακής Ενότητας, αποτελεί ιδιαίτερης οικονομικής σημασίας για την πρωτογενή παραγωγή και περιλαμβάνει τους οικισμούς: Φίχτι, Κουτσοπόδι, Πυργέλλα, Αγία Τριάδα, Κεφαλάρι, Σκαφιδάκι και Ναύπλιο. Πιο συγκεκριμένα, η περιοχή μελέτης οριοθετείται προσεγγιστικά από τις συντεταγμένες λ: 22^ο,37' - 22^ο,25' και φ: (37^ο,30' - 37^ο,45') και εκτείνεται από το οροπέδιο της Τρίπολης δυτικά μέχρι και το Αραχναίο όρος ανατολικά (Γιαννουλόπουλος, 2000). Η περιοχή ενδιαφέροντος της συγκεκριμένης εργασίας έχει συνολική έκταση 245,4 km².

Γεωγραφικός χάρτης Ν. Αργολίδας



Εικόνα 6: Γεωγραφική θέση της Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας (πρώην Ν. Αργολίδας).

Γεωγραφικός χάρτης του Ν. Αργολίδας



Εικόνα 7: Η γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης.

2.2 Δημογραφικά στοιχεία & Χρήσεις γης

2.2.1 Δημογραφικά στοιχεία της Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας

Σύμφωνα με τα προσωρινά αποτελέσματα της απογραφής του 2021, ο πληθυσμός της Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας ανέρχεται στους 93.934 κατοίκους παρουσιάζοντας μια ευκρινή φθίνουσα τάση κατά 3,31% σε σχέση με τον πληθυσμό του 2011 (97.044 κάτοικοι). Οι δήμοι και οι πληθυσμοί της Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας για το 2021 καθώς και η πληθυσμιακή εξέλιξη κατά δημοτική ενότητα παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

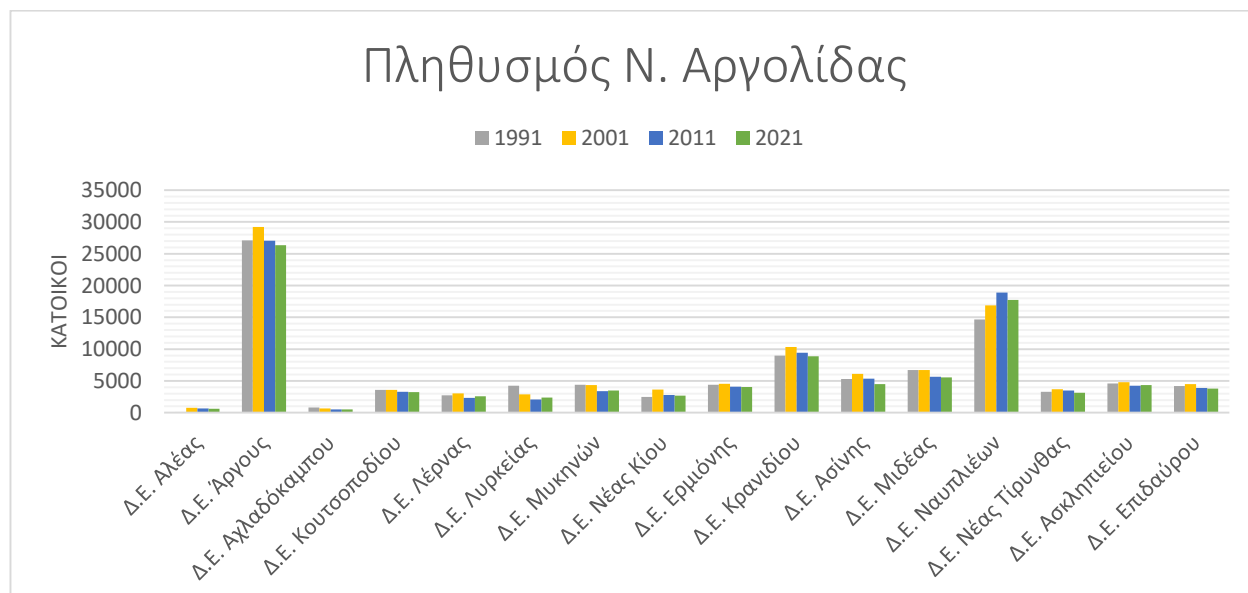
Δήμοι	Πληθυσμός
Δ. Ναυπλίων	30.973
Δ. Άργους - Μυκηνών	41.877
Δ. Επιδαύρου	8.137
Δ. Ερμιονίδας	12.947

Πίνακας 1: Πληθυσμοί δήμων της Περιφερειακής ενότητας Αργολίδας για το έτος 2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).

Δημοτική Ενότητα/ Έτος	1991	2001	2011	2021
Δ.Ε. Αλέας	115	793	660	613
Δ.Ε. Άργους	27.081	29.228	27.050	26.361
Δ.Ε. Αχλαδόκαμπου	844	654	497	536
Δ.Ε. Κουτσοποδίου	3.604	3.575	3.272	3.239
Δ.Ε. Λέρνας	2.742	3.042	2.319	2.563
Δ.Ε. Λυρκείας	4.239	2.901	2.058	2.385
Δ.Ε. Μυκηνών	4.412	4.349	3.388	3.501
Δ.Ε. Νέας Κίου	2.456	3.646	2.778	2.679
Δ.Ε. Ερμιόνης	4.392	4.554	4.099	4.059
Δ.Ε. Κρανιδίου	8.973	10.347	9.452	8.888
Δ.Ε. Ασίνης	5.322	6.117	5.340	4.516
Δ.Ε. Μιδέας	6.701	6.724	5.631	5.559
Δ.Ε. Ναυπλίων	14.680	16.885	18.910	17.744
Δ.Ε. Νέας Τίρυνθας	3.308	3.680	3.475	3.154
Δ.Ε. Ασκληπιείου	4.590	4.804	4.228	4.325
Δ.Ε. Επιδαύρου	4.177	4.471	3.887	3.812
Σύνολο	97.636	105.770	97.044	93.934

Πίνακας 2: Πληθυσμιακή εξέλιξη κατά Δημοτική Ενότητα της Επαρχιακής Ενότητας Αργολίδας (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται οι πληθυσμοί κάθε Δημοτικής Ενότητας να φθίνουν μελλοντικά με εξαίρεση τις Δημοτικές Ενότητες Λέρνας, Λυρκείας, Μυκηνών και Ασκληπιείου που φαίνεται να έχει αυξητική τάση σε σχέση με τις προηγούμενες απογραφές.



Σχήμα 1: Διακύμανση πληθυσμών του Ν. Αργολίδας κατά τα έτη 1991, 2001, 2011 και 2021 (ΕΛΣΤΑΤ, 2021).

2.2.2 Δημογραφικά στοιχεία περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης αποτελείται από τους κύριους οικισμούς: Φίχι, Μυκήνες, Μοναστηράκι, Κουτσοπόδι, Κεφαλάρι, Ελληνικό, Σκαφιδάκι, Νέα Κίος, Τίρυνθα, Ναύπλιο, Αγ. Ανδριανός, Αγ. Τριάδα Αργολίδας, Ίναχος, Αεροδρόμιο, Άργος, Νέο Ηραίο, Ήρα, Κουρτάκι, Πυργέλλα, Δαλαμανάρα, Αργολικό, Ανύφι, Νέα Τύρυνθα. Ο πληθυσμός αυτών των οικισμών σύμφωνα με την απογραφή του 2011 ανέρχεται στους 52.335 κατοίκους, εμφανίζοντας πτώση κατά 5,14% σε σχέση με τον αντίστοιχο πληθυσμό της απογραφής του 2001 (55.026 κάτοικοι).

Στους παρακάτω πίνακες απεικονίζονται τα πληθυσμιακά στοιχεία των οικισμών του Αργολικού πεδίου και %μεταβολή αυτών για τα έτη 1991 έως 2011. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα για τους οικισμούς Φίχι, Κουτσοπόδι, Σκαφιδάκι, Νέα Κίος, Ίναχος και Αργολικό παρουσιάζεται φθίνουσα πληθυσμιακή τάση, μεγαλύτερη αυτή του οικισμού Σκαφιδάκι (53,20%), ενώ οι υπόλοιποι οικισμοί είτε δεν μεταβάλλονται εμφανώς είτε παρουσιάζουν μια μικρή αυξητική τάση για τα μελλοντικά έτη. Οι οικισμοί που παρουσιάζουν συνεχόμενα αυξητική τάση είναι το Κεφαλάρι (11,08%) και ο Αγ. Ανδριανός (11,48%).

Οικισμός/Έτος	1991	2001	2011
Φίχι	926	913	761
Μυκήνες	436	439	354
Μοναστηράκι	283	356	276
Κουτσοπόδι	2.066	1.893	1.857
Κεφαλάρι	602	607	677
Ελληνικό	379	376	378
Σκαφιδάκι	671	638	438
Νέα Κίος	2.456	3.548	2.778
Τίρυνθα	562	431	452
Ναύπλιο	11.897	13.124	14.203
Αγ. Ανδριανός	956	1.004	1.080
Αγ. Τριάδα Αργολίδας	1.152	1.248	1.151
Ίναχος	667	647	622
Αεροδρόμιο	-	58	111
Άργος	21.901	24.630	22.209
Νέο Ηραίο	547	584	488
Ήρα	446	401	369
Κουρτάκι	411	259	296
Πυργέλλα	501	420	418
Δαλαμανάρα	769	735	877
Αργολικό	712	623	609
Ανύφι	670	843	745
Νέα Τίρυνθα	1.111	1.249	1.186
Σύνολο	50.121	55.026	52.335

Πίνακας 3: Πληθυσμός οικισμών της περιοχής μελέτης (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).

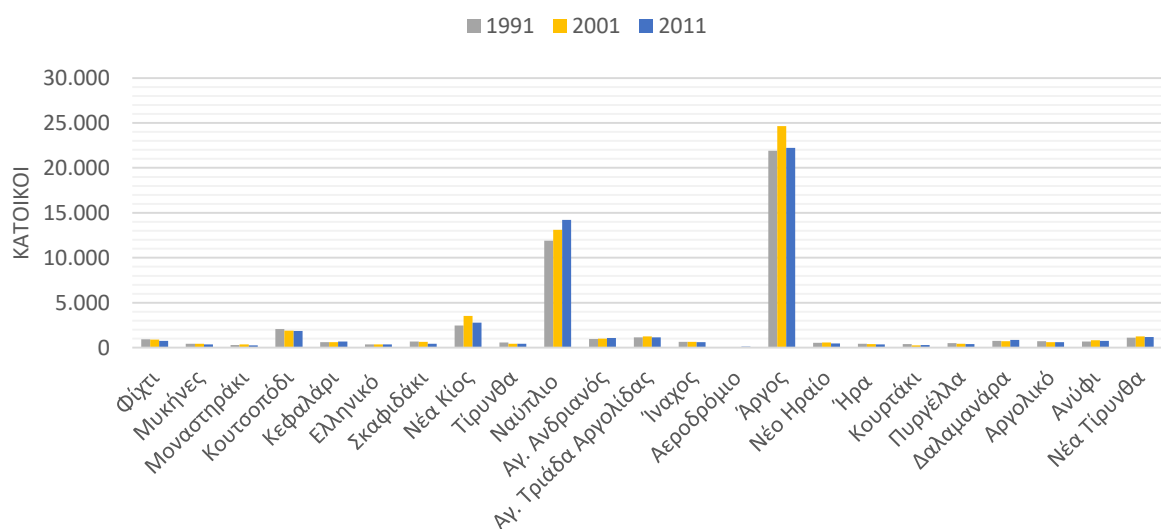
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Οικισμός/ %Μεταβολή	1991 - 2001	2001 - 2011	2011 - 1991
Φίχτι	-1,42	-19,97	-21,68
Μυκήνες	0,68	-24,01	-23,16
Μοναστηράκι	20,51	-28,99	-2,54
Κουτσοπόδι	-9,14	-1,94	-11,25
Κεφαλάρι	0,82	10,34	11,08
Ελληνικό	-0,80	0,53	-0,26
Σκαφιδάκι	-5,17	-45,66	-53,20
Νέα Κίος	30,78	-27,72	11,59
Τίρυνθα	-30,39	4,65	-24,34
Ναύπλιο	9,35	7,60	16,24
Αγ. Ανδριανός	4,78	7,04	11,48
Αγ. Τριάδα Αργολίδας	7,69	-8,43	-0,09
Ίναχος	-3,09	-4,02	-7,23
Αεροδρόμιο	-	47,75	-
Άργος	11,08	-10,90	1,39
Νέο Ηραίο	6,34	-19,67	-12,09
Ήρα	-11,22	-8,67	-20,87
Κουρτάκι	-58,69	12,50	-38,85
Πυργέλλα	-19,29	-0,48	-19,86
Δαλαμανάρα	-4,63	16,19	12,31
Αργολικό	-14,29	-2,30	-16,91
Ανύφι	20,52	-13,15	10,07
Νέα Τίρυνθα	11,05	-5,31	6,32
Σύνολο	8,91	-5,14	4,23

Πίνακας 4: Πληθυσμιακές μεταβολές των οικισμών της περιοχής μελέτης (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).

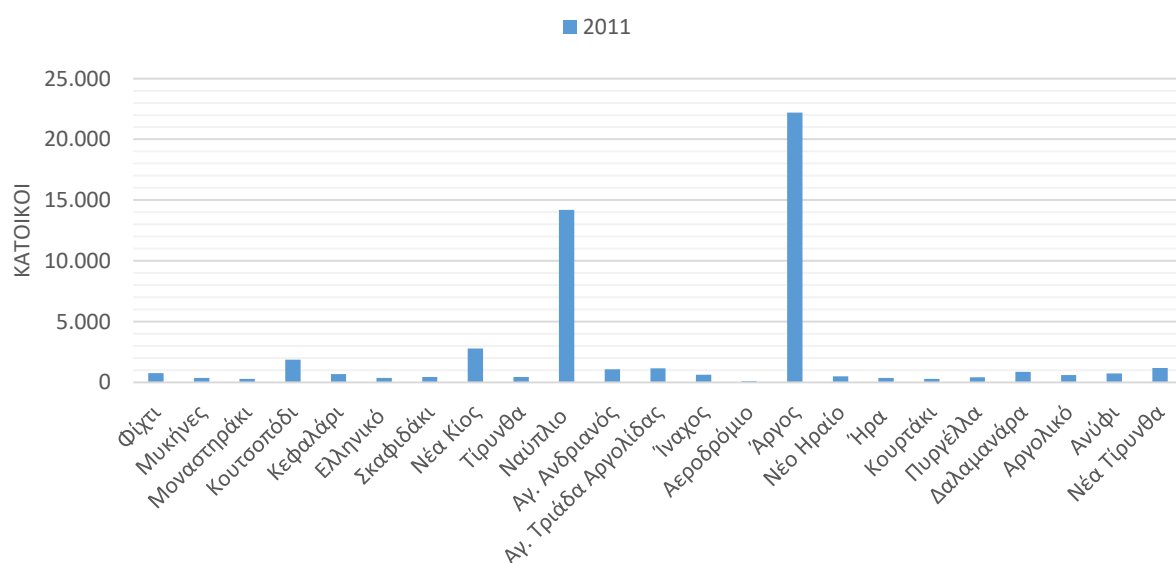
Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζεται η κατανομή των πληθυσμών στο Αργολικό πεδίο κατά τα έτη 1991 έως 2011. Σύμφωνα με την απογραφή του 2011 φαίνεται πως οι οικισμοί με τους μεγαλύτερους πληθυσμούς είναι το Άργος (22.209 κάτοικοι) και το Ναύπλιο (14.203 κάτοικοι).

Πληθυσμός οικισμών Αργολικού Πεδίου



Σχήμα 2: Διακύμανση πληθυσμών των οικισμών της περιοχής μελέτης 1991 – 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).

Πληθυσμός οικισμών Αργολικού Πεδίου 2011



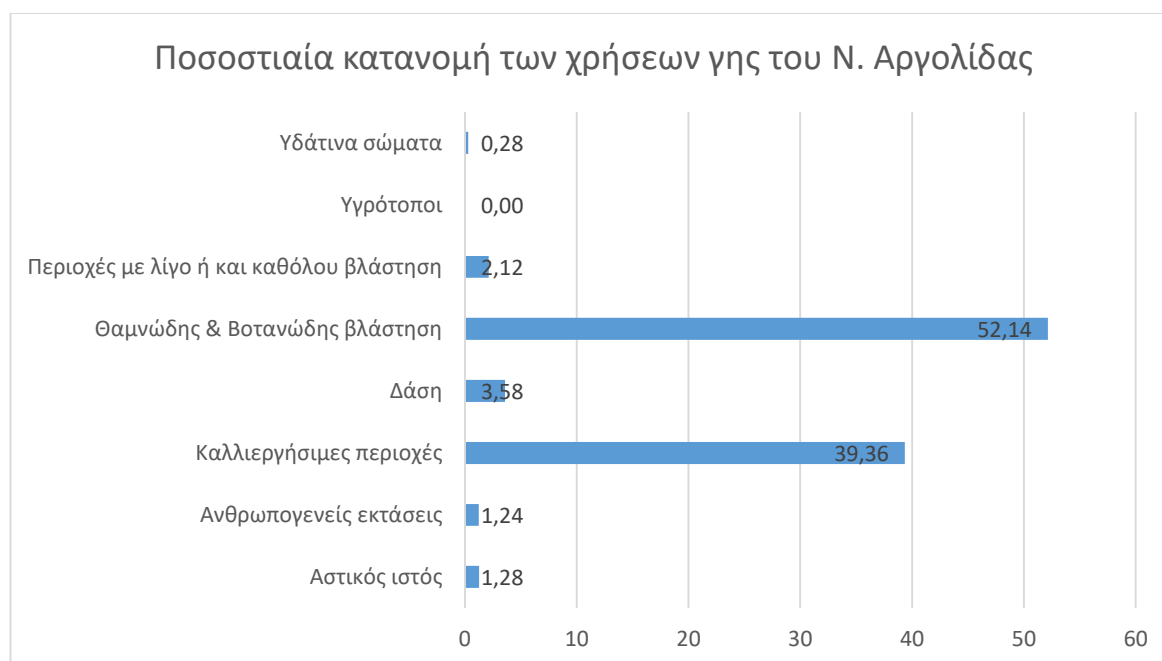
Σχήμα 3: Κατανομή πληθυσμού του Αργολικού Πεδίου το 2011 (ΕΛΣΤΑΤ, 2011).

2.2.3 Χρήσεις γης της Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας

Ο Ν. Αργολίδας καταλαμβάνει έκταση που ανέρχεται στα 2150,54 km². Ο Νομός με βάση της χρήσεις γης καταλαμβάνεται κυρίως από θαμνώδης & βοτανώδης βλάστηση (52,14%), όπου το 45,76% αποτελούν σκληροφυλλική βλάστηση. Ένα επίσης μεγάλο ποσοστό καταλαμβάνουν οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις που ανέρχονται στα 39,36%, όπου τα 12,10% ανήκουν σε εκτάσεις που καλλιεργούνται αμπελώνες, τα 8,66% σε καλλιεργήσιμες περιοχές με φυσική βλάστηση και τα 7,90% σε καλλιέργειες οπωροφόρων δέντρων & φυτειών με σαρκώδεις καρπούς.

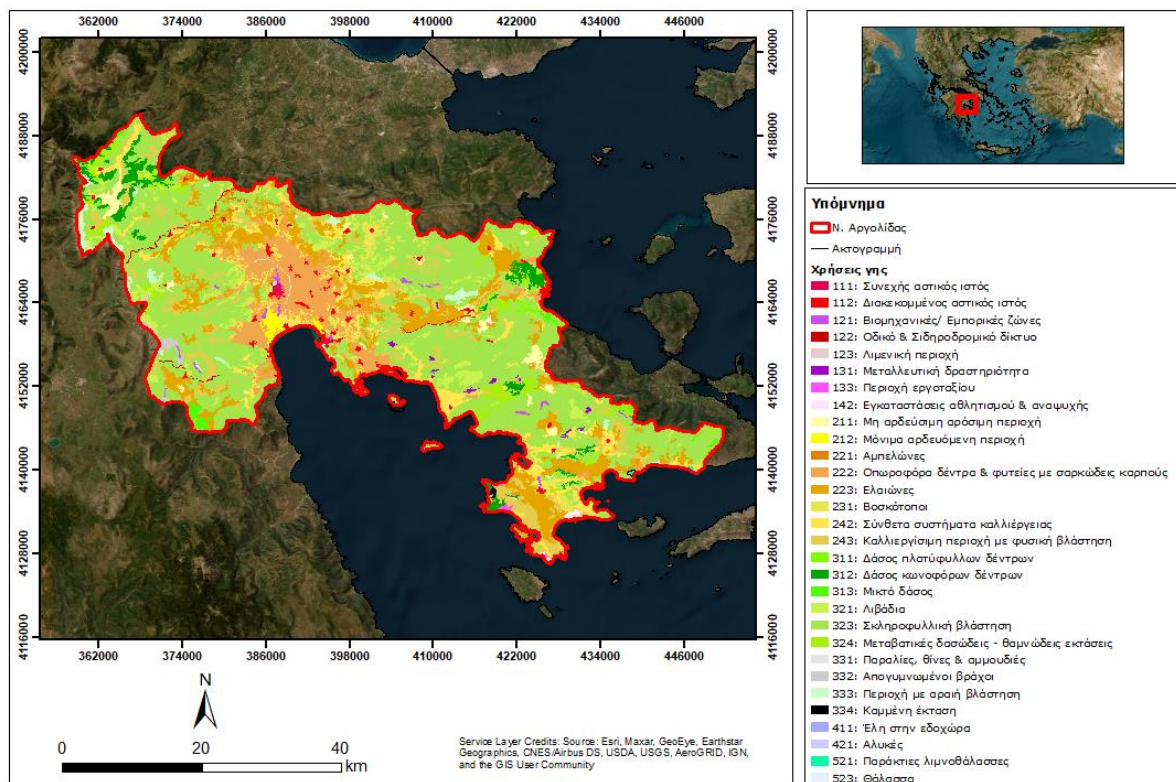
Χρήσεις γης	Έκταση (km ²)	Ποσοστά (%)
Αστικός ιστός	27,43	1,28
Ανθρωπογενείς εκτάσεις	26,69	1,24
Καλλιεργήσιμες περιοχές	846,42	39,36
Δάση	76,98	3,58
Θαμνώδης & Βοτανώδης βλάστηση	1121,29	52,14
Περιοχές με λίγο ή και καθόλου βλάστηση	45,66	2,12
Υγρότοποι	0,002	0,00
Υδάτινα σώματα	6,07	0,28
Σύνολο	2150,54	100,00

Πίνακας 5: Κατηγοριοποιημένες χρήσεις γης του Ν. Αργολίδας και οι εκτάσεις αυτών σε km² και σε % ποσοστό (CLC, 2018)



Σχήμα 4: Κατανομή % χρήσεων γης του Ν. Αργολίδας.

Χάρτης χρήσεων γης του Ν. Αργολίδας



Εικόνα 8: Χάρτης χρήσεων γης του Ν. Αργολίδας κατά Corine LandCover (CLC, 2018).

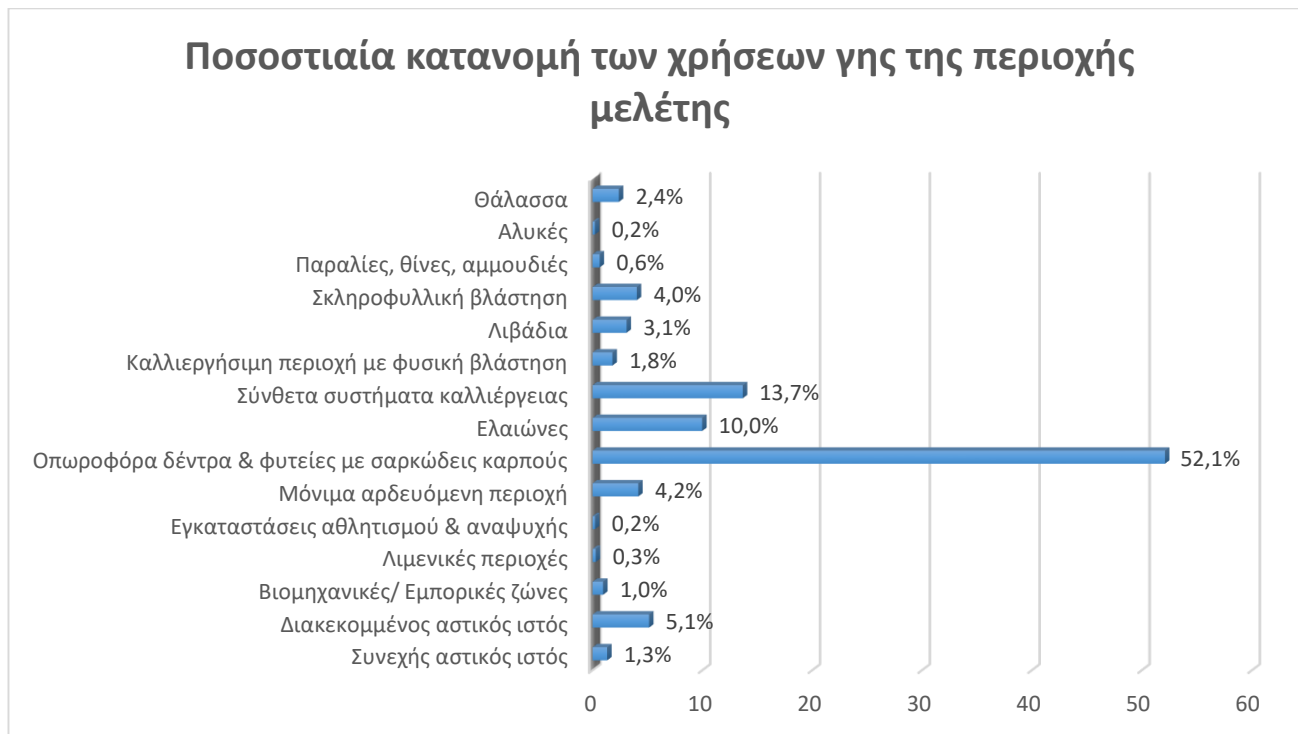
2.2.4 Χρήσεις γης της περιοχής μελέτης

Το Αργολικό πεδίο στο μεγαλύτερο σύνολο χρησιμοποιείται για γεωργικές δραστηριότητες. Η έκταση του υπό μελέτη τμήματος ανέρχεται στα 245,4 km², όπου τα 19,46 km² αποτελούν δομημένες εκτάσεις και τεχνητές περιοχές, δηλαδή μόλις το 8% της περιοχής, ενώ οι οικισμοί αποτελούν το 6,5% .

Χρήσεις γης	Έκταση (km ²)	Ποσοστά (%)
Συνεχής αστικός ιστός	3,26	1,3
Διακεκομμένος αστικός ιστός	12,63	5,1
Βιομηχανικές/ Εμπορικές ζώνες	2,34	1,0
Λιμενικές περιοχές	0,70	0,3
Εγκαταστάσεις αθλητισμού & αναψυχής	0,53	0,2
Μόνιμα αρδευόμενη περιοχή	10,21	4,2
Οπωροφόρα δέντρα & φυτείες με σαρκώδεις καρπούς	127,88	52,1
Ελαιώνες	24,49	10,0
Σύνθετα συστήματα καλλιέργειας	33,57	13,7
Καλλιεργήσιμη περιοχή με φυσική βλάστηση	4,44	1,8
Λιβάδια	7,59	3,1
Σκληροφυλλική βλάστηση	9,87	4,0
Παραλίες, θίνες, αμμουδιές	1,58	0,6

Αλυκές	0,49	0,2
Θάλασσα	5,86	2,4
Σύνολο	245,43	100

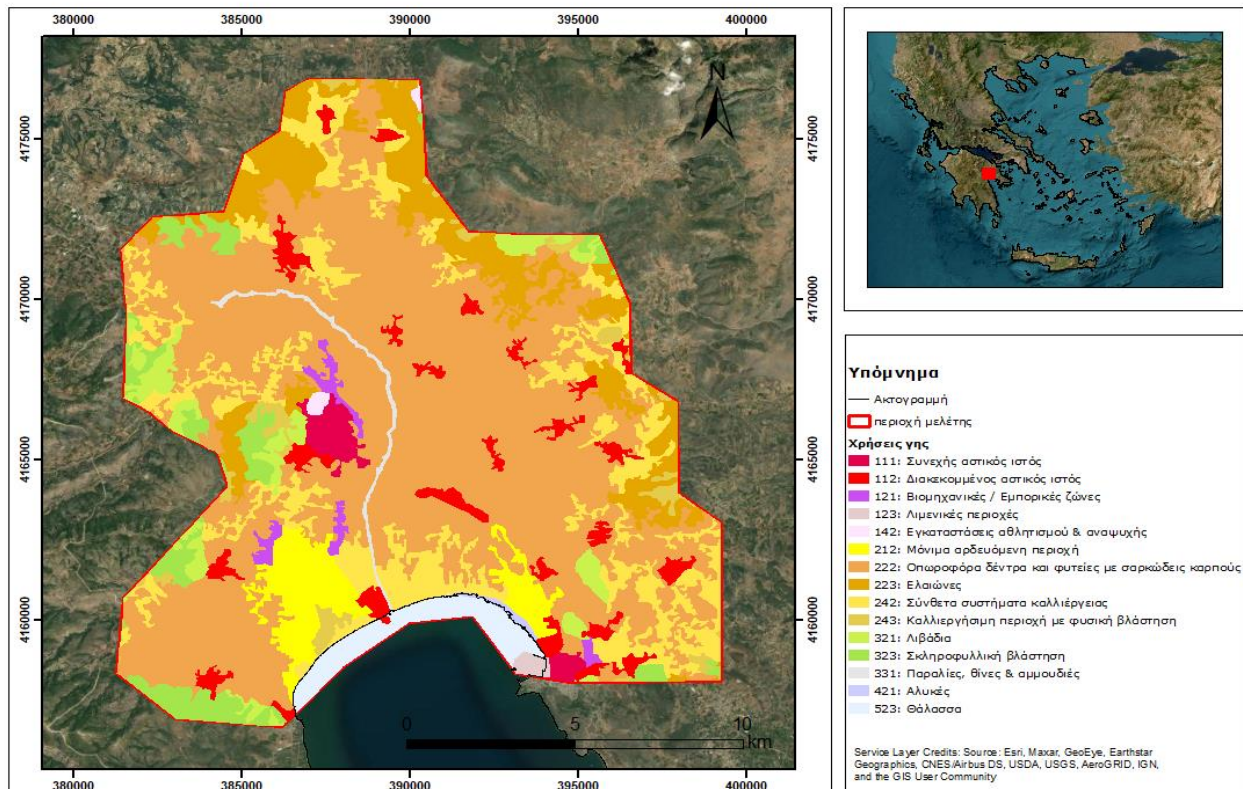
Πίνακας 6: Οι χρήσεις γης της περιοχής μελέτης και οι εκτάσεις αυτών σε km² και σε % ποσοστό (CLC,2018).



Σχήμα 5: Κατανομή % των χρήσεων γης της περιοχής του Αργολικού πεδίου.

Στο παραπάνω διάγραμμα όπως και στον χάρτη φαίνεται ότι το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής (52,1%) χρησιμοποιείται για καλλιέργειες οπωροφόρων δέντρων. Αυτό το ποσοστό δικαιολογείται καθώς οι καλλιέργειες πορτοκαλιών, μανταρινιών και άλλων τέτοιων ειδών δέντρων αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες της οικονομίας της περιοχής για τον πρωτογενή τομέα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι καλλιέργειες οπωροφόρων δέντρων και φυτειών σαρκωδών καρπών στο Αργολικό πεδίο αποτελούν το 75,22% της συνολικής έκτασης αυτών των καλλιεργειών στον Ν. Αργολίδας.

Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής μελέτης



Εικόνα 9: Χρήσεις γης της περιοχής μελέτης κατά Corine LandCover (CLC, 2018).

Κεφάλαιο 3^ο: Γεωμορφολογικά και υδρογραφικά στοιχεία

3.1 Γεωμορφολογικό ανάγλυφο

Η γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται κυρίως από λοφώδες ανάγλυφο. Στα δυτικά της περιοχής οι ορεινοί όγκοι Κτένιας, Αρτεμίσιο και Κυλλήνη, στα ανατολικά οι όγκοι του Αραχναίου όρους και στα βόρεια τα βουνά των Δερβενακίων περικλείουν την πεδινή έκταση του Αργολικού πεδίου. Η γεωμορφολογική εικόνα του Αργολικού πεδίου είναι αποτέλεσμα της γεωλογίας της περιοχής, της δράσης των τεκτονικών δυνάμεων και των εξωγενών δυνάμεων της αποσάθρωσης και της διάβρωσης των γεωλογικών σχηματισμών (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Τα υψόμετρα της περιοχής κυμαίνονται από +0 έως +254 m. Στο νότιο τμήμα του Αργολικού που περιλαμβάνει κυρίως την πεδινή έκταση οι τιμές του υψομέτρου κυμαίνονται από +0 έως +40 m, ενώ στο βόρειο και στα ανατολικά και δυτικά σύνορα της περιοχής επικρατούν υψηλότερες τιμές. Οι μορφολογικές κλίσεις της περιοχής μελέτης κυμαίνονται από 0° έως 66°, όπου οι επικρατούσες τιμές στην πεδιάδα είναι από 0° έως 20°. Επομένως, η περιοχή μπορεί να χωριστεί λόγω μορφολογικών κλίσεων σε δύο τμήματα (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991):

- Το βόρειο τμήμα που περιλαμβάνει την περιοχή βόρεια του Άργους έως τους πρόποδες των Μυκητών. Το τμήμα αυτό της αλλουβιακής πεδιάδας χαρακτηρίζεται από χονδρόκοκκα μεταφερθέντα υλικά από τους χειμάρρους Ίναχο και Ξεριά, οι οποίοι λόγω της μεγάλης μορφολογικής τους κλίσης, εναποθέτουν σχετικά αδρομερή υλικά.
- Το νότιο τμήμα, το οποίο ορίζεται από την Νέα Κίο, το Άργος, τη Δαλαμανάρα και το Ναύπλιο παρουσιάζει μορφολογική κλίση σχεδόν οριζόντια αντιπροσωπεύονται την πεδιάδα υπερχειλίσης με αμμώδεις, ιλυώδεις και αργιλικές αποθέσεις δημιουργώντας εξαιρετικά εύφορες πεδιάδες από το υψόμετρο +1 έως +10 m.

Στα δυτικά και ανατολικά της περιοχής παρουσιάζεται σχηματισμός φαραγγιών που ακολουθείται από μια φάση απόθεσης πλευρικών κώνων και ριπιδίων κατά το Άνω Πλειστόκαινο. Τα ριπίδια αυτά διακόπτονται από μια αρχαιότερη φάση κατά βάθος διάβρωσης, με αποτέλεσμα να δημιουργείται αναβαθμίδα με μέσο ύψος 10 – 15 m (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991).

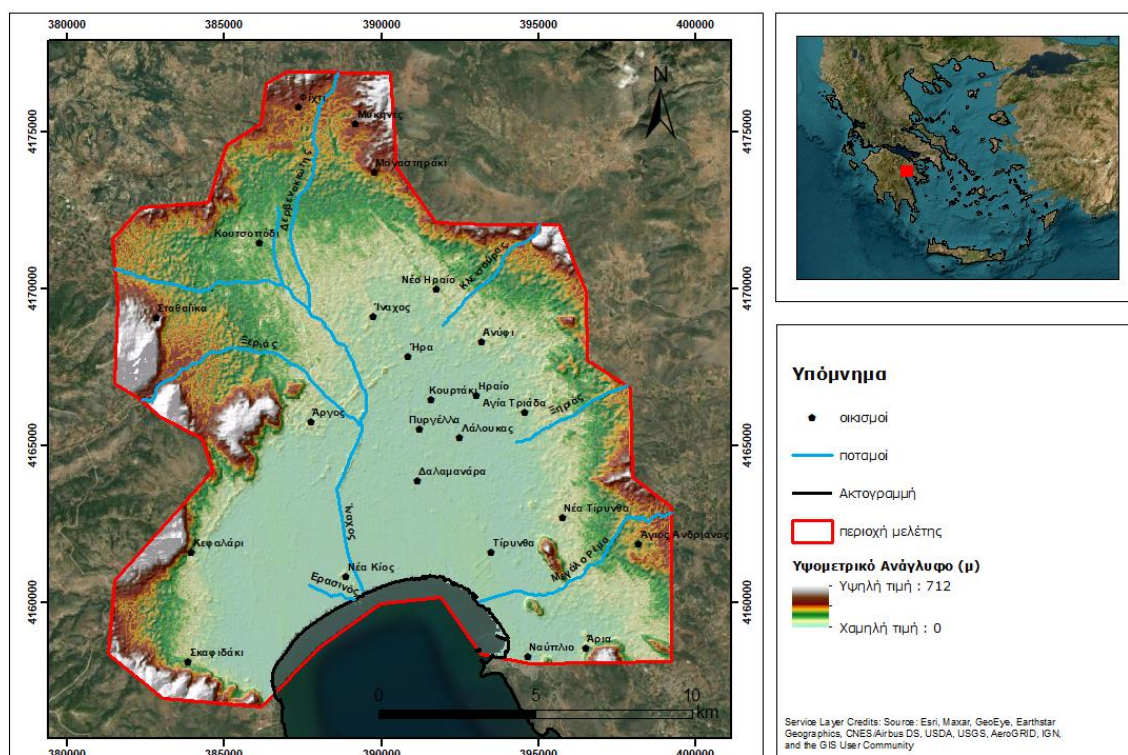
3.2 Υδρογραφικά στοιχεία

Οι προαναφερόμενοι ορεινοί όγκοι που περικλείουν το Αργολικό πεδίο αποτελούνται από ένα δενδριτικής μορφής υδρογραφικό δίκτυο, στο οποίο το σύνολο των ρεμάτων έχουν ως τελικούς αποδέκτες χειμάρρους. Οι χειμάρροι αυτοί, οι οποίοι καταλήγουν στην Αργολική πεδιάδα δημιουργούν αυτόνομες υδρολογικές υπολεκάνες απορροής. Οι υδρολογικές λεκάνες που δημιουργούνται είναι οι εξής (Δαναλάτος, 2018; Γιαννουλόπουλος, 2000):

- Η λεκάνη του Ερασινού ποταμού. Ο Ερασινός ποταμός είναι ο μοναδικός ποταμός συνεχούς ροής που πηγάζει από το Κεφαλάρι και εκβάλλει εν μέρει στον βάλτο της Νέας Κίου.
- Η λεκάνη του Ίναχου ποταμού (197 km²). Ο Ίναχος ποταμός έχει μήκος 42 km και πηγάζει από το Αρτεμίσιο. Μαζί με τον ποταμό Ξηριά αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους χειμάρρους λόγω της έκτασης της υδρολογικής του λεκάνης και των πλημμυρικών φαινομένων που έχουν εκδηλωθεί σε αυτές τις περιοχές.
- Η λεκάνη του ποταμού Ξηριά (109 km²).
- Η λεκάνη του ποταμού Δερβενακιώτη (62 km²) στα ΒΔ.
- Η λεκάνη του Κλεισούρα ποταμού (96,5 km²) στα ΒΑ.
- Η λεκάνη του ποταμού Ξηριά ή Αμοργιανός (85 km²) στα ΒΑ.
- Η λεκάνη των ρεμάτων Ηραίου, Αμυδαλίτσας, Μηδέας και Παναριτίου συνολικής έκτασης 39 km² που αποστραγγίζονται στις ΒΑ περιοχές.
- Η λεκάνη του ποταμού Μεγάλο Ρέμα ή Ραμαντάνη με λεκάνη απορροής 21 km², ο οποίος εκβάλλει μεταξύ Νέας Τίρυνθας και Ναυπλίου στα ανατολικά.

Η περιοχή μελέτης συγκριτικά με την ορεινή μάζα παρουσιάζει ένα πιο αραιό υδρογραφικό δίκτυο, το οποίο εξαρτάται από την κλίση της πεδινής έκτασης και την σύσταση και κατάσταση των γεωλογικών σχηματισμών.

Γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής μελέτης

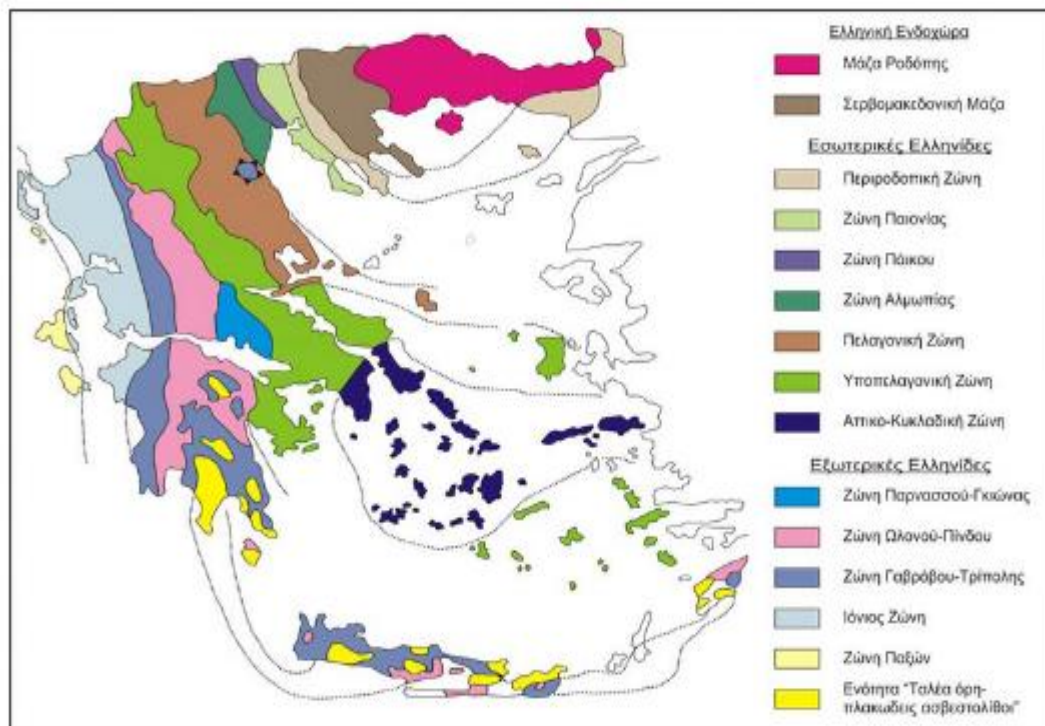


Εικόνα 10: Γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής του Αργολικού πεδίου.

Κεφάλαιο 4^ο: Γεωλογική δομή & Τεκτονικό καθεστώς

4.1 Γεωλογική δομή

Γενικά, η γεωλογία της Ελλάδας περιλαμβάνει σχηματισμούς που αποτέθηκαν/σχηματίστηκαν τόσο πριν, κατά τη διάρκεια όσο και μετά το πέρας της Αλπικής ορογένεσης, οι οποίοι χωρίζονται σε τεκτονικά μπλοκ/ενότητες με όμοια χαρακτηριστικά ανάλογα με τις λεκάνες ιζηματογένεσης στις οποίες σχηματίστηκαν. Η γενική εικόνα παρουσιάζει τις προαλπικές και αλπικές ενότητες/σχηματισμούς ως τις στρωματογραφικά κατώτατες και κατώτερες, αντίστοιχα, να υπόκεινται τεκτονικά των μεταλπικών ενοτήτων (Παπανικολάου, 2014). Αυτό παρατηρείται και στην περιοχή του Αργολικού πεδίου, όπου δυτικά του Άργους οι Εσωτερικές Ελληνίδες επωθούνται πάνω στις Εξωτερικές και η πεδινή έκταση αποτελείται από μεταλπικούς σχηματισμούς που καλύπτουν το αλπικό και προαλπικό υπόβαθρο. Συγκεκριμένα, από δυτικά προς ανατολικά εντοπίζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί των γεωτεκτονικών ενοτήτων Γαβρόβου – Τρίπολης, Ωλονού – Πίνδου και της Υποπελαγονικής ζώνης, που αποτελούν το αλπικό υπόβαθρο. Το προαλπικό υπόβαθρο εντοπίζεται δυτικότερα της περιοχής μελέτης, στα χωριά Μερκούρι και Σπηλιά (Γιαννουλόπουλος, Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό Πεδίο, 2000). Η πεδινή έκταση αποτελεί ένα Νεογενές βύθισμα, στο οποίο έχουν αποθεθεί μεταλπικά ιζήματα Νεογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991; Γιαννουλόπουλος, 2000).



Εικόνα 11: Οι γεωτεκτονικές ενότητες της Ελλάδας (Μουντράκης, 2010)

4.1.1 Προαλπικό υπόβαθρο (Ενότητα Άρνας ή Φυλλιτών – Χαλαζιτών)

Η ενότητα Άρνας ή Φυλλιτών – Χαλαζιτών περιλαμβάνει μέσου βαθμού μεταμόρφωσης πετρώματα κυανοσχιστολιθικού τύπου της εξωτερικής τεκτονομεταμορφικής ζώνης Πελοποννήσου – Κρήτης, τα οποία παρεμβάλλονται στην ενότητα Μάνης προς τα κάτω και στην ενότητα της Τρίπολης προς τα πάνω (Σκαρπέλης, 1982; Παπανικολάου, 2014). Πιο συγκεκριμένα στο Αργολικό πεδίο η συγκεκριμένη ενότητα δομείται λιθολογικά από ένα σύστημα μαρμαρυγιακών σχιστολίθων και φυλλιτικών, σερεκιτικών, γραφιτικών, χλωριτοσερεκιτικών με χλωριτοειδή και άλλα ορυκτά, έντονα πτυχωμένων με λίγους χαλαζίτες και γκριζούς κρυσταλλικούς μεσοστρωματώδεις ασβεστόλιθους στα ανώτερα μέρη του. Μέσα στους σχιστόλιθους και τους φυλλίτες απαντούν κατά θέσεις αιματίτης και σιδερίτης σε φλέβες. Το όλο σύστημα έχει υποστεί μεταμόρφωση κυανοσχιστολιθικού τύπου με πιέσεις και θερμοκρασίες που διαφέρουν λόγω της διαδικασίας ανόδου της ενότητας στην επιφάνεια, χωρίς να υπάρχει θερμική επίδραση από ανερχόμενα μάγματα σε ηφαιστειακό τόξο. Ειδικότερα, σύμφωνα με τον (Σκαρπέλης, 1982) η κυανοσχιστολιθική μεταμόρφωση έγινε σε πιέσεις 7 kbars και 350 °C, χωρίς να υποστεί μεταγενέστερη παρασινοσχιστολιθική φάση, ενώ ο (Παπανικολάου, 2014) σύμφωνα με τις πηγές (Trotet, et. al., 2006) και (Jolivet, et. al., 1996) γράφει ότι η μεταμόρφωση έγινε σε πιέσεις 9 – 12 kbars και θερμοκρασία 320 – 500 °C από διάφορες εμφανίσεις στη Βόρεια και στην Νότια Πελοπόννησο.

4.1.2 Αλπικό σύστημα

Στο αλπικό σύστημα ανήκουν η μη – μεταμορφωμένοι σχηματισμοί έως πολύ χαμηλά μεταμορφωμένοι στην βάση του αλπικού συστήματος. Στο Αργολικό πεδίο το αλπικό σύστημα αποτελείται από τις ασβεστολιθικές μάζες και τον φλύσχη στα δυτικά ορεινά συμπλέγματα του Αρτεμισίου και Κτενιά, των λόφων των Δερβενακίων στα βόρεια, και του ορεινού συστήματος Τραπεζώνας – Αραχναίου, στα ανατολικά. Επίσης, οι λοφώδεις ασβεστολιθικές εξάρσεις που απαντώνται στην πεδινή έκταση και στις περιοχές Τίρυνθα και Προφήτη Ηλία ανήκουν στο συγκεκριμένο σύστημα (Γιαννουλόπουλος, Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό Πεδίο, 2000). Οι τεκτονικές ενότητες που παρουσιάζονται στην συγκεκριμένη περιοχή από δυτικά προς ανατολικά και από την κατώτερη στην ανώτερη είναι οι εξής (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991; Γιαννουλόπουλος, 2000):

- Η ενότητα Γαβρόβου – Τρίπολης
- Η ενότητα Πίνδου
- Η ενότητα Άκρος
- Η υπο – Πελαγονική ενότητα / ενότητα Ανατολικής Ελλάδας

4.1.2.1 Η ενότητα Γαβρόβου – Τρίπολης

Η ενότητα Γαβρόβου – Τρίπολης αποτελεί την δυτικότερη ενότητα του αλπικού αυτού συστήματος. Βασικό χαρακτηριστικό της ενότητας είναι η νηρητική ιζηματογένεση με ασβεστόλιθους και δολομίτες συνεχώς από το Άνω Τριαδικό μέχρι και το Ηώκαινο, με χαρακτηριστικούς μαύρους βιτουμενιούχους

στρωματώδεις ασβεστόλιθους, γνωστούς σαν Tripolitza kalk από τον Philppson (1893) (Παπανικολάου, 2014). Στην περιοχή του Αργολικού πεδίου οι ανθρακικές εμφανίσεις είναι περιορισμένες στην περιοχή του Μερκουρίου και δυτικά της Λυρκείας, ενώ στην συνέχεια καταλήγουν στον ηφκαινικό φλύσχη (Γιαννουλόπουλος, 2000). Η στρωματογραφική κολώνα στην περιοχή περιλαμβάνει (Παπασταματίου, κ.α., 1970):

- Το Αν. Παλαιοζωικό - Τριαδικό: δομείται από ένα σύμπλεγμα από λάβες και ασβεστόλιθους με πηλίτες και ψαμμίτες που είναι γνωστό ως "στρώματα του Τυρού" δεν αναφέρεται η εμφάνιση του στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος.
- Το Μέσο - Ανώτερο Ιουρασικό (Ts-Jj), αντιπροσωπεύεται από ασβεστόλιθους, δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους νηριτικής φάσης. Είναι συνήθως παχυστρωματώδεις ανοιχτότεφροι, λευκοί έως ροδόχρωοι ασβεστόλιθοι, με μαλάκια και ελασματοβράγχια και παρουσιάζουν περιορισμένη ανάπτυξη στη περιοχή "Λούκα βρύση".
- Το Ανώτερο Ιουρασικό - Κατ. Κρητιδικό (Jj, αναπτύσσεται στην ίδια θέση σε συνέχεια με τους προηγούμενους ασβεστόλιθους. Πρόκειται για βιτουμενιούχους ασβεστόλιθους, δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους σκοτεινότεφρου έως μαύρου χρώματος νηριτικής φάσης με Cladocoropsis, οι οποίοι γίνονται κυρίως ανοιχτόχρωμοι με εμφανή κρυσταλλικότητα σε βαθύτερους στρωματογραφικούς ορίζοντες.
- Στο Κατώτερο Κρητιδικό (K) απαντούν κυρίως δολομίτες με Cladocoropsis. Περιορίζονται σε δακτυλιοειδή εμφάνιση γύρω από το τεκτονικό παράθυρο του μεταμορφωμένου υπόβαθρου στην περιοχή Μερκουρίου - Σπηλιάς.
- Το Ανώτερο Κρητιδικό (Ks), αντιπροσωπεύεται από μικρή λωρίδα ρουδιστοφόρων ασβεστόλιθων (Τουρώνιας ηλικίας) σε συνέχεια με τους προηγούμενους στην περιοχή του Κτενιά. Πρόκειται για τεφρούς έως μαύρους ασβεστόλιθους, δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους άλλοτε παχυστρωματώδεις και άλλοτε λεπτοστρωματώδεις. Χαρακτηριστική είναι η παρουσία των Ρουδιστών, Γαστερόποδων, Οστρακοδών και των φυκών.
- Το Αν. Κρητιδικό - Ηώκαινο (e-K), αντιπροσωπεύεται από ασβεστόλιθους με Miliolides ενώ στο Μαιστρήχτιο απαντούν μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθοι με Orbitolides και Rosalines. Απαντούν δυτικά του Αχλαδόκαμπου και ΒΔ της Λυρκείας.
- Στο Ηώκαινο - Μειόκαινο (Em-s), ακολουθούν παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι, δολομίτες και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι ανοιχτόχρωμοι έως υπόλευκοι κατά θέσεις κυρίως στιφροί και κλαστικοί οι οποίοι μεταβαίνουν στους μελανούς βιτουμενιούχους νουμουλιτοφόρους ασβεστόλιθους (Αν. Ηώκαινο - Ακουιάνιο). Κατά θέσεις απαντούν μεταβατικοί ορίζοντες προς το φλύσχη με χαρακτηριστικά απολιθώματα τα Alveolina, Miliolidae, Nummulites κ. α. Αναπτύσσονται δυτικά του άξονα Λυρκεία - Καπαρέλι, στην περιοχή του Μερκουρίου - Σπηλιάς

καθώς και στα Δερβενάκια.

- Ο φλύσχης (Ft) αναπτύσσεται κατά το μεγαλύτερο τμήμα του σε συνέχεια με τους υποκείμενους ασβεστόλιθους. Πρόκειται για ένα σύμπλεγμα από μάργες και ψαμμιτομάργες με φακοειδείς ενστρώσεις κροκαλοπαγών και ασβεστόλιθων.

4.1.2.2 Η ενότητα Πίνδου

Η ενότητα της Πίνδου στην Πελοπόννησο δημιουργεί το λεγόμενο αρκαδικό κάλυμμα, που έχει ως βάση τους ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους πάνω από τον «πρώτο φλύσχη». Στο Αργολικό πεδίο οι σχηματισμοί της Πίνδου καταλαμβάνουν αρκετά μεγάλη έκταση δυτικά και νοτιοδυτικά του δήμου Άργους - Μυκηνών (Καμπόσος, 2016). Η στρωματογραφική κολώνα της Πίνδου στην περιοχή μελέτης είναι η εξής (Παπασταματίου, 1970):

- Ιουρασικό - Κατ. Κρητιδικό (Jj): Αποτελείται από ένα σύστημα από τεφρούς λεπτοστρωματώδεις πλακώδεις ασβεστόλιθους και σχιστοκερατόλιθους. Περιέχουν Filaments και απαντούν σε περιορισμένες εμφανίσεις στη Στέρνα και στον Αχλαδόκαμπο.
- Μέσο - Κατώτερο Κρητιδικό (Kj): Πρόκειται για ένα σύστημα από αργιλικούς σχιστόλιθους, κερατόλιθους και ψαμίτες ερυθρού χρώματος με αδρομερέστερα κλαστικά ιζήματα και ασβεστόλιθους. Αποτελεί την κύρια επιφάνεια αποκόλλησης και επώθησης του καλύμματος στην υποκείμενη σειρά της Τρίπολης και βιβλιογραφικά περιγράφεται ως πρώτος φλύσχης της ενότητας της Πίνδου. Τα απολιθώματα σπανίζουν. Οι περιορισμένες εμφανίσεις του ορίζοντα αυτού οριοθετούν συνήθως το Αρκαδικό κάλυμμα από την υποκείμενη ενότητα της Τρίπολης.
- Ανώτερο Κρητιδικό (Ks): Αποτελεί το κάλυμμα με τη σημαντικότερη εξάπλωση στον Κτενιά και στο Αρτεμίσιο. Πρόκειται για πολυπτυχωμένους λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους λευκού, κίτρινου, και ερυθρού χρώματος, πελαγικής φάσης με ενστρώσεις και κονδύλους κερατολίθων. Περιλαμβάνει επίσης ενστρώσεις παχυστρωματοδών μικροκρυσταλλικών ασβεστόλιθων και μαργών σε εναλλαγές και περιέχει ακτινόζωα και τρηματοφόρα όπως *Globotruncana* κ.α.
- Μαιστρήχτιο - Παλαιόκαινο (Fo): Περιλαμβάνει το φλύσχη ο οποίος αποτελεί ένα σύμπλεγμα από ασβεστιτικούς σχιστόλιθους και μάργες. Κατά θέσεις απαντούν σερπεντινωμένα εκρηξιγενή πετρώματα και ασβεστόλιθοι. Η έναρξη της απόθεσης του φλύσχη είναι στο Μαιστρήχτιο με μεταβατικά στρώματα συνιστάμενα από εναλλαγές μαργών και λεπτοπλακώδων ασβεστόλιθων συνήθως τεφρών με ενστρώσεις και κονδύλους πυριτόλιθων μαύρου ή ερυθρού χρώματος. Περιέχουν ακτινόζωα και τρηματοφόρα. Αναπτύσσεται σε συνέχεια με τους προηγούμενους ασβεστόλιθους ή παρεμβάλλονται σε αυτούς λόγω τεκτονικών λεπιώσεων ενώ παρουσιάζουν επίσης σημαντική εξάπλωση.

4.1.2.3 Η ενότητα Άκρος

Στην διδακτορική διατριβή του (Γιαννουλόπουλος, 2000) η ενότητα Άκρος αναφέρεται ως ιζήματα

μετάβασης από την ζώνη της Πίνδου στην Πελαγονική ζώνη. Η ενότητα αυτή ανήκει στην ενότητα της Δυτικής Θεσσαλίας – Βοιωτίας και αναφέρονταν ως ιζήματα μετάβασης λόγω των εναλλαγών νηριτικής και πελαγικής φάσης των σχηματισμών για το διάστημα Τριαδικό – Ιουρασικό. Χαρακτηριστικό της ενότητας είναι η γνωστή «φάση θυμιάματος», που αποτελείται από πελαγικούς ασβεστόλιθους με *Globotruncanes*, κυρίως όμως με κλαστικούς λατυποπαγείς ασβεστόλιθους με λατύπες οφιολίθων και κερατόλιθων (Παπανικολάου, 2014). Ο συγκεκριμένος σχηματισμός εμφανίζεται στην περιοχή του κάστρου του Άργους (Καμπόσος, 2016). Η στρωματογραφική κολώνα της ενότητας εμφανίζεται ως εξής (Γιαννουλόπουλος, 2000):

- Κάτω Κρητιδικό - Τουρώνιο (K1-7): Περιλαμβάνει κλαστικούς ασβεστόλιθους με παρεμβολές μαργών και μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Απαντούν κυρίως στο Παλαμήδι, στην Άρια καθώς και στην Τίρυνθα και στο Μπούρτζι.
- Τουρώνιο – Σενώνιο (K7-8): Πρόκειται συνήθως για παχυστρωματώδεις, κιτρινόχρωμους κατά θέσεις μαργαϊκούς ασβεστόλιθους.
- Σενώνιο (K8): Περιλαμβάνει στιφρούς, λευκορόδινους έως κιτρινόλευκους με ενστρώσεις και κονδύλους πυριτόλιθων. Κατά θέσεις μεταπίπτουν προς στρωματογραφικά κατώτερους ορίζοντες.
- Μαιστρήχτιο (Fs-o): Αντιπροσωπεύεται από το φλύσχη ο οποίος συνίσταται από ασβεστιτικούς σχιστόλιθους, μάργες ερυθροϊώδους χρώματος, ψαμμιτομάργες, ψαμίτες και κροκαλοπαγή με ενστρώσεις κλαστικών ασβεστόλιθων. Στα μεταβατικά ιζήματα από τους ασβεστόλιθους απαντούν οφιολιθικά σώματα από διάβασες, σπηλίτες και σερπεντινωμένους περιδοτίτες.

4.1.2.4 Η υπο – Πελαγονική ενότητα / ενότητα Ανατολικής Ελλάδας

Η υπο – Πελαγονική ενότητα και ενότητα Ανατολικής Ελλάδας εμφανίζονται γεωγραφικά στην ανατολική και βορειοανατολική περιφέρεια του Αργολικού πεδίου και στην Ανατολική Αργολίδα (Γιαννουλόπουλος, 2000). Οι ενότητες αυτές ανήκουν στον ίδιο παλαιογεωγραφικό χώρο και βασικό τους χαρακτηριστικό είναι οι οφιολιθικές μάζες που επωθούνται της υποπελαγονικής και της μαλιακής ενότητας αλλά και η ανοκρητιδική επίκλιση με την σχιστοψαμμιτοκερατολιθική διάπλαση της ενότητας Ανατολικής Ελλάδας (Παπανικολάου, 2014). Η στρωματογραφική στήλη των ενότητων είναι η ακόλουθη (Bennert, 1972; Τατάρης, Καλέργης, & Κούνης, 1964):

- Το υπόβαθρο (P-TR.t,tj), της ενότητας αυτής στην περιοχή, δομείται από τραχείτες και τραχειτικούς τόφφους. Εμφανίζεται σε δύο αντικλινικές δομές στην περιοχή του Θεάτρου και στον οικισμό Αδάμι.
- Στο Κατ. Ανίσιο - Κάρνιο (T2-4,hn) απαντούν βαθυκόκκινοι έως καστανοί κερατόλιθοι επικείμενοι στους τραχείτες.
- Στο Ανίσιο - Κάρνιο (T2-4.k,hn) απαντούν κιτρινωποί ασβεστόλιθοι με σαφή στρώση και συχνές παρεμβολές στρωμάτων και κονδύλων κερατόλιθων. Κατά θέσεις είναι λεπτοπλακάδεις.

Απαντούν επίσης και οι παχυστρωματώδεις αμμωνιτοφόροι ασβεστόλιθοι γνωστοί ως ασβεστόλιθοι του Ασκληπιείου (T2-4.,κ).

- Στο Κάρνιο - Alamo (Trs-Ji-m) απαντούν οι ασβεστόλιθοι του "Παντοκράτορα". Πρόκειται για ανοιχτότεφρους ασβεστόλιθους με λεπτά στρώματα δολομίτη που υπόκεινται της σχιστοψαμμιτοκερατολιθικής διάπλασης. Στα ανώτερα τμήματα τους γίνονται ωολιθικοί. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη ανάπτυξη στην ανατολική Αργολίδα. Ο ορεινός όγκος του Αραχναίου δομείται σχεδόν αποκλειστικά από το σχηματισμό αυτό. Είναι έντονα ρωγματομένοι και καρστικοποιημένοι.
- Στο Αν. Λιάσιο - Δογγέριο (Ji-m.k) αναπτύσσονται οι ασβεστόλιθοι τύπου "Ammoniaco Rosso".
- Μέσο - Αν. Ιουρασικό (Jm-Sh). Το Μέσο Ιουρασικό δομείται από ασβεστόλιθους χονδροπλακώδεις έως μεσοπλακώδεις με ενστρώσεις και κονδύλους πυριτόλιθων ενώ μέσα σε αυτούς αναπτύσσεται η "σχιστοψαμμιτοκερατολιθική" διάπλαση. Το Αν. Ιουρασικό δομείται από ωολιθικούς ασβεστόλιθους και απαντά μόνο στις βόρειες παρυφές του Αραχναίου.
- Σχιστοψαμμιτοκερατολιθική διάπλαση - Ιουρασικό -Κ. Κρητιδικό (Sh). Είναι η πλέον αντιπροσωπευτική σειρά της ζώνης της Ανατολικής Ελλάδας. Δομείται από ποικιλία πετρωμάτων με επικράτηση σχιστόλιθων, ψαμμιτών, κερατολίθων. Επίσης περιέχει οφιολιθικά σώματα, τοφφικά κροκαλοπαγή και φακούς ασβεστόλιθων.
- Κρητιδικό - Μ. Ηώκαινο (K-em). Δομείται από παχυστρωματώδεις, λεπτοκρυσταλλικούς ρουδιστοφόρους ασβεστόλιθους. Κατά θέσεις περιέχουν κομμάτια Ιππουριτών.

4.1.3 Μεταλλικά ιζήματα

Τα μεταλλικά ιζήματα αποτελούν Νεογενείς και Τεταρτογενείς σχηματισμούς που δομούν την αργολική πεδιάδα και τους λόφους βόρεια και βορειοδυτικά στον οικισμό Φίχτια (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Τα Νεογενή ιζήματα είναι Πλειοκαινικής – Άνω Πλειστοκαινικής ηλικίας και υπάρχουν εμφανίσεις στην περιοχή Στέρνα – Φιχτίων και στις βορειοανατολικές παρυφές της πεδιάδας. Τα ιζήματα αυτά συνίστανται από λευκοκίτρινες μάργες εναλλασσόμενες με χονδρόκοκκους ψαμμίτες, ψαμμιτομάργες, ψηφιοπαγή και κροκαλοπαγή σε εναλλαγές με μαργαϊκά ψαμμιτοκροκαλοπαγή. Το πάχος τους υπερβαίνει τα 100 μ. και είναι πιθανόν Καλαβρίας ηλικίας (Θεοδωρόπουλος, Ζαμάνη 1970). Χαρακτηριστικό των στρωμάτων αυτών είναι η απουσία μικροπανίδας και η κλίση προς το νότο κατά 20° περίπου (Γιαννουλόπουλος, 2000; Γάκη - Παπαναστασίου, 1991). Είναι αποθέσεις κυρίως ποταμοχειμάρριες και λιμναίες πάνω στο αλπικό υπόβαθρο των ενοτήτων Τρίπολης Πίνδου και Υποελαγονικής (Παπασταματίου κ.α., 1970). Μικρής έκτασης Νεογενή θαλάσσιας φάσης απαντώνται στην περιοχή του Κιβερίου και συνίστανται κυρίως από μάργες και ψαμμιτομάργες (Γιαννουλόπουλος, 2000). Στις περιοχές Κεφαλαρίου - Κιβερίου και Ναυπλίου απαντώνται θαλάσσιες αναβαθμίδες από κροκαλοπαγή, πιθανόν Τυρρήνιας ηλικίας (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Τα Τεταρτογενή ιζήματα ομαδοποιούνται σε μικρής έκτασης θαλάσσια κροκαλοπαγή, ποταμοχερσαίες αποθέσεις, πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων, ποταμοχερσαία δελταϊκά ριπίδια και σε αλλουβιακές αποθέσεις. Τα συγκεκριμένα ιζήματα παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην περιοχή, καθώς και στην παρούσα έρευνα, γιατί λόγω της λιθοστρωματογραφικής τους δομής και εξάπλωσης φιλοξενούν μεγάλες ποσότητες νερού (Γιαννουλόπουλος, 2000). Αποτελούνται από ασύνδετα υλικά προσχώσεων, υλικά ελουβιακού μανδύα και κλαστικές αποθέσεις στις κοίτες ποταμών και χειμάρρων, όπου μπορεί να σχηματίζουν αναβαθμίδες ύψους μέχρι και 2m. Περιλαμβάνουν κροκάλες, χαλίκια και κατά θέσεις αμμούχες αργίλους (Καμπόσος, 2016). Πιο συγκεκριμένα η λιθολογία τους είναι η εξής (Γιαννουλόπουλος, 2000):

- Αργιλώδη ιζήματα (άργιλος, μαργαϊκή άργιλος, μάργα).
- Κλαστικά ιζήματα ασύνδετα (άμμος, ασβεστολιθικές ψηφίδες, χάλικες και κροκάλες).
- Χημικά ιζήματα (ασβεστολιθικά συγκρίματα) και οργανικά (βιοκλαστικά) ιζήματα (τύρφη, κοραλλιογενείς ορίζοντες, τράπεζες ελασματοβραγχίων).

4.2 Τεκτονικά στοιχεία

Στην Αλπική ορογένεση οι τεκτονικές κινήσεις που αφορούν την διαμόρφωση των παλαιγεωγραφικών χώρων και την επώθηση των εσωτερικών Ελληνίδων στις Εξωτερικές έγιναν με διεύθυνση Α – Δ (Παπανικολάου, 2014). Στην περιοχή μελέτης γράφει ο (Γιαννουλόπουλος, 2000) σύμφωνα με τις πηγές (Τατάρης, Καλλέρης, 1965) ότι οι τεκτονικές οριζόντιες ολισθήσεις έλαβαν χώρα από ΒΑ – ΝΔ.

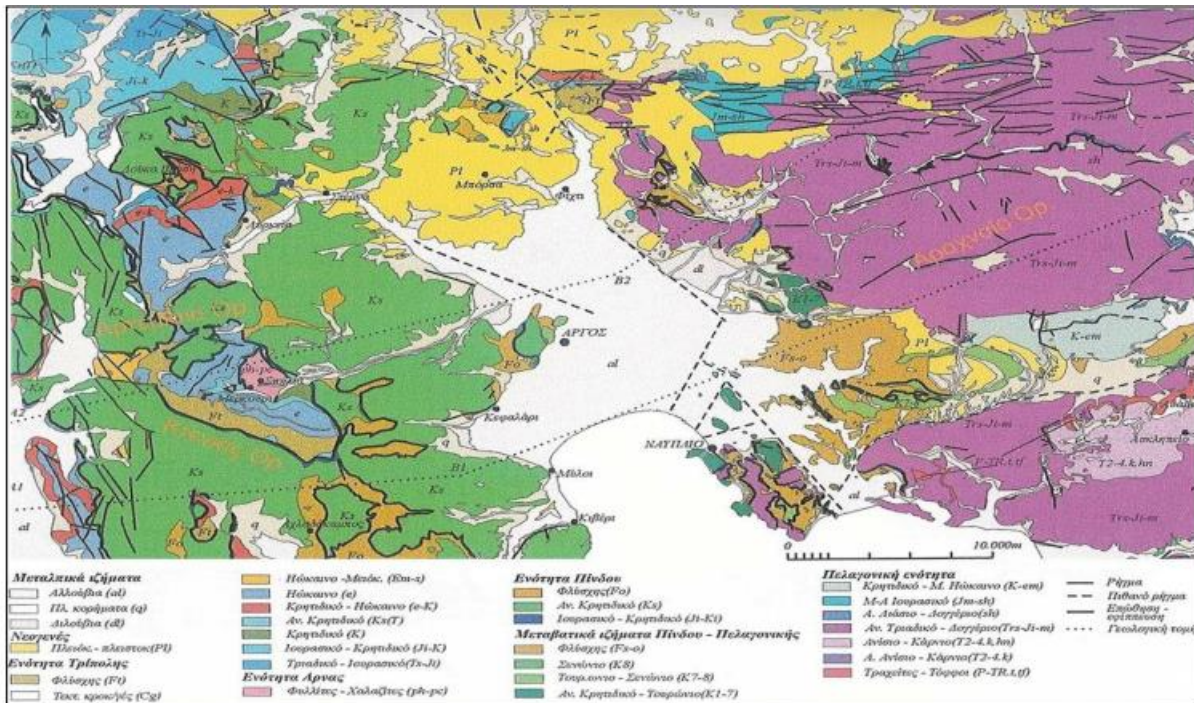
Στο Αργολικό πεδίο τα τεκτονικά στοιχεία που απαντώνται είναι επωθήσεις, επιπεύσεις και ρήγματα κατά την αλπική ορογένεση και ρήγματα που σχηματίστηκαν μετά την αλπική ορογένεση. Όσον αφορά την αλπική τεκτονική, το Αργολικό πεδίο βρίσκεται στα σύνορα των Εξωτερικών και των Εσωτερικών από ανατολικά προς δυτικά, αντίστοιχα (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991; Γιαννουλόπουλος, 2000). Στη δυτική ζώνη (Αργολικό πεδίο - οροπέδιο Τρίπολης) κυριαρχούν ρήματα μικρής σχετικά έκτασης, κυρίαρχης διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ ενώ αντίθετα ανατολικά (Αραχναίο) κυριαρχούν εκτεταμένα ρήματα μέσης διεύθυνσης ΑΒΑ-ΔΝΔ (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Στις παρυφές του Αργολικού πεδίου εντοπίζονται κανονικά ρήγματα με διεύθυνση ΒΔ – ΝΑ και ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης με διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991; Γιαννουλόπουλος, 2000). Νοτιοδυτικά της πόλης του Άργους διαπιστώθηκε η ύπαρξη ενός ρήματος διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ (Κιβέρι – Λέρνη – Κεφαλάρι). Στη δράση αυτού του ρήματος αποδίδεται η γραμμική διευθέτηση τεσσάρων καρστικών πηγών, που από βορρά προς νότο εμφανίζονται σε ελαττούμενα υψόμετρα (Κεφαλάρι Άργους, Λέρνης, Κιβερίου και Ανάβαλου Άστρους) (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991).

Διακρίνονται δύο κύριες πτυχογόνες παραμορφωτικές φάσεις, η Παλαιοαλπική (Νεοκιμερική) αποτυπωμένη στους Τριαδικούς και Ιουρασικούς ασβεστόλιθους των ανατολικών παρυφών της πεδιάδας η

οποία έδωσε πτυχές με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, και η Νεοαλπική (Λαραμική ή Πυρηναϊκή) που είναι αποτυπωμένη κυρίως στους Κρητιδικούς ασβεστόλιθους με πτυχές διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ (Γιαννουλόπουλος, Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό Πεδίο, 2000). Ο ορεινός όγκος Τραπεζόνας - Αραχναίου έχει τεμαχιστεί από ισχυρά ρήγματα διεύθυνσης περίπου Α-Δ με μεταπτώσεις προς το Νότο. Οι λόφοι βόρεια του Ναυπλίου είναι τεκτονικά ράκη από πτυχωμένους ασβεστόλιθους με πτυχές διεύθυνσης Α-Δ έως ΒΔ (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Σημαντικό τεκτονικό γεγονός αποτελεί η μεταλπική τεκτονική κατά την οποία δημιουργήθηκαν εφελκυστικά ρήγματα μεγάλης κλίσης και ισχυρές στρέψεις ρηξιτεμάχων, που συνοδεύτηκε από την απόθεση μεγάλου πάχους Ανωπλειοκαινικών – Ανωπλειστοκαινικών αποθέσεων. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε το τεκτονικό βύθισμα της Αργολικής πεδιάδας (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991; Γιαννουλόπουλος, 2000; Καμπόσος, 2016).



Εικόνα 12: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής (σύνθεση από υφιστάμενους Γεωλογικούς Χάρτες έκδοσης ΙΓΜΕ, κλίμακα 1:50.000 (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Κεφάλαιο 5^ο: Επιφανειακή Υδρολογία

5.1 Υδρομετεωρολογικός σταθμός

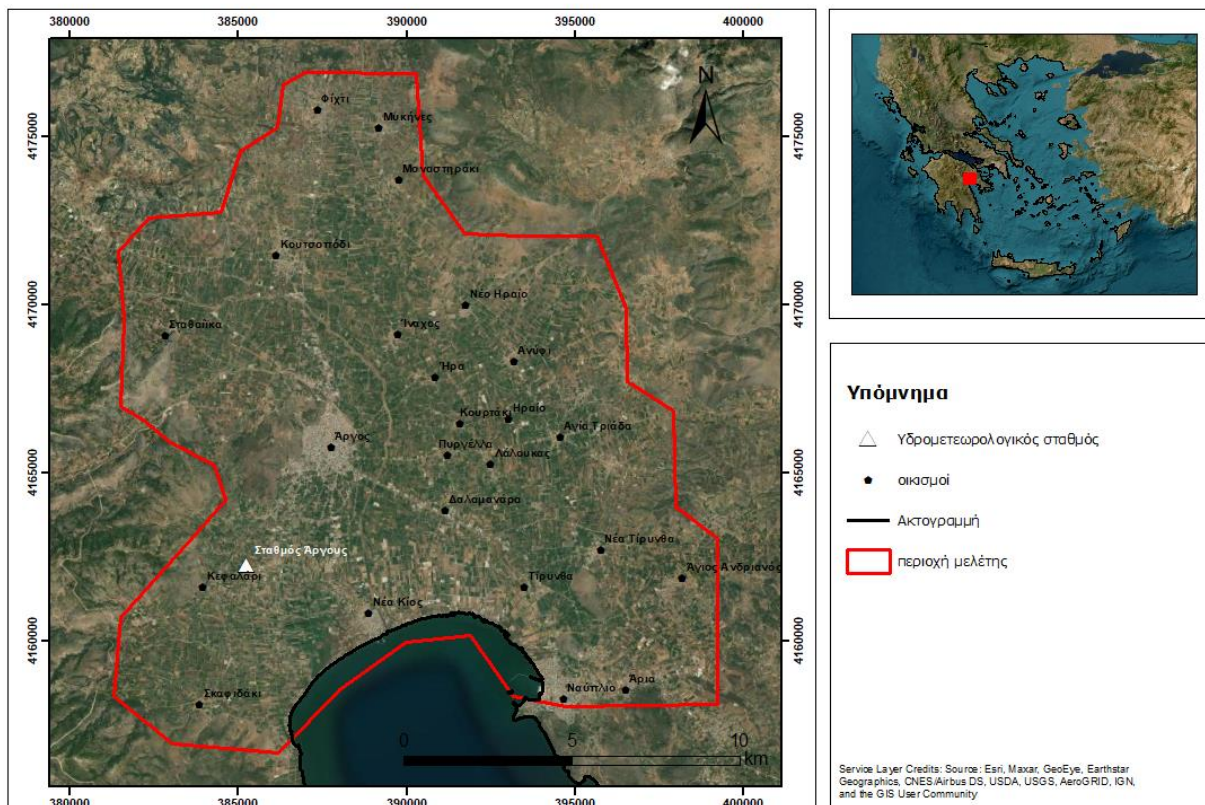
Τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής μελέτης λήφθηκαν από τον υδρομετεωρολογικό σταθμό «Άργος», ο οποίος βρίσκεται υπό την αιγίδα του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και τα δεδομένα αναρτώνται σε απλουστευμένης μορφής κλιματικές πληροφορίες στην ιστοσελίδα [meteo search \(https://meteosearch.meteo.gr/\)](https://meteosearch.meteo.gr/). Ο συγκεκριμένος σταθμός βρίσκεται νοτιοδυτικά της περιοχής μελέτης κοντά στον οικισμό Κεφαλάρι. Πιο συγκεκριμένα, οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθμού είναι οι εξής: (φ,λ,): (37° 36', 22° 42') και βρίσκεται σε υψόμετρο +38 m.

Σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (WMO) η πυκνότητα του υδρομετεωρολογικού δικτύου εξαρτάται από τις μετεωρολογικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Ειδικότερα προτείνει (Μιμίκου & Μπαλάς, 2018):

- Έναν βροχογράφο ανά 600 – 900 km² σε επίπεδες περιοχές για ήπιες μεσογειακές και τροπικές ζώνες.
- Έναν βροχογράφο ανά 100 – 250 km² σε ορεινές περιοχές για ήπιες μεσογειακές και τροπικές ζώνες.
- Έναν βροχογράφο ανά 25 km² σε ημιορεινές περιοχές για ήπιες μεσογειακές και τροπικές ζώνες.
- Έναν βροχογράφο ανά 1500 – 10000 km² σε ξηρές και πολικές ζώνες.

Επομένως, σύμφωνα με τα κριτήρια αυτά εφόσον η περιοχή μελέτης της συγκεκριμένης εργασίας καταλαμβάνει έκταση 242,9 km², ο σταθμός του Άργους αποτελεί ικανοποιητική και έγκυρη πηγή δεδομένων για την περεταίρω ανάλυση των κλιματικών πληροφοριών.

Γεωγραφική θέση Υδρομετεωρολογικού Σταθμού Άργους



Εικόνα 13: Χάρτης γεωγραφικής θέσης υδρομετεωρολογικού σταθμού «Άργος».

5.2 Βροχομετρικά δεδομένα

Το Αργολικό πεδίο χαρακτηρίζεται ως τυπική πεδινή έκταση με κλίμα υποτροπικό – μεσογειακό με σχετικά ξηρά και υγρά καλοκαίρια και υγρούς και ψυχρούς χειμώνες. Ο συγκεκριμένος σταθμός έχει καταγράψει όλες τις κλιματικές πληροφορίες για την περίοδο Αύγουστος 2012 – Δεκέμβριος 2022.

Έτος	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Σύνολο (mm/yr)
2012	-	-	-	-	-	-	-	0	71,4	56	23,2	69,8	220,4
2013	76,6	46	17,4	5,4	33,2	6	0,2	0,8	26	46	131,2	165,4	554,2
2014	89,8	34,6	39,6	70	2,8	21,2	1,8	9,8	48	48	54,2	100	519,8
2015	52,4	73,6	109,4	2,8	34	33,2	0	36,8	51,4	66	20,2	3,2	483
2016	31,6	4	51	0,2	6,6	11,8	0	4,2	139,6	71	60,4	23,8	404,2
2017	85,6	11	37,4	10,4	15,2	51,2	40,4	12	2,8	10,4	87	64,6	428
2018	35,4	142	5,6	29,8	37,8	83,6	27,4	1	192	13,2	88,8	132,4	789
2019	216,8	40,8	73,8	66,8	2,8	7,4	30,4	0	6,2	21,2	140,8	54,6	661,6
2020	15	5,2	68,8	78,4	22	18,4	2,2	13,8	23,4	42,8	28,6	117,8	436,4
2021	68	30,2	19	14,6	0	31,8	0,4	0,6	13,2	145,8	56	47,6	427,2
2022	71,4	20,6	27,4	26,6	14	9,8	4,2	7	58,8	50,8	50,8	25,2	366,6

Πίνακας 7: Βροχομετρικά δεδομένα για την περίοδο 2012 - 2022.

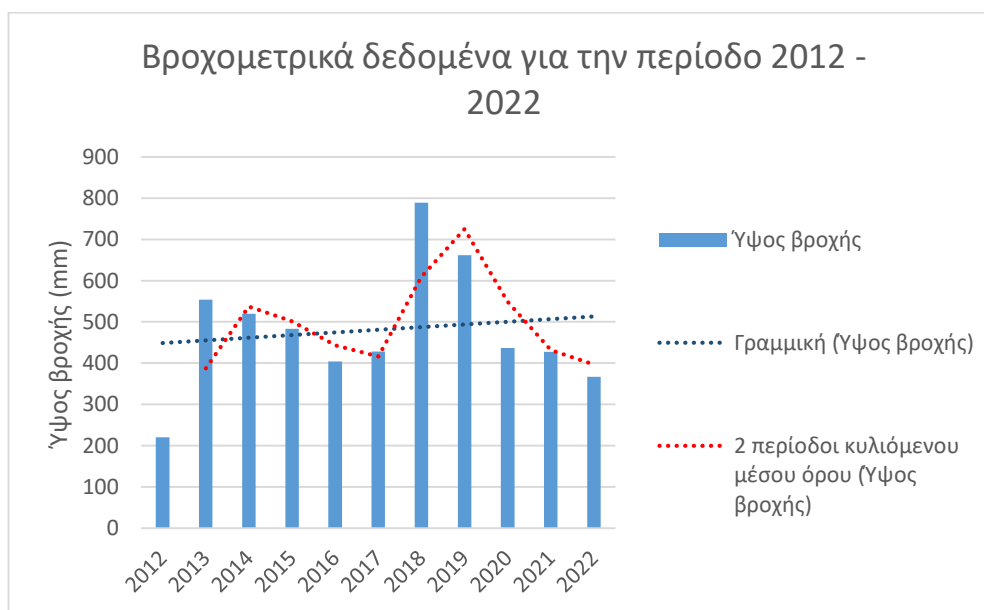
ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Παρατηρείται ότι η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 480,9 mm και οι τιμές της ελάχιστης και μέγιστης ετήσιας βροχόπτωσης είναι 220,4 mm και 789 mm, αντίστοιχα.

ΕΤΟΣ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Σύνολο (mm/yr)
Μέση τιμή	74,3	40,8	44,9	30,5	16,8	27,4	10,7	7,8	57,5	51,9	67,4	73,1	509,7
Ελάχιστη τιμή	15,0	4,0	5,6	0,2	0,0	6,0	0,0	0,0	2,8	10,4	20,2	3,2	67,4
Μέγιστη τιμή	216,8	142	109,4	78,4	37,8	83,6	40,4	36,8	192	145,8	140,8	165,4	1389,2
Τυπική απόκλιση	55,8	41,4	31,6	30,1	14,2	24,3	15,6	10,9	59,1	37,0	42,6	50,5	413,0

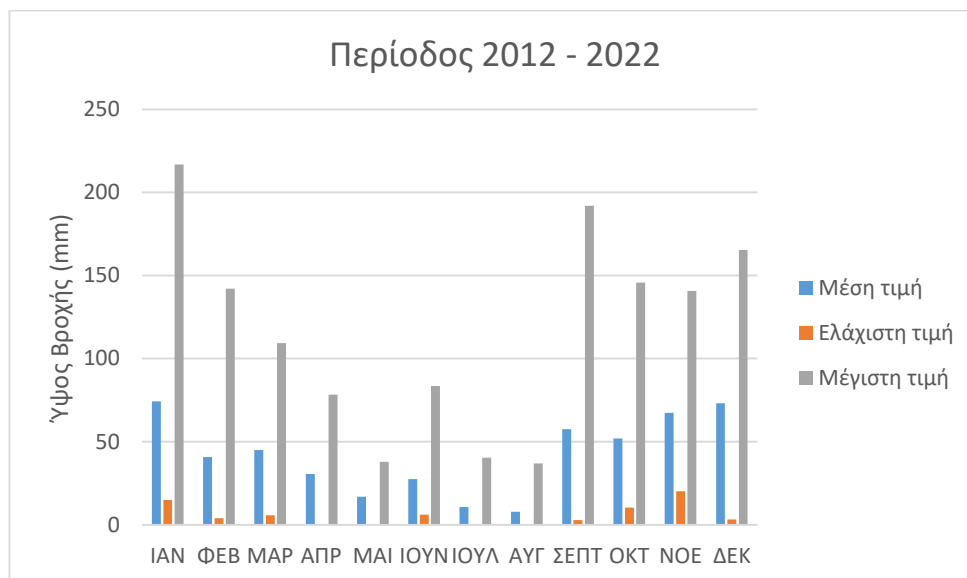
Πίνακας 8: Στατιστικά στοιχεία των υψών βροχής σε mm για την περίοδο 2012 – 2022.

Στο **Σχήμα 6** απεικονίζεται η διακύμανση των βροχομετρικών δεδομένων από το 2012 – 2022. Παρατηρείται ότι για την συνολική περίοδο η γραμμική τάση παρουσιάζεται μια μικρή αυξητική τάση των 50 mm, ενώ ο κυλιόμενος μέσος 2 περιόδων παρουσιάζει έντονη φθίνουσα τάση για την περίοδο 2021 – 2022. Η αυξητική τάση ίσως οφείλεται στην έλλειψη δεδομένων από τον Ιανουάριο έως τον Ιούλιο. Η κανονική εικόνα δείχνει μείωση των κατακρημνισμάτων, όπως δείχνει και ο κυλιόμενος μέσος.



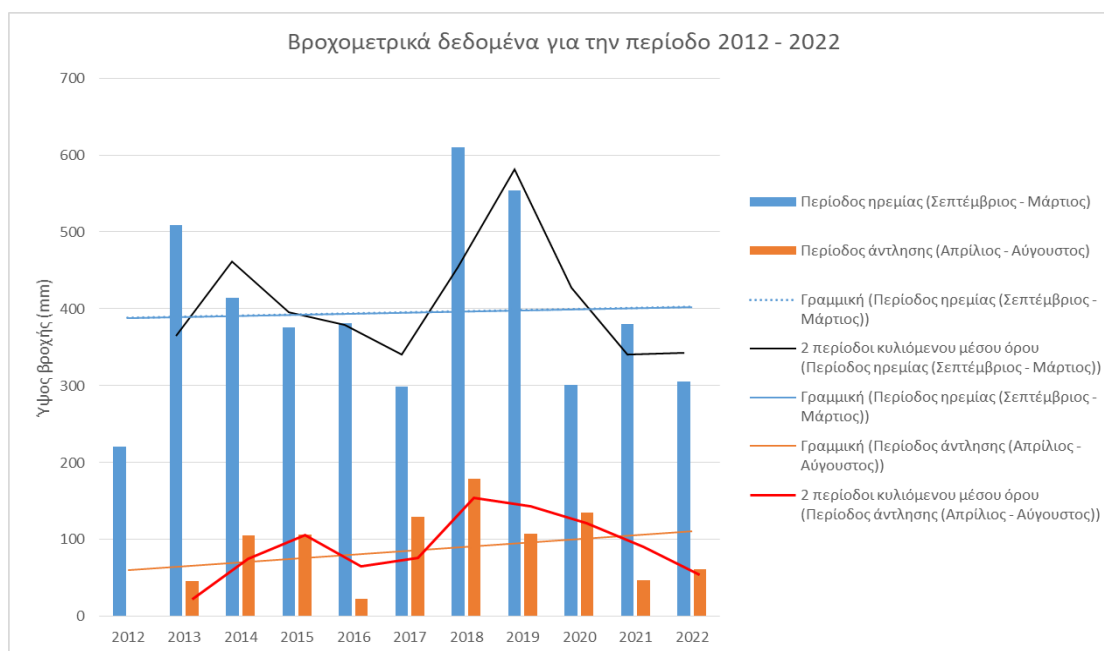
Σχήμα 6: Διακύμανση βροχομετρικών δεδομένων για την περίοδο 2012 – 2022.

Στο **Σχήμα 7** απεικονίζονται οι μηνιαίες βροχές για την μέση, ελάχιστη και μέγιστη τιμή για την περίοδο 2012 – 2022. Παρατηρείται ότι οι πιο βροχεροί μήνες είναι από τον Σεπτέμβριο μέχρι τον Μάρτιο και αυτή η περίοδος ονομάζεται περίοδος ηρεμίας, και οι ξηρότεροι μήνες είναι από τον Απρίλιο έως τον Αύγουστο, η οποία περίοδος ονομάζεται περίοδος άντλησης.



Σχήμα 7: Απεικόνιση μέσης, ελάχιστης και μέγιστης τιμής μηνιαίων βροχών σε mm για την περίοδο 2012 – 2022.

Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται η ετήσια διακύμανση των περιόδων ηρεμίας και άντλησης, αντίστοιχα, για την περίοδο 2012 – 2022. Παρατηρείται στην περίοδο ηρεμίας ότι η γραμμή τάσης έχει ελάχιστα μικρή αυξητική τάση, ενώ ο κυλιόμενος μέσος 2 περιόδων στην περίοδο 2019 – 2021 παρουσιάζει έντονα πτωτική τάση και για την περίοδο 2021 – 2022 παρουσιάζει ελάχιστα αυξητική. Για την περίοδο άντλησης η γραμμή τάσης παρουσιάζει ευκρινή αυξητική τάση της τάξεως των 50 mm, ενώ ο κυλιόμενος μέσος 2 περιόδων έχει πτωτική τάση από το 2018 – 2022. Η αυξητική τάση ίσως οφείλεται στην έλλειψη δεδομένων από τον Ιανουάριο έως τον Ιούλιο. Η κανονική εικόνα δείχνει μείωση των κατακρημνισμάτων, όπως δείχνει και ο κυλιόμενος μέσος.



Σχήμα 8: Η ετήσια διακύμανση βροχής σε mm για τις περιόδους ηρεμίας και άντλησης για την περίοδο 2012 – 2022.

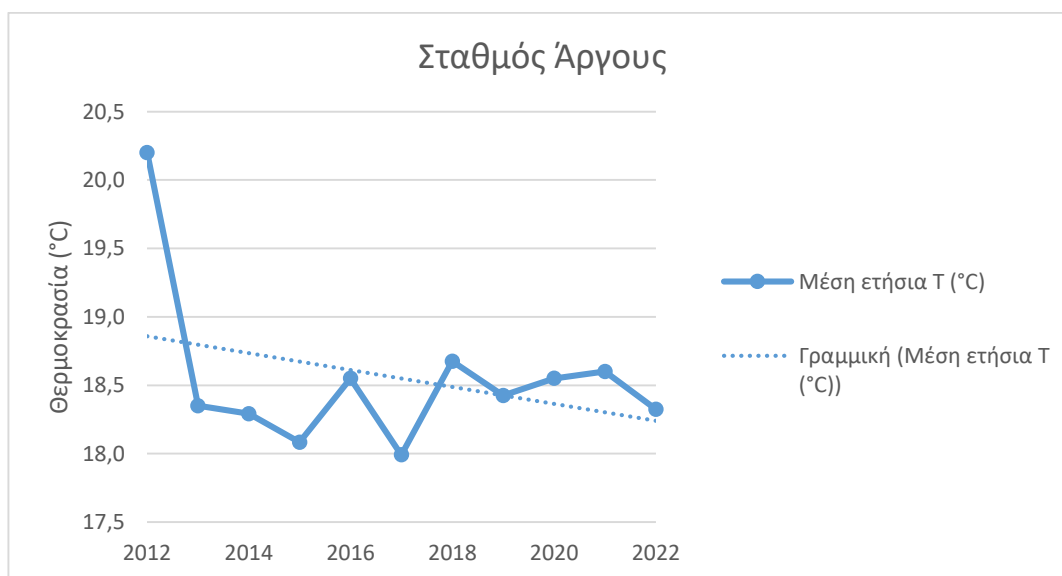
5.3 Θερμοκρασιακά δεδομένα

Για τον υπολογισμό της ετήσιας θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν τα θερμοκρασιακά δεδομένα που κατέγραψε ο σταθμός «Άργος» για την περίοδο 2012 – 2022.

Έτος	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠΤ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	Μέση ετήσια T (°C)
2012	-	-	-	-	-	-	-	29	24,5	21,1	16	10,4	20,2
2013	9,5	10,8	13	16,9	22	25	27,6	28,6	23,3	18,5	15,1	9,9	18,4
2014	11,2	11,5	12,8	15,5	19,9	24,7	27,1	27,9	23,5	18,8	14,8	11,8	18,3
2015	9,1	9,1	11,9	15,2	20,6	23,6	28,3	28,3	24,9	19,5	16	10,5	18,1
2016	10,5	13,5	12,9	18,4	20,1	26	28,4	27,9	23,4	18,8	14,4	8,3	18,6
2017	6,9	10,6	13,2	15,3	20,8	24,8	28,2	28,9	23,7	18,6	14	10,9	18,0
2018	10	11,6	14,4	17,9	22,1	24,7	27,4	27,9	23,8	19,1	15,5	9,7	18,7
2019	8,2	9,9	12,9	14,8	18,8	26,3	27,6	29,2	24,3	20,8	16,5	11,8	18,4
2020	9,3	11,1	13,1	14,9	20,3	23,8	28,2	27,8	25,6	20,3	15,2	13	18,6
2021	11,3	11,6	11,7	15,4	21,6	24,3	29,8	29	23,8	17,9	15,8	11	18,6
2022	8,1	10,7	9,1	16,1	20,5	26,5	28,6	27,9	23,6	19,8	15,8	13,2	18,3

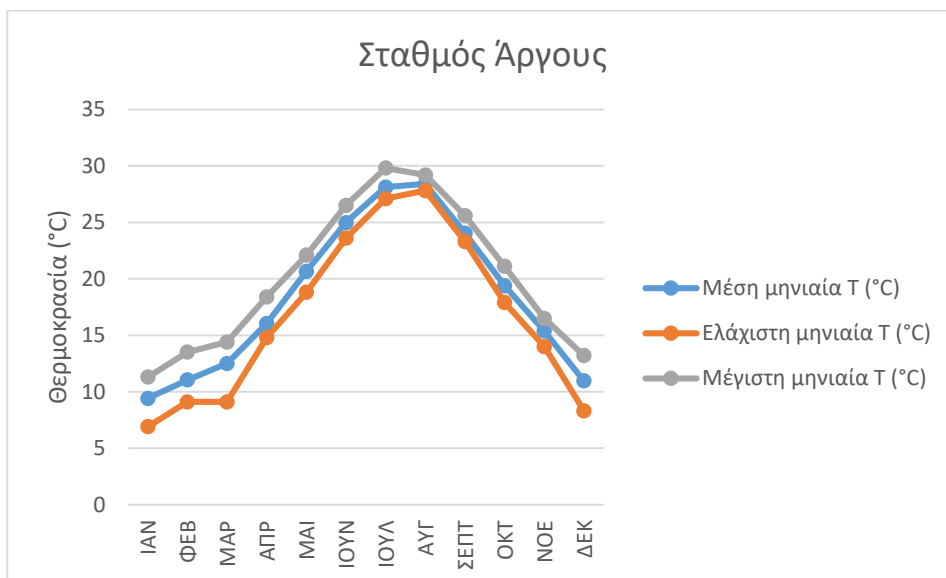
Πίνακας 9: Θερμοκρασιακά δεδομένα σε °C για την περίοδο 2012 – 2022.

Παρατηρείται ότι η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 18,5 °C, ενώ οι τιμές της ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασία είναι 18,0 °C και 20,2 °C, αντίστοιχα.



Σχήμα 9: Η ετήσια θερμοκρασιακή διακύμανση που έχει καταγραφεί από τον σταθμό «Άργος» για την περίοδο 2012 – 2022.

Στο Σχήμα 9 παρατηρούμε ότι για την συνολική περίοδο η γενική διακύμανση της θερμοκρασίας είναι ± 2 °C, που ίσως αυτό να οφείλεται στην έλλειψη θερμοκρασιακών δεδομένων κατά τους χειμερινούς μήνες το έτος 2012. Επίσης, η γραμμή τάσης φαίνεται να παρουσιάζει πτωτική τάση κατά 1 °C. Στο Σχήμα 10 απεικονίζεται η διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας για την συγκεκριμένη περίοδο. Επιπλέον, διακρίνεται ότι ο μήνας Ιούλιος αποτελεί από τους ζεστότερους μήνες με την μεγαλύτερη θερμοκρασία να έχει καταγραφεί το 2021 με 29,8 °C.



Σχήμα 10: Η διακύμανση της μέσης, ελάχιστης και μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας για την περίοδο 2012 – 2022.

5.4 Υπολογισμός εξατμισοδιαπνοής

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής εφαρμόστηκε η μέθοδος Thornthwaite, η οποία μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για περιορισμένη διαθεσιμότητα νερού. Η εξίσωση εκτιμά τη μηνιαία εξατμισοδιαπνοή με βάση τη μέση μηνιαία θερμοκρασία και η μορφή της είναι η εξής (Μιμίκου & Μπαλλάς, 2018):

$$E_p = 16 \left(\frac{10t_i}{J} \right)^a \frac{\mu N}{360}$$

Όπου E_p , είναι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα, t_i η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C, μ ο αριθμός των ημερών, N η μέση αστρονομική διάρκεια ημέρας:

$$N = 1,46 \times P_i$$

P_i , ποσοστό ωρών ημέρας κάθε μήνα που δίνεται από πίνακα με γραμμική παρεμβολή ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος της εκάστοτε λεκάνης

J ο ετήσιος δείκτης θερμοκρασίας και a μια εμπειρική παράμετρος που εξαρτάται από τον δείκτη J ($a = 0,016J + 0,5$). Ο δείκτης J δίνεται από την σχέση:

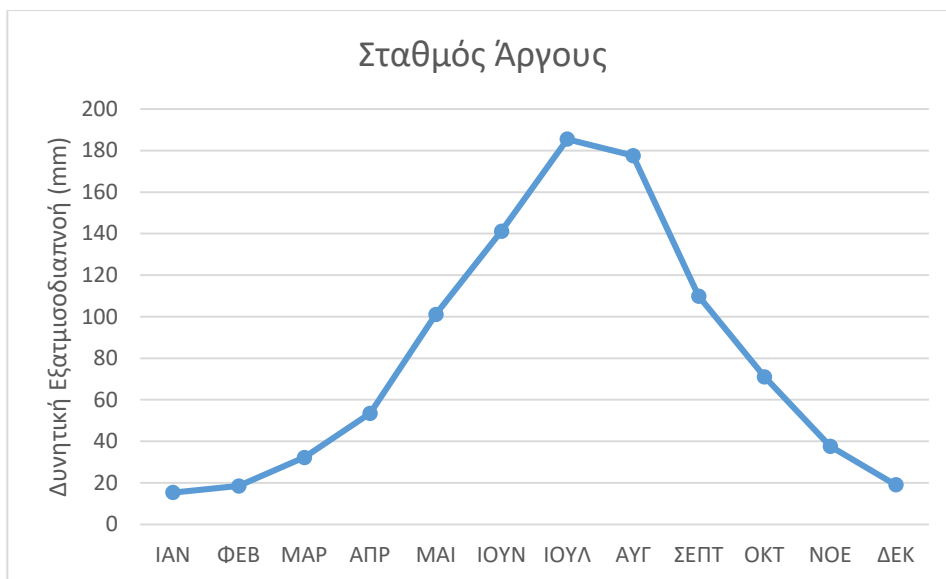
$$J = \sum_{j=1}^{12} j_i$$

Ενώ ο μηνιαίος δείκτης θερμοκρασίας j_i είναι συνάρτηση της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας κατά την εξίσωση:

$$j_i = 0,09t_i^{3/2}$$

Στο **Σχήμα 11** παρουσιάζεται η μηνιαία διακύμανση της τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για την περίοδο 2012 – 2022. Παρατηρείται ότι η μέγιστη και ελάχιστη τιμή για το συγκεκριμένο σταθμό είναι 185,48

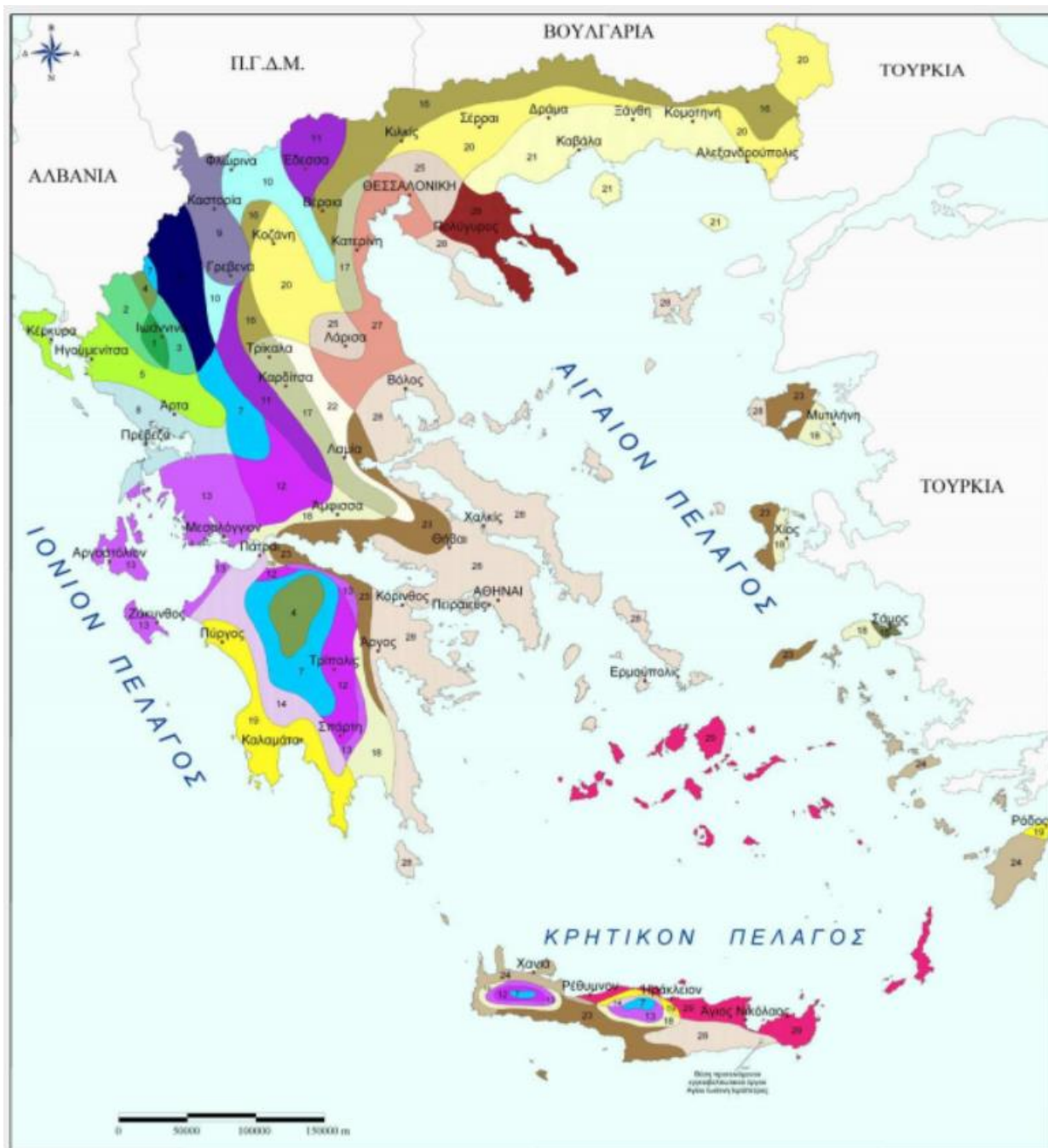
mm/μήνα και 15,30 mm/μήνα.



Σχήμα 11: Διακύμανση της μηνιαίας τιμής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για την περίοδο 2012 – 2022.

5.5 Κλιματική κατάταξη περιοχής μελέτης

Το Αργολικό πεδίο σύμφωνα με τον χάρτη κλιματικής ταξινόμησης της Ελλάδας κατά Thornthwaite ανήκει στην κατηγορία 28 και το κλίμα περιγράφεται ως πολύ ξηρό προς ξηροθερμικό, με επίδραση της θάλασσας (Καρράς, 1973). Ένας άλλος τρόπος κλιματικής κατάταξης είναι η κατάταξη κατά Köppen με βάση το ετήσιο θερμοκρασιακό εύρος. Το μέσο θερμοκρασιακό εύρος αποτελεί τη διαφορά μεταξύ της μέσης θερμοκρασίας του ψυχρότερου μήνα ετησίως, T_{ψ} , και της μέσης θερμοκρασίας του θερμότερου μήνα, T_{θ} . Έτσι, το θερμοκρασιακό εύρος υπολογίζεται μεταξύ 9,4 – 29,8 °C. Επομένως, η περιοχή μελέτης ανήκει στο κλιματικό τύπο Csa, ο οποίος αντιστοιχεί σε μεσογειακό τύπο κλίματος ή μεσόθερμο με ξηρό και θερμό θέρος και θερμοκρασιακά χαρακτηριστικά $-2 < T_{\psi} < 18$ °C και $T_{\theta} > 22$ °C.



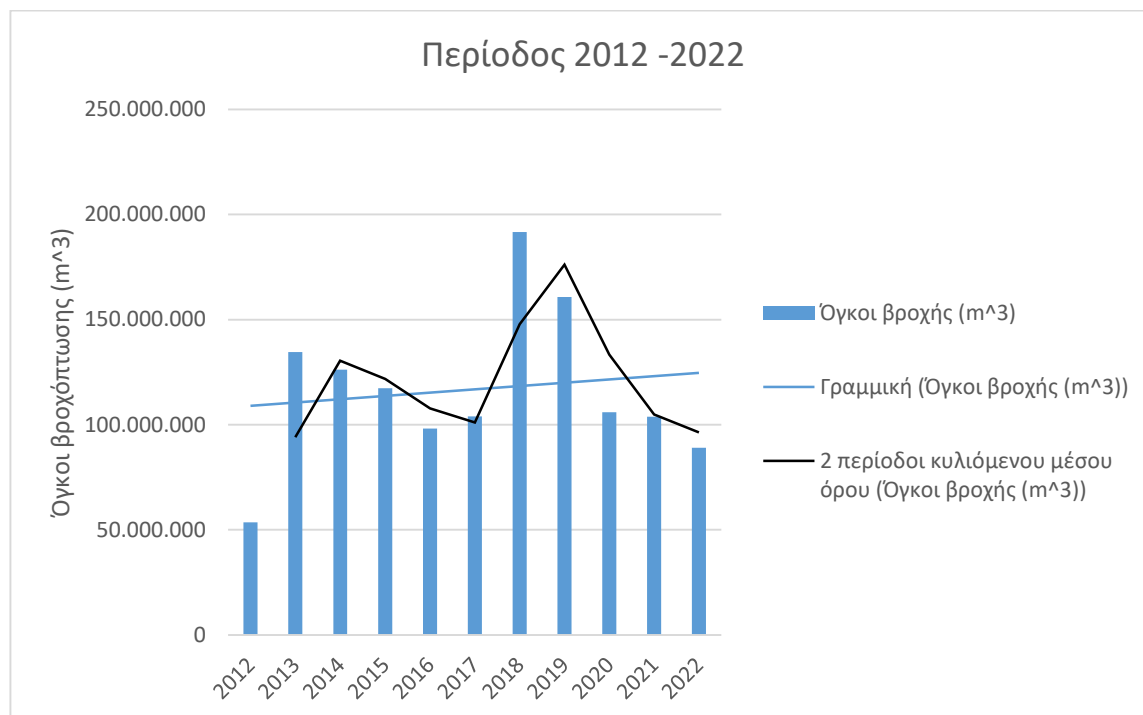
Εικόνα 14: Χάρτης κλιματικής κατάταξης της Ελλάδας κατά Thornthwaite (Καρράς, 1973).



Εικόνα 15: Υπόμνημα του χάρτη κλιματικής κατάταξης της Ελλάδας κατά Thornthwaite (Καρράς, 1973).

5.6 Όγκοι κατακρημνισμάτων περιόδου 2012 – 2022

Η έκταση της περιοχής ενδιαφέροντος είναι 245,4 km². Με βάση την έκταση αυτή και τα βροχομετρικά δεδομένα που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 7** υπολογίζεται ο όγκος των βροχοπτώσεων για την περίοδο 2012 – 2022. Η μέση τιμή ανέρχεται στα $116,8 \times 10^6$ m³, η ελάχιστη είναι στα $53,3 \times 10^6$ το 2012 που ίσως οφείλεται στην έλλειψη κλιματικών δεδομένων από τον Ιανουάριο έως τον Ιούλιο και η μέγιστη είναι στα $191,7 \times 10^6$ m³ το 2018. Παρατηρείται ότι ο κυλιόμενος μέσος παρουσιάζει συνεχή πτωτική τάση από το 2019 έως το 2022, με απότομη αλλαγή κλίσης το 2021.



Σχήμα 12: Διακύμανση ετήσιου όγκου βροχής σε m³ για την περίοδο 2012 – 2022.

Κεφάλαιο 6^ο: Υδρογεωλογικές συνθήκες

6.1 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά σχηματισμών

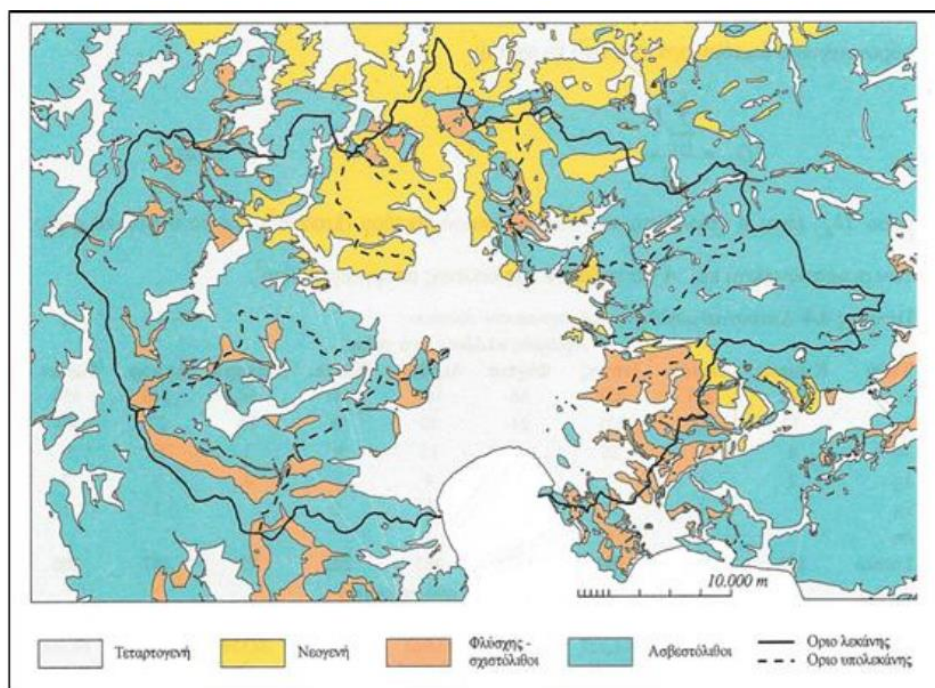
Στο Αργολικό πεδίο λόγω της παρουσίας διαφόρων γεωλογικών σχηματισμό που «φιλοξενούν» την ανάπτυξη αρκετών υδροφόρων συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται οι εξής υδρογεωλογικές ενότητες (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991; Γιαννουλόπουλος, 2000; Mitropapas, Koumantakis, Vasileiou, Perdikaki, & Kallioras, 2016):

- Το καρστικό σύστημα της δυτικής Αργολίδας, το οποίο είναι το μοναδικό που διαθέτει μεγάλα αποθέματα νερού, σε καλή ποιότητα.
- Ο κοκκώδης υδροφορέας, ο οποίος αναπτύσσεται στο τεκτονικό βύθισμα του Αργολικού πεδίου και την περιοχή της Ασίνης.
- Το καρστικό σύστημα του Αραχναίου όρους
- Το ρωγματωμένο καρστικό σύστημα στις περιοχές Τραχείας – Ερμιονίδας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τελευταίες τρεις υδρογεωλογικές ενότητες αντιμετωπίζουν ποσοτικά και ποιοτικά προβλήματα όσον αφορά την διαχείριση των υπογείων νερών.

6.1.1 Υδρολιθολογική ταξινόμηση των γεωλογικών σχηματισμών

Επομένως, η περιοχή του Αργολικού πεδίου αποτελείται λιθολογικά κυρίως από ανθρακικούς σχηματισμούς, από γενικά μικροπερατούς ως αδιαπέρατους (φλύσχης και σχιστόλιθοι) σχηματισμούς, και Τεταρτογενή ιζήματα ποικίλης υδατοπερατότητας (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991; Γιαννουλόπουλος, 2000).



Εικόνα 16: Χάρτης υδρολιθολογικών σχηματισμών της υδρολογικής λεκάνης του Αργολικού πεδίου (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Ειδικότερα, οι υδρολιθολογικές ενότητες είναι οι εξής (Γιαννουλόπουλος, 2000):

- Κορήματα και Διλούβια: Αποτελούνται από αδρομερείς, κλαστικές αποθέσεις κλιτύων και κόνους κορημάτων. Λιθολογικά αποτελούνται από ανθρακικά κοκκώδη υλικά και στο σύνολο τους χαρακτηρίζονται ως πέρατα έως πολύ περατά υλικά.
- Αλλούβια: Καλύπτουν κυρίως πεδινά τμήματα και ιδιαίτερα την Αργολική πεδιάδα, δομούνται από εναλλαγές αδρομερών και λεπτομερών κλαστικών υλικών. Στις παρυφές της πεδιάδας τα υλικά αυτά γίνονται αδρομερέστερα. Χαρακτηρίζονται ως ποικίλης περατότητας υλικά ανάλογα με το κλαστικό υλικό που επικρατεί.
- Νεογενή: Δομούνται κυρίως από μάργες και μαργαϊκά κροκαλοπαγή. Είναι συνήθως χαμηλής περατότητας και σε γενικές γραμμές χαρακτηρίζονται ως ημιπερατοί σχηματισμοί.
- Φλύσχος Πίνδου: Δομείται κυρίως από αργιλικά υλικά και στο σύνολο του χαρακτηρίζεται ως πρακτικά αδιαπέρατος σχηματισμός.
- Ασβεστόλιθοι της Πίνδου: Πρόκειται για λεπτοπλακώδεις έως μεσοπλακώδεις ασβεστόλιθους έντονα πτυχωμένους, ρωγματομένους και καρστικοποιημένους. Χαρακτηρίζονται στο σύνολο τους ως πολύ περατοί σχηματισμοί.
- Φλύσχος της Τρίπολης: Δομείται και αυτός από αργιλώδη ιζήματα και θεωρείται πρακτικά αδιαπέρατος.
- Ασβεστόλιθοι της Τρίπολης: αποτελούν συνήθως μια παχιά ανθρακική ακολουθία από παχυστρωματώδεις έως άστρωτους ασβεστόλιθους και δολομίτες. Είναι καρστικοποιημένοι και

χαρακτηρίζονται στο σύνολο τους ως πολύ περατοί.

- Ασβεστόλιθοι Πελαγονικής: Πρόκειται επίσης για μια παχιά ανθρακική ακολουθία από ασβεστόλιθους και δολομίτες έντονα καρστικοποιημένους και ρωγματομένους με τοπικές παρεμβολές σχιστόλιθων. Χαρακτηρίζονται ως υψηλής περατότητας σχηματισμοί.
- Σχιστόλιθοι Άρνας (μεταμορφωμένο υπόβαθρο): Αποτελούν το υπόβαθρο των σχηματισμών δυτικά της πεδιάδας και ως σχιστόλιθοι χαρακτηρίζονται ως πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί.
- Τόφφοι - σχιστόλιθοι Πελαγονικής: Συνιστούν το υπόβαθρο της Πελαγονικής που αναπτύσσεται ανατολικά του Αργολικού πεδίου. Θεωρούνται ως πρακτικά αδιαπέρατοι σχηματισμοί.

6.1.2 Υδροφόροι σχηματισμοί

Οι τύποι των υδροφορέων που επικρατούν στο Αργολικό βύθισμα είναι αυτοί των Τερτατογενών σχηματισμοί, δηλαδή οι υδροφόροι των αλλουβιακών σχηματισμών. Οι συγκεκριμένοι υδροφόροι αποτελούνται από λεπτομερή υλικά, όπως άμμοι, άργιλοι, ψηφίδες, και κροκαλοπαγή, τα οποία εναλλάσσονται και κατά την κατακόρυφη και κατά την οριζόντια διεύθυνση. Το καθεστώς εναλλαγών κοκκομετρίας των σχηματισμών αυτών και στις 2 διευθύνσεις έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή της υδροπερατότητας και κατά συνέπεια εμφανίζονται διαφορές στις παροχές κατά τόπους και κυμαίνονται από 2 – 3 m³/h έως και 150 m³/h. Αυτοί οι τύποι υδροφορέων λόγω του αρκετά μεγάλου πορώδους μπορούν να φιλοξενήσουν αρκετές ποσότητες νερού και είναι αρκετά συχνό το φαινόμενο σε γεωργικές καλλιέργειες να συμβαίνει υπερεκμετάλλευση αυτών, όπως συμβαίνει και στην περιοχή του Αργολικού πεδίου (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Στην παρούσα εργασία η προσομοίωση των υπογείων νερών θα επιτευχθεί στην υδρογεωλογική ενότητα των κοκκώδων υδροφορέων, ενώ οι υπόλοιπες συνυπολογίζονται ως τροφοδοσίες στο συγκεκριμένο υδροφόρο σύστημα.

Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί ανάλογα με το περιβάλλον απόθεσης των ιζημάτων τους διακρίνονται σε (Mandel & Shiftan, 1981; Γάκη - Παπαναστασίου, 1991; Γιαννουλόπουλος, 2000):

- Κώνους αλλουβιακών αποθέσεων: Εμφανίζονται σε περιοχές που οι χείμαρροι εισέρχονται στην πεδιάδα αποθέτοντας το μεγάλο φορτίο ιζημάτων τους λόγω μείωσης της ταχύτητας ροής. Οι εναλλαγές ιζημάτων που αποτίθενται είναι γνωστοί ως τύπου "Piedmont".
- Αλλουβιακές πεδιάδες: Η κατανομή και η ανάπτυξη των διαφόρων ιζημάτων μέσα σε αυτές σχετίζεται έμμεσα με το καθεστώς λειτουργίας και ροής των διαφόρων χειμάρρων καθώς και με τα υλικά τροφοδοσίας τους. Αδρομερέστερα υλικά απαντούν συνήθως κοντά σε κοίτες ή σε παλαιοκοίτες των χειμάρρων.
- Δελταϊκές αποθέσεις: Δελταϊκά ιζήματα αναπτύσσονται εκεί όπου οι χείμαρροι αποθέτουν περισσότερα υλικά από αυτά που μπορούν να απομακρυνθούν με την ενέργεια των κυμάτων. Δελταϊκές αποθέσεις δεν σχηματίζουν απαραίτητα όλες οι ποτάμιες εκβολές. Σε τέτοιες περιοχές

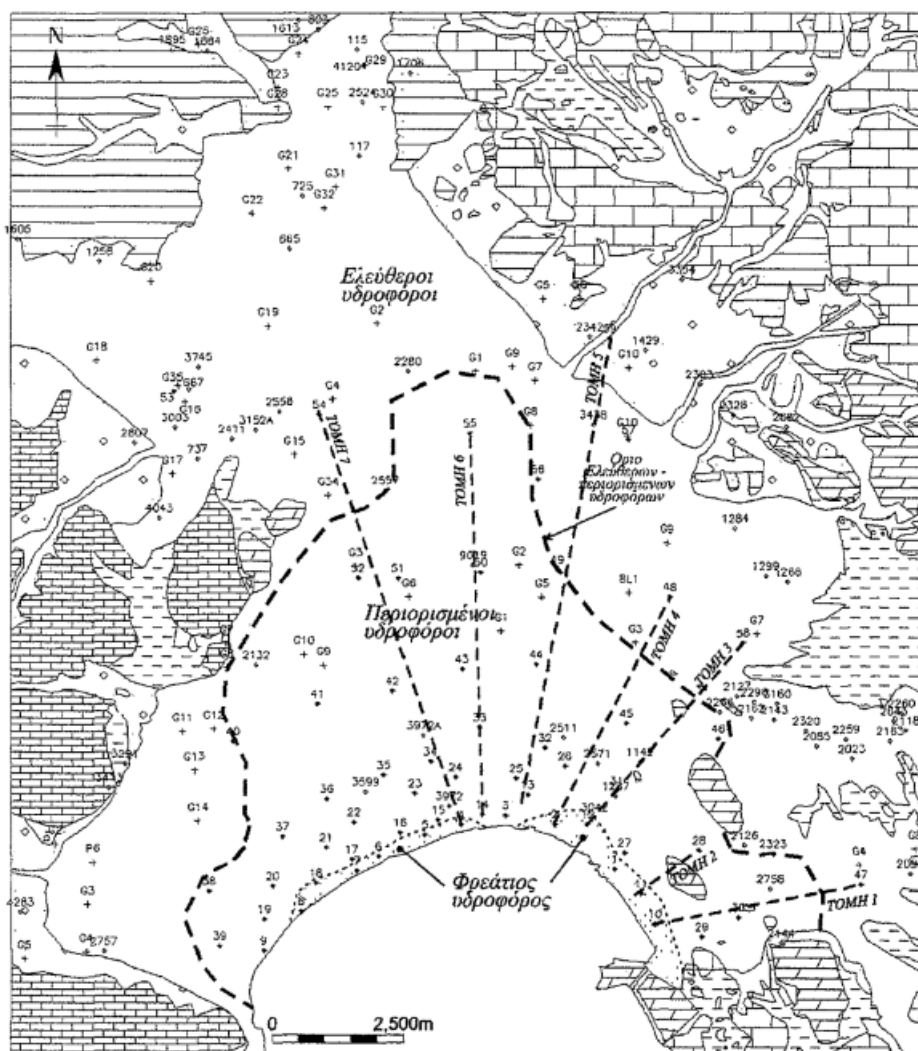
τα ιζήματα δομούνται κυρίως από λεπτή άμμο και ιλύ. Άργιλος και ιλύς αποτίθεται σε παλιρροιακά και λιμνοθαλάσσια περιβάλλοντα.

Στην Αργολική πεδιάδα λόγω του τεκτονικού βυθίσματος μπορεί να χαρακτηριστεί ως αλλουβιακή πεδιάδα, ενώ κατά τόπους εμφανίζονται οι κώνοι αλλουβιακών αποθέσεων, κυρίως στις εισόδους των χειμάρρων, και οι δελταϊκές αποθέσεις, που εμφανίζονται στην παράκτια και παραλιακή ζώνη.

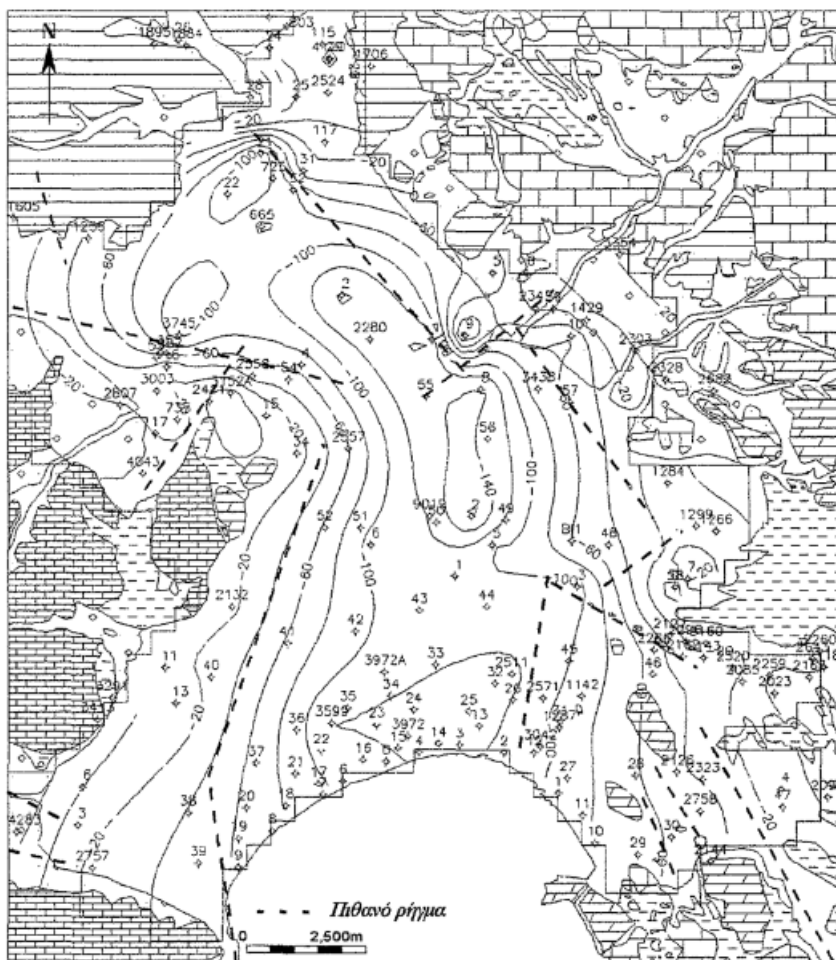
6.1.3 Υδροφόρα συστήματα

Οι υδροφόροι σχηματισμοί που σχηματίζονται στην πεδιάδα λόγω των ιζημάτων διαφορετικής κοκκομετρίας μπορούν να ενταχθούν στα εξής υδροφόρα συστήματα (Γιαννουλόπουλος, 2000):

- Φρεάτιο υδροφόρο σύστημα: Το συγκεκριμένο σύστημα αναπτύσσεται σε μια στενή λωρίδα κατά μήκος της παράκτιας ζώνης από την παραλία μέχρι και 200 – 300 m. προς την πεδιάδα και εκτείνεται από το Ναύπλιο έως και στην μέση περίπου του Αργολικού κόλπου. Αποτελείται από αργιλικά υλικά και το βάθος του εκτιμάται στα 7 – 8 m., ενώ το σύστημα αυτό έχει ως δάπεδο το αργιλικό κάλυμμα. Ο φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος διακρίνεται από χαλαρή εδαφική στρώση πάχους 2 – 3 m. ονομάζεται και «ως ζώνη εδαφικού νερού», επειδή δεν δημιουργούνται συνθήκες εκμετάλλευσης και αποθήκευσης ποσοτήτων νερού.
- Υπό πίεση υδροφόρο σύστημα: Το σύστημα αυτό αναπτύσσεται κάτω από το αργιλικό κάλυμμα και αποτελείται από εναλλαγές λεπτομερών και αδρομερών υλικών, τα οποία αυξάνονται στις παρυφές της πεδιάδας. Επομένως, το αργιλικό κάλυμμα σε αυτό το σημείο απουσιάζει και οι υπό πίεση υδροφόροι μεταβαίνουν σε ελεύθερους.
- Ελεύθεροι υδροφόροι: Το σύστημα αυτό αναπτύσσεται στα όρια του αργιλικού καλύμματος (πάχος 15 – 20 m.) και απλώνεται μέχρι το αλπικό σύστημα. Η βάση των ελεύθερων υδροφόρων είναι ο φλύσσης ή εκτεταμένα αργιλικά, ενώ η οροφή προσδιορίζεται από την πιεζομετρική επιφάνεια του υπογείου νερού.



Εικόνα 17: Χάρτης κατανομής υδροφόρων Αργολικού πεδίου (Γιαννουλόπουλος, 2000).

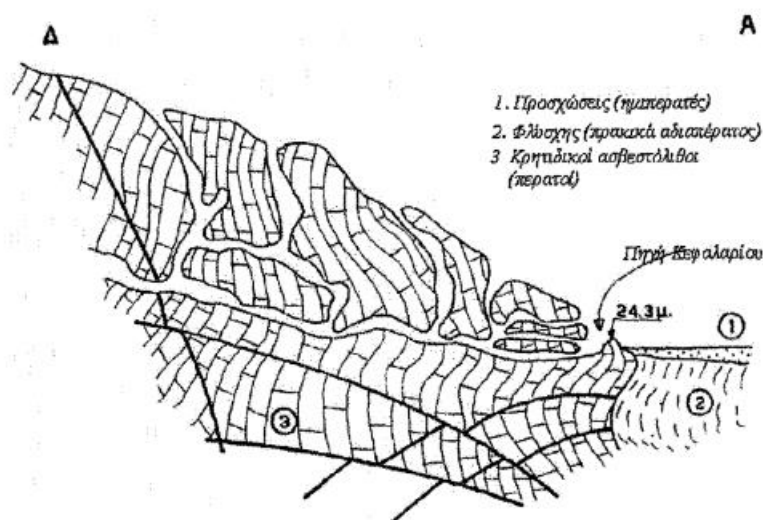


Εικόνα 18: Χάρτης ισοβαθών καμπυλών του αδιαπέρατου υποβάθρου (σχιστόλιθοι, τόφροι και φλύσχη)
(Γιαννουλόπουλος, 2000).

6.1.4 Πηγαία ύδατα

Στο Αργολικό πεδίο αναπτύσσεται πληθώρα πηγών κυρίως στις δυτικές παρυφές της πεδιάδας που αποτελούν και βασικές συνιστώσες το υδατικό δυναμικό. Οι πηγές αυτές είναι οι πηγές του Κεφαλαρίου, της Λέρνης, της Κρόης και του Κιβερίου (Γιαννουλόπουλος, 2000; Mitropapas, Koumantakis, Vasileiou, Perdikaki, & Kallioras, 2016).

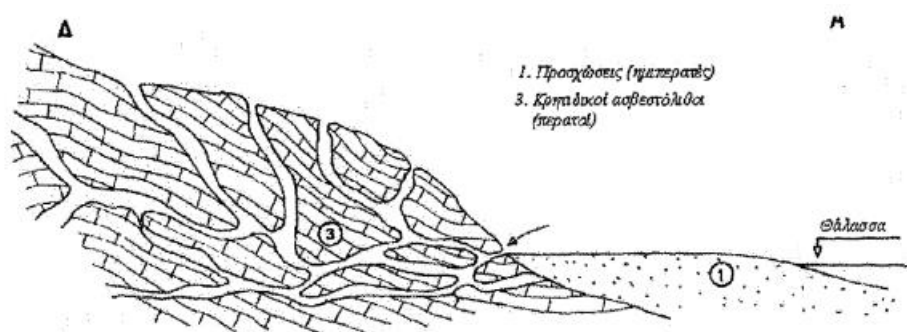
Η πηγή Κεφαλαρίου είναι μια καρστική πηγή υπερχειλίσης που βρίσκεται στην επαφή των Κρητιδικών ασβεστολίθων της ενότητας Ωλονού Πίνδου με τον φλύσχη της Πίνδου, σε υψόμετρο +24,3 m. Η παροχή της πηγής παρουσιάζει έντονη διακύμανση που σχετίζεται με τις βροχοπτώσεις στο Αρκαδικό πεδίο, όπου λαμβάνει χώρα και η τροφοδοσία τους. Η παροχή της πηγής παρουσιάζει ένα εύρος $25 - 140 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{έτος}$ ενώ στις ξηρές περιόδους η παροχή μηδενίζεται (Γιαννουλόπουλος, 2000).



Εικόνα 19: Γεωλογικό σκαρίφημα πηγής Κεφαλαρίου (Δούνας & Ελευθερίου, 1978; Γιαννουλόπουλος, 2000).

Η πηγή της Λέρνης πηγάζει σε απόλυτο υψόμετρο +0,6 m και βρίσκεται στο όριο Κρητιδικών ασβεστολίθων της ενότητας Πίνδου με τις Τεταρτογενείς αποθέσεις, χαρακτηρίζοντάς τη ως πηγή υπερχειλίσης. Έχει συνεχή ροή κατά την διάρκεια του έτους, ανάλογη παροχή με αυτή του Κεφαλαρίου αλλά παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση μεταξύ $37 - 63,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Η πηγή της Κρόης πηγάζει και αυτή από τους Κρητιδικούς ασβεστολίθους της ενότητας της Πίνδου και των σύγχρονων Τεταρτογενών αποθέσεων, στον οικισμό Μύλοι, κανοντάς τη και αυτή καρστική πηγή υπερχειλίσης. Επίσης, αυτή η πηγή σημειώνει ετήσιες παροχές μεταξύ $3,8 - 11,3 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η ποιότητα των παραπάνω πηγών είναι αρκετά καλή και το νερό τους βρίσκεται εντός των ορίων του πόσιμου νερού (Γιαννουλόπουλος, 2000).



Εικόνα 20: Γεωλογικό σκαρίφημα πηγών Λέρνης και Κρόης (Δούνας & Ελευθερίου, 1978; Γιαννουλόπουλος, 2000).

Οι πηγές του Κιβερίου χαρακτηρίζονται ως παράκτιες – υποθαλάσσιες καρστικές πηγές, καθώς αναβλύζουν σε απόλυτο υψόμετρο μεταξύ +0,25 έως -7,5 m και πηγάζουν από καρστικούς Κρητιδικούς ασβεστόλιθους της ενότητας της Πίνδου. Οι πηγές αυτές μέχρι το '70 εκφόρτιζε στην θάλασσα, ενώ μετά

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

(Γιαννουλόπουλος, 2000).

Γεώτρηση	X(m)	Y(m)	Q(m ³ /h)	t(min)	Δs(m)	rw(m)	Πάχος(m)	T(m ² /d)	K(m/d)
115	388556,5994	4175811,308	62	1440	4,7	0,108	52,7	541,2	10,27
117	388597,7278	4173734,322	75	1440	13	0,108	61	228,6	3,75
667	395823,479	4162184,945	110	1440	8,5	0,108	84	540,75	6,44
797	385399,9923	4169246,182	20	1440	12	0,108	26	59,44	2,29
1117	383975,9204	4167935,213	95	1440	9	0,108	44	425,07	9,66
1142	398280,9027	4162349,458	80	1440	12,2	0,108	99,2	266,98	2,69
1258	393962,4175	4162071,842	125	1440	11	0,108	57	464,33	8,15
1266	383682,8803	4171693,324	65	1440	11	0,108	34	228,48	6,72
1284	396736,016	4165539,482	130	1440	8	0,108	35	662,05	18,92
1287	395697,5231	4166557,411	140	1440	8,4	0,108	88,4	706,37	7,99
1299	393499,7226	4161362,376	120	1440	20	0,108	32	231,56	7,24
1429	396335,0138	4165662,868	30	1440	17	0,108	21	62,48	2,98
1613	394042,1038	4170022,481	14	1440	32	0,108	54	14,97	0,28
1621	387476,978	4176345,978	7	1440	6	0,108	26	40,75	1,57
1630	382119,9999	4172022,351	60	1440	13,2	0,108	49,2	176,2	3,58
1706	389559,1048	4175333,19	26	1440	10	0,108	33	96,1	2,91
1884	385718,7376	4175718,769	50	1440	28	0,108	32	64,56	2,02
1895	385060,6827	4175759,897	50	1440	13,5	0,108	29	138,69	4,78
2023	397962,1574	4162133,534	75	1440	18	0,108	43	159,85	3,72
2085	397283,5382	4162370,023	60	1440	9	0,108	33	259,01	7,85
2096	399082,9071	4159912,599	10	1440	11	0,108	16,5	30,59	1,85
2126	395916,0179	4160478,115	70	1440	10	0,108	45	276,39	6,14
2127	395782,3505	4163346,823	20	1440	18	0,108	45	39,77	0,88
2132	386721,2431	4163945,756	23	1440	18,5	0,108	23,5	43,36	1,85
2143	396502,0981	4162853,282	32	1440	28	0,108	53	41,29	0,78
2144	398681,9049	4162472,844	52	1440	1	0,108	21,5	2196,15	102,15
2163	397849,0542	4162513,972	65	1440	9	0,108	45	285,63	6,35
2259	398908,1113	4163007,513	55	1440	15	0,108	27	136,8	5,07
2260	395443,041	4163028,078	80	1440	11,2	0,108	22,2	273,61	12,32
2266	389538,5406	4169559,786	80	1440	47	0,108	67	63,55	0,95
2280	396121,6601	4163233,72	78	1440	41	0,108	111	73,07	0,66
2296	397077,8961	4162647,64	9	1440	18	0,108	26	16,61	0,64
2320	396460,9696	4160303,319	60	1440	11	0,108	55	214,52	3,90
2323	395707,8052	4168747,5	72	1440	17	0,108	73	166,49	2,28
2328	392941,9183	4170248,688	25	1440	12	0,108	12	72,43	6,04
2342	386217,4199	4168264,241	5	1440	44	0,108	53	3,61	0,07
2411	392522,9224	4162524,254	45	1440	8	0,108	13	207,59	15,97
2511	388638,8562	4174803,661	140	1440	32	0,108	132	176,72	1,34
2524	389096,41	4167287,441	15	1440	25	0,108	59	21,01	0,36
2557	393170,6952	4162030,713	75	1440	13	0,108	64	229,05	3,58

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

2571	396409,5591	4159634,982	200	1440	46	0,108	131	175,51	1,34
2682	396705,1697	4168511,011	25	1440	1	0,108	22,7	1021,53	45,00
2807	384407,7689	4168202,548	3	1440	16	0,108	53	6,12	0,12
3042	393057,592	4161012,784	70	1440	28	0,108	80	95,98	1,20
3293	392821,1035	4162287,766	145	1440	29	0,108	90	199,99	2,22
3354	394720,7229	4171359,155	25	1440	21	0,108	93	44,26	0,48
3413	383903,9456	4161555,166	40	1440	11	0,108	41	138,19	3,37
3438	393034,4572	4168541,858	40	1440	36	0,108	76	40,77	0,54
3599	388769,9531	4161501,185	100	1440	11	0,108	128,5	380,1	2,96
3745	385610,7755	4169672,89	72	1440	18,5	0,108	137,5	156,58	1,14
3972	390337,9745	4161197,862	150	1440	25,48	0,108	133,48	241,39	1,81
4120	388674,8436	4175482,28	2	1440	25	0,108	46	2,48	0,05
4283	382230,5326	4159185,14	42	1440	14	0,108	25	110,3	4,41
9019	390751,8293	4165817,099	40	1440	64,1	0,108	116,6	22,63	0,19
3972A	389854,7154	4162573,094	150	1440	40	0,108	110	149,1	1,36
1	385213,5391	4174640,356	25	360	13,31	0,108	150,15	67,84	0,45
2	385359,8664	4170695,882	15,6	360	4,31	0,108	69,3	130,7	1,89
12	386571,2015	4168191,778	10	300	3,36	0,108	15,9	97,62	6,14
13	383752,8115	4167194,208	8	120	1,53	0,108	72,61	181,52	2,50
14	383625,5704	4167321,449	19,4	240	8,33	0,108	134,55	82,81	0,62
19	385245,3494	4160834,698	27,7	420	14,83	0,108	35,1	63,39	1,81
21	386405,7881	4158625,793	20	480	5,39	0,108	80	137,25	1,72
28	389535,9187	4161109,539	21,8	420	16,5	0,108	91,3	46,08	0,50
43	389189,823	4164117,518	19,8	420	11,09	0,108	16,25	57,95	3,57
48	390767,6124	4163028,335	11,5	360	7,84	0,108	71,41	50,4	0,71
60	390744,709	4168354,646	23,2	300	2,85	0,1524	62,14	288,21	4,64
65	390205,2068	4169759,388	23,8	360	5,7	0,108	95,85	154,35	1,61
77	391762,6376	4168171,419	20,3	360	5,37	0,108	54,95	135,39	2,46
79	392719,4906	4167825,323	21,6	180	12,64	0,1524	48,35	52,59	1,09
86	394147,1355	4165237,24	16,3	420	5,47	0,1524	35,25	98,53	2,80
98	392701,6768	4164443,255	5	240	4,34	0,108	88,5	38,49	0,43
103	394472,8727	4162051,123	12	300	2,98	0,108	34,04	139,83	4,11
118	398167,9537	4160045,804	15	300	4,08	0,1619	15,95	114,19	7,16
120	395796,18	4162203,812	11	360	4,43	0,108	25,89	83,55	3,23
129	395307,5742	4166769,222	10	255	3,42	0,108	8,45	91,58	10,84
130	398201,0364	4168443,715	15,5	240	4,04	0,108	74,67	136,36	1,83
131	397259,4524	4168685,473	19,5	420	5,98	0,108	76,55	118,7	1,55
132	395569,6908	4169403,113	15	300	4,25	0,108	88,5	127,45	1,44
134	387202,3172	4172283,851	15	300	4,01	0,1524	47,3	124,8	2,64
135	388311,8595	4172334,747	15	300	4,43	0,108	57,4	119,49	2,08
149	388476,0005	4174996,631	10	360	4	0,108	32,5	85,14	2,62
153	393107,5759	4171423,701	20	360	6,58	0,108	89,4	110,03	1,23
ΔΙ	393443,4923	4160045,804	25	1440	43	0,108	56	20,27	0,36
Δ3	391433,0832	4160982,298	35	1440	8	0,108	58	170,48	2,94

**ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ**

Δ4	390588,2025	4160865,236	35	1440	23	0,108	58	56,09	0,97
Δ5	389901,1006	4160605,664	85	1440	14	0,108	225	254,75	1,13
Δ6	389005,3234	4160239,21	30	1440	22	0,108	55	49,84	0,91
Δ7	388608,3312	4159979,638	40	1440	18	0,108	59	83,65	1,42
Δ8	387564,9543	4159241,64	40	1440	19	0,108	59	79,04	1,34
Δ9	386882,9421	4158468,014	30	1440	14	0,108	59	80,51	1,36
ΓΕ1	389834,9352	4162661,88	16,47	50	11	0,1619	75,97	42,38	0,56
ΓΕ3	390962,2912	4162206,357	6,55	240	17,98	0,1619	80,7	10,53	0,13
ΓΕ4	390962,2912	4162206,357	19	390	35,85	0,1619	56,53	15,8	0,28
ΓΕ5	391249,8561	4162099,475	60	1440	12,28	0,1619	57,08	180,88	3,17
ΓΕ7	391947,1372	4162015,496	11,38	150	14,68	0,1619	80,86	22,73	0,28
ΓΕ8	392944,7073	4161888,254	43,55	360	27,17	0,1619	87	52,4	0,60
ΓΕ9	392944,7073	4161888,254	47	420	27,66	0,1619	59,55	55,16	0,93
Ι3	384116,721	4160203,583	39,75	1440	2,45	0,108	30,7	657,32	21,41
ΕΙ	390265,0101	4167629,372	50	300	6,54	0,108	27,04	272,42	10,07
Ε2	390153,0379	4167581,021	76	1440	1,55	0,108	27,28	2085,09	76,43
Ε3	390644,1885	4167726,075	17,6	1440	17,1	0,108	24,5	35,61	1,45
							Μέση τιμή	196,83	5,45
							Ελάχιστη τιμή	2,48	0,05
							Μέγιστη τιμή	2196,15	102,15

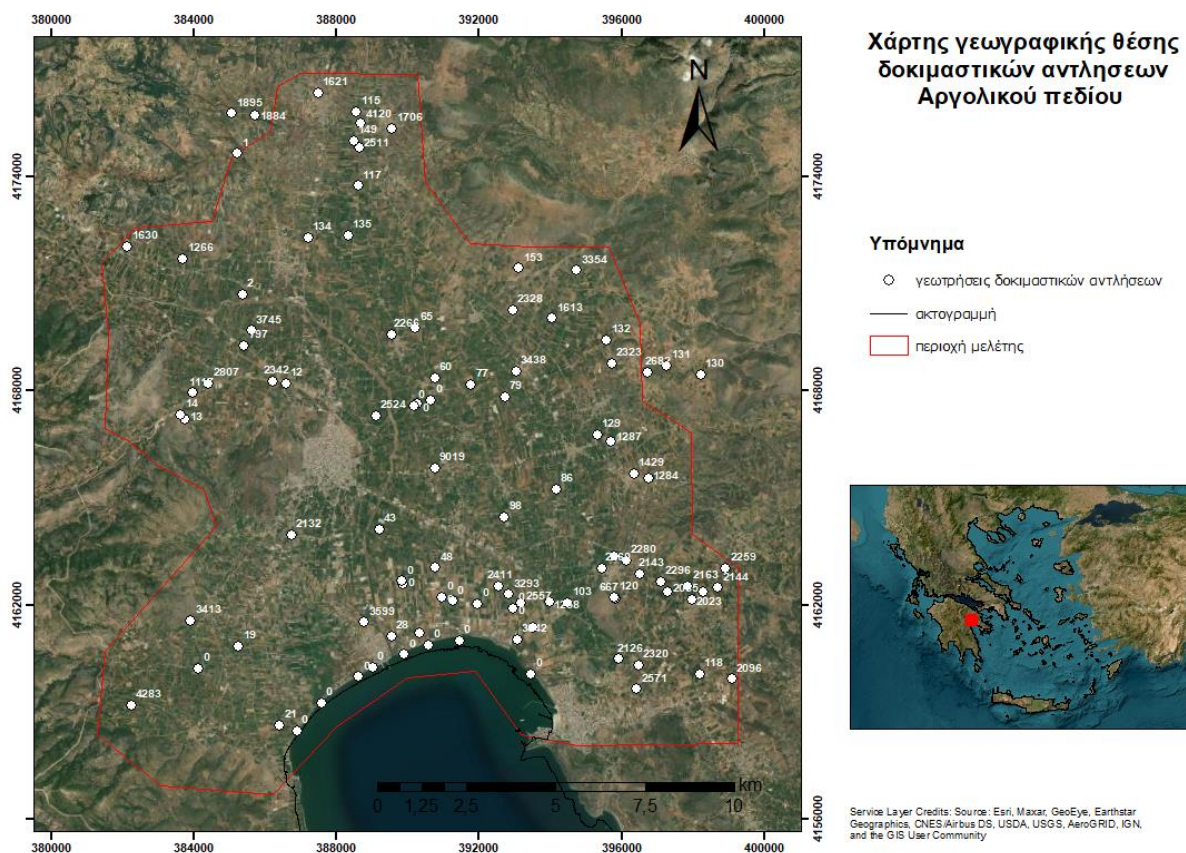
Πίνακας 10: Πίνακας υδραυλικών παραμέτρων Αργολικού πεδίου (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Από τα παραπάνω παρατηρείται ότι οι τιμές της μεταβιβαστικότητας T κυμαίνονται από 2,48 – 2196, 5 m^2/d , με μέση τιμή 196,83 m^2/d , γεγονός που δηλώνει την έντονη ετερογένεια των υδροφόρων στρωμάτων και των διαφόρων δυναμικών που διαθέτουν οι υδροφόροι στην περιοχή. Ενώ, η μεταβιβαστικότητα T με σταθερή παροχή κυμαίνεται από 27 m^2/d , για στρώματα χαμηλής δυναμικότητας, μέχρι και 7260 m^2/d , για στρώματα υψηλής δυναμικότητας (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας K , κυμαίνονται μεταξύ 0,05 – 102,5 m/d , με μέση τιμή 5,45 m/d . Με βάση αυτά τα αποτελέσματα οι σχηματισμοί της περιοχής θεωρούνται γενικά περατοί, με μέγιστες τιμές υδροπερατότητας να αντιστοιχούν σε αδρομερή υλικά (χαλίκια, κροκάλες, λατύπες). Η κατακόρυφη υδραυλική αγωγιμότητα εκτιμήθηκε από την άντληση μόνο μιας γεώτρησης και υπολογίστηκε ίση με 0,75 m/d , το οποίο ισούται με το 4% της οριζόντιας. Το νούμερο αυτό είναι αρκετά μικρό σε σύγκριση με αντίστοιχα περιβάλλοντα και αυτό δείχνει ότι η ροή πραγματοποιείται κατά βάση στην οριζόντια διεύθυνση (Γιαννουλόπουλος, 2000).

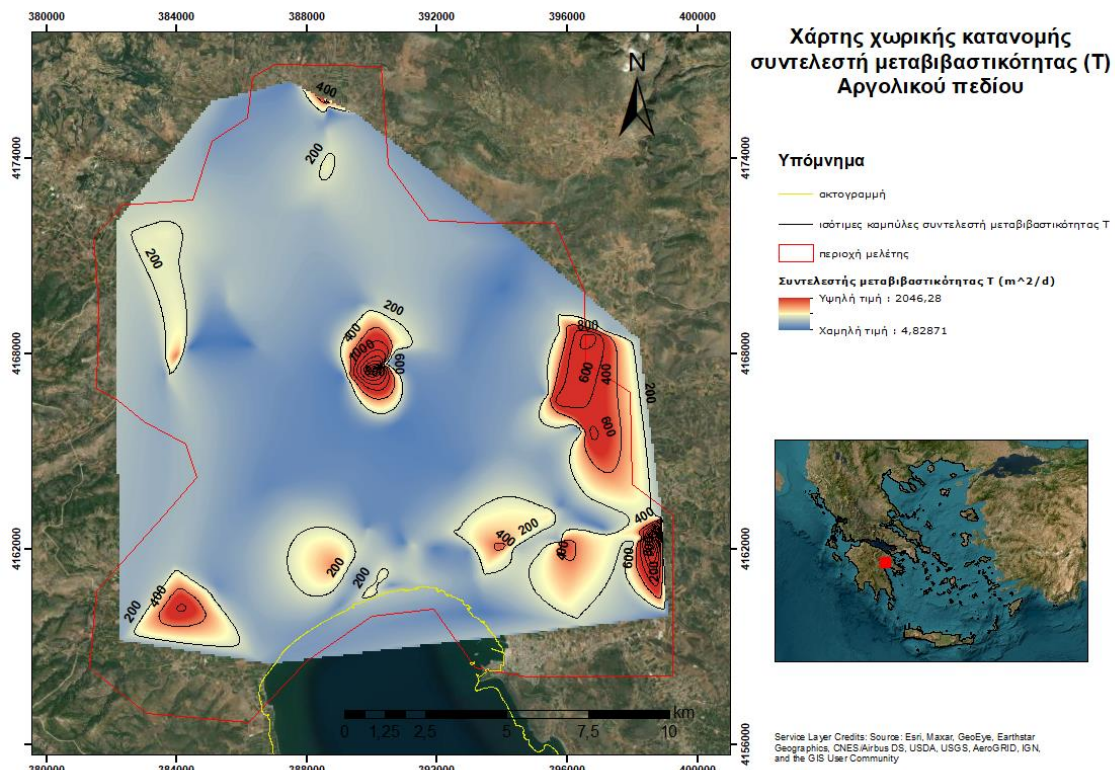
Ο συντελεστής εναποθήκευσης S θεωρήθηκε ενιαίος σε όλη την περιοχή και λήφθηκε ίσος με 0,00455. Η ειδική απόδοση S_y , έχει νόημα μόνο στους ελεύθερους υδροφορείς. Σύμφωνα με την διδακτορική διατριβή του (Γιαννουλόπουλος, 2000), η ειδική απόδοση είχε υπολογιστεί παλιότερα από στοιχεία εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού. Επομένως, έχοντας υπόψη τις ποσότητες νερού που εισέρχονται στους υδροφόρους και γνωστές διηθήσεις από την διάωρυγα του Κιβερίου και με βάση τους πιεζομετρικούς χάρτες η ειδική απόδοση υπολογίζεται στα 2,55 % ($S_y = 0,0255$). Σύμφωνα με μετρήσεις του (Γιαννουλόπουλος,

2000) με βάση τις δοκιμές άντλησης σταθερής παροχής υπολόγισε ότι η ειδική απόδοση κυμαίνεται από $1,38 \times 10^{-2}$ έως 4×10^{-2} με μέση τιμή τα $3,2 \times 10^{-2}$.

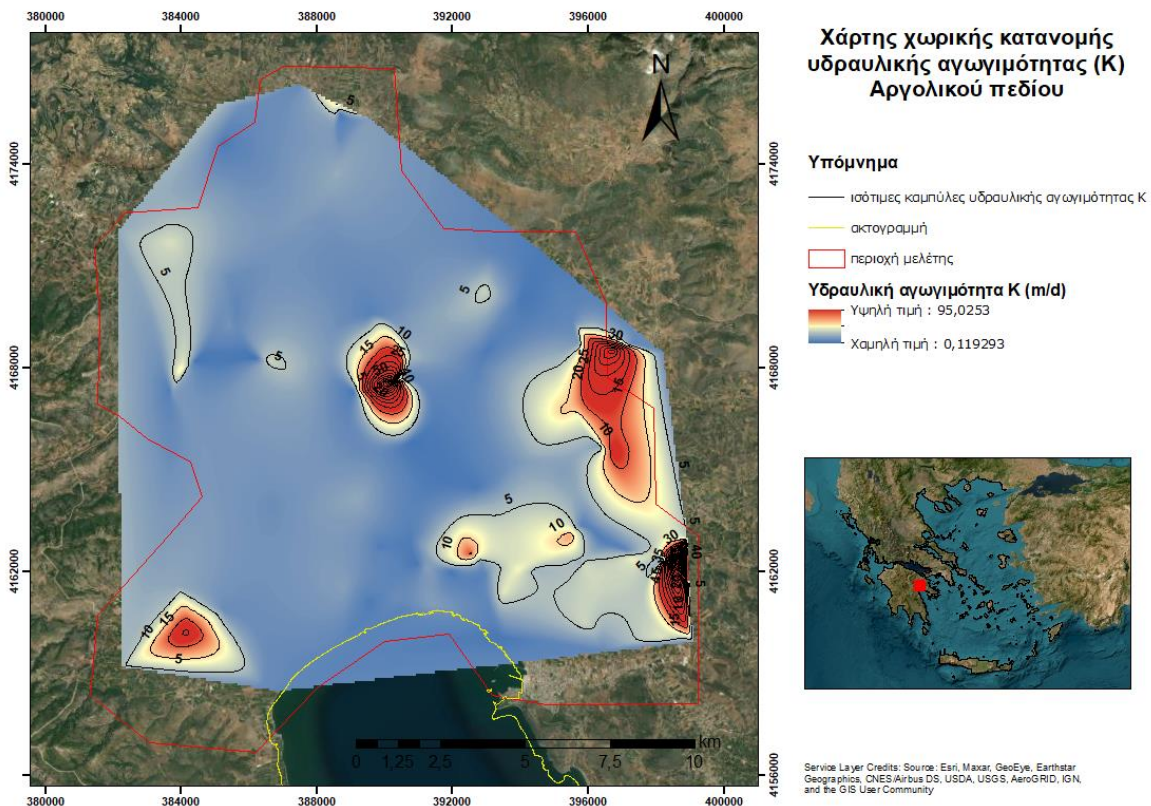


Εικόνα 22: Χάρτης γεωγραφικής θέσης δοκιμαστικών αντλήσεων, δεδομένα από (Γιαννουλόπουλος, 2000).

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ



Εικόνα 23: Χάρτης κατανομής συντελεστή μεταβαστικότητας (T) με δεδομένα από (Γιαννουλόπουλος, 2000).

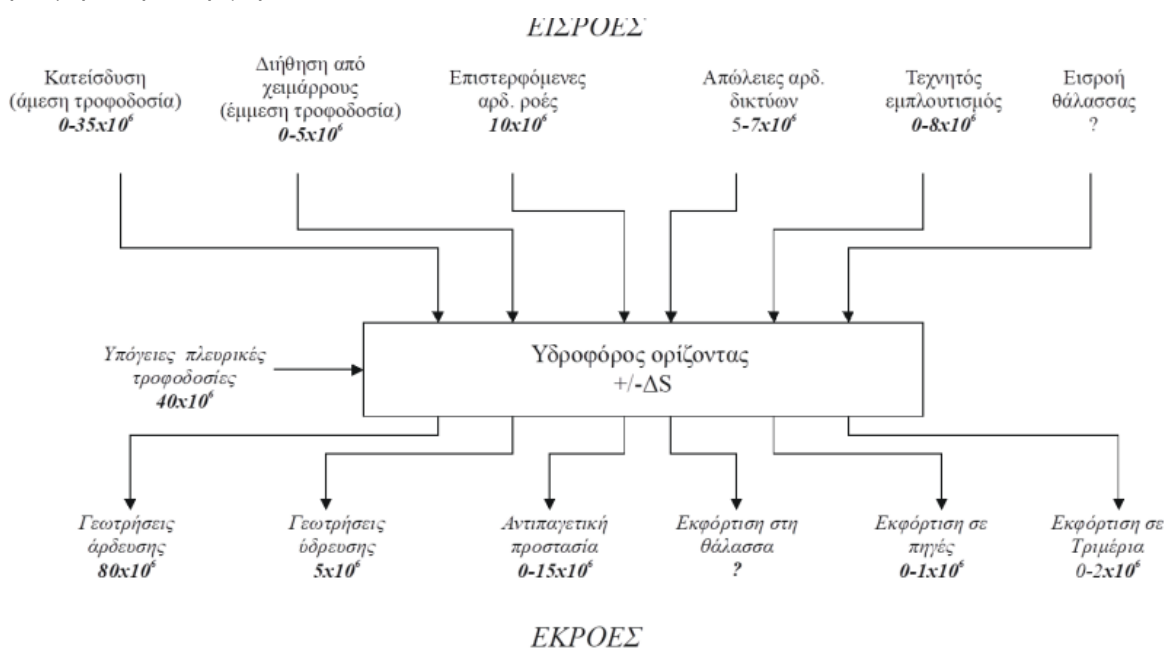


Εικόνα 24: Χάρτης κατανομής υδραυλικής αγωγιμότητας (K) με δεδομένα από (Γιαννουλόπουλος, 2000).

6.3 Στοιχεία υδατικού ισοζυγίου του υδροφόρου συστήματος

Η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου μιας υδρολογικής λεκάνης αποτελεί την μαθηματική έκφραση του υδρολογικού κύκλου και εκφράζεται με την διαφορά των εισροών με των εκροών σε μια λεκάνη απορροής, με τον ρυθμό εναποθήκευσης του νερού στη λεκάνη ΔS , σε καθορισμένο χρόνο Δt (Μιμίκου & Μπαλτάς, 2018). Οι συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου των υδροφόρων σχηματισμών υπολογίζονται είτε ως μέσες υπερετήσιες τιμές σε συνθήκες μόνιμης ροής, είτε σε διακριτά χρονικά βήματα, σε υπερετήσιες συνθήκες μη μόνιμης ροής. Επιπλέον, υπολογίζονται είτε ως μέσες μηνιαίες τιμές σε επίπεδο υδροφορέα ή υδρολογικής ενότητας, είτε ως διακριτές κατανεμημένες στον χώρο τιμές (Freeze & Cherry, 1979).

Ο (Γιαννουλόπουλος, 2000) στο αλλουβιακό υδροφόρο σύστημα για την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου του συστήματος όρισε σαν εισροές: την κατείδυση, την διήθηση από χειμάρρους, τις επιστρεφόμενες αρδευτικές ροές, τις απώλειες αρδ. δικτύων, τον τεχνητό εμπλουτισμό, οι πλευρικές τροφοδοσίες και η εισροή από την θάλασσα. Ενώ οι εκροές του συστήματος αποτελούν: οι γεωτρήσεις άρδευσης, οι γεωτρήσεις ύδρευσης, η αντιπαγετική προστασία, η εκφόρτιση στην θάλασσα, η εκφόρτιση σε πηγές και η εκφόρτιση σε Τριμέρια.



Εικόνα 25: Σχηματική απεικόνιση του υδατικού ισοζυγίου του αλλουβιακού υδροφόρου συστήματος στο Αργολικό πεδίο (Γιαννουλόπουλος, 2000).

6.3.1 Εισροές

6.3.1.1 Κατείδυση ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων

Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί λόγω της λιθολογικής ετερογένειας δημιουργούν κατά τόπους υπό πίεση συνθήκες στον υδροφόρο και επηρεάζουν αρνητικά την κατείδυση του μετεωρικού νερού. Ο (Γιαννουλόπουλος, 2000) για την εκτίμηση της άμεσης κατείδυσης χρησιμοποίησε δύο μεθόδους, την εκτίμηση από άμεσες μετρήσεις μεταβολής εδαφικής υγρασίας και με την μέθοδο Thornthwaite – Mather.

Κατά την πρώτη μέθοδο, αφού προσδιόρισε την πραγματική εξατμισοδιαπνοή στην συνέχεια οι μέσες μηνιαίες τιμές της αφαιρέθηκαν από τις αντίστοιχες βροχοπτώσεις της περιόδου 1964 – 1996 και προέκυψε το αντίστοιχο περίσσεμα ύδατος. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή το περίσσεμα ύδατος ανέρχεται στα 190 mm με τυπική απόκλιση τα 112 mm. Επομένως, αν γίνει αναγωγή του νερού αυτού στην έκταση της περιοχής, τότε προκύπτει ότι ο όγκος του νερού αυτού είναι κατά μέσο όρο $23 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Κατά την μέθοδο Thornthwaite – Mather, η οποία βασίζεται σε μετρήσεις υδρολογικών ετών εκτιμήθηκε ότι η κατείδυση κυμαίνεται από $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ έως $26 \times 10^6 \text{ m}^3$.

6.3.1.2 Διήθηση από χειμάρρους

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.2 *Υδρογραφικά στοιχεία*, οι κύριοι χείμαρροι του Αργολικού βυθίσματος από τα ανατολικά περιθώρια είναι οι Κλεισούρας, Ξηριάς και Μεγάλο Ρέμα ή Ραμαντάνης και από το δυτικό περιθώριο οι Ξηριάς, Ίναχος, ο χείμαρρος των Φιχτιών και Δερβενακιώτης.

Ο (Γιαννουλόπουλος, 2000) στο πλαίσιο της διδακτορικής του διατριβής προσπάθησε να εκτιμήσει την ποσότητα του νερού που διηθείται στον Ίναχο ποταμό μετρώντας την παροχή σε δύο διαφορετικά σημεία, το ένα ανάντη της γέφυρας Σχινοχωρίου και το άλλο στην γέφυρα του Κουτσοποδίου. Από τις μετρήσεις αυτές προέκυψε ότι οι αντίστοιχες παροχές ήταν $4700 \text{ m}^3/\text{h}$ και $3750 \text{ m}^3/\text{h}$, ενώ προέρχονταν εξολοκλήρου από τις πηγές Σχινοχωρίου. Επομένως, προκύπτει ότι στην περίπτωση αυτή $950 \text{ m}^3/\text{h}$ αποτελούσαν τις διηθήσεις του χείμαρρου αυτού προς τα υπόγεια νερά. Όσον αφορά τους υπόλοιπους χείμαρρους, οι απορροές του χείμαρρου Ξηριά είναι μικρής διάρκειας και εκφορτίζεται στην θάλασσα, με αποτέλεσμα να μην εμπλουτίζει σημαντικά τα υπόγεια νερά. Οι υπόλοιποι χείμαρροι έχουν πιο μικρές απορροές και ο εμπλουτισμός είναι σχεδόν μηδαμινός. Επιπλέον, δεν παρουσιάζουν διαμορφωμένη κοίτη προς την θάλασσα και καταλήγουν να εμπλουτίζουν εν μέρει τα αδρομερή υλικά των βορείων και δυτικών περιθωρίων της πεδιάδας. Κατά συνέπεια, η τροφοδοσία από τους χείμαρρους για υγρά υδρολογικά έτη ανέρχεται στα $5 \times 10^6 \text{ m}^3$, όπου το 50% των απορροών προέρχεται από τον Ίναχο. Επίσης, για μέσα υδρολογικά έτη εκτιμάται ότι οι ποταμοχειμάρριες τροφοδοσίες δεν ξεπερνούν τα $3 \times 10^6 \text{ m}^3$.

6.3.1.3 Επιστρεφόμενες αρδευτικές ροές

Στην Αργολική πεδιάδα εφαρμόζονται διαφορετικές ποσότητες άρδευσης ανά εδαφικό τύπο (Γιαννουλόπουλος, 2000; Karamanos, Aggelides, & Londra, 2007). Μεμονωμένες μετρήσεις έδειξαν ότι σε περιοχές όπου επικρατούν αδρομερή εδαφικά υλικά η ποσότητα νερού άρδευσης ανέρχεται σε 700-900 $\text{m}^3/\text{στρέμμα}/\text{έτος}$, σε αντίθεση με αργιλώδη εδάφη που απαντούν για παράδειγμα στην Δαλαμανάρα, όπου η αντίστοιχη ποσότητα είναι 500-600 $\text{m}^3/\text{στρέμμα}/\text{έτος}$ (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Όπως προέκυψε από τις επιτόπου καταγραφές των μεταβολών της εδαφικής υγρασίας και των κλίσεων του υδραυλικού φορτίου, το περίσσευμα ύδατος σε αργιλώδη εδάφη είναι σχεδόν αμελητέο. Παρόλα αυτά εκτιμάται ότι στα αμμοπηλώδη εδάφη το περίσσευμα ύδατος είναι της τάξης του 10-15% του ύψους του νερού άρδευσης. Δεδομένου ότι τα εδάφη αυτά καταλαμβάνουν έκταση 57.500 στρέμματα προκύπτει ότι

το περίσσειμα νερού ανέρχεται περίπου σε $7 - 10 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ (Γιαννουλόπουλος, 2000).

6.3.1.4 Απώλειες αρδευτικών δικτύων

Στο Αργολικό πεδίο οι αρδευτικές απώλειες σχετίζονται με τις αρδευτικές διώρυγες της Νέας Κίου και του Κιβερίου. Σύμφωνα με τον (Γιαννουλόπουλος, 2000) μετρήσεις παροχών κατά μήκος της διώρυγας του Κιβερίου έδειξαν ότι υπάρχουν σημαντικές απώλειες. Η λειτουργία της διώρυγας σε διάρκεια 5 μηνών αντιστοιχούσε σε απώλειες νερού της τάξης των $5 - 7 \times 10^6 \text{ m}^3$. Το νερό των απωλειών θα κατέληγε άμεσα ή έμμεσα στα υπόγεια νερά, αφού η διώρυγα διέρχεται ανατολικά από την πεδιάδα στα όρια του αργολικού καλύμματος. Στην διώρυγα της Νέας Κίου οι απώλειες θεωρούνται αμελητέες (Γιαννουλόπουλος, 2000).

6.3.1.5 Πλευρικές τροφοδοσίες

Οι υπόγειες πλευρικές τροφοδοσίες λαμβάνουν χώρα κυρίως στο δυτικό περιθώριο της Αργολικής πεδιάδας, όπου τοποθετείται το ασβεστολιθικό κάλυμμα. Ο (Γιαννουλόπουλος, 2000), ο οποίος έκανε την πρώτη προσπάθεια να ξεχωρίσει τις πλευρικές από τις κατακόρυφες τροφοδοσίες, εκτίμησε τις μέσες τροφοδοσίες και από αυτές αφείρεσε τις κατακόρυφες για να υπολογίσει τις πλευρικές. Με αυτόν τον τρόπο, αφού οι κατακόρυφες διηθήσεις και οι διηθήσεις χειμάρρων είναι κατά μέσο όρο στα $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ και οι συνολικές μέσες εισροές $80 \times 10^6 \text{ m}^3$, οι πλευρικές οφείλουν να είναι μικρότερες από $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ (θεωρώντας το ισοζύγιο ελλειμματικό). Οι πλευρικές εισροές συνίστανται από τις εισροές της θάλασσας και από τις εισροές των γειτονικών καρστικών υδροόρων. Επομένως, θεωρώντας τις εισροές της θάλασσας ως αμελητέες οι μέσες ετήσιες πλευρικές εισροές από το καρστικό σύστημα θα είναι $30 - 40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ (Γιαννουλόπουλος, 2000).

6.3.1.6 Τεχνητός Εμπλουτισμός

Στο Αργολικό πεδίο εφαρμόστηκε τεχνητός εμπλουτισμός λόγω της σημαντικής ποιοτικής και ποσοτικής υποβάθμισης των υδατικών πόρων που είχε σημειωθεί από το 1950. Οι επιπτώσεις της θαλάσσιας διείσδυσης έγιναν ιδιαίτερα αισθητές στην ανατολική πλευρά της πεδιάδας στην πόλη του Ναυπλίου και στις περιοχές Ασίνης – Δρεπάνου και Ιρίων (Γιαννουλόπουλος, 2000). Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού χωρίζεται σε δύο φάσεις, η πρώτη αφορούσε τις προαναφερθείσες περιοχές και διήρκησε από το 1964 – 1968 και η δεύτερη φάση αφορούσε τις περιοχές παράλληλα στην παράκτια ζώνη Πυργέλλα, Ήραιο, Αγία Τριάδα και Κουρτάκι.

Για την εφαρμογή της πρώτης φάσης του τεχνητού εμπλουτισμού κατασκευάστηκε ένας σωληνωτός αγωγός, ο οποίος μεταφέρει τα νερά της πηγής Κεφαλαρίου. Ο αγωγός αυτός τροφοδοτούσε τα υπάρχοντα αρδευτικά δίκτυα από τα οποία το νερό κατέληγε μέσω πλαστικών σωλήνων κάτω από την υπάρχουσα στάθμη των φρεάτων, ώστε να αποφεύγεται η έμφραξη των πόρων του υδροφορέα από φυσαλίδες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απορροφητικής ικανότητας στο άμεσο περιβάλλον των φρεάτων και ιδιαίτερα στη διάβρωση τοιχωμάτων των φρεάτων που δεν έχουν επένδυση προστασίας στα τοιχώματά τους. Ο εμπλουτισμός εφαρμόστηκε για πρώτη φορά τον Μάιο του 1964 και κράτησε για λίγους μήνες

γιατί χρησιμοποιούσε νερό από τις πηγές του Κεφαλαρίου του θερινούς μήνες και ξαναεφαρμόστηκε τον Φεβρουάριο του 1965 και διακόπτονταν έως το 1966 γιατί το νερό δεν ήταν αρκετό να καλύψει την απορροφητική ικανότητα των φρεάτων. Τέλος, το 1967 έως το 1968 ο τεχνητός εμπλουτισμός πραγματοποιήθηκε υπό την αιγίδα του ΤΟΕΒ του Υπουργείου Γεωργίας και διήρκεσε 120 μέρες. Συμπερασματικά, οι ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν για τεχνητό εμπλουτισμό τα έτη 1965, 1966 και 1967 είναι 1.160.000, 745.000 και 1.400.000 m³, αντίστοιχα. Η μέση απορροφητική ικανότητα υπολογίστηκε από 10-30 m³ /h, ενώ σε αδρομερείς σχηματισμούς ήταν μεγαλύτερη. Ωστόσο με την πάροδο του χρόνου η απορροφητική ικανότητα μειώθηκε. Αυτό οφείλεται στην άνοδο της στάθμης του υπόγειου νερού και της μείωσης διαφοράς δυναμικού μεταξύ της στάθμης του φρέατος και του υδροφόρου (Γιαννουλόπουλος, 2000; Γιαννούλας & Ζύμης, 2009).

Η δεύτερη φάση εμπλουτισμού πραγματοποιήθηκε το 1968 μέχρι το 1998. Σε αυτήν την φάση η νομαρχία Αργολίδα είχε εφαρμόσει δραστικά μέτρα, αφού το μέτωπο υφαλμύρινσης προελάβαινε απειλητικά μέσα στην πεδιάδα ειδικά στις περιοχές Κουρτάκι, Πυργέλλα και Αγία Τριάδα. Αρχικά, η εφαρμογή έγινε σε 130 ιδιωτικές γεωτρήσεις και φρέατα σε μια ευρύτερη ζώνη σε σχέση με την περιοχή εφαρμογής της 1ης φάσης του εμπλουτισμού. Αναλυτικότερα κάλυπτε πέρα από τις περιοχές Ασίνης-Δρεπάνου και το νότιο και όλη τη χαμηλή περιοχή του Αργολικού πεδίου από το Ναύπλιο και την Νέα Τίρυνθα μέχρι τη Νέα Κίο και προς βορρά μέχρι τις περιοχές Πυργέλας, Δαλαμανάρας και Λάλουκα (Γιαννούλας & Ζύμης, 2009). Με την κατασκευή της νέας διώρυγας της Κιβερίου, την άνοιξη του 1994 εφαρμόστηκε ο τεχνητός εμπλουτισμός και σε γεωτρήσεις που βρίσκονταν εκατέρωθεν της διώρυγας με μεγάλες ποσότητες νερού να διοχετεύονται στους υπόγειους υδροφόρους. Έκτοτε ο εμπλουτισμός πραγματοποιούνταν κατά κύριο λόγο από τη νέα διώρυγα Κιβερίου σε παρακείμενες από αυτή γεωτρήσεις με φυσική ροή και αναρρόφηση νερού από τη διώρυγα (Γιαννουλόπουλος, 2000; Γιαννούλας & Ζύμης, 2009).

Έτος	Διώρυγα Ν. Κίου	Διώρυγα Κιβερίου		Σύνολο
		Εμπλουτισμός σε γεωτρήσεις	Εκτιμώμενες απώλειες	
1990	3.094.000	-	-	3.094.000
1991	6.930.000	-	-	6.930.000
1992	5.685.370	-	-	5.685.370
1993	3.890.000	-	-	3.890.000
1994	4.500.000	4.750.000	4.750.000	14.000.000
1995	-	6.800.000	6.800.000	13.600.000
1996	-	3.610.000	3.610.000	7.220.000
1997	-	1.000.000	3.000.000	4.000.000
1998	598.920	1.980.000	2.330.000	4.919.000
ΣΥΝΟΛΟ	24.099.969	18.140.000	20.490.000	63.259.000

Εικόνα 26: Πίνακας ποσοτήτων νερού σε m³ για τον τεχνητό εμπλουτισμό που εφαρμόστηκε την περίοδο 1990 – 1998 (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Εκτός από τις παραπάνω περιόδους πραγματοποιήθηκαν κι άλλες προσπάθειες τεχνητού εμπλουτισμού τις περιόδους Ιανουάριος – Φεβρουάριος 2009, Φεβρουάριος – Μάρτιος 2017 και Μάρτιος 2021. Το 2009 εφαρμόστηκε τεχνητός εμπλουτισμός πάλι στις ανατολικές περιοχές της Αργολικής πεδιάδας και στις περιοχές Ασίνης – Δρεπάνου. Με το έργο αυτό έγινε μεταφορά νερού αρίστης ποιότητας κυρίως από τις πηγές Κεφαλαρίου και δευτερευόντως από τις πηγές της Λέρνης μέσω των υπάρχοντων αρδευτικών υποδομών (Γιαννούλας & Ζύμης, 2009). Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν 91 γεωτρήσεις που είχαν βάθος από 60-80m, 3 φρέατα βάθους 3- 15m στο αργολικό πεδίο, ενώ στην περιοχή της Ασίνης αξιοποιήθηκαν 35 φρέατα που είχαν βάθος από 6-8m και επιφανειακή διάθεση στις κοίτες των χειμάρρων Ραμαντάνη και Αμοριανού. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες ποσότητες νερού για το Αργολικό πεδίο ήταν $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ /έτος και $4,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ /έτος για την πεδιάδα Ασίνης-Δρεπάνου. Το έργο είχε ως στόχο την επαναφορά της πιεζομετρίας στα επίπεδα της Άνοιξης του 1964, όπου θεωρούνταν που η ποιότητα και η ποσότητα του νερού δεν είχε υποβαθμιστεί από την υπεράντληση. Παράλληλα τέθηκε ως στόχο η αποθήκευση νερού στους υπόγειους υδροφορείς, ώστε τους ξηρούς μήνες να καλυφθούν οι υδατικές ανάγκες της περιοχής. Και τέλος, να ανασχεθεί η εισβολή του μετώπου θαλάσσιας διείσδυσης και σταδιακά να γίνει ποιοτική αποκατάσταση των υδατικών πόρων.

Το 2017 η περιοχή εφαρμογής του έργου ορίστηκε με βάση περιβαλλοντικούς όρους από την Ήρα έως το Αργολικό κατά μήκος της διώρυγας του Αναβάλου, την περιοχή Πουλακίδας – Μάνεση, Αμοριανού και Ασίνης – Δρεπάνου σε συνεργασία της Περιφέρειας Πελοποννήσου και Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων της περιοχής. Για την εφαρμογή του έργου χρησιμοποιήθηκε το πλεόνασμα των νερών της πηγής Κεφαλαρίου μέσω των υφιστάμενων υποδομών του αρδευτικού δικτύου. Ο καθαρισμός του νερού από φερτά υλικά εξασφαλίστηκε από το σύστημα καθαρισμού των αντλιοστασίων, αλλά και σήτες κατακράτησης που τοποθετήθηκαν για το σκοπό αυτό. Η διοχέτευση του νερού στο υδροφόρο πραγματοποιήθηκε απευθείας σε αυτόν μέσω του αντλητικού συστήματος σε σημεία υδροληψίας. Σε αβαθή φρέατα το νερό κατέληγε στον υδροφόρο με τη μέθοδο της κατακρήμνισης. Η ποσότητα νερού που αξιοποιήθηκε από την πηγή Κεφαλαρίου ήταν $2,2 \times 10^6 \text{ m}^3$, όπως υπολογίστηκε από εγκατεστημένους ηλεκτρονικούς σταθμηγράφους (Γιαννούλας Ε., 2017).

Τον Μάρτιο του 2021 εφαρμόστηκε τεχνητός εμπλουτισμός αποκλειστικά για την περιοχή Ασίνης – Δρεπάνου χρησιμοποιώντας τα αποθέματα της πηγής Κεφαλαρίου. Η εφαρμογή του εμπλουτισμού βασίστηκε σε προηγούμενες υποδομές που είχαν κατασκευαστεί στους προηγούμενους εμπλουτισμούς. Δηλαδή χρησιμοποιήθηκαν η διώρυγα του Ανάβαλου, το αντλιοστάσιο Ασίνης, ο καταθλιπτικός αγωγός Άριας – Λευκακίων και η διώρυγα Ασίνης. Ο εμπλουτισμός γινόταν άμεσα, μέσω της στήλης του αντλητικού συγκροτήματος των σημείων εφαρμογής, και έμμεσα, σε μικρό αριθμό αβαθών φρεάτων χωρίς υδραυλική εγκατάσταση, όπου το νερό με παροχή $<15 \text{ m}^3$ κατακρημιζόταν από την επιφάνεια. Η συνολική ποσότητα που απολήφθηκε από την πηγή Κεφαλαρίου την περίοδο λειτουργίας του τεχνητού εμπλουτισμού ανέρχεται στα $1.080.000 \text{ m}^3$ (Γιαννούλας Ε., 2021).

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Έτος	Ποσότητες νερού μέσω διώρυγας Ν. Κίου (μ ³)	Ποσότητες νερού μέσω διώρυγας Αναβάλου (μ ³)	Συνολικές ποσότητες νερού (μ ³)
1990	3.094.000	0	3.094.000
1991	6.929.580	0	6.929.580
1992	5.685.370	0	5.685.370
1993	3.891.590	0	3.891.590
1994	4.500.000	9.500.000	14.000.000
1995	1.364.200	12.228.000	13.592.200
1996	0	7.224.000	7.224.000
1997	0	4.000.000	4.000.000
1998	598.920	4.320.000	4.918.920
1999	0	0	0
2000	0	0	0
2001	423.000	2.195.000	2.618.000

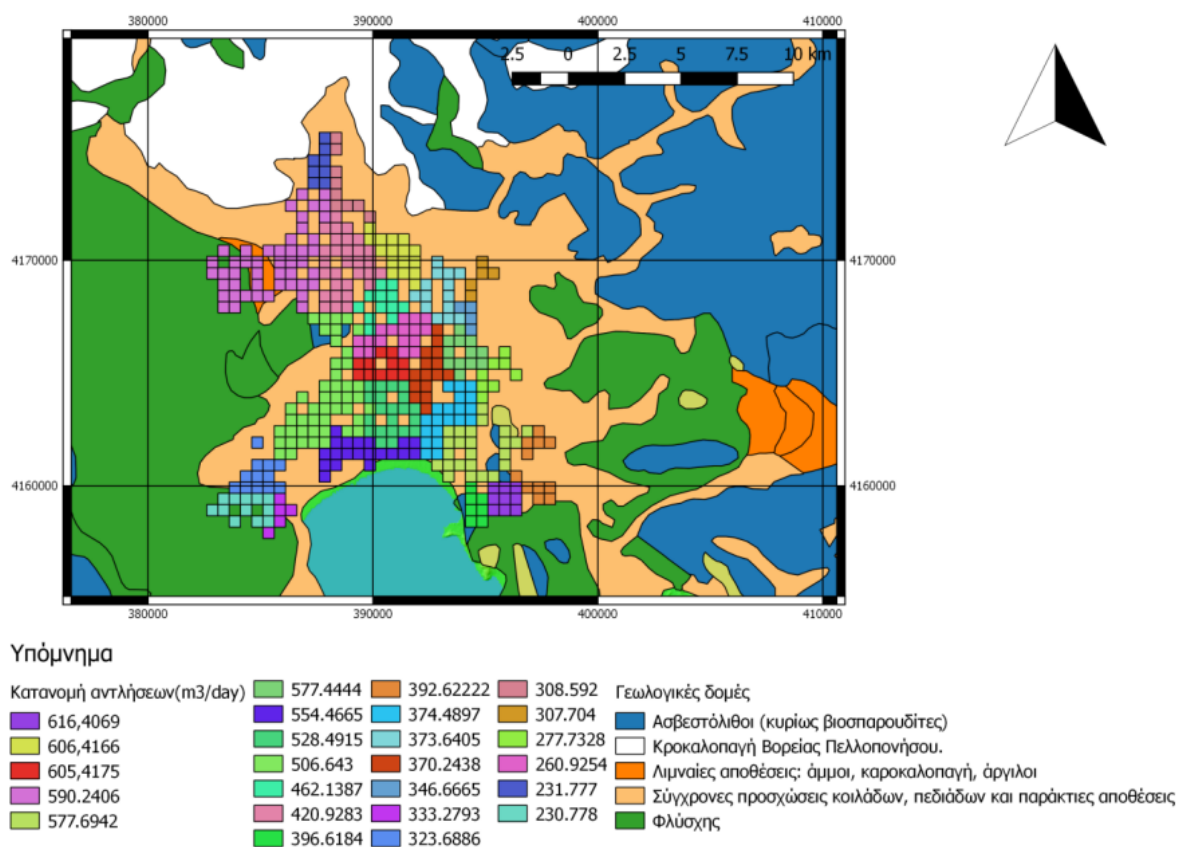
Έτος	Ποσότητες νερού μέσω διώρυγας Ν. Κίου (μ ³)	Ποσότητες νερού μέσω διώρυγας Αναβάλου (μ ³)	Συνολικές ποσότητες νερού (μ ³)
2002	1.406.470	5.136.385	6.542.855
2003	0	2.800.000	2.800.000
2004	255.000	3.103.000	3.358.000
2005	0	0	0
2006	0	0	0
2007	0	0	0
2008	144.320	0	144.320
2009	0	6.877.596	6.877.596
2010	0	4.587.466	4.587.466
2011	0	1.353.200	1.353.200
2012	0	3.836.000	3.836.000
2013	0	4.000.000	4.000.000
2014	0	4.455.453	4.455.453
2017	0	1.509.500	1.509.500
2018	0	1.147.000	1.147.000
2020	0	432.000	432.000
2021	0	504.000	504.000
ΣΥΝΟΛΟ	28.292.450	79.208.600	107.501.050

Εικόνα 27: Διαχρονικές χορηγηθείσες ποσότητες νερού (Γιαννούλας Ε. , 2021).

6.3.2 Εκροές

6.3.2.1 Γεωτρήσεις Άρδευσης

Οι αρδευτικές ανάγκες του Αργολικού πεδίου καλύπτονται στην πλειοψηφία από τα υπόγεια νερά και κατά ένα μέρος από πηγαία ύδατα (πηγές Κεφαλαρίου, Κιβερίου και Λέρνης). Επιπλέον, λειτουργεί και το κανάλι από τις πηγές του Ανάβαλου, το οποίο χρησιμοποιείται για τις αρδευτικές ανάγκες νότια της πεδιάδας λόγω του μετώπου υφαλμύρινσης (Γιαννουλόπουλος, 2000; Mitropapas, Koumantakis, Vasileiou, Perdikaki, & Kallioras, 2016). Στην περιοχή μελέτης το πρόβλημα της υπεράντλησης είναι γνωστό από την δεκαετία του '50, αφού το 1960 η ΔΕΗ του Ναυπλίου είχε καταγράψει ότι οι γεωτρήσεις ξεπερνούσαν τις 5.000. Επομένως, είναι σημαντικό να εκτιμηθεί η χωρική κατανομή των αντλούμενων ποσοτήτων για την καλύτερη κατανόηση του υδατικού ισοζυγίου. Ο (Γιαννουλόπουλος, 2000) στην διδακτορική του διατριβή είχε χωρίσει την Αργολική πεδιάδα σε 23 ζώνες άντλησης με βάση τις αντλούμενες ποσότητες που παράγει η εκάστοτε ζώνη.



Εικόνα 28: Χάρτης κατανομής αντλήσεων (m³/d) σε κελιά (500 × 500) στο Αργολικό πεδίο (Χρυσανθόπουλος, 2018), δεδομένα από (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Από τον παραπάνω χάρτη παρατηρείται ότι οι μέγιστες αντλούμενες ποσότητες κατανέμονται κοντά στην παράκτια ζώνη και ανατολικά στο Ναύπλιο, που αυτό δείχνει την δυναμικότητα του υδροφορέα και ίσως οφείλεται στο μικρό βάθος της υδροφορίας, γεγονός το οποίο καθιστά την εκτέλεση των υδρογεωτρήσεων

πιο οικονομική.

6.3.2.2 Γεωτρήσεις Ύδρευσης

Οι υδρευτικές ανάγκες του Ναυπλίου, της περιοχής Ασίνης – Δρεπάνου – Τολού καθώς και των οικισμών Αρίας και Πυργιώτικα καλύπτονται αποκλειστικά από την πηγή Κρόης. Επίσης, η πόλη του Άργους καλύπτει τις υδρευτικές της ανάγκες από υδρογεωτρήσεις που βρίσκονται δυτικά της πόλης στους καρστικούς Κρητιδικούς ασβεστολίθους, όπου η πηγή Κρόη λειτουργεί συμπληρωματικά τους καλοκαιρινούς μήνες. Οι υπόλοιποι οικισμοί για την ύδρευση χρησιμοποιούν υδρογεωτρήσεις στα Τεταρτογενή ιζήματα (Γιαννουλόπουλος, 2000). Από πληροφορίες αρμόδιων φορέων (ΔΕΥΑΡ, ΔΕΒ κλπ) εκτιμάται ότι η κατανάλωση του νερού ύδρευσης από την πηγή της Κρόης ανέρχεται σε $3 - 4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ ενώ το υπόγειο νερό ύδρευσης συμπεριλαμβανομένου και αυτού της πόλης του Αργούς που είναι καρστικό ανέρχεται σε $5 - 8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$.

6.3.2.3 Αντιπαγετική προστασία

Η αντιπαγετική προστασία εφαρμόζεται τους ξηρούς και ψυχρούς χειμερινούς μήνες για την προστασία των καλλιεργειών. Γι' αυτόν τον λόγο, όλες σχεδόν οι γεωτρήσεις είναι εξοπλισμένες με θερμοστάτη και τίθενται αυτόματα σε λειτουργία όταν η θερμοκρασία του αέρα πέσει κάτω από το μηδέν. Σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΗ το νερό για την αντιπαγετική προστασία αντιστοιχεί στο 25% του νερού άρδευσης. Κατά συνέπεια, οι αντλήσεις νερού για την αντιπαγετική προστασία κυμαίνονται από 0 έως $15 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ περίπου.

6.3.2.4 Εκφόρτιση στην θάλασσα

Από την μελέτη πιεζομετρικών χαρτών παρατηρείται ότι στις περιοχές Νέας Κίου και Μύλων υπάρχει μια σαφής υδραυλική κλίση προς την θάλασσα. Η κλίση αυτή είναι πιο ξεκάθαρη τους χειμερινούς μήνες, που παρουσιάζονται υψηλές στάθμες του υδροφορέα, με αποτέλεσμα να λαμβάνει χώρα η εκφόρτιση του προς την θάλασσα. Ο ποσοτικός προσδιορισμός των εκφορτίσεων του υδροφόρου γίνεται με την βοήθεια μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης (Γιαννουλόπουλος, 2000).

6.3.2.5 Εκφόρτιση σε πηγές και Τριμέρια

Η εκφόρτιση του υπογείου νερού του Αργολικού πεδίου, όταν δεν λαμβάνουν χώρα οι αντλήσεις, γίνονται σε φυσικούς αποδέκτες όπως η θάλασσα, τα ποτάμια και οι πηγές. Μια σημαντική πηγή για το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής αποτελεί η πηγή Γλυκιά, που βρίσκεται στους πρόποδες του Προφήτη Ηλία κοντά στο Ναύπλιο. Η πηγή αυτή χαρακτηρίζεται ως τυπική πηγή υπερπλήρωσης, η οποία εκφορτίζει στην επαφή Τεταρτογενών αποθέσεων και Μεσοζωϊκών Ασβεστολίθων. Η παροχή της είναι της τάξης των $250 \text{ m}^3/\text{h}$ ενώ ρέει συνήθως κατά τα υγρά υδρολογικά έτη (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Τα Τριμέρια αποτελούσαν περιοχές μέσα στην πεδιάδα όπου η στάθμη του υπογείου νερού συνήθιζε να είναι υψηλή με υδροχαρή βλάστηση. Η περιοχή αυτή ορίζεται από ένα τρίγωνο που σχηματίζουν τα χωριά Ίναχος – Ήρα – Χώνικας με μήκος 1.000 m και πλάτος 300 m (Γιαννουλόπουλος, 2000). Τελευταία φορά

το Τριμέρι παρουσιάστηκε το 1923 στο χωρίο Αγ. Τριάδα και διατηρήθηκε 7 – 8 χρόνια (Γάκη - Παπαναστασίου, 1991; Γιαννουλόπουλος, 2000).

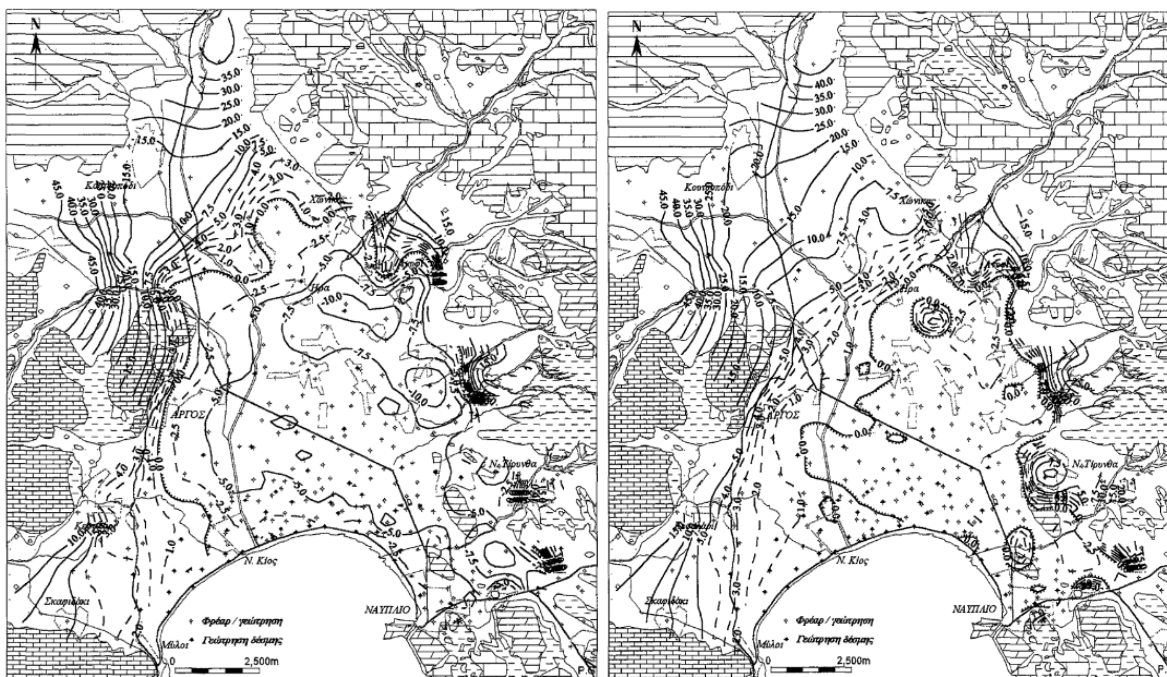
Οι συνολικές εκφορτίσεις της πηγής Γλυκιάς και σε Τριμέρια εκτιμώνται ότι δεν είναι υψηλότερες από 500 m³/h, ενώ αν θεωρηθεί ότι λειτουργούν για πέντε μήνες οι συνολικές απορροές εκτιμώνται σε 0 – 2 x 10⁶ m³/έτος (Γιαννουλόπουλος, 2000).

6.4 Πιεζομετρικές συνθήκες

Οι πιεζομετρικοί χάρτες αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την απεικόνιση των υπόγειων δικτύων ροής που επιτρέπει την μελέτη της μορφολογίας της πιεζομετρικής επιφάνειας του υδροφορέα, του τύπου του υδροφόρου, τις διευθύνσεις ροής και την εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφόρου (Καλλέργης, 2000). Για την κατασκευή των πιεζομετρικών χαρτών πραγματοποιούνται μετρήσεις στάθμης με σταθμήμετρο τουλάχιστον δύο φορές τον χρόνο. Η αντιπροσωπευτική εικόνα του δυναμικού της υπόγειας ροής του υδροφόρου δίνεται από μετρήσεις που διεξάγονται τουλάχιστον μία φορά την υγρή περίοδο (Απρίλιος – Μάιος) και τουλάχιστον μια φορά την ξηρή περίοδο (Αύγουστος - Σεπτέμβρης).

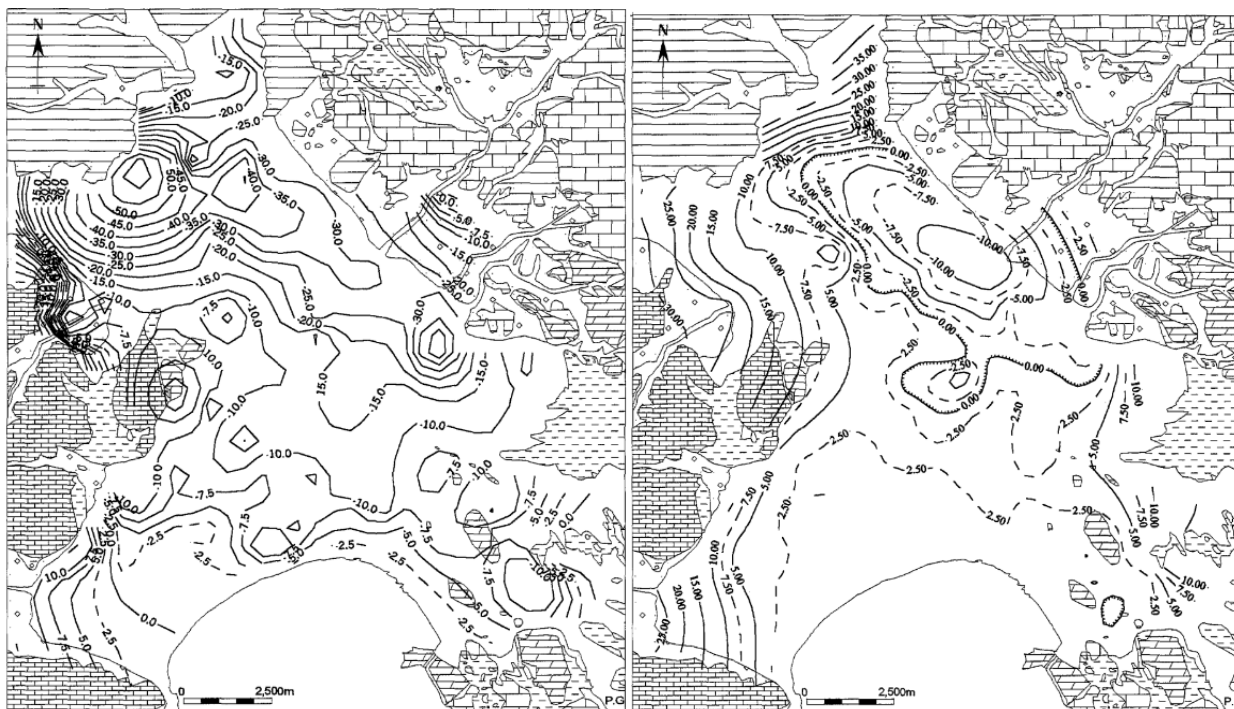
Για την μελέτη της μεταβολής της στάθμης του υδροφόρου αποτελούν χρήσιμα εργαλεία οι παλιότεροι πιεζομετρικοί χάρτες της περιοχής μελέτης για να συγκριθούν με την τωρινή κατάσταση που επικρατεί. Επιπλέον, οι παλιότεροι πιεζομετρικοί χάρτες είναι σημαντική για το Αργολικό πεδίο γιατί δείχνουν το δυναμικό της στάθμης σε περιόδους που εφαρμόζονταν Τεχνητός Εμπλουτισμός.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι πιεζομετρικοί χάρτες με σταθμημετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την τελευταία δεκαετία, τόσο την πρώτη δεκαετία των μετρήσεων όσο και την δεκαετία του '90, όπου επικρατούσε η μεγάλη ξηρασία. Στην συνέχεια, αυτοί οι χάρτες θα συγκριθούν με την τωρινή κατάσταση (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).



Εικόνα 29: Χάρτες μέσης πιεζομετρίας του φθινοπώρου (αριστερά) και της άνοιξης (δεξιά) της περιόδου 1964 - 1975 (Γιαννιλόπουλος, 2000).

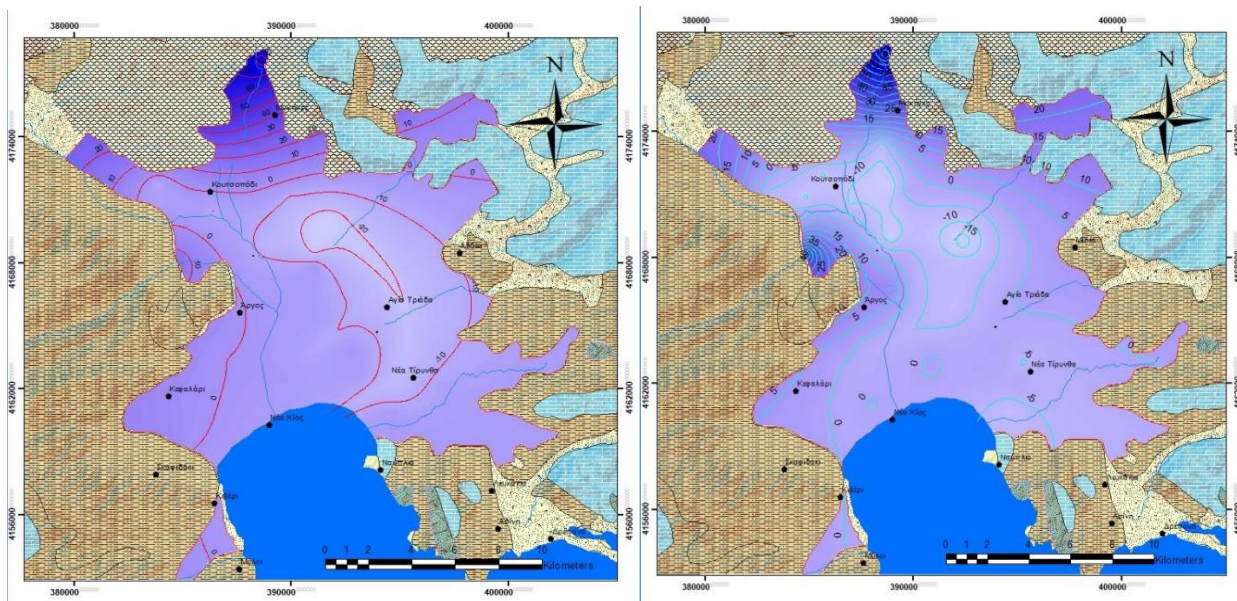
Κατά το φθινόπωρο την περίοδο 1964 – 1975 παρατηρείται ότι το όριο του απολύτου υψομέτρου της θάλασσας, +0 m, «αγκαλιάζει» όλη την αργολική πεδιάδα με τις παρυφές, όπου βρίσκεται σε επαφή με τους ανθρακικούς σχηματισμούς. Επίσης, είναι ευδιάκριτη η τροφοδοσία από τους ασβεστόλιθους της Πίνδου στα δυτικά, στα βόρεια η τροφοδοσία από τα κροκαλοπαγή και στα ανατολικά από τους ασβεστόλιθους των μεταβατικών της Πίνδου. Σε αντίθεση με την υγρή περίοδο το μέτωπο της θάλασσας έχει κατέβει προς τον Αργολικό κόλπο και εξακολουθούν να φαίνονται οι προαναφερθείσες τροφοδοσίες.



Εικόνα 30: Πιεζομετρικές καμπύλες – Φθινόπωρο 1990 (δεξιά) και Άνοιξη 1999 (αριστερά) (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Κατά το φθινόπωρο της δεκαετίας του '90 παρουσιάζεται έντονη ταπείνωση της στάθμης σε όλο το Αργολικό βύθισμα και φαίνεται ότι το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης έχει φτάσει μέχρι και στους ελεύθερους υδροφόρους που είναι σε επαφή με τους ανθρακικούς σχηματισμούς. Έντονα φαίνεται η τροφοδοσία από τους δυτικούς ανθρακικούς σχηματισμούς, ενώ λοιπές τροφοδοσίες δεν διακρίνονται. Κατά την άνοιξη του '99, όπου είχε τελειώσει το '98 η 2^η φάση του εμπλουτισμού, το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης έχει περιοριστεί στις βορειοανατολικές παρυφές λόγω του εμπλουτισμού που είχε γίνει στις περιοχές παράλληλα στην παράκτια ζώνη από το Κιβέρι μέχρι το Ναύπλιο. Τα σημεία τροφοδοσίας του υδροφορέα εντοπίζονται στο βόρειο και βορειοδυτικό τμήμα του πεδίου από τα κροκαλοπαγή και τον φλύσχη, οι οποίοι γειτνιάζουν με τους καρστικούς σχηματισμούς, αντίστοιχα.

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ



Εικόνα 31: Πιεζομετρικοί χάρτες Οκτωβρίου 2017 (δεξιά) και Μαΐου 2018 (αριστερά) (Μακαρατζή, 2020), δεδομένα από (Χρυσανθόπουλος, 2018).

Από τους παραπάνω χάρτες διακρίνονται οι τροφοδοσίες στο δυτικό και ανατολικό πεδίο της περιοχής ενδιαφέροντος, ενώ παρατηρούνται κώνοι ταπείνωσης στα κεντρικά της πεδιάδας και στις δύο περιόδους. Την υγρή περίοδο φαίνεται έντονα η τροφοδοσία από τους δυτικούς ασβεστόλιθους της Πίνδου.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εξετάστηκε η πιεζομετρική στάθμη της περιοχής του Αργολικού πεδίου την ξηρή περίοδο (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος) του 2022. Παρακάτω στον **Πίνακα 11** παρουσιάζονται τα σημεία (γεωτρήσεις) των σταθμημετρήσεων για την ανάλυση της μορφολογίας της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα.

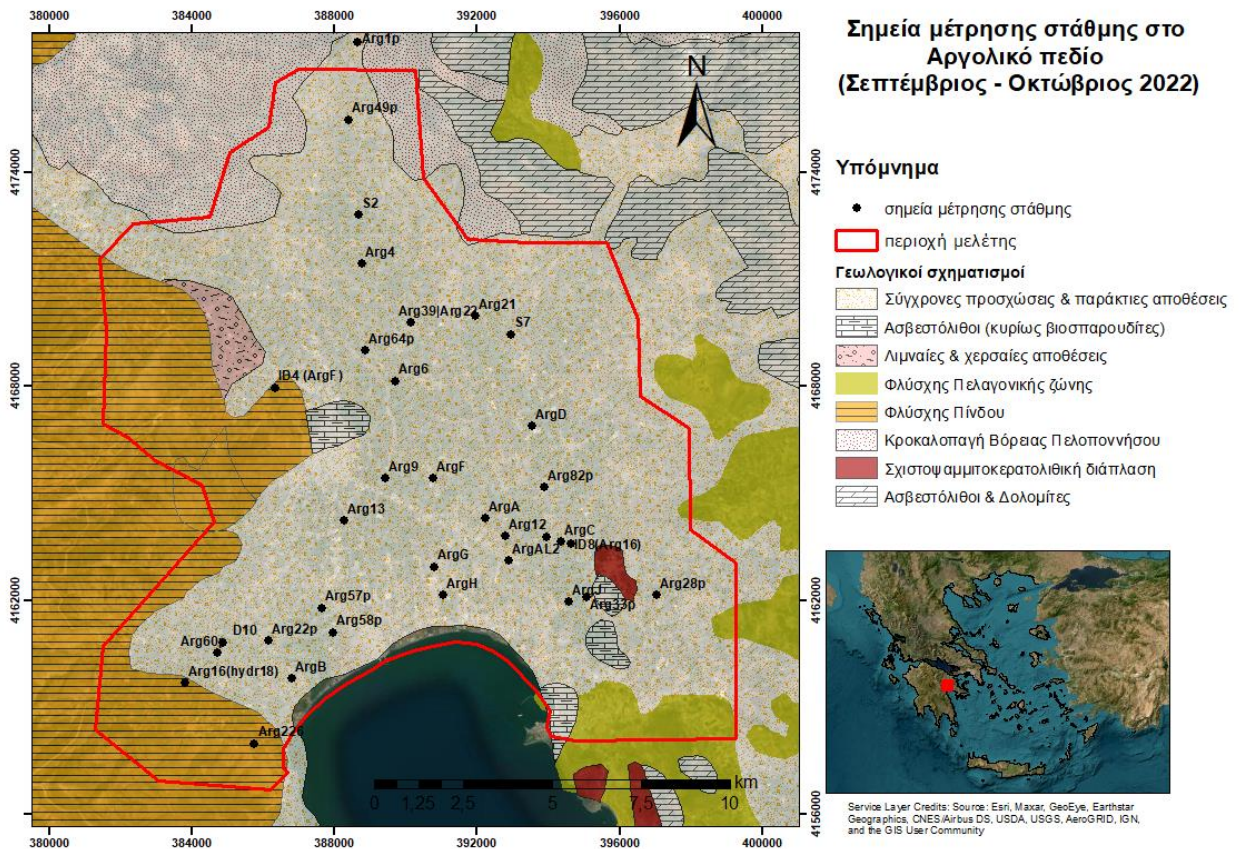
Γεώτρηση	X	Y	ΑΥΣ (m)
Arg1p	388646	4177650	88,53
Arg49p	388400	4175470	55,65
Arg4	388772	4171440	-29,24
Arg21	391931	4169960	-18,12
Arg39 Arg22	390132	4169770	-25,86
Arg64p	388859	4168990	-20,24
Arg6	389694	4168140	-8,44
Arg82p	393872	4165160	-0,11
ArgD	393527	4166870	-1,31
ID8(Arg16)	394614	4163570	2,42
ArgC	394336	4163630	7,27
Arg66p	393946	4163760	1,47
Arg12	392788	4163790	1,12

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

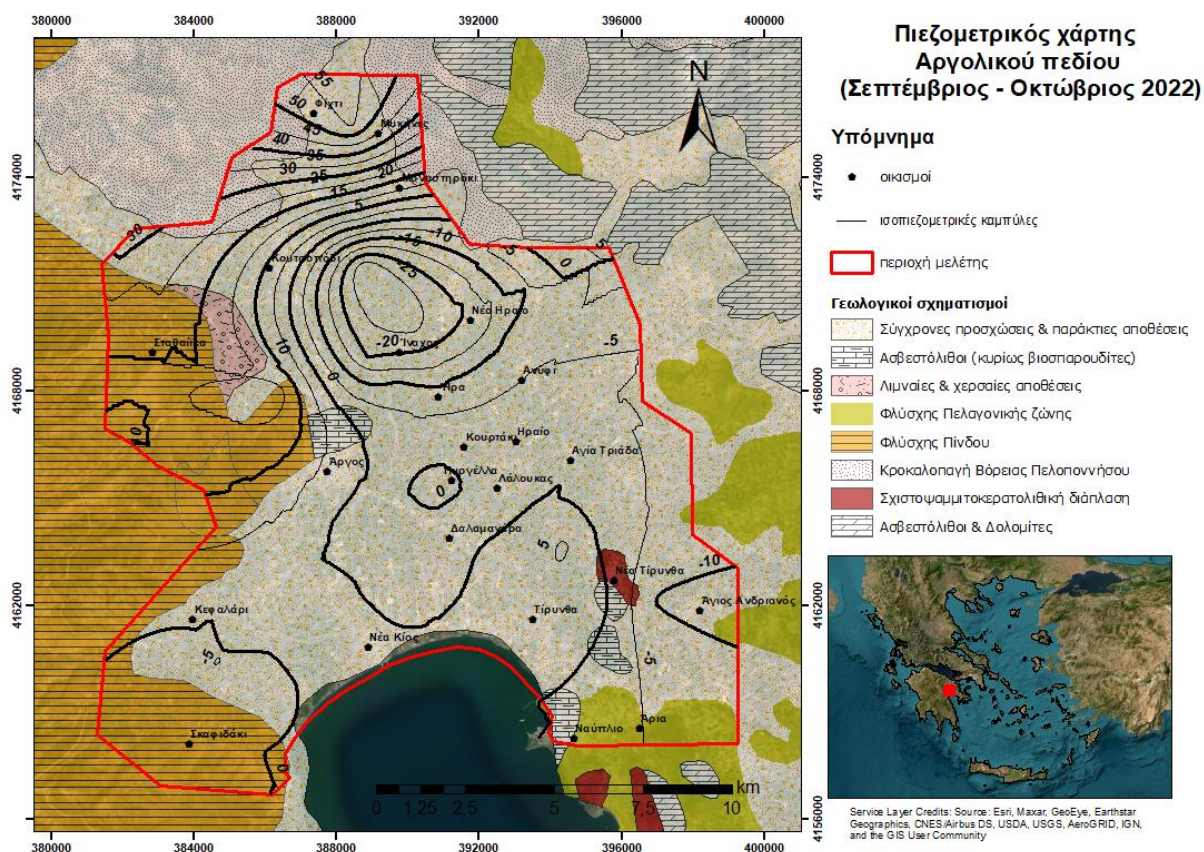
ArgA	392222	4164280	-1,21
ArgAL2	392889	4163110	4,47
ArgJ	394557	4161960	4,04
Arg28p	397020	4162140	-10,53
Arg33p	395056	4162080	3,68
ArgG	390780	4162930	-3,42
ArgH	391037	4162120	-0,48
ArgF	390760	4165410	1,39
Arg9	389406	4165410	-1,03
Arg13	388252	4164230	-1,39
Arg57p	387641	4161780	1,81
Arg58p	387956	4161090	1,52
ArgB	386814	4159800	-0,03
Arg22p	386156	4160850	0,20
ID10	384871	4160810	1,35
Arg60p	384695	4160510	-5,35
ID4 (ArgF)	386329	4167950	17,39
Arg226	385745	4157970	-0,07
Arg16(hydr18)	383791	4159660	-3,46
S2	388658	4172800	4,35
S7	392930	4169450	-7,93

Πίνακας 11: Σημεία μέτρησης στάθμης την περίοδο Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου 2022.

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ



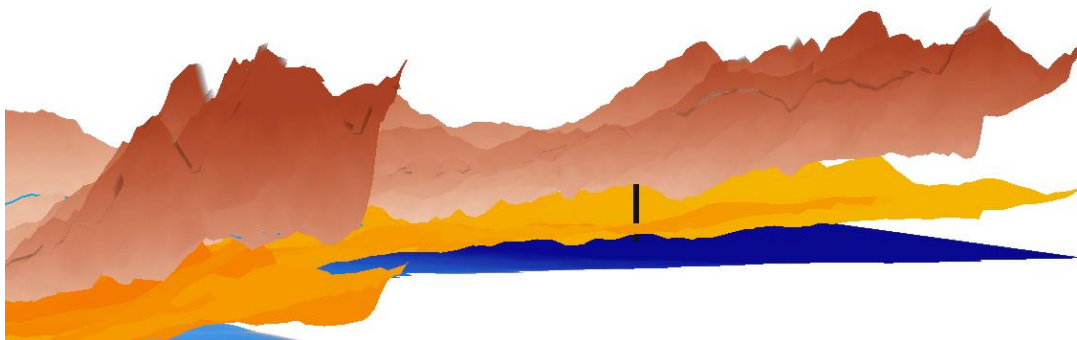
Εικόνα 32: Χάρτης γεωγραφικής θέσης των σταθμημετρήσεων στο Αργολικό πεδίο (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).



Εικόνα 33: Πιεζομετρικός χάρτης Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).

Για την ξηρή περίοδο του 2022 παρατηρούμε ότι δημιουργείται ένας κώνος ταπείνωσης κεντρικά της Αργολικής πεδιάδας. Ο κώνος αυτός οριοθετείται από τον οικισμό Ίναχος μέχρι τους οικισμούς Ήρα – Ανύφι, όπου εντοπίζονται οι χαμηλότερες τιμές στάθμης. Το μέτωπο της θάλασσας περιορίζεται κυρίως στην ανατολική πλευρά του Αργολικού πεδίου από το Μοναστηράκι βόρεια μέχρι την περιοχή Ναυπλίου – Αρίας, ενώ στην νοτιοδυτική πλευρά στο Σκαφιδάκι η στάθμη βρίσκεται στα -5 m. Σε σύγκριση με τους προηγούμενους πιεζομετρικούς χάρτες η στάθμη έχει κατέβει περίπου κατά 5 m συγκρίνοντας τους ξηρούς μήνες με τα παλαιότερα δεδομένα και τα δεδομένα του 2017. Επίσης, διακρίνεται περισσότερο η βόρεια τροφοδοσία από τα κροκαλοπαγή σε σχέση με τις υπόλοιπες στα δυτικά από τους ανθρακικούς σχηματισμούς της Πίνδου και τον φλύσχη και στα ανατολικά από τους ανθρακικούς σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης. Κύρια αιτία της υφιστάμενης κατάστασης είναι η υπεράντληση των υπογείων νερών

για την κάλυψη γεωργικών αναγκών.



Εικόνα 34: Απεικόνιση σε 2,5D της στάθμης του υδροφόρου και της γεώτρησης Arg49p στην περιοχή των Μυκηνών (πάχος υδροφορέα περίπου στα 60m).

6.5 Υδροχημικά στοιχεία

Για την διερεύνηση της ποιότητας των υπογείων νερών της πεδιάδας, καθώς και την παρακολούθηση του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης και του προβλήματος της νιτρορύπανσης, πραγματοποιήθηκαν δειγματοληψίες νερού που καλύπτουν το περισσότερο μέρος της πεδιάδας. Στα δείγματα αυτά έγιναν επιτόπιες μετρήσεις και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., όπου αναλύθηκαν χημικά ως προς τα βασικά ιόντα.

6.5.1 Δειγματοληψία και επί τόπου μετρήσεις

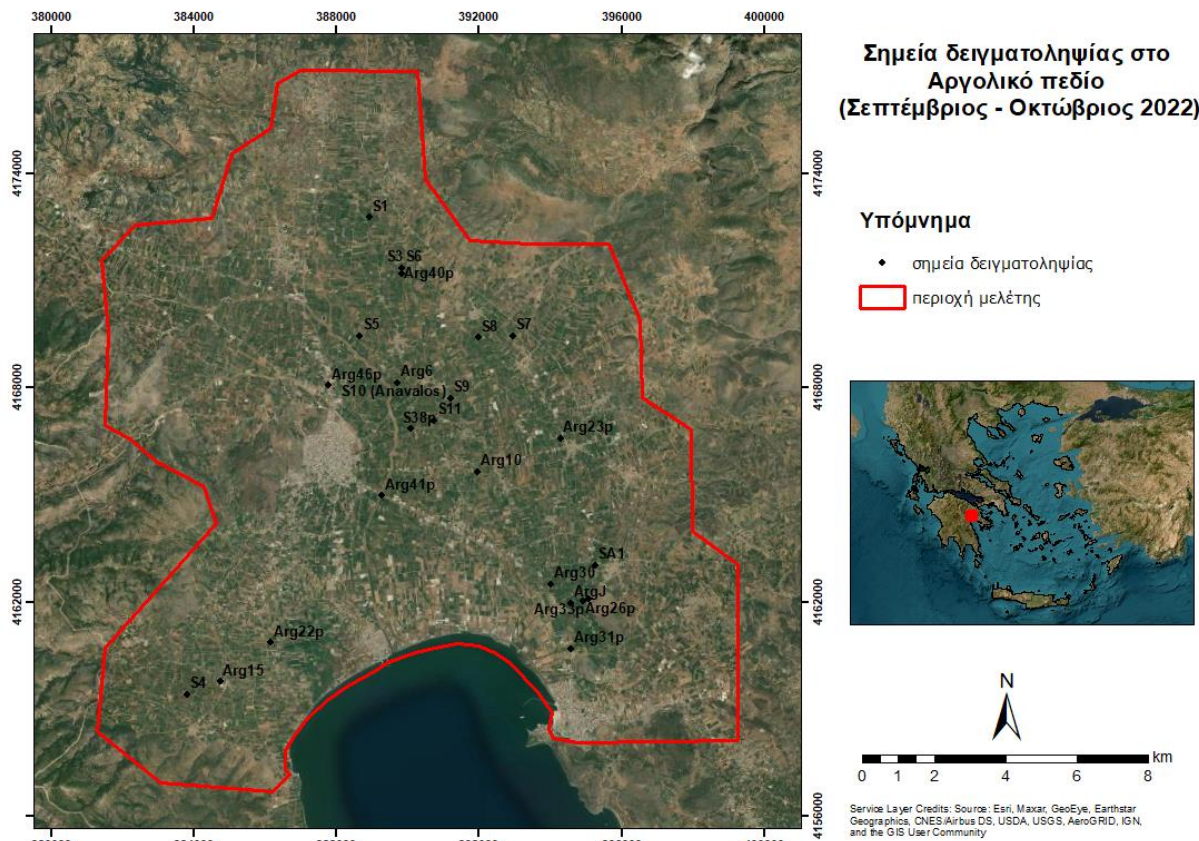
Κατά την δειγματοληψία ισχύουν συγκεκριμένοι περιορισμοί και κανόνες για την ακριβέστερη ποιοτική ανάλυση των δειγμάτων (Καλλέργης, 2000; Καλλιώρας Α. , 2015):

- Η γεώτρηση θα πρέπει να αντλείται για εύλογο χρονικό διάστημα πριν την δειγματοληψία.
- Να ισχύουν ίδιες συνθήκες σε κάθε δειγματοληψία.
- Τα δείγματα να προέρχονται από το ίδιο υδροφόρο στρώμα.
- Η αποθήκευση των δειγμάτων να γίνεται σε ειδικά μπουκαλάκια με αεροστεγές πώμα.
- Συντήρηση των δειγμάτων σε δροσερό μέρος.
- Άμεση χημική ανάλυση των δειγμάτων εντός 24 ή 48 ωρών, για την διατήρηση των χημικών χαρακτηριστικών των ιόντων.
- Οι φυσικοχημικές παράμετροι μετριοούνται επί τόπου.

Η δειγματοληψία στο πλαίσιο της συγκεκριμένης διατριβής πραγματοποιήθηκε την ξηρή περίοδο του Σεπτεμβρίου το 2022, όπως και οι σταθμημετρήσεις. Οι φυσικοχημικές παράμετροι (ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα EC, pH και θερμοκρασία) μετρήθηκαν με πολυπαραμετρικά όργανα του εργαστηρίου

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών. Οι θέσεις της δειγματοληψίας παρουσιάζονται στον χάρτη της **Εικόνα 35**, ενώ τα αποτελέσματα των επί τόπου μετρήσεων φαίνονται στον **Πίνακας 12**.



Εικόνα 35: Χάρτης γεωγραφικής θέσης των σημείων δειγματοληψίας στο Αργολικό πεδίο (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).

Σημείο δειγματοληψίας	X	Y	EC (μS/cm)	Θερμοκρασία (°C)	pH
S1	37,6979736	22,74157785	1190	20	6,3
S7	37,66859059	22,7876525	2100	18,5	6,5
Arg15	37,5803	22,69631	2030	18	6,8
Arg10	37,63414	22,777179	2510	18,3	6,6
Arg33p	37,60243	22,812815	2530	19	6,6
S4	37,57700595	22,68566452	888	18,6	6,7
S5	37,66795524	22,73905858	1380	19	7
Arg22p	37,5903	22,712195	1175	19	6,7
S3	37,68523243	22,7521766	927	19	6,4
S6	37,68533388	22,75211859	1180	19	6,5
Arg23p	37,64287216	22,8032824	1517	18	7
ΣΑ1	37,61097	22,814835	1900	19,2	7
Arg26p	37,60179	22,81108	2870	18,7	7
ArgJ	37,6012624	22,8071833	3660	18,3	7

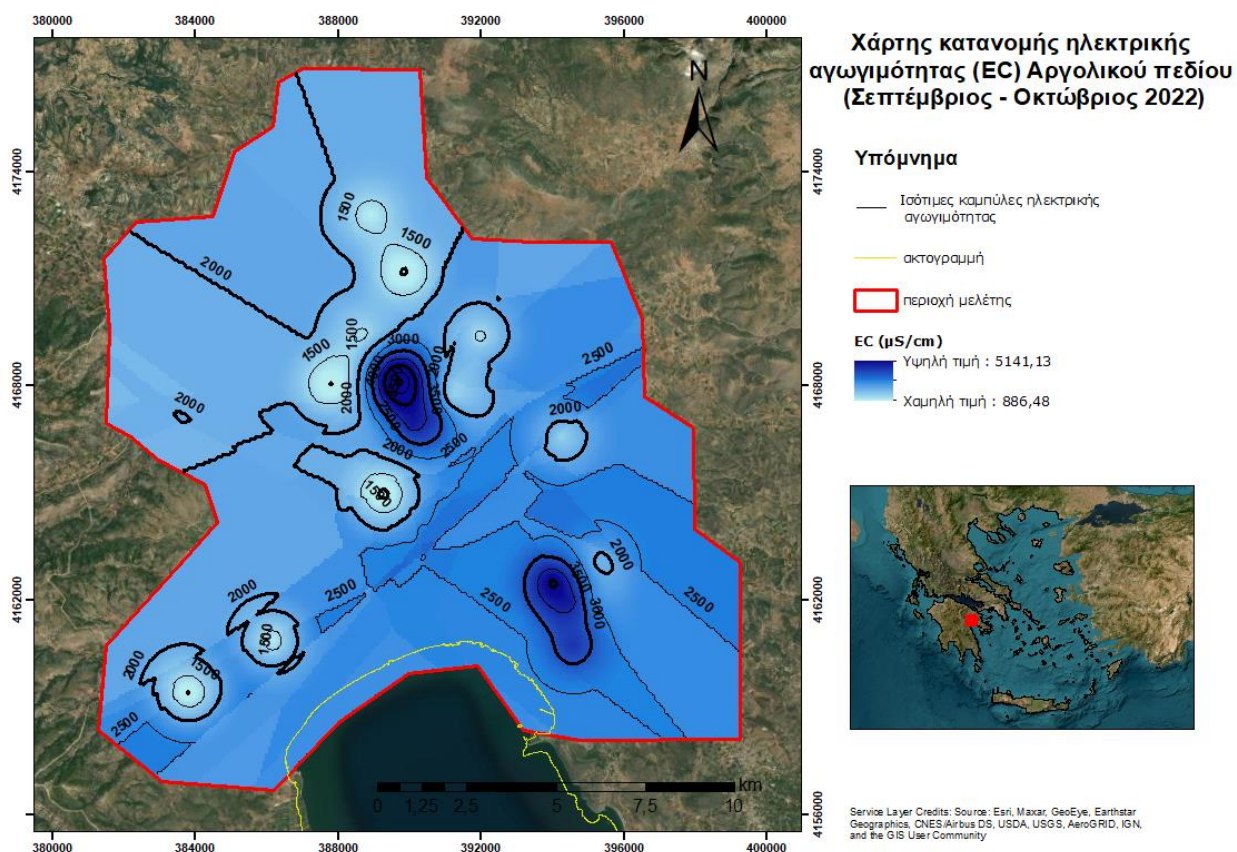
Arg31p	37,58982	22,8075	3400	18,5	6,97
Arg30	37,60605	22,80088	4150	18,1	6,96
Arg41p	37,62773	22,74676	823	19,2	6,975
Arg6	37,65641622	22,75117069	5300	18	6,955
Arg40p	37,68392	22,75206	896	19,2	6,957
S8	37,66802796	22,77670808	1362	25,9	6,902
S9	37,652672	22,76815116	1131	18,7	6,912
S10 (Ανάβαλος)	37,652671	22,76815117	2010	17,4	6,924
S11	37,64698676	22,76302848	3310	18,4	6,968
S38p	37,64477	22,75573	3700	18,4	6,924
Arg46p	37,65539	22,72939	936	23,1	6,944

Πίνακας 12: Επί τόπου μετρήσεις δειγμάτων του αλλουβιακού υδροφόρου συστήματος στο Αργολικό πεδίο (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).

6.5.1.1 Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα (Specific Electrical Conductivity, SEC)

Η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί μια πρώτη ποιοτική ένδειξη και εκτίμηση της χημικής κατάστασης των υδάτων. Η μέτρηση του μεγέθους αυτού γίνεται επί τόπου με αγωγιμόμετρο και ορίζεται ως 1 cm^3 σε θερμοκρασία ίση με $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Ως φυσικό μέγεθος, προσδιορίζει την αγωγιμότητα του νερού ως μέσο για την μετάδοση του ρεύματος. Η αγωγιμότητα του νερού εξαρτάται άμεσα από την χημική σύσταση του νερού. Δηλαδή, η συγκέντρωση των χημικών στοιχείων που υπάρχουν στο νερό επηρεάζουν το εν λόγω μέγεθος (Καλλιώρας Α., 2008). Το μέγεθος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα γλυκά υπόγεια νερά δεν ξεπερνά τα $1000 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$, ενώ μεγαλύτερες τιμές ($>1500 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$) υποδεικνύουν ότι ο υπόγειος υδροφορέας έχει υποστεί ρύπανση.

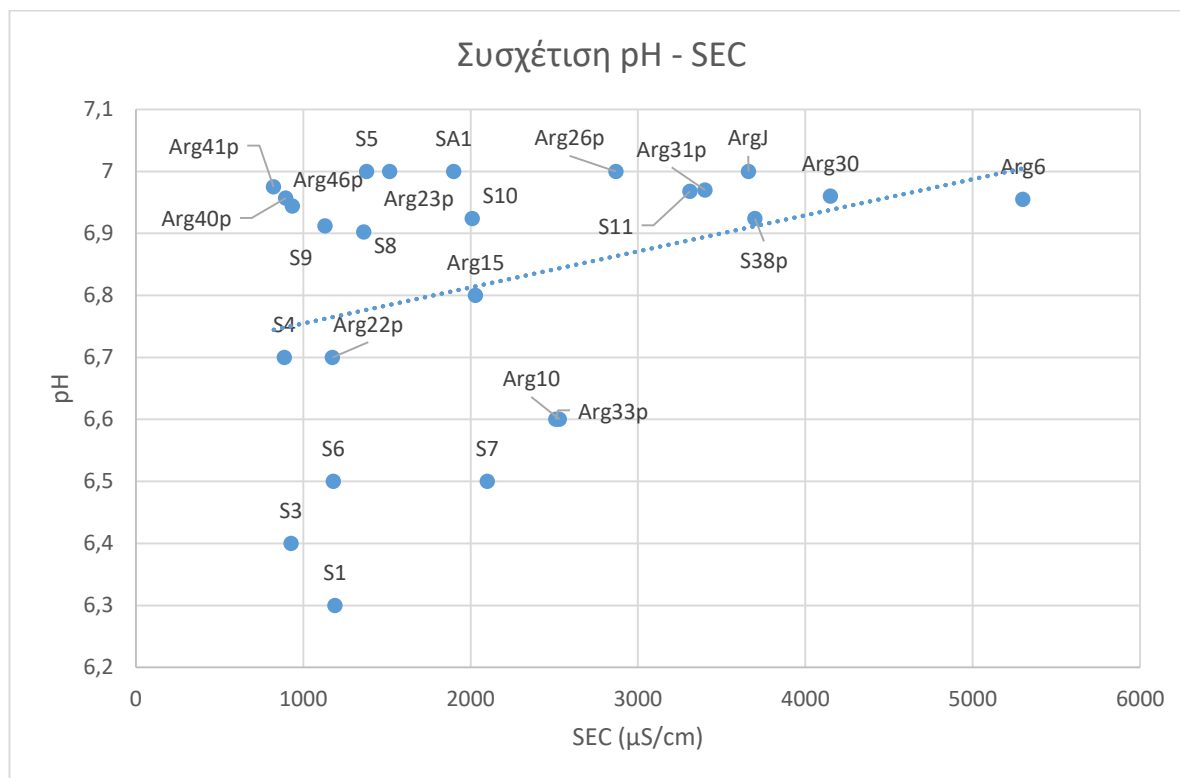
Σύμφωνα με τις μετρήσεις που παρουσιάζονται στον **Πίνακα 12** παρατηρείται ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα στα περισσότερα δείγματα είναι αυξημένη και μάλιστα οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται στον κώνο ταπείνωσης που δημιουργείται στις περιοχές Ίναχος, Ήραιο και Ανύφι, που βρίσκονται κεντρικά της περιοχής μελέτης. Σύμφωνα με τον παρακάτω χάρτη, **Εικόνα 36**, παρατηρούνται δύο μέγιστα στο κεντρικό και ανατολικό κομμάτι της Αργολικής πεδιάδας, με μέγιστη τιμή τα $5300 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$, ελάχιστη τιμή τα $823 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$ και μέση τιμή τα $2115 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$. Η αυξημένη αγωγιμότητα γενικά σε όλη την έκταση της πεδιάδας και με τιμές άνω των $5000 \text{ } \mu\text{S}/\text{cm}$, μπορεί να αποδεικνύει την ύπαρξη του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Ωστόσο, για την εξακρίβωση του φαινομένου αυτού χρειάζονται περεταίρω χημικές αναλύσεις, όπως η συγκέντρωση Cl^- στα υπόγεια νερά.



Εικόνα 36: Χάρτης κατανομής ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σε $\mu\text{S/cm}$, Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).

6.5.1.2 pH

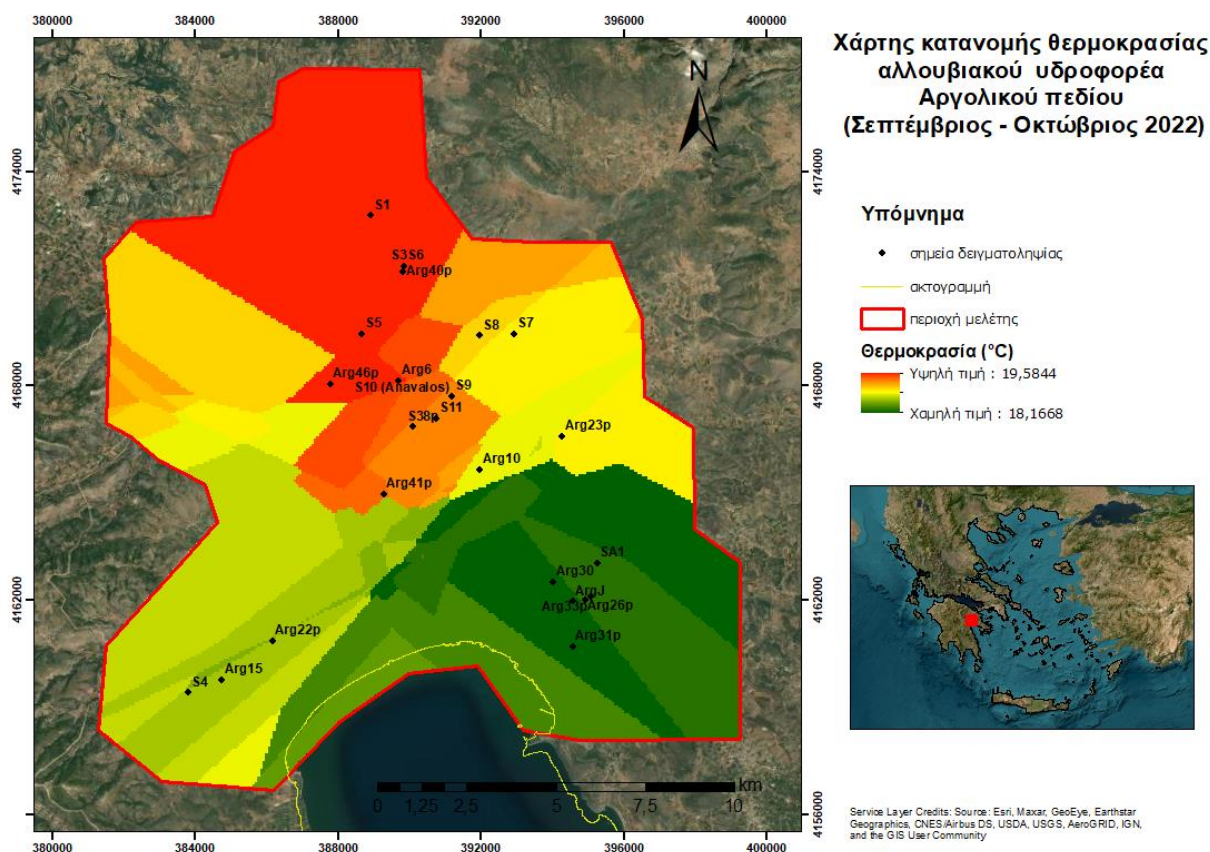
Το pH αποτελεί σημαντικό δείκτη για τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του νερού. Για την σωστή εκτίμηση του pH η επί τόπου μέτρηση πρέπει να γίνεται σε συνθήκες που να αποτρέπουν την ανταλλαγή αερίου του δείγματος με τον ατμοσφαιρικό αέρα, καθώς είναι ευαίσθητο στη συγκέντρωση CO_2 (Καλλέργης, 2000). Από τα δείγματα που συλλέχθηκαν στην πεδιάδα το pH κυμαίνεται από 6,3 έως 7 και το νερό χαρακτηρίζεται από ελαφρώς όξινο έως ουδέτερο. Σε συσχέτιση που έγινε μεταξύ του pH – SEC φαίνεται ότι τα μεγέθη pH – SEC είναι ανάλογα. Δηλαδή, με την αύξηση του pH αυξάνεται και η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτό είναι λογικό, δεδομένου ότι το pH του θαλασσινού νερού είναι μεταξύ 7,5 – 8,4 και επίσης χαρακτηρίζεται από αυξημένες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Επομένως, βλέποντας και την γεωγραφική θέση των σημείων δειγματοληψίας **Εικόνα 35** και σε σύγκριση με τον πιεζομετρικό χάρτη **Εικόνα 33**, μπορεί να τεκμηριωθεί ο ισχυρισμός για την ύπαρξη φαινομένου θαλάσσιας διείσδυσης.



Σχήμα 13: Συσχέτιση τιμών pH – SEC των δειγμάτων της περιοχής μελέτης.

6.5.1.3 Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία αποτελεί σημαντικό δείκτη δίνοντας πληροφορίες για την επαφή του γλυκού νερού με το γεωλογικό υλικό, το είδος του γεωλογικού υλικού ακόμα και για την προέλευση του νερού (Καλλέργης, 2000). Η θερμοκρασία του υπογείου νερού σε διάφορα υδροφόρα συστήματα παίρνει διακριτές θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις ανάλογα με το είδος του υλικού. Γενικά, η θερμοκρασία των υπογείων νερών παραμένει σταθερή. Στους πιο ψηλούς υδροφορείς η θερμοκρασία είναι πιο υψηλή σε σχέση με τους πιο βαθιούς υδροφορείς. Σύμφωνα με τα δεδομένα των μετρήσεων, η μέγιστη θερμοκρασία είναι 25,9 °C, η ελάχιστη είναι 17,4 °C και η μέση θερμοκρασία είναι 19,1 °C. Οι αυξημένες θερμοκρασίες στο βόρειο τμήμα ίσως οφείλεται στην τροφοδοσία του νερού από τα κροκαλοπαγή της Βόρειας Πελοποννήσου και επειδή ο υδροφόρος είναι ελεύθερος, ενώ νοτιότερα λόγω των τροφοδοσιών των ανθρακικών σχηματισμών και δυτικά και ανατολικά αλλά και επειδή ο υδροφόρος είναι υπό – πίεση και δεν έχει επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα οι θερμοκρασίες είναι χαμηλότερες.



Εικόνα 37: Χάρτης κατανομής θερμοκρασίας αλλουβιακού υδροφορέα Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).

6.5.2 Χημικές Αναλύσεις

Στην συνέχεια, τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο για χημικές αναλύσεις. Πιο συγκεκριμένα, τα NO_3^- και τα SO_4^- αναλύθηκαν στο φασματοφωτόμετρο, τα ιόντα Cl^- , HCO_3^- , Ca^{++} και Mg^{++} αναλύθηκαν με την μέθοδο της τιτλοδότησης και τα ιόντα Na^+ και K^+ αναλύθηκαν στο φλογοφωτόμετρο. Στον **Πίνακα 13** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων βασικών ιόντων.

Σημείο δειγματοληψίας	X	Y	NO_3^- (mg/L)	SO_4^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	Ca^{++} (mg/L)	Mg^{++} (mg/L)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)
S1	388909,9465	4172762,38	221,6	37	100	458	990	568	26	2,2
S7	392929,799	4169448,686	227,8	28	320	610	976	1014	2,6	3,1
Arg15	384737,5902	4159760,693	24,9	134	360	238	536	608	159,5	1,6
Arg10	391956,2361	4165638,303	56,3	11	660	136	910	1138	52,1	2,7
Arg33p	395056,1533	4162079,646	130,7	120	480	220	846	930	138,5	3,1
S4	383792,4626	4159408,31	128	50	80	244	600	498	18,6	1
S5	388643,0306	4169434,725	128,8	22	206	198	750	718	26,7	1,1
Arg22p	386155,4734	4160850,865	39	5	126	246	510	566	55	1,4
S3	389825,5272	4171336,205	128,5	12	80	212	498	500	23,8	1,1
S6	389820,562	4171347,529	154,4	15	130	214	604	606	26,3	1,1
Arg23p	394271,8853	4166577,455	459,5	138	152	692	900	1192	34	1,4
ΣΑ1	395246,4292	4163024,918	194,5	118	350	152	804	1054	47	1,8
Arg26p	394902,0979	4162010,575	129,9	74	796	210	884	1180	272,5	4,5

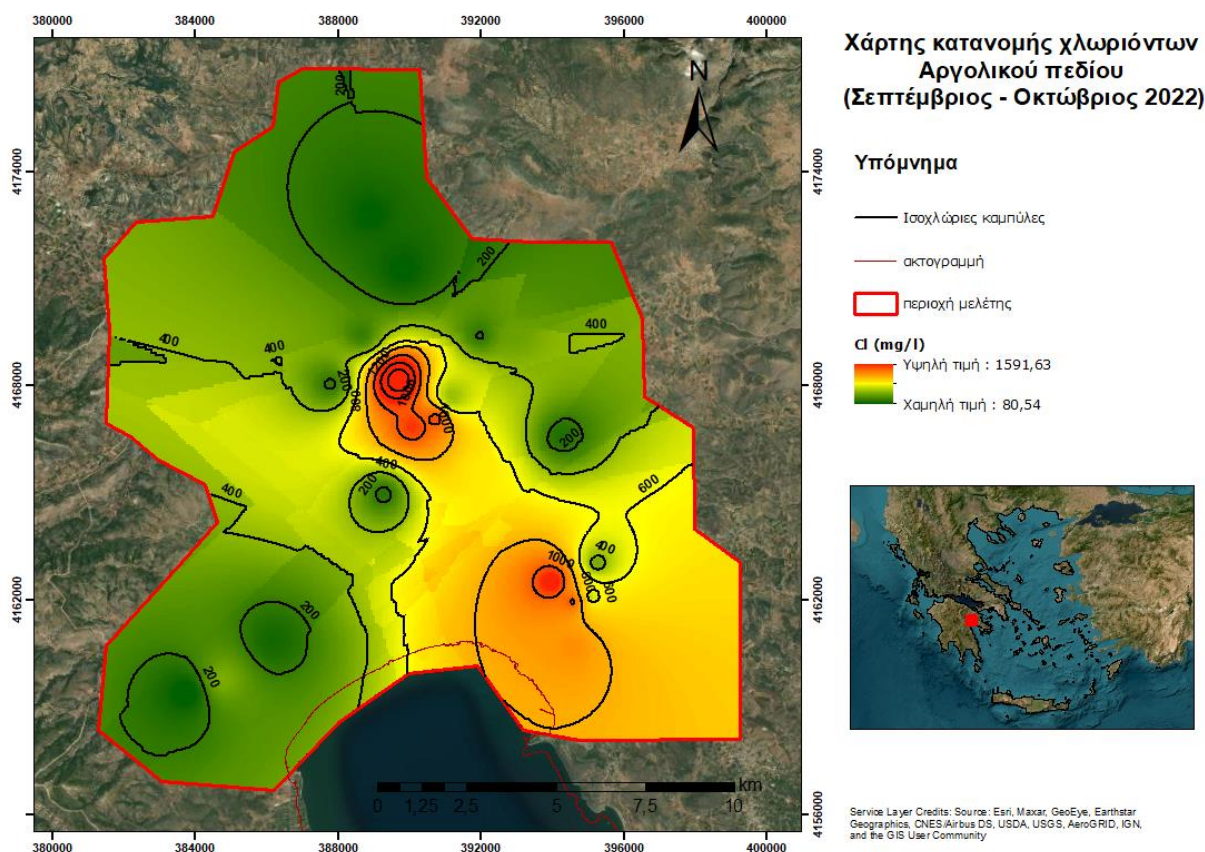
ArgJ	394557,372	4161956,4	224	340	1018	220	1316	1772	247	3,5
Arg31p	394569,2072	4160686,497	122,9	over στο 1/5	880	262	1052	1060	275	4
Arg30	394007,7264	4162494,679	313	290	1178	226	1364	2004	251,5	5
Arg41p	389262,6427	4164962,516	28,6	7	174	200	474	620	29,2	0,7
Arg6	389694,2369	4168140,139	70,9	145	1594	224	1666	1932	366	3,5
Arg40p	389813,3067	4171190,723	149,1	2	94	244	424	558	54	1,4
S8	391963,7252	4169398,799	259,5	16	194	226	678	720	19	2,1
S9	391186,6456	4167704,895	91,6	16	240	190	638	656	24,9	0,8
S10 (Ανάβαλος)	391186,645	4167704,784	6,1	70	602	230	314	582	256	8,7
S11	390726,4267	4167080,05	284	108	1038	204	1408	1860	97,5	1
S38p	390079,2757	4166842,612	238	140	1082	234	3178	1716	54,8	1,6
Arg46p	387771,3923	4168052,085	198	78	186	158	440	275	24,6	1,1

Πίνακας 13: Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων των δειγμάτων της περιοχής μελέτης.

6.5.2.1 Συγκέντρωση χλωριόντων (Cl⁻)

Υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων συνήθως αντιστοιχούν σε ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν αργιλικά ορυκτά θαλάσσια προέλευσης, όπως οι εβατορίτες και οι θερμές πηγές, ενώ στους παράκτιους υδροφορείς συνδέονται με θαλάσσια διείσδυση (Βουδούρης, 2009). Σύμφωνα με τον (Καλλέργης, 2000) η συγκέντρωση των χλωριόντων επηρεάζεται από την ξηρότητα του κλίματος. Για παράδειγμα, σε υγρές περιοχές η συγκέντρωση χλωριόντων ανέρχεται στα 10 mg/l, σε αντίθεση με τις ξηρές που ξεπερνούν τα 100 mg/l. Επίσης, καθοριστικός παράγοντας στην συγκέντρωση χλωριόντων στο νερό είναι οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως (Καλλιώρας Α., 2008): (α) η απόθεση αλάτων στο οδικό δίκτυο για την αντιπαγετική προστασία, (β) τα βιομηχανικά, οικιακά και αγροχημικά απόβλητα, (γ) η σαλαμούρα των πετρελαϊκών πεδίων και (δ) η θαλάσσια διείσδυση λόγω υπεράντλησης.

Στον χάρτη της **Εικόνα 38** παρατηρούνται υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων όχι μόνο στην παράκτια ζώνη αλλά και στην ενδοχώρα. Ειδικότερα, οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση από 80 mg/l έως 1594 mg/l, με μέση τιμή 484,4 mg/l. Συγκρίνοντας τον πιεζομετρικό χάρτη (**Εικόνα 33**) και τον χάρτη κατανομής ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (**Εικόνα 36**) με τον συγκεκριμένο χάρτη είναι φανερό ότι οι υψηλές τιμές χλωριόντων σε ορισμένες περιοχές συνδέονται με θαλάσσια διείσδυση.

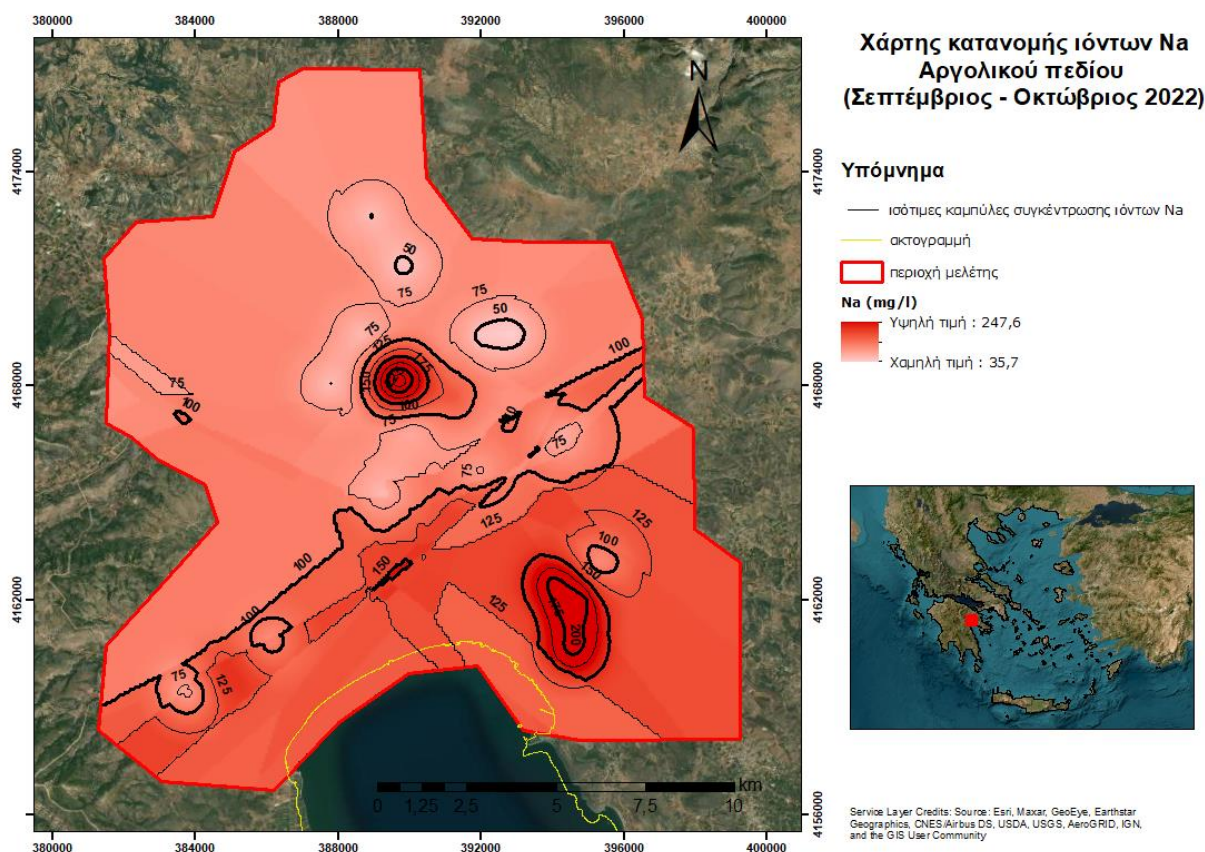


Εικόνα 38: Χάρτης κατανομής χλωριόντων του Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).

6.5.2.2 Συγκέντρωση ιόντων νατρίου (Na^+)

Τα ιόντα νατρίου συνδέονται κυρίως με την παρουσία αστρίων και συγκεκριμένα με το ορυκτό του αλβίτη ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Επίσης, η παρουσία τους στα υπόγεια νερά σχετίζονται με την θαλάσσια διείσδυση σε παράκτιους υδροφόρους ορίζοντες ή με αερομεταφερόμενα σταγονίδια από τη θάλασσα. Η τιμή των συγκεντρώσεων Na^+ στα υπόγεια νερά είναι 20 mg/l, ενώ η τιμή στο θαλασσινό νερό ανέρχεται στα 10.000 mg/l (Βουδούρης, 2009).

Στην περιοχή του Αργολικού πεδίου υψηλές συγκεντρώσεις Na με ελάχιστες περιοχές να είναι εντός ορίων στις συγκεντρώσεις (S7 και S8). Οι τιμές κυμαίνονται από 2,6 mg/l έως 366 mg/l, με μέση τιμή τα 103,28 mg/l. Με βάση τον χάρτη της **Εικόνα 39** παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές βρίσκονται στις ίδιες περιοχές όπου παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις χλωρίων, υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και αρνητικές τιμές στην πιεζομετρία. Επομένως, συμπεραίνεται ότι στις περιοχές αυτές λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης.



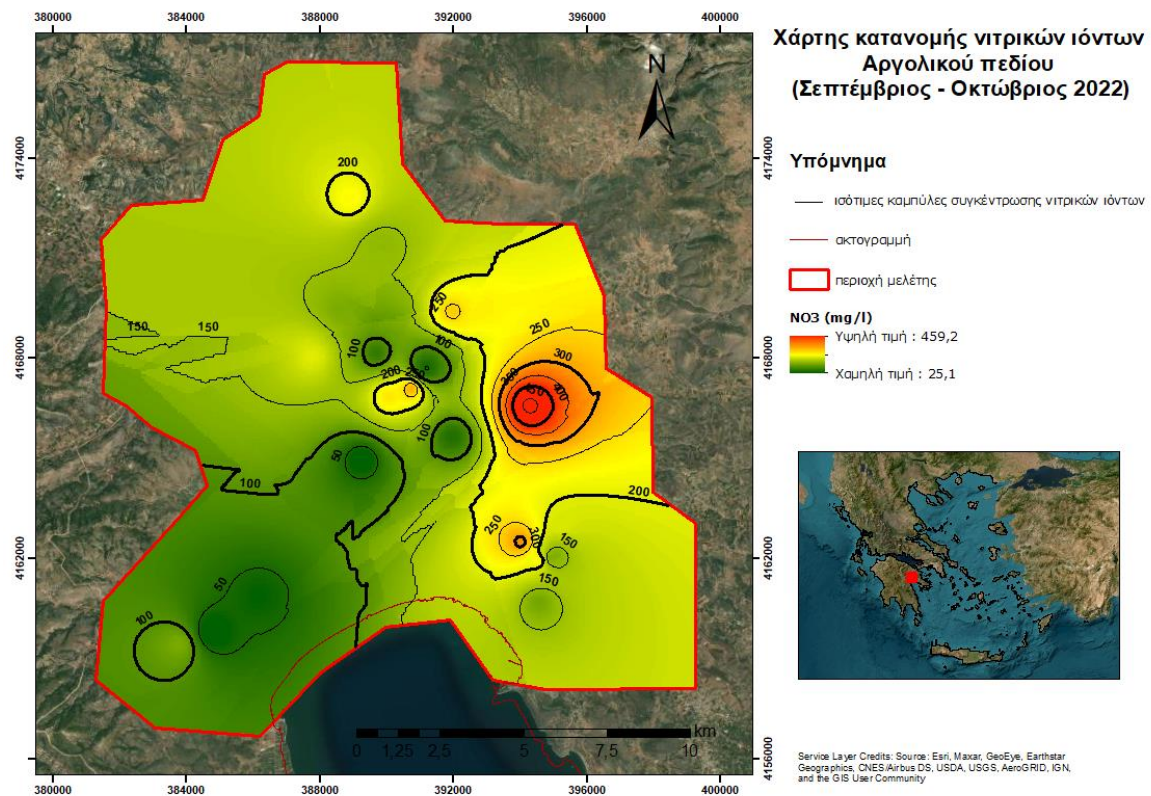
Εικόνα 39: Χάρτης κατανομής ιόντων Na⁺ Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).

6.5.2.3 Συγκέντρωση νιτρικών ιόντων (NO₃⁻)

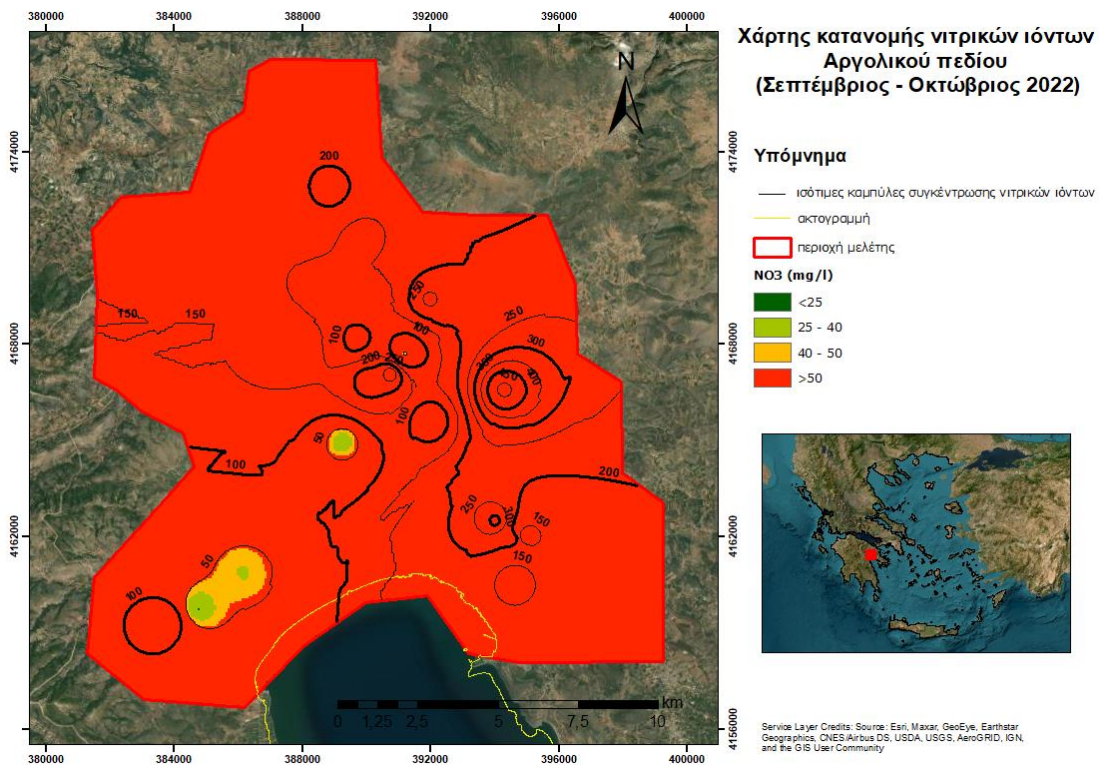
Η παρουσία των νιτρικών ιόντων συνδέεται με ανθρωπογενείς δραστηριότητες και ειδικότερα στους παράκτιους αλλουβιακούς υδροφορείς συνδέονται κυρίως με την απόθεση των αζωτούχων λιπασμάτων και άλλων σημειακών πηγών όπως τα κτηνοτροφικά και αγροχημικά απόβλητα. Οι συγκεκριμένες πηγές ρύπανσης συμβαίνουν και στην Αργολική πεδιάδα καθώς αποτελείται κυρίως από καλλιέργειες και σε κάποια σημεία υπάρχουν και βοσκότοποι (*Εικόνα 9*).

Στον χάρτη της *Εικόνα 40* παρατηρείται ότι οι υψηλότερες τιμές νιτρικών ιόντων αντιστοιχούν στις περιοχές ανατολικά της πεδιάδας, στο οικισμό Λάλουκας, Ήραιο, Κουρτάκι και Αγία Τριάδα, όπου υπάρχει αρκετά μεγάλη έκταση πορτοκαλιών, μανταρινιών και άλλων οπωροφόρων δέντρων. Επιπλέον, σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των συγκεντρώσεων νιτρικών ιόντων από το ΥΠΕΝ η Αργολική πεδιάδα παρουσιάζει προβλήματα με την νιτρορύπανση, καθώς μόνο σε μια περιοχή στον οικισμό Κεφαλάρι και σε άλλη μια περιοχή νότια του Άργους φαίνεται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπογείων νερών τους να είναι εντός των ορίων συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων.

ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ & ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΩΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ



Εικόνα 40: Χάρτης κατανομής νιτρικών ιόντων Αργολικού πεδίου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022).



Εικόνα 41: Χάρτης κατανομής νιτρικών ιόντων σύμφωνα με τα όρια ποιότητας των υδάτων από ΥΠΕΝ.

Κεφάλαιο 7^ο: Προσομοίωση υπογείων νερών της περιοχής του Αργολικού πεδίου

7.1 Εννοιολογικό μοντέλο

Η κατάσταση εννοιολογικού μοντέλου σε προβλήματα διαχείρισης υπογείων υδατικών πόρων οφείλεται στην κατανόηση των φυσικών και ανθρωπογενών διεργασιών που επηρεάζουν ένα υδροφόρο σύστημα. Σύμφωνα με τους (Kresic & Mikszewski, 2013) ένα εννοιολογικό μοντέλο ορίζεται ως «η περιγραφή των ποικίλων παραγόντων (φυσικών και ανθρωπογενών) που συμμετέχουν και συμβάλλουν στην κίνηση του υπογείου νερού στο υπέδαφος». Ένα εννοιολογικό υδρογεωλογικό μοντέλο περιγράφει τα εξής χαρακτηριστικά (Περδικάκη, 2016):

- Τον τύπο του υδροφόρου στρώματος μέσα στο οποίο ρέει το υπόγειο νερό
- Την ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται σε αυτό
- Την ταχύτητα με την οποία κινείται το νερό μέσα στην μάζα του συστήματος
- Τις εισροές και εκροές του συστήματος
- Την παρακολούθηση και προσομοίωση του συστήματος σε μελλοντικές μεταβολές φυσικών διεργασιών και ανθρωπογενείς επιδράσεις.

Επιπλέον, σε υδρογεωλογικά προβλήματα, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της Εισαγωγής, το εννοιολογικό υδρογεωλογικό μοντέλο μπορεί να περιλαμβάνει προβλήματα και ποσοτικής και ποιοτικής υποβάθμισης υδροφόρων συστημάτων.

Ένας άλλος παράγοντας που χρειάζεται να μελετηθεί είναι η υδρολογική λεκάνη που φιλοξενεί το υδροφόρο σύστημα, διότι με βάση τις δικές της παραμέτρους εκτιμώνται οι εισροές και εκροές του συστήματος. Επομένως, ο σχεδιασμός ενός μοντέλου βασίζεται στις εξής παραμέτρους (Anderson & Woessner, 1992):

- Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο και κατ' επέκταση και η τοπογραφία της υδρολογικής λεκάνης, τα οποία δίνουν πληροφορίες για το πώς κινείται το νερό μέσα σε αυτή, τις ζώνες τροφοδοσίας και τις εκφορτίσεις του υδροφόρου συστήματος.
- Οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν σε αυτή μας δίνουν πληροφορίες για το πορώδες του υδροφόρου σχηματισμού και για τις υδραυλικές παραμέτρους του (K, T, S).
- Οι κλιματικές συνθήκες και η υδρολογία, οι οποίες παίζουν και αυτές σημαντικό ρόλο στο υδατικό ισοζύγιο του υδροφόρου συστήματος.
- Οι χρήσεις γης, οι οποίες λόγω ανθρωπογενών παρεμβάσεων επηρεάζουν σαφώς αρνητικά το υδατικό ισοζύγιο. Για παράδειγμα, σε μια περιοχή που επικρατεί έντονη αστικοποίηση, η δόμηση εμποδίζει την κατεΐσδυση και τον εμπλουτισμό των νερών του υδροφόρου, ενώ αυξάνει την απορροή του συστήματος. Επίσης, οι γεωργικές περιοχές δύναται να έχουν ποιοτικά

υποβαθμισμένο νερό λόγω της ανεμπόδιστης χρήσης λιπασμάτων.

- Το νερό που εν τέλει αποθηκεύεται στο υδροφόρο σύστημα. Για τον υπολογισμό είναι απαραίτητη η εκτίμηση των εισροών και εκροών του συστήματος, η οποία είναι δύσκολη διότι αρκετές φορές δεν μπορούν να προσδιοριστούν όλες οι ποσότητες που εισέρχονται και εξέρχονται από το σύστημα.

Όλες αυτές οι παράμετροι είναι σημαντικό να προσδιοριστούν για την κατασκευή του εννοιολογικού υδρογεωλογικού μοντέλου. Μια ιδιαίτερη περίπτωση είναι τα παράκτια κοκκώδη υδροσυστήματα που έχουν υδραυλική επαφή με την θάλασσα και παρουσιάζονται φαινόμενα θαλάσσιας διείσδυσης. Επομένως, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι εξισώσεις του μηχανισμού της θαλάσσιας διείσδυσης, μέσω των μαθηματικών μοντέλων.

7.2 Μαθηματικό μοντέλο

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, το εννοιολογικό υδρολογικό μοντέλο αφορά την κατανόηση των διεργασιών που διέπουν το υπό μελέτη υδροφόρο σύστημα, καθώς επίσης αντικατοπτρίζει και την παρούσα φυσική κατάσταση του συστήματος. Για την πρόβλεψη της μελλοντικής ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης των υδροσυστημάτων χρησιμοποιούνται τα μαθηματικά μοντέλα. Ειδικότερα, έχουν ως στόχο την επίλυση διαφορικών εξισώσεων, τη γεωμετρία του συστήματος, τις αρχικές και οριακές του συνθήκες που περιγράφουν την λειτουργία του υδροφόρου συστήματος (Καλλιώρας Α. , 2015).

Η επίλυση των διαφορικών εξισώσεων πραγματοποιείται με την χρήση αναλυτικών ή αριθμητικών μεθόδων. Οι αναλυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό υδραυλικών παραμέτρων, όπως η αποθηκευτικότητα και η μεταβιβαστικότητα του υδροφορέα σε προσομοιώσεις μονοδιάστατης ή δισδιάστατης ροής. Αντιθέτως, οι αριθμητικές μέθοδοι εφαρμόζονται σε πιο πολυσύνθετα προβλήματα, όπως η μελέτη ενός ανισότροπου και ανομοιογενή υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα, η αριθμητική επίλυση είναι ένας πίνακας από προσεγγιστικές τιμές της λύσης σε διακεκριμένα σημεία του πεδίου ορισμού. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η χωρική και χρονική διακριτοποίηση του συστήματος ενός υδροφορέα με ένα πλέγμα, των οποίων η θέση περιγράφεται με όρους γραμμών, στηλών και επιπέδων (Oude Essink, 2000; Καλλιώρας Α. , 2015).

Οι αριθμητικές μέθοδοι διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες μεθόδων επίλυσης (Oude Essink, 2000; Καλλιώρας Α. , 2015):

- Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (Finite difference method): Με αυτήν την μέθοδο πραγματοποιείται διακριτοποίηση του πεδίου μελέτης σε κάνναβο ορθογωνικής μορφής και η επίλυση των εξισώσεων γίνεται πάνω στα σημεία του πλέγματος. Τα κελιά του καννάβου ορίζονται από τους δείκτες I,J,K, οι οποίοι αντιστοιχούν στην στήλη, στη σειρά και το στρώμα ενός κελιού στον τρισδιάστατο χώρο. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών έχουν πολύ καλή εφαρμογή σε δισδιάστατα και τρισδιάστατα προβλήματα, ενώ από αριθμητική άποψη είναι η πιο κατανοητή

μέθοδος. Ωστόσο, λόγω της ορθογωνικής μορφής του καννάβου αποτελεί δέσμευση και επίσης παρουσιάζει προβλήματα στην ακριβή μαθηματική διακριτοποίηση.

- Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (Finite element method): Με την μέθοδο αυτή το πεδίο του προβλήματος διακρίνεται σε στοιχεία ή υπό – περιοχές, τα οποία ορίζονται από κελιά. Η επίλυση των εξισώσεων πραγματοποιείται στο εσωτερικό κάθε υποσυνόλου με την εφαρμογή λογισμικού των διαφορών ή με την μέθοδο σταθμισμένων υπολοίπων. Με αυτόν τον τρόπο, παρουσιάζεται το πλεονέκτημα της μεθόδου που είναι η αναπαράσταση ακανόνιστων γεωμετρικά ορίων των πεδίων και οι οριακές συνθήκες, η ακριβής προσομοίωση της ετερογένειας και της ανισοτροπίας των ροών, αλλά και περιοχών με έντονες μεταβολές φορτίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία στην διακριτοποίηση του πεδίου και των ορίων σε σύγκριση με την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Ωστόσο, σημαντικά μειονεκτήματα είναι η πολυπλοκότητα των αλγορίθμων και η δυσκολία προγραμματισμού.
- Μέθοδος οριακών στοιχείων (boundary element conditions): Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Τα πλεονεκτήματα αυτά είναι η μεγάλη ακρίβεια των αποτελεσμάτων στο εσωτερικό του πεδίου, η απλότητα της εισαγωγής των δεδομένων του φυσικού προβλήματος, το μικρό μέγεθος των συστημάτων αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτουν από την διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων και η αντιμετώπιση ενός δισδιάστατου προβλήματος ως μονοδιάστατο. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι η δυσκολία περιγραφής ετερογενών πεδίων και η πολυπλοκότητα στην λύση μη μόνιμων ροών.

7.3 Ο κώδικας MODFLOW

Ο κώδικας MODFLOW (Modular three dimensional difference groundwater flow model), ο οποίος κατασκευάστηκε από την Αμερικανική Υπηρεσία Γεωλογικών Ερευνών (USGS) αποτελεί χρήσιμο και ευρέως διαδεδομένο εργαλείο για την μελέτη και ερμηνεία της ροής του υπογείου νερού. Για την προσομοίωση των υπό μελέτη υδροφόρων ο κώδικας χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους και συγκεκριμένα την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, ενώ συνδυάζει τον νόμο Darcy και την εξίσωση συνέχειας. Σύμφωνα με την συγκεκριμένη επίλυση είναι δυνατό οι εκάστοτε προσομοιώσεις της κίνησης των υπογείων νερών να πραγματοποιηθούν σε διδιάστατη ή τριδιάστατη ροή και σε συνθήκες μόνιμης ή μεταβαλλόμενης ροής (Βουδούρης, 2013; Καλλιώρας Α. , 2015).

Η αρχή του κώδικα περιλαμβάνει ένα σύνολο μαθηματικών απλοποιήσεων και υποθέσεων, τα οποία αποβλέπουν στην μετατροπή πραγματικών δεδομένων υδρογεωλογικών προβλημάτων σε ένα μαθηματικό υπολογιστικό πρόβλημα. Κάποιες από τις αρχές του κώδικα είναι οι εξής (Oude Essink, 2000; Καλλιώρας Α. , 2015):

- Το υδρογεωλογικό σύστημα έχει την δυνατότητα να προσομοιωθεί σε συνθήκες σταθερής και μεταβαλλόμενης.

- Το μαθηματικό υδρογεωλογικό σύστημα εφαρμόζει και αξιοποιεί την αρχή των πεπερασμένων διαφορών για ένα block – center.
- Δεν υφίστανται ροή εκτός των ορίων του μοντέλου.
- Το πορώδες μέσο μπορεί να προσομοιωθεί ως ανισότροπο.
- Το πορώδες μέσο μπορεί να προσομοιωθεί ως ομοιογενές.
- Το σύστημα ροής μπορεί να έχει ακανόνιστο σχήμα, περικλείοντας ελεύθερο, μερικώς υπό – πίεση ή υπό – πίεση υδροφόρο και ο συνδυασμός τους.
- Η ροή μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως και σε τριδιάστατη ροή.

Η λειτουργία του κώδικα βασίζεται σε συγκεκριμένες παραδοχές όπως: η πυκνότητα του υπογείου νερού θεωρείται σταθερή, η κίνηση του υπογείου νερού λαμβάνει χώρα σε τρεις διαστάσεις (x,y,z) σε κάρναβο ορθογωνικής μορφής, ενώ οι ιδιότητες κάθε block κατανέμονται ομοιόμορφα και ομοιογενώς (Καλλιώρας Α. , 2015).

7.3.1 Η εξίσωση των πεπερασμένων διαφορών

Σύμφωνα με την μέθοδο επίλυσης πεπερασμένων διαφορών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο χώρος διακριτοποιείται από ένα τρις ορθογώνιο πλέγμα, καθώς βασίζεται στον κάρναβο ορθογωνικής μορφής, χωρίζοντας έτσι τον χώρο σε κελία. Επομένως, η προσέγγιση με αυτήν την μέθοδο επίλυσης εφαρμόζεται σε διακριτοποιημένο χώρο υποθέτοντας ότι το κάθε κελί αντιστοιχεί σε έναν αντιπροσωπευτικό όγκο αναφοράς. Η εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς του κώδικα MODFLOW θεωρώντας σταθερή την πυκνότητα του υγρού είναι η εξής (Oude Essink, 2000):

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} \Delta V$$

Όπου:

Q_i , ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε κελί

S_s , η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού

$\Delta\varphi$, η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα Δt

ΔV , ο όγκος του συγκεκριμένου κελιού.

7.3.2 Η υδραυλική αγωγιμότητα

Η μαθηματική περιγραφή του μεγέθους της υδραυλικής αγωγιμότητας ορίζεται ως εξής (Oude Essink, 2000):

$$CR_{i,j+1/2,k} = \frac{k_{i,j+1/2,k} \Delta y \Delta z}{\Delta x}$$

Όπου:

$CR_{i,j+1/2,k}$, η υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ κόμβων [i,j,k] και [i, j+1, k] στην κατεύθυνση της γραμμής.

7.3.3 Απαιτήσεις δεδομένων

Τα απαραίτητα δεδομένα για την κατασκευή ενός μαθηματικού υδρογεωλογικού μοντέλου είναι οι υδραυλικές παράμετροι του συστήματος, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα (K) και ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας (T). Επίσης, είναι αναγκαίο να καθοριστεί η γεωμετρία του υδροφόρου συστήματος (πάχος και έκταση υδροφορέα) και οι γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν (γεωλογικοί σχηματισμοί). Επιπλέον, ανάλογα με τον τύπο του υδροφορέα (ελεύθερος ή υπό – πίεση) υπολογίζεται ο συντελεστής ειδικής απόδοσης (μ) ή ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (S), αντίστοιχα.

7.3.4 Αρχικές και Οριακές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες περιγράφουν τις αρχικές ποσοτικές ή ποιοτικές υδρολογικές συνθήκες του υδροσυστήματος για μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή αφετηρίας, $t = 0$. Δηλαδή, οι αρχικές συνθήκες περιγράφουν την κατανομή του υδραυλικού φορτίου ή συγκέντρωσης στον χώρο για την χρονική στιγμή $t = 0$ του υδροσυστήματος ($h = f(x,y,z, t=0)$).

Οι οριακές συνθήκες ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες (Harbaugh, 2005):

- Καθορισμένου φορτίου ή Dirichlet (specified head): Το υδραυλικό φορτίο εκφράζεται ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας της περιοχής προσομοίωσης. Πάνω στην οριακή επιφάνεια το υδραυλικό φορτίο μπορεί να παραμένει σταθερό ή να μεταβάλλεται. Με αυτόν τον τρόπο αυτή η επιφάνεια μπορεί να διακρίνεται από μεταβαλλόμενο ή σταθερό φορτίο. Σε συνθήκες μόνιμης ροής το φορτίο σε κάθε χρονική στιγμή t είναι σταθερό και περιγράφεται με την εξίσωση $h = f(x,y,z)$, ενώ σε συνθήκες μεταβαλλόμενης ροής το φορτίο είναι συγκεκριμένο σε κάθε χρονική στιγμή t και περιγράφεται από την εξίσωση $h = f(x,y,z,t)$.
- Σταθερής ροής ή Neumann (specified flow): Σε αυτήν την συνθήκη η ροή καθορίζεται κατά μήκος μιας οριακής επιφάνειας, ως συνάρτηση της θέσης και του χρόνου. Σε περίπτωση μόνιμης ροής περιγράφεται από την σχέση $\partial h/\partial n = f(x,y,z,t)$ και σε περίπτωση μη μόνιμης ροής περιγράφεται ως $\partial h/\partial n = f(x,y,z)$, ενώ στην περίπτωση αδιαπέρατου υδραυλικού ορίου λόγω γεωλογικού σχηματισμού ή υπόγειου υδροκρίτη περιγράφεται ως $\partial h/\partial n = 0$, όπου n η διεύθυνση κάθετα στην ροή.
- Μεταβαλλόμενης ροής ή Cauchy (head dependent flow): Η συνθήκη αυτή εξαρτάται τόσο από το μεταβαλλόμενο φορτίο της ροής διαμέσου μιας οριακής επιφάνειας όσο και από την υδραυλική κλίση εγκάρσια στην οριακή επιφάνεια.

7.3.5 Μαθηματική περιγραφή

Ο κώδικας MODFLOW εφαρμόζει την εξίσωση συνέχειας στα υπόγεια νερά με βάση τον νόμο του Darcy σε τρεις διαστάσεις και για διάφορους τύπους υδροφόρων στρωμάτων. Η επίλυση των εξισώσεων

πεπερασμένων διαφορών διακριτοποιείται σε χρονικά βήματα επίλυσης. Για κάθε μοντέλο καθορίζονται οι χρονικές περιόδους (stress periods) των προσομοιώσεων καθώς και τα χρονικά βήματα (time steps) των χρονικών περιόδων, οι οποίες ορίζονται από τον χρήστη.

Η μαθηματική έκφραση της τρισδιάστατης κίνησης του υπογείου νερού σταθερής πυκνότητας μέσω ενός σχηματισμού για τους ελεύθερους υδροφόρους περιγράφεται ως εξής (Harbaugh, 2005):

$$\frac{\theta}{\theta x} \left(Kx h \frac{\theta h}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left(Ky h \frac{\theta h}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left(Kz h \frac{\theta h}{\theta z} \right) \pm W = S_y \frac{\theta h}{\theta t}$$

Και για τους υπό – πίεση:

$$\frac{\theta}{\theta x} \left(Tx \frac{\theta h}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left(Ty \frac{\theta h}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left(Tz \frac{\theta h}{\theta z} \right) \pm W = S \frac{\theta h}{\theta t}$$

Όπου,

Kx , Ky , Kz , η υδραυλική αγωγιμότητα κατά τους άξονες x,y,z , οι οποίοι θεωρούνται παράλληλοι κατά τους κύριους άξονες της υδραυλικής αγωγιμότητας (LT^{-1})

Tx , Ty , Tz , ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας κατά μήκος των αξόνων x,y,z , οι οποίοι θεωρούνται παράλληλοι ως προς τους κύριους άξονες του συντελεστή μεταβιβαστικότητας (L^2T^{-1})

h , το υδραυλικό φορτίο (L)

W , οι \pm εισροές – εκροές (LT^{-1})

S , ο συντελεστής εναποθήκευσης

S_y , η ειδική απόδοση

t , ο χρόνος (T).

Για την επίλυση της εξίσωσης εκτός από την διακριτοποίηση του χρόνου χρειάζεται και η διακριτοποίηση του πεδίου, δηλαδή του χώρου. Όπως, αναφέρθηκε και παραπάνω με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών η διακριτοποίηση του πεδίου επιτυγχάνεται με την κατασκευή καννάβου ορθογωνικής μορφής, ο οποίος αποτελείται από τρισδιάστατα ορθογώνια που ονομάζονται κελιά (cells). Η πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφόρου υπολογίζεται σε ένα σημείο της κυψελίδας το οποίο ονομάζεται κόμβος. Στην προσομοίωση με block – center σύστημα οι κόμβοι βρίσκονται στο κέντρο των κυψελίδων. Με βάση τα φυσικά τους χαρακτηριστικά διακρίνονται οι εξής κυψελίδες (Reilly, 2001):

- Κυψελίδες σταθερού φορτίου (constant – head), στις οποίες η στάθμη διατηρεί σταθερή την τιμή της, ενώ η ποσότητα του νερού που εισέρχεται και εξέρχεται από την κυψελίδα μεταβάλλεται ανάλογα με την στάθμη των γειτονικών κυψελίδων.
- Κυψελίδες χωρίς ροή (no flow/ inactive), στις οποίες δεν πραγματοποιείται καμία ροή ούτε ως προς την κυψελίδα ούτε σε γειτονική κυψελίδα.
- Κυψελίδες μεταβαλλόμενου φορτίου (variable – head), στις οποίες η στάθμη δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται συνεχώς στον χρόνο προσομοίωσης.
- Κυψελίδες σταθερής ροής (constant – flux/ general head boundaries), στις οποίες η ροή παραμένει

σταθερή στην κυψελίδα αλλά η στάθμη μεταβάλλεται ανάλογα με τις στάθμες στις γειτονικές κυψελίδες.

7.4 Ο κώδικας SEAWAT

Ο κώδικας SEAWAT αποτελεί έναν συνδυασμό των πακέτων κώδικα του MODFLOW και MT3DMS σε ένα ενιαίο πρόγραμμα με στόχο την τρισδιάστατη προσομοίωση του υπογείου νερού μεταβλητής πυκνότητας. Ειδικότερα για τις μελέτες υφαλμύρινσης των υπογείων νερών, ο κώδικας βασίζεται στο υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού σε ένα περιβάλλον αλατότητας και επομένως διαφορετικής πυκνότητας ρευστού (Guo & Langevin, 2002).

Η ιδέα του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου νερού περιγράφεται από δύο πιεζόμετρα, που μελετούν την υδροδυναμική κατάσταση των δύο διαφορετικών ρευστών έχοντας την ίδια πίεση πόρων P_N . Τα υδραυλικά φορτία των δύο διαφορετικών ρευστών εκφράζονται με τις εξής μαθηματικές εξισώσεις (Guo & Langevin, 2002):

Για το υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού:

$$h_f = \frac{p}{\rho_f} h - \frac{p - p_f}{\rho_f} Z$$

Και για το υδραυλικό φορτίο του θαλασσινού νερού:

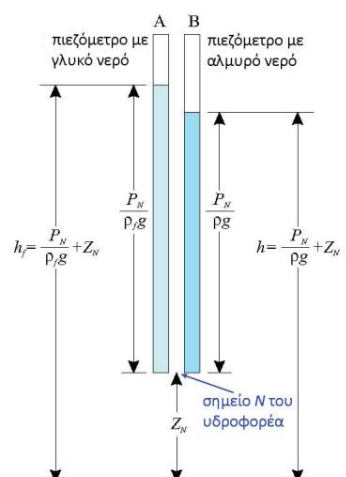
$$h = \frac{\rho_f}{\rho} h_f + \frac{p - p_f}{\rho} Z$$

όπου,

h , h_f , το υδραυλικό φορτίο του αλατισμένου και του γλυκού νερού, αντίστοιχα (L)

ρ , ρ_f , η πυκνότητα του αλατισμένου και του γλυκού νερού, αντίστοιχα (ML^{-3})

Z , το ύψος από το σημείο αναφοράς N (L).



Εικόνα 42: Σχηματική απεικόνιση της βασικής αρχής του κώδικα SEAWAT με τα δύο πιεζόμετρα διαφορετικών πυκνοτήτων (Ζιόγας, 2013; Guo & Langevin, 2002).

7.4.1 Ο νόμος Darcy

Ο νόμος Darcy για ένα ρευστό μεταβλητής πυκνότητας ορίζεται ως εξής (Guo & Langevin, 2002):

$$q_x = -\frac{k_x \theta P}{\mu \theta x},$$

$$q_y = -\frac{k_y \theta P}{\mu \theta y},$$

$$q_z = -\frac{k_z}{\mu} \left[\frac{\theta P}{\theta z} + pg \right],$$

Όπου,

q_x, q_y, q_z οι ταχύτητες Darcy, οι οποίοι θεωρούνται παράλληλοι κατά τους άξονες x, y, z

μ , το δυναμικό ιξώδες [$ML^{-1}T^{-1}$]

g , η επιτάχυνση της βαρύτητας [LT^{-1}]

7.4.2 Μαθηματική περιγραφή

Η μαθηματική περιγραφή της υπόγειας ροής του νερού του υδροφορέα που περιορίζεται ως προς το επίπεδο των αξόνων x, y, z δίνεται από την εξίσωση (Guo & Langevin, 2002):

$$\frac{\theta}{\theta l} \left[\frac{pk_l}{\mu} \left(\frac{\theta P}{\theta l} + pg \frac{\theta z}{\theta l} \right) \right] + \frac{\theta}{\theta m} \left[\frac{pk_m}{\mu} \left(\frac{\theta P}{\theta m} + pg \frac{\theta z}{\theta m} \right) \right] + \frac{\theta}{\theta n} \left[\frac{pk_n}{\mu} \left(\frac{\theta P}{\theta n} + pg \frac{\theta z}{\theta n} \right) \right]$$

$$= pS_\varphi \frac{\theta P}{\theta t} + \theta \frac{\theta \rho \theta C}{\theta C \theta t} - p_s q_s$$

Όπου,

k_l, k_m, k_n , η διαπερατότητα στις διευθύνσεις l, m, n [L^2]

μ , το δυναμικό ιξώδες [$ML^{-1}T^{-1}$]

g , η επιτάχυνση της βαρύτητας [LT^{-1}]

S_φ , η ειδική αποθηκευτικότητα σε όρους γλυκού νερού

C , η συγκέντρωση του διαλύματος [M/L^3]

p_s , η ποσότητα του νερού που προστίθεται ή αφαιρείται από το σύστημα μέσω πηγής – απαγωγής [L^3]

q_s , ο ρυθμός προσθήκης – αφαίρεσης νερού από το σύστημα ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα [T^{-1}]

θ , το πορώδες.

Η εξίσωση αυτή λειτουργεί με την παραδοχή ότι το πορώδες μέσο είναι συμπιεστό. Επίσης, η επίλυση της εξίσωσης βασίζεται στην μέθοδο πεπερασμένων διαφορών και χρησιμοποιούνται δύο τύποι πυκνότητας που μετατρέπουν την παροχή όγκου σε παροχή μάζας και κώδικα SEAWAT υπολογίζονται πριν από κάθε επανάληψη του αλγορίθμου (Ζιώγας, 2013).

Η εξίσωση μεταφοράς μάζας ενός διαλύματος με το υπόγειο νερό στην θαλάσσια διείδυση, το οποίο όμως δεν υπόκειται σε προσρόφηση ή χημική αποδόμηση σε συνθήκες ίδιας θερμοκρασίας εκφράζεται μαθηματικά ως (Guo & Langevin, 2002):

$$\frac{\theta C}{\theta t} = \frac{\theta}{\theta_{x_t}} \left(D_{ij} \frac{\theta C}{\theta x_j} \right) - \frac{\theta}{\theta_{x_t}} (q_i C) + \frac{q_s}{\theta} C_s$$

Όπου,

$i = 1,2,3$,

$j = 1,2,3$,

C , η συγκέντρωση του διαλυμένου άλατος [M/L^3]

D_{ij} , ο ταυιστής των συντελεστών υδρομηχανικής διασποράς

q_i , οι ταχύτητες Darcy

C_s , η συγκέντρωση του διαλυμένου άλατος στο νερό, που εισέρχεται ή αφαιρείται από το σύστημα μέσω πηγής ή απαγωγής [M/L^3]

q_s , ο ρυθμός αφαίρεσης —προσθήκης νερού από το σύστημα μέσω πηγής ή απαγωγής ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα [T^{-1}]

Η εξίσωση μεταφοράς χρησιμοποιείται και σε περιπτώσεις όπου η υπόγεια ροή είναι σταθερής πυκνότητας όσο και για μεταβλητής πυκνότητας. Όταν στο σύστημα παρουσιάζεται ανισοτροπία ως προς την διασπορά υπεισέρχονται οι όροι της εγκάρσιας, κατακόρυφης και διαμήκης διασποράς. Για την επίλυση της εξίσωσης ο κώδικας SEAWAT χρησιμοποιεί τις αριθμητικές μεθόδους του κώδικα MT3DMS (Ζιώγας, 2013). Οι εκάστοτε όροι της εξίσωσης λύνονται με διαφορετική μέθοδο. Πιο συγκεκριμένα, για τους όρους διασποράς και πηγής/ απαγωγής εφαρμόζεται η άρρητη μέθοδος GCG solver. Η μέθοδος αυτή θεωρείται ικανοποιητική καθώς μπορεί να λύσει με μεγάλη μαθηματική ακρίβεια προβλήματα διασποράς (Ζιώγας, 2013). Για τους όρους της μεταγωγής χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι της ρητής και άρρητης επίλυσης, οι μεικτές Eulerian – Langragian και η 3^{ης} τάξης ρητού σχήματος TVD (Ζιώγας, 2013).

7.4.3 Αρχικές και Οριακές συνθήκες

Οι αρχικές συνθήκες αντιπροσωπεύουν τις αρχικές τιμές για μια εξαρτημένη μεταβλητή, όπως το υδραυλικό φορτίο γλυκού νερού και η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας, σε μια χρονική στιγμή $t = 0$. Οι αρχικές συνθήκες τόσο για την υπόγεια ροή όσο και για την μεταφορά μάζας θα πρέπει να ορίζονται και για προσομοιώσεις μεταβαλλόμενης ροής (Guo & Langevin, 2002).

Οι οριακές συνθήκες στον κώδικα SEAWAT χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες όπως και στον κώδικα MODFLOW (Guo & Langevin, 2002; Ζιώγας, 2013):

- τύπου Dirichlet: η συνθήκη αυτή αντιστοιχεί στα όρια του πεδίου του φορτίου σταθερής συγκέντρωσης ή σταθερού φορτίου.
- τύπου Neumann: η συνθήκη αυτή είναι τα όρια της παραγωγού της εξαρτημένης μεταβλητής, όπως η εισροή νερού ή διαλύματος άλατος. Όμως, στην περίπτωση εισροή διαλύματος άλατος, μόνο η εισροή άλατος λόγω διασποράς μπορεί να θεωρηθεί ως οριακή συνθήκη, ενώ η εισροή λόγω μεταγωγής εξαρτάται και από την ροή και καθορίζεται από την αριθμητική επίλυση.
- τύπου Cauchy: στην συνθήκη αυτή τα όρια εξαρτώνται από μια τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής

που ορίζεται εκτός των ορίων του μοντέλου. Για την εξίσωση μεταφοράς, το όριο αυτό περιλαμβάνει και τον καθορισμό της παραγωγού της εξαρτημένης μεταβλητής. Στον τύπο αυτό, σε σύγκριση με τους άλλους δύο, τα όρια ορίζονται εκτός ορίων του πεδίου και επίσης η ένταση της επιρροής του εξαρτάται από ένα παράγοντα αγωγιμότητας (Conductance).

Για την προσομοίωση της ακόρεστης ζώνης ο κώδικας SEAWAT ελέγχει την στάθμη του υδραυλικού φορτίου σε κάθε κελί και για τον προσδιορισμό της μεταβολής του όγκου του νερού στο κάθε κελί χρησιμοποιεί την ειδική αποθηκευτικότητα S_s ή την ειδική απόδοση S_y , αν η πιεζομετρική επιφάνεια είναι πάνω ή κάτω από την έδρα του υπολογιστικού κελιού, αντίστοιχα. Επίσης, αν η στάθμη πέσει κάτω από την επιφάνεια της έδρας του κάτω κελιού, το κελί απενεργοποιείται, ενώ αντίστροφα το κελί ενεργοποιείται (Ζιώγας, 2013).

7.5 Μαθηματική προσομοίωση υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας στο αλλουβιακό υδροφόρο σύστημα του Αργολικού πεδίου

Για την παρακολούθηση και προσομοίωση της υπόγειας ροής του αλλουβιακού υδροφόρου συστήματος χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW – 2005 και για την μελέτη της θαλάσσιας διείσδυσης ο κώδικας SEAWAT. Οι δύο κώδικες εφαρμόζονται στο λογισμικό ModelMuse, το οποίο είναι εύχρηστο και επιτρέπει την συμβατότητα δεδομένων και αρχείων με GIS λογισμικά που είναι απαραίτητα για τέτοιου είδους υδρολογικές και υδρογεωλογικές μελέτες. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που έχουν τόσο το λογισμικό όσο και οι κώδικες είναι ότι διατίθενται δωρεάν από την Αμερικανική Γεωλογική Υπηρεσία (U.S. Geological Survey) μαζί με βοηθητικά εγχειρίδια για τον χρήστη – μελετητή.

7.5.1 Εννοιολογικό μοντέλο του υδροφόρου συστήματος της περιοχής μελέτης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το εννοιολογικό μοντέλο περιγράφει όλες τις φυσικές διεργασίες που διέπουν ένα υπό μελέτη σύστημα. Επομένως, είναι σημαντικό να οριστούν οι σωστές φυσικές παράμετροι ώστε το μαθηματικό μοντέλο που θα δημιουργηθεί να είναι αρκετά αξιόπιστο. Η προσομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης στην συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή επικεντρώνεται στο υδροφόρο σύστημα που σχηματίζεται εντός των Τεταρτογενών κοκκωδών σχηματισμών της Αργολικής πεδιάδας.

Για την επίτευξη της προσομοίωσης πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα με σκοπό την κατανόηση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής μελέτης. Επίσης, λήφθηκαν πρωτογενή δεδομένα που αφορούσαν σταθμημετρήσεις και δειγματοληψίες νερού για την κατανόηση της παρούσας κατάστασης του υδατικού ισοζυγίου.

Η έκταση της περιοχής μελέτης καθώς και τα υδρογεωλογικά όρια καθορίστηκαν από την εμφάνιση του αλλουβιακού γεωλογικού σχηματισμού στην πεδιάδα του Αργολικού πεδίου. Για την καλύτερη λειτουργία του μοντέλου ροής όλοι οι υδροφόροι σχηματισμοί του Αργολικού πεδίου που σχηματίζονται εντός των κοκκωδών αποθέσεων αποτελούν ένα ενιαίο στρώμα με ισοδύναμες υδραυλικές ιδιότητες που προκύπτουν από τα επιμέρους υδροφόρα στρώματα. Το υδροφόρο σύστημα αποτελείται από δύο στρώματα, το αργιλικό

κάλυμμα και τις αλλουβιακές αποθέσεις. Το αργιλικό κάλυμμα αναπτύσσεται από την επιφάνεια έως την βάση του (πάχος 15 m) και παρουσιάζει περιορισμένες υδραυλικές ιδιότητες. Το κύριο υδροφόρο σύστημα έχει ως οροφή το υπόβαθρο του αργιλικού καλύματος. Όσον αφορά το βάθος του υδροφορέα, σχηματίστηκε με βάση τις ισοβαθείς καμπύλες της οροφής του αδιαπέρατου υλικού. Τα δεδομένα αυτά λήφθηκαν από την διδακτορική διατριβή του Γιαννουλόπουλου (2000).

Στην περιοχή μελέτης ως φυσικός επιφανειακός εμπλουτισμός λειτουργούν τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, οι διηθήσεις χειμάρρων και το μοναδικό ποτάμι με μόνιμη ροή, ο Ερασινός ποταμός. Τέλος, ως εκροή στο σύστημα που μελετάται θεωρείται ένα πυκνό δίκτυο γεωτρήσεων και πηγαδιών σύμφωνα με βιβλιογραφική έρευνα (Γιαννουλόπουλος, 2000). Επομένως, τα είδη τροφοδοσίας που δέχεται ο υδροφόρος είναι τα εξής:

- Ο φυσικός εμπλουτισμός από τα κατακρημνίσματα μέσω της ενεργής κατείσδυσης
- Οι υπόγειες πλευρικές τροφοδοσίες
- Οι διηθήσεις χειμάρρων και ποταμών
- Ο επαγωγικός εμπλουτισμός από τις επιστρεφόμενες αρδεύσεις

7.5.2 Χρήση του λογισμικού ModelMuse στην περιοχή μελέτης

Για την προσομοίωση της υδροδυναμικής κατάστασης του κοκκώδους υδροφόρου συστήματος της περιοχής μελέτης είναι αναγκαίο να εισαχθούν στο λογισμικό ModelMuse όλα τα απαραίτητα στοιχεία που απαρτίζουν το εννοιολογικό μοντέλο. Οι αρχικές και οριακές συνθήκες του μοντέλου καθώς και όλα τα γεωμετρικά στοιχεία των δεδομένων στην περιοχή μελέτης εισάγονται ως αντικείμενα (objects). Τα αντικείμενα αυτά αποτελούν shapefiles ή Raster αρχεία που τα δεδομένα τους έχουν ψηφιοποιηθεί και γεωαναφερθεί σε περιβάλλον GIS στο σύστημα αναφοράς GGRS '87/Greek Grid. Πιο συγκεκριμένα, ως υπόβαθρο της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (DEM) και η ψηφιοποίηση των υδρογραφικών στοιχείων και άλλων οντοτήτων έγινε με βάση τον γεωλογικό και τον υδρολιθολογικό χάρτη από την διδακτορική διατριβή του Γιαννουλόπουλου (2000). Επίσης, η μορφολογία του υδροφορέα προέκυψε από βιβλιογραφικά δεδομένα και εισάγεται στο λογισμικό με μορφή ASCII αρχείων, τα οποία σχεδιάστηκαν και αυτά σε περιβάλλον GIS. Για την κατασκευή του μοντέλου στο λογισμικό ModelMuse ακολουθία μια αλληλουχία βημάτων για την ολοκλήρωση του μαθηματικού μοντέλου που αφορούν την χωρική και χρονική διακριτοποίηση, την γεωμετρία του υδροφόρου συστήματος, τις οριακές συνθήκες και τις υδραυλικές παραμέτρους.

7.5.2.1 Καθορισμός μονάδων φυσικών μεγεθών

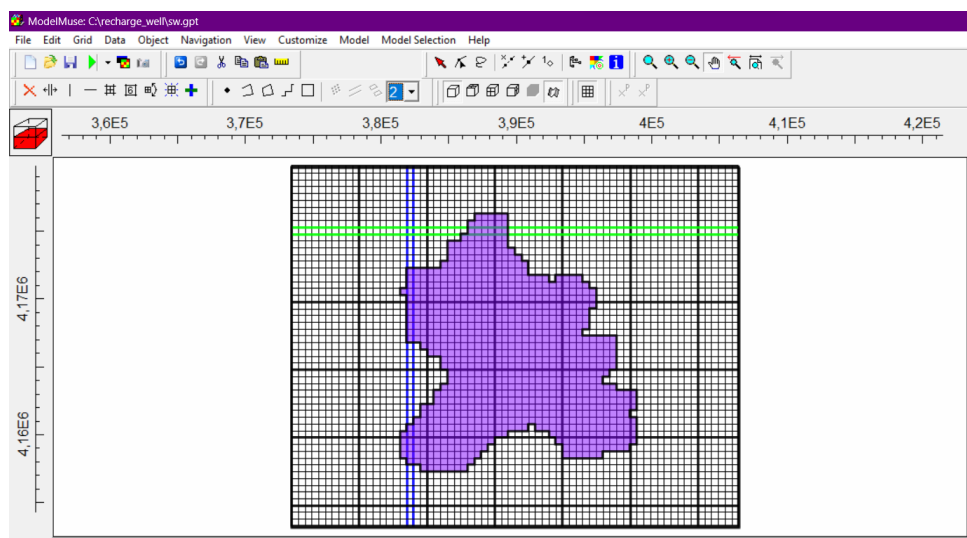
Κατά την κατασκευή του μοντέλου καθορίστηκαν οι χρονικές μονάδες σε ημέρες και οι χωρικές μονάδες σε μέτρα. Επομένως, οι μονάδες των φυσικών μεγεθών είναι οι εξής:

- Μήκος: m
- Χρόνος: day

- Υδραυλική αγωγιμότητα: m/day
- Ρυθμός άντλησης: m³/day
- Ρυθμός εμπλουτισμού: m/day

7.5.2.2 Χωρική διακριτοποίηση

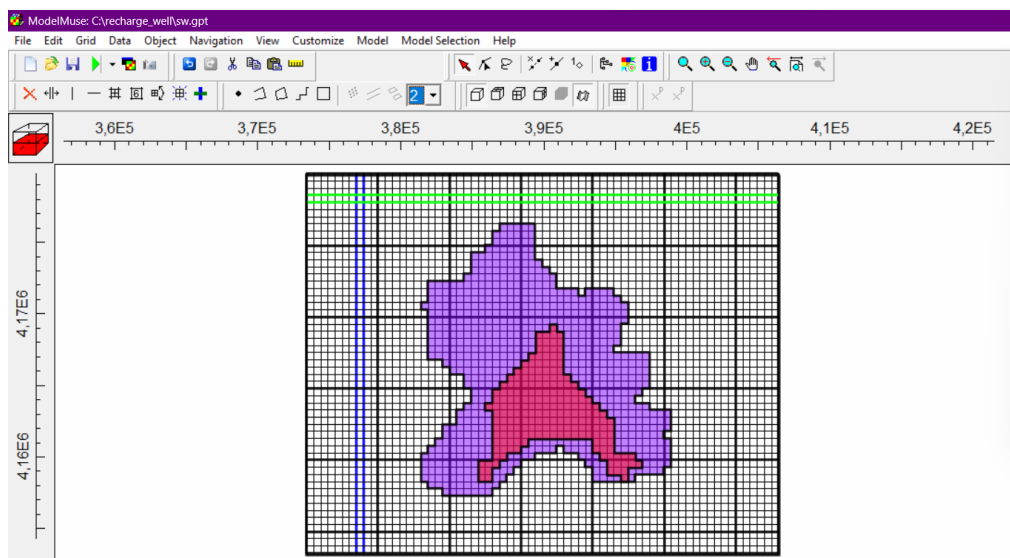
Για την χωρική διακριτοποίηση δημιουργήθηκε κάνναβος με ισοδιάσταση κελιών στα 500 m και καλύπτει την έκταση της περιοχής μελέτης με διαστάσεις 17,5 × 20 km. Ο κάνναβος της περιοχής μελέτης παρουσιάζεται στην **Εικόνα 43**.



Εικόνα 43: Δημιουργία καννάβου στο λογισμικό ModelMuse (cell size: 500 × 500 m).

7.5.2.3 Καθορισμός γεωμετρίας

Το μοντέλο ροής αποτελείται από δύο στρώματα. Το πρώτο στρώμα αποτελεί το αργιλικό κάλυμμα που έχει πάχος 15 m με περιορισμένη εμφάνιση στα νότια της περιοχής μελέτης και τοποθετείται πάνω από το κύριο υδροφόρο στρώμα. Το δεύτερο στρώμα αποτελεί το κύριο υδροφόρο στρώμα και έχει ως οροφή το αργιλικό κάλυμμα στα νότια, ενώ προς τα βόρεια αναπτύσσονται ελεύθεροι υδροφορείς. Ως δάπεδο έχει την εμφάνιση του αδιαπέρατου υποβάθρου που καθορίζεται από τις ισοβαθείς του χάρτη της **Εικόνα 18**.



Εικόνα 44: Απεικόνιση των δύο στρωμάτων σε περιβάλλον ModelMuse με κόκκινο χρώμα το αργιλικό κάλυμμα και με μωβ το κύριο υδροφόρο στρώμα.

7.5.2.4 Χρονική διακριτοποίηση

Η συνολική προσομοίωση έχει διάρκεια 61 μέρες και χωρίστηκε σε 3 περιόδους. Η πρώτη περίοδος έχει διάρκεια μιας μέρας και πραγματοποιείται σε συνθήκες μόνιμης ροής. Οι υπόλοιπες περιόδους πραγματοποιούνται σε συνθήκες μη μόνιμης ροής και έχουν διάρκεια 29 μέρες και 31 μέρες, αντίστοιχα. Η προσομοίωση αφορά τους μήνες κατά το τέλος της ξηρής περιόδου (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος), όπου οι αντλήσεις είναι ιδιαίτερα αυξημένες για την κάλυψη των γεωργικών αναγκών.

7.5.2.5 Υδραυλικές παράμετροι

Οι υδραυλικές παράμετροι προσδιορίστηκαν από την βιβλιογραφία (Γιαννουλόπουλος, 2000). Ο συντελεστής εναποθήκευσης εμφανίζει μέση τιμή $2,8 \times 10^{-3}$. Η ειδική απόδοση κυμαίνεται από 1,38 έως 4×10^{-2} , με μέση τιμή $3,2 \times 10^{-2}$. Οι τιμές του συντελεστή μεταβιβαστικότητας (T) και της υδραυλικής αγωγιμότητας παρουσιάζονται στον **Πίνακα 10**.

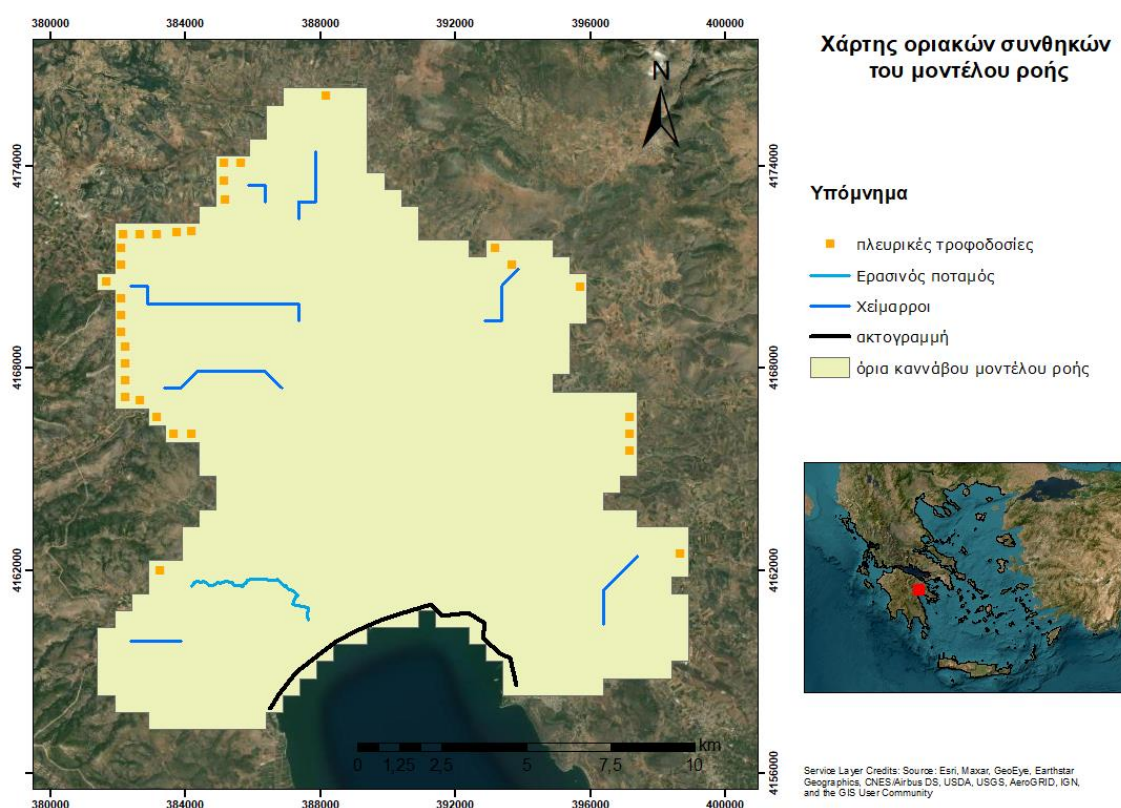
7.5.2.6 Ορισμός οριακών συνθηκών

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της υπόγειας ροής είναι οι εξής:

- Η ακτογραμμή του Αργολικού πεδίου χρησιμοποιήθηκε ως όριο σταθερού υδραυλικού φορτίου (τύπου Dirichlet) με το πακέτο Constant Head Package (CHD).
- Οι πλευρικές τροφοδοσίες από το καρστικό σύστημα στα δυτικά, το κροκαλοπαγές στα βόρεια και το καρστικό σύστημα στα ανατολικά χρησιμοποιήθηκαν ως όρια σταθερής ροής (τύπου Cauchy) με το πακέτο General Head Boundary Package (GHB).
- Ο Ερασινός ποταμός που είναι το μοναδικό ποτάμι με μόνιμη ροή στην περιοχή και χρησιμοποιήθηκε ως όριο σταθερής ροής (τύπου Cauchy) με το πακέτο River Package (RIV).
- Οι χείμαρροι της περιοχής μελέτης που είναι εφήμερης ροής χρησιμοποιήθηκαν ως όρια μη

μόνιμης ροής (τύπου Neumann) με το πακέτο Recharge package (RCH).

- Η επιφανειακή τροφοδοσία από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα καθώς και η εξατμισοδιαπνοή εφαρμόστηκαν στο όριο του καννάβου του μοντέλου ροής με τα πακέτα Recharge package (RCH) και Evapotranspiration package (EVT).
- Οι αντλήσεις που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών χρησιμοποιήθηκαν με το πακέτο Well package (WELL), με αρνητικό πρόσημο για να θεωρηθεί ως εκροή στο σύστημα.
- Εκτός των ορίων του καννάβου του μοντέλου ροής επικρατούν οριακές συνθήκες μηδενικής ροής καθώς δεν υφίσταται εισροή και εκροή νερού σε αυτά τα τμήματα.



Εικόνα 45: Χάρτης οριακών συνθηκών του μοντέλου ροής.

7.5.2.7 Στοιχεία υδατικού ισοζυγίου

Με βάση το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής μελέτης που μελετήθηκε στα παραπάνω κεφάλαια ορίζονται οι εισροές και οι εκροές του συστήματος:

- Κατείδυση ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων: Για τον υπολογισμό του όγκου των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που κατείδυει και εμπλουτίζει τα υπόγεια νερά υπολογίστηκαν αρχικά ο όγκος των μέσων μηνιαίων υψών βροχής για την περίοδο 2012 – 2022 και στην συνέχεια έγινε αναγωγή του στην έκταση της περιοχής μελέτης (242,5 km²), έχοντας υπόψιν και τον συντελεστή κατείδυσης που ανέρχεται στο 25%. Επομένως, μέσος ημερήσιος

εμπλουτισμός νερού για την περιοχή είναι $3,45 \times 10^{-4}$ m/d. Στον εμπλουτισμό αυτόν προστίθενται και ο επαγωγικός εμπλουτισμός που ανέρχεται στα $4,11 \times 10^{-4}$ m/d.

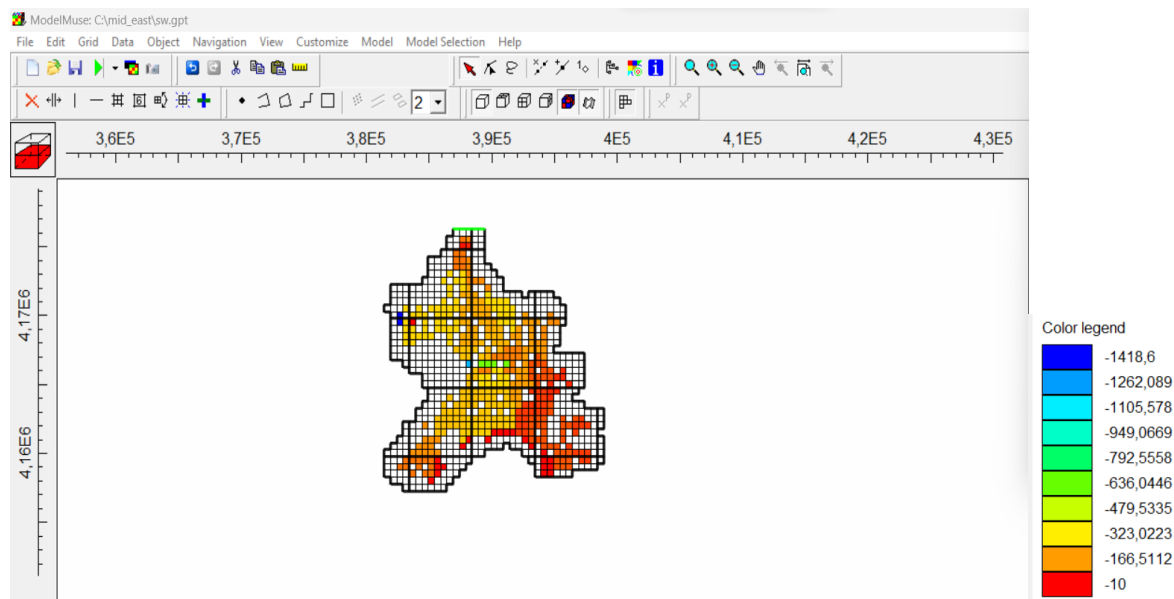
- Εξατμισοδιαπνοή: Η εξατμισοδιαπνοή για την περίοδο που εφαρμόζεται το μοντέλο ροής υπολογίστηκε ότι ανέρχεται στα $3,9 \times 10^{-3}$ m/d.
- Διηθήσεις χειμάρρων: Οι χειμάρροι επειδή δεν έχουν διαμορφωμένη κοίτη προς την θάλασσα, θεωρείται ότι όταν έχουν ροή εμπλουτίζουν τα υπόγεια νερά με διήθηση του επιφανειακού νερού. Σύμφωνα με τον Γιαννουλόπουλο (2000), οι χειμαρρικές διηθήσεις ανέρχονται στα $3 \text{ hm}^3/\text{y}$ κατά τους υγρούς μήνες.
- Αντλήσεις: Η κατανομή των αντλήσεων με τους ρυθμούς άντλησης φαίνεται στους χάρτες της **Εικόνα 46**, **Εικόνα 47** και **Εικόνα 48**.
- Υπόγειες πλευρικές τροφοδοσίες: Οι υπόγειες πλευρικές τροφοδοσίες υπολογίζονται στα $40 \text{ hm}^3/\text{year}$.

7.5.2.8 Πακέτο παρακολούθησης

Για την σύγκριση των παρατηρούμενων με των προσομοιωμένων τιμών χρησιμοποιήθηκε το πακέτο Head Observation Package (HOB), κατά το οποίο χρησιμοποιήθηκαν 33 γεωτρήσεις και πηγάδια παρακολούθησης που αφορούν τις σταθμημετρήσεις του Οκτωβρίου 2022. Οι σταθμημετρήσεις εισήχθησαν στο μοντέλο ως shapefile αρχεία και στην συνέχεια ορίστηκε ο χρόνος που καταγράφηκε η κάθε μέτρηση με βάση τα stress periods του μοντέλου ροής.

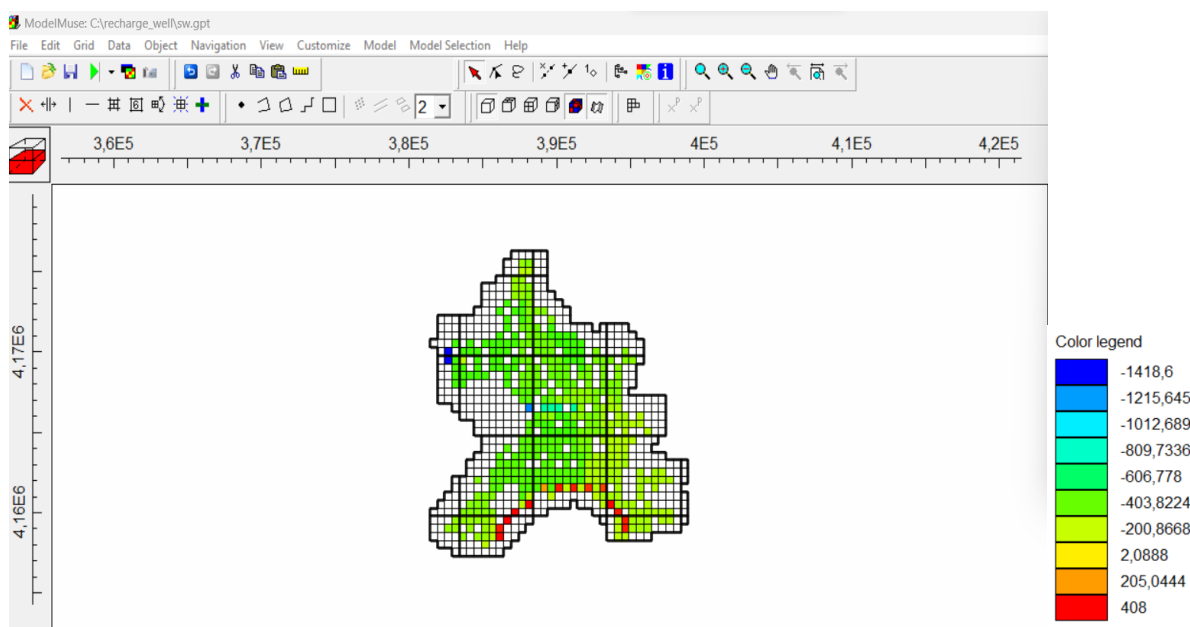
7.5.3 Αποτελέσματα MODFLOW

Στο μοντέλο ροής εφαρμόστηκαν τα 3 σενάρια προσομοίωσης που αποσκοπούν στην μετρίαση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Το πρώτο σενάριο αφορά την διαχείριση των αντλήσεων στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα με στόχο την υποχώρηση του μετώπου υφαλμύρινσης στα ανατολικά. Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμός άντλησης στα ανατολικά που είναι ήδη αυξημένος υποδιπλασιάστηκε και στο κεντρικό τμήμα οι αντλήσεις διπλασιάστηκαν. Στην **Εικόνα 46** απεικονίζονται οι ρυθμοί άντλησης που επικρατούν στο 1^ο σενάριο.



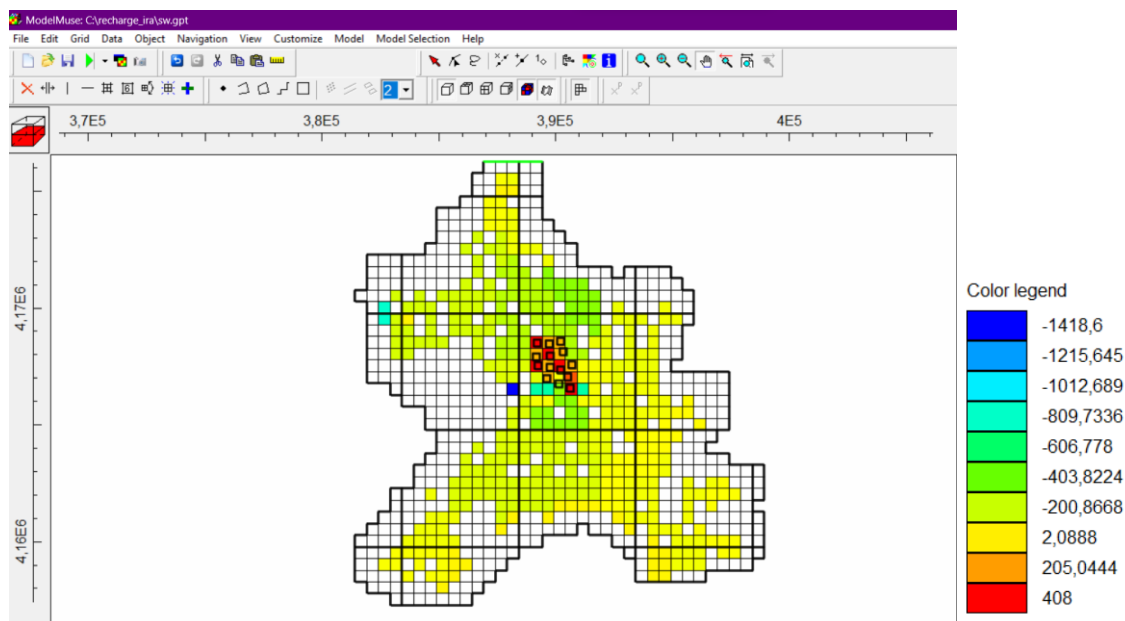
Εικόνα 46: Απεικόνιση της κατανομής του ρυθμού άντλησης των γεωτρήσεων σύμφωνα με τις συνθήκες του 1^{ου} σεναρίου στο λογισμικό ModelMuse, με κόκκινο χρώμα εντοπίζονται οι τιμές με τον χαμηλότερο ρυθμό άντλησης.

Στο 2^ο σενάριο έχοντας τις ίδιες συνθήκες άντλησης με του 1^{ου} σεναρίου προστέθηκαν 14 γεωτρήσεις εμπλουτισμού κατά μήκος της ακτής, εξετάζοντας την ταυτόχρονη εφαρμογή δύο μεθόδων μετρίασης του μετώπου θαλάσσιας διείσδυσης. Ως ημερήσιος τεχνητός εμπλουτισμός στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού ορίστηκαν τα 408 m³, σύμφωνα με δεδομένα από την έκθεση τεχνητού εμπλουτισμού του 2021 για την Αργολική πεδιάδα. Στην **Εικόνα 47** απεικονίζονται οι ρυθμοί άντλησης που επικρατούν στο 2^ο σενάριο.



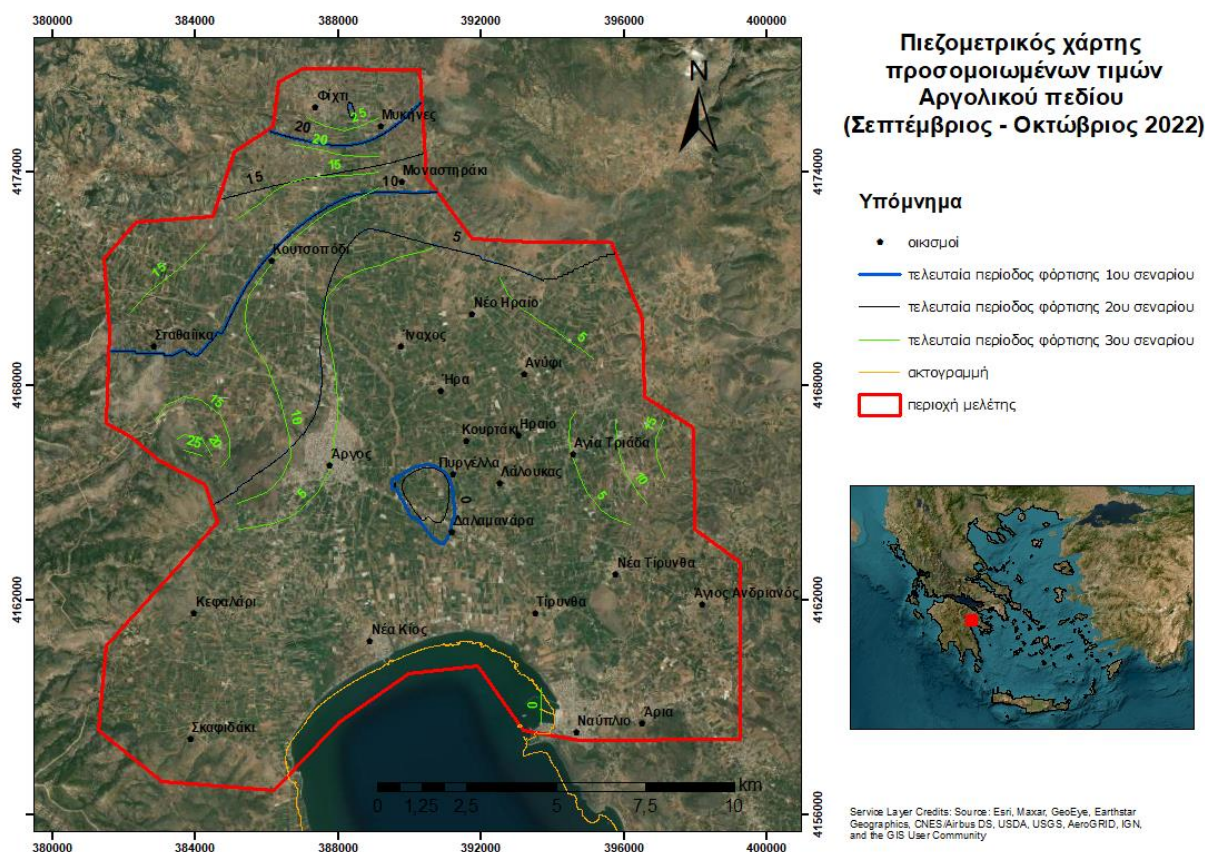
Εικόνα 47: Απεικόνιση της κατανομής του ρυθμού άντλησης των γεωτρήσεων σύμφωνα με τις συνθήκες του 2^{ου} σεναρίου στο λογισμικό ModelMuse, με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού που προσθέτουν νερό στο σύστημα.

Στο 3^ο σενάριο κρατώντας τον ίδιο ρυθμό άντλησης του 1^{ου} σεναρίου, προστέθηκαν 14 γεωτρήσεις στο κεντρικό τμήματα της πεδιάδας για την μετρίαση του μετώπου υφαλμύρισης όπως φαίνεται στον χάρτη της **Εικόνα 33**. Ως ημερήσιος εμπλουτισμός από τις γεωτρήσεις εμπλουτισμού ορίστηκαν τα 408 m³, όπως και στο 2^ο σενάριο. Στην **Εικόνα 48** απεικονίζονται οι ρυθμοί άντλησης που επικρατούν στο 3^ο σενάριο.



Εικόνα 48: Απεικόνιση της κατανομής του ρυθμού άντλησης των γεωτρήσεων σύμφωνα με τις συνθήκες του 3^{ου} σεναρίου στο λογισμικό ModelMuse, με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού που προσθέτουν νερό στο σύστημα.

Τα σενάρια αυτά αξιολογήθηκαν με βάση το πιεζομετρικό φορτίο. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του πιεζομετρικού χάρτη της **Εικόνα 49** παρατηρείται ότι οι προσομοιωμένες τιμές και στα δύο σενάρια είναι αρκετά αυξημένες σε σχέση με την επικρατούσα κατάσταση που φαίνεται στον χάρτη της **Εικόνα 33**. Φαίνεται και στις δύο περιπτώσεις ότι το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης περιορίζεται στις περιοχές μεταξύ Πυργέλλας και Δαλαμανάρας και στο σενάριο με τις γεωτρήσεις εμπλουτισμού το μέτωπο φαίνεται αισθητά μικρότερο. Στο βόρειο τμήμα της πεδιάδας ο κώνος που δημιουργείται με βάση τις παρατηρούμενες τιμές στις περιοχές Κουτσοπόδι, Ίναχος και Νέο Ηραίο φαίνεται να εξαφανίζεται και στα δύο σενάρια.



Εικόνα 49: Πιεζομετρικός χάρτης προσομοιωμένων τιμών με μπλε χρώμα απεικονίζονται οι καμπύλες του 1^{ου} σεναρίου, με μαύρο οι καμπύλες του 2^{ου} σεναρίου με πράσινο του 3^{ου}.

7.5.4 Εφαρμογή του MT3DMS

Ο κώδικας MT3DMS αποτελεί συνδυαστικό στοιχείο για το μοντελοποίηση με τον κώδικα SEAWAT, διότι αναλαμβάνει να επιλύσει την εξίσωση μεταφοράς ρευστού σε καθεστώς διαφοράς πυκνότητας. Πιο συγκεκριμένα, ο ρόλος του κώδικα αυτού είναι η προώθηση της ροής στα κελιά διαμέσου της αλατότητας καθορισμένων κελιών, μετατρέποντας το μοντέλο ροής σε μοντέλο μεταφοράς. Ο κώδικας MODFLOW παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για το μοντέλο ροής και επειδή συνυπάρχει μαζί με τον κώδικα MT3DMS δημιουργείται το πλεονέκτημα ότι χρειάζονται ελάχιστες τροποποιήσεις για το στήσιμο του μοντέλου μεταφοράς (Guo & Langevin, 2002).

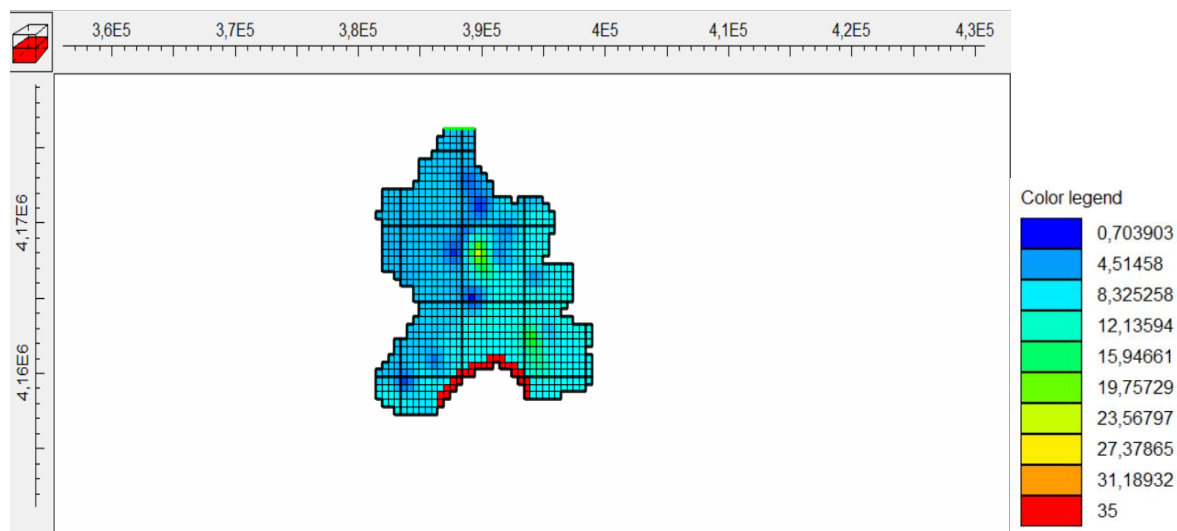
Για το στήσιμο του μοντέλου μεταφοράς στο λογισμικό ModelMuse με τον κώδικα SEAWAT ενεργοποιείται το βασικό πακέτο μεταφοράς (BTN package), το οποίο διαθέτει όλες τις απαραίτητες παραμέτρους από τον κώδικα MODFLOW, όπως η χωρική διακριτοποίηση και οι υδραυλικές παράμετροι. Επίσης, στο πακέτο BTN package ορίζεται η παράμετρος αναφοράς που είναι τα ολικά αιωρούμενα στερεά TDS με μονάδα μέτρησης, kg. Στην συνέχεια, ενεργοποιούνται τα πακέτα της μεταγωγής (advection package), της διασποράς (dispersion package), της εξίσωσης μεταφοράς μάζας (sink and source package) και το πακέτο επίλυσης GCG solver για την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς.

Οι περίοδοι φόρτισης του μοντέλου μεταφοράς είναι ίδιες με αυτές του μοντέλου ροής. Ο υπολογισμός των τιμών της πυκνότητας του νερού μεταξύ των υπολογιστικών κελιών έγινε με βάση τον αλγόριθμο upstream weighting. Ως οριακή συνθήκη ορίζεται η ακτογραμμή, η οποία αποτελεί το υδραυλικό όριο του υδροφορέα με την θάλασσα. Στο μοντέλο ροής η ακτογραμμή έχει ένα σταθερό υδραυλικό φορτίο που αντιστοιχεί με το επίπεδο της θάλασσας. Στο μοντέλο μεταφοράς η ακτογραμμή έχει σταθερό φορτίο μεταφοράς μάζας, που αντιστοιχεί σε σταθερή συγκέντρωση TDS για το νερό που εισέρχεται στον υδροφορέα και είναι ίση με 35 kg/m^3 .

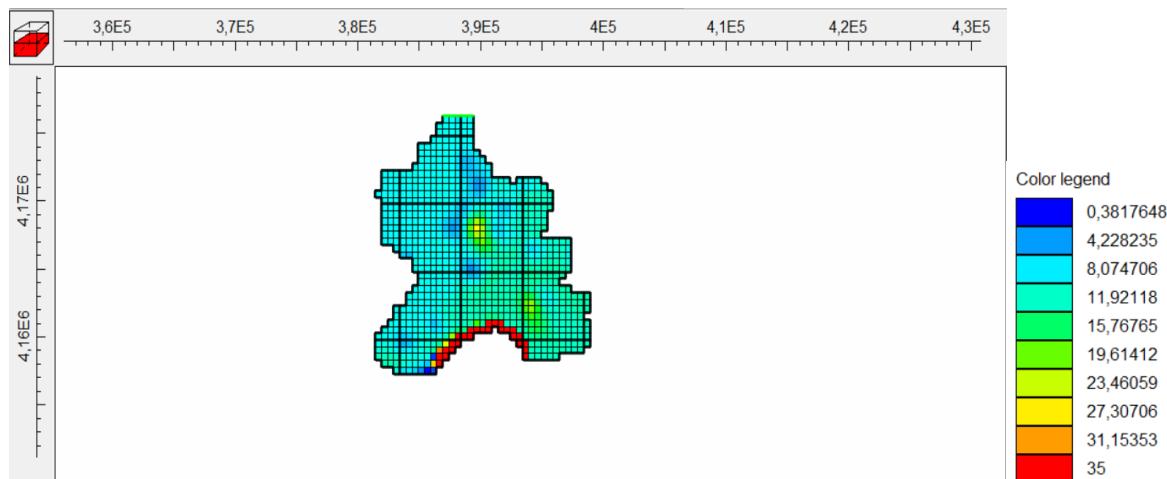
Επίσης, για την εξίσωση μεταφοράς η διαμήκης εξάπλωση καθορίστηκε σε 50 L, η αναλογία μεταξύ εγκάρσιας και διαμήκου είναι 0,1 και η αναλογία κατακόρυφης και διαμήκου διασποράς 0,01. Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης για το άλας είναι $1e^{-5} \text{ L}^2/\text{T}$. Τέλος, ως αρχικές συνθήκες δόθηκαν σε αρχείο ASCII τιμές που αφορούν την αλατότητα συναρτήσει της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

7.5.5 Αποτελέσματα SEAWAT

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του 1^{ου} σεναρίου της **Εικόνα 50** και **Εικόνα 51** φαίνεται ότι η συγκέντρωση TDS κυμαίνεται από $0,3 \text{ kg/m}^3$ έως 35 kg/m^3 στο όριο της ακτογραμμής. Η συγκέντρωση TDS στην δεύτερη περίοδο φόρτισης παρουσιάζει μικρότερες τιμές σε σχέση με την πρώτη περίοδο φόρτισης, που ίσως οφείλεται και στο μεγαλύτερο ύψος βροχής που επικρατεί κατά τον Οκτώβρη μήνα. Επίσης, η ακτίνα επιρροής της αλατότητας στο κεντρικό μέτωπο ανέρχεται στα 3 km και στο ανατολικό περίπου στα 2 km και για τις περιόδους φόρτισης. Κατά την δεύτερη περίοδο φόρτισης εμφανίζεται πιο υψηλή συγκέντρωση αλατότητας στα δυτικά χωρίς όμως να επηρεάζει ιδιαίτερα τις πηγές Κεφαλαρίου, συγκρατώντας τις υψηλές τιμές της συγκέντρωσης TDS κατά μήκος της ακτής.

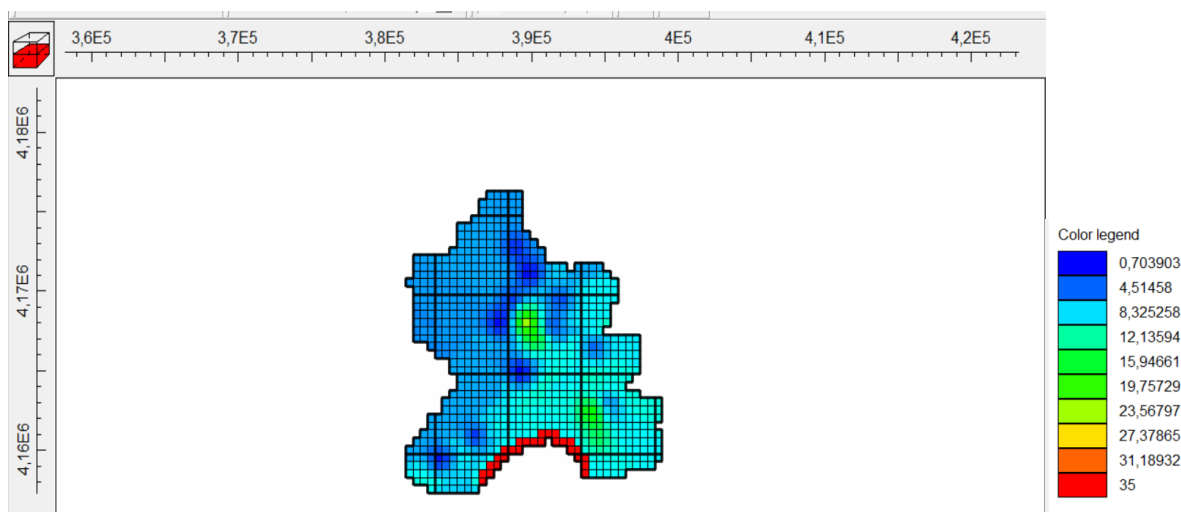


Εικόνα 50: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m^3 κατά την πρώτη περίοδο φόρτισης του 1^{ου} σεναρίου.

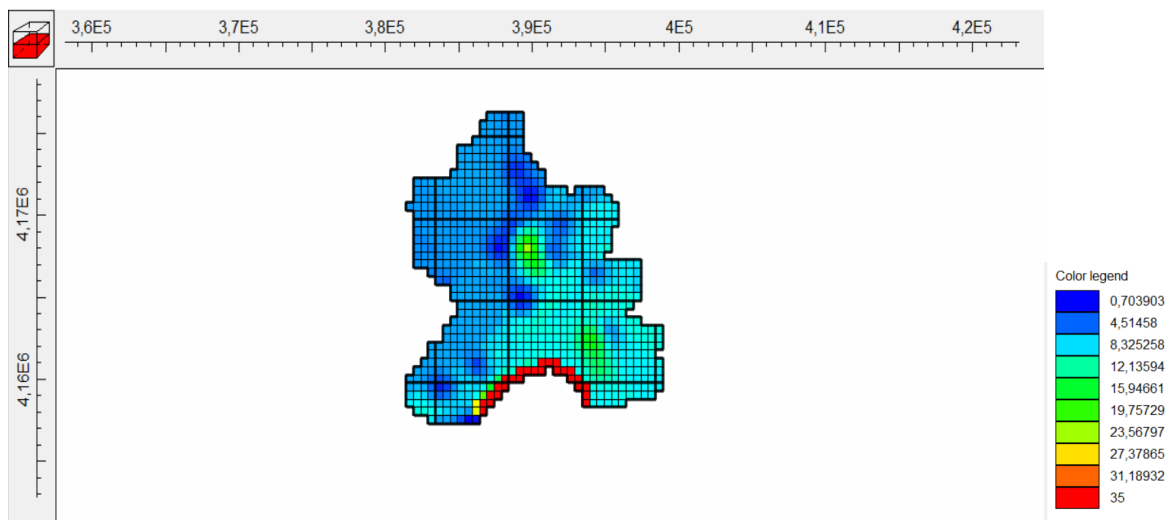


Εικόνα 51: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m^3 κατά την δεύτερη περίοδο φόρτισης στο 1^ο σενάριο.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του 2^ο σεναρίου της *Εικόνα 52* και *Εικόνα 53* φαίνεται ότι οι τιμές της συγκέντρωσης TDS κυμαίνονται από $0,7 \text{ kg/m}^3$ έως 35 kg/m^3 , όπου βρίσκεται η ακτογραμμή. Εφαρμόζοντας ταυτόχρονα δύο διαχειριστικούς τρόπους αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης φαίνεται ότι οι υψηλές τιμές αλατότητας συγκρατούνται στο όριο της ακτογραμμής. Παρ' όλο αυτά, είναι φανερό ότι το κεντρικό μέρος της πεδιάδας και οι ανατολικές παρυφές επηρεάζονται από το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίοδο φόρτισης η ακτίνα επιρροής υπολογίζεται περίπου στα 2 km στα κεντρικά και στα 1,3 km στα ανατολικά, ενώ στην δεύτερη περίοδο φόρτισης δεν παρατηρούνται αξιόλογες διαφορές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μικρή διάρκεια της περιόδου φόρτισης. Ωστόσο, στην δεύτερη περίοδο φόρτισης στα νοτιοδυτικά παρατηρείται πιο αυξημένη συγκέντρωση αλατότητας, κοντά στην ακτή που πιθανότητα να μην επηρεάζει τα υπόγεια νερά του Κεφαλαρίου. Γενικά, οι ακτίνες επιρροής των μετώπων αλατότητας είναι αισθητά μικρότερες σε σχέση με το πρώτο σενάριο και οι υψηλές τιμές αλατότητας αρκετά περιορισμένες σε διαχειριστικό βαθμό.

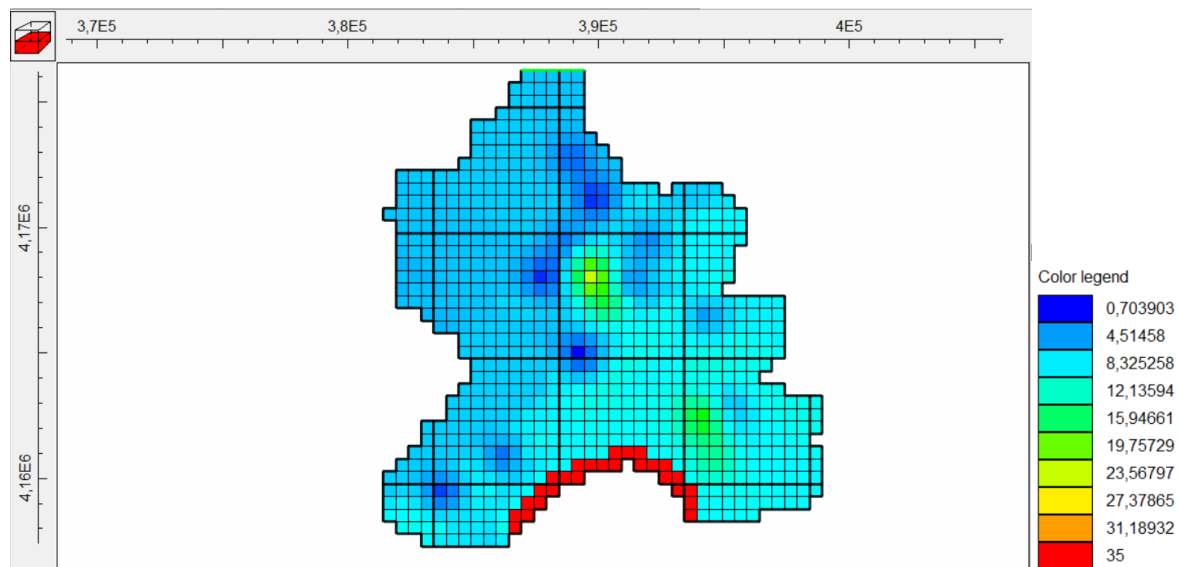


Εικόνα 52: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m^3 κατά την πρώτη περίοδο φόρτισης του 2^ο σεναρίου.

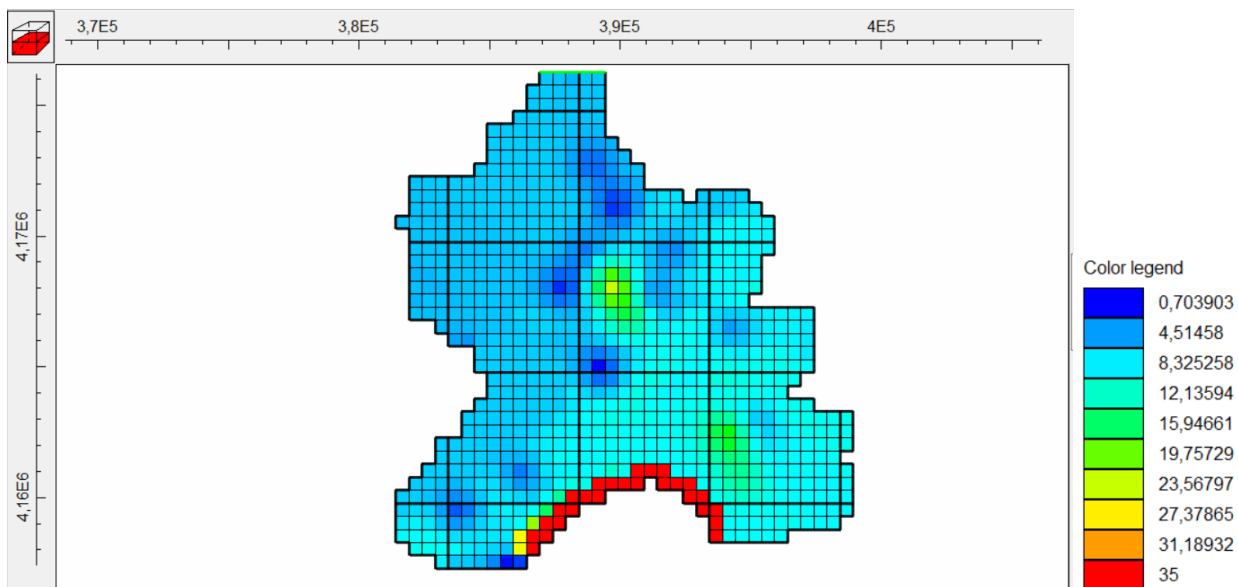


Εικόνα 53: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m^3 κατά την δεύτερη περίοδο φόρτισης του 2^{ου} σεναρίου.

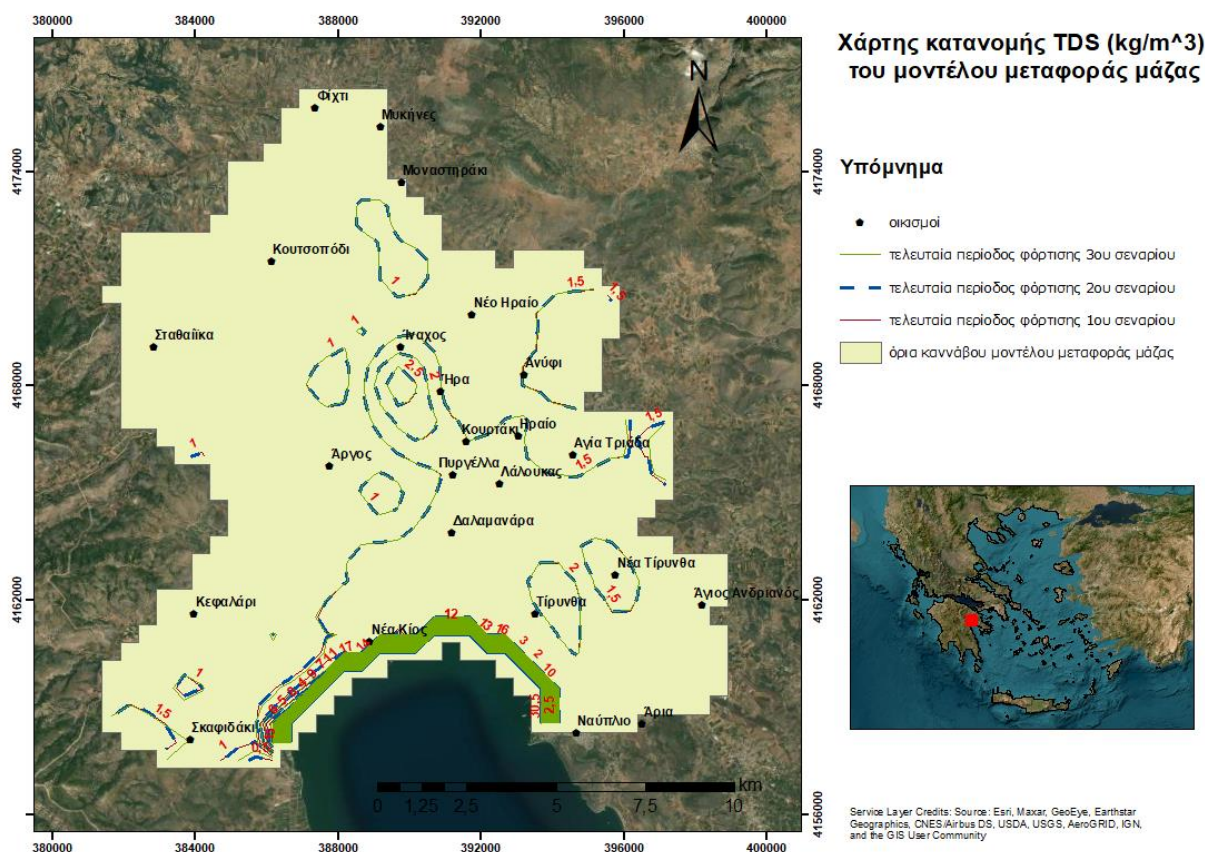
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του 3^{ου} σεναρίου της **Εικόνα 54**, **Εικόνα 55** φαίνεται ότι οι τιμές της συγκέντρωσης TDS κυμαίνονται από $0,7 \text{ kg/m}^3$ έως 35 kg/m^3 , όπου βρίσκεται η ακτογραμμή. Εφαρμόζοντας τεχνητό εμπλουτισμό στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας φαίνεται ότι οι υψηλές τιμές αλατότητας συγκρατούνται στο όριο της ακτογραμμής. Παρ' όλο αυτά, είναι φανερό ότι το κεντρικό μέρος της πεδιάδας και οι ανατολικές παρυφές επηρεάζονται από το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη περίοδο φόρτισης η ακτίνα επιρροής υπολογίζεται περίπου στα $1,9 \text{ km}$ στα κεντρικά και στα $1,2 \text{ km}$ στα ανατολικά, ενώ στην δεύτερη περίοδο φόρτισης δεν παρατηρούνται αξιόλογες διαφορές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην μικρή διάρκεια της περιόδου φόρτισης. Ωστόσο, στην δεύτερη περίοδο φόρτισης στα νοτιοδυτικά παρατηρείται πιο αυξημένη συγκέντρωση αλατότητας, κοντά στην ακτή που πιθανότητα να μην επηρεάζει τα υπόγεια νερά του Κεφαλαρίου. Γενικά, οι ακτίνες επιρροής των μετώπων αλατότητας είναι ελάχιστα μικρότερες σε σχέση με του 2^{ου} σεναρίου.



Εικόνα 54: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m^3 κατά την πρώτη περίοδο φόρτισης του 3^{ου} σεναρίου.



Εικόνα 55: Κατανομή της συγκέντρωσης TDS σε kg/m^3 κατά την δεύτερη περίοδο φόρτισης του 3^{ου} σεναρίου.



Εικόνα 56: Χάρτης επιρροής αλατότητας στην περιοχή μελέτης.

Στον παραπάνω χάρτη παρατηρείται ότι στους οικισμούς Ίναχος, Τίρυνθα και Νέα Κίος επικρατούν τιμές μεγαλύτερες από 1,5 kg/m³, οι οποίες ξεπερνούν κατά πολύ τα όρια του πόσιμου νερού σύμφωνα με τον ν. 3199/2003. Επίσης, φαίνεται ότι οι δυτικές περιοχές ως προς την συγκέντρωση TDS βρίσκονται στα όρια ποσιμότητας, ωστόσο οι τιμές δεν θεωρούνται ιδανικές για την συγκεκριμένη χρήση μακροχρόνια. Τιμές κάτω των 0,5 kg/m³ επικρατούν σε μεμονωμένα σημεία στο δυτικό κομμάτι της πεδιάδας.

Κεφάλαιο 8^ο: Συμπεράσματα & Προοπτικές μεθόδου

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εξετάστηκαν τα ποιοτικά και ποσοτικά στοιχεία του υδατικού ισοζυγίου του παράκτιου κοκκώδους υδροφορέα στην περιοχή του Αργολικού πεδίου. Η περιοχή του Αργολικού πεδίου ανήκει στην Περιφερειακή Ενότητα Αργολίδας και βρέχεται νότια από τον Αργολικό κόλπο όπου είναι και το σημείο εκφόρτισης του παράκτιου υδροφόρου συστήματος. Το Αργολικό πεδίο αποτελείται από μια εύφορη αλλουβιακή πεδιάδα που δέχεται έντονες ανθρωπογενείς πιέσεις από την δεκαετία του '50. Η υποβάθμιση των ποσοτικών και ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπογείων υδατικών πόρων της περιοχής από νιτρορύπανση αλλά κυρίως από την θαλάσσια διείσδυση είναι ένα πρόβλημα που συνεχώς οξύνεται με κίνδυνο η εξυγίανση των υπογείων νερών να καταστεί αδύνατη. Στο πλαίσιο της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας το συγκεκριμένο παράκτιο υδροφόρο σύστημα μελετήθηκε βιβλιογραφικά για την κατανόηση των φυσικών διεργασιών και πραγματοποιήθηκαν σταθμημετρήσεις και χημικές αναλύσεις για την αποτύπωση της ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης των υπογείων νερών. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η έκταση της περιοχής μελέτης ανέρχεται στα 245,4 km² και αποτελεί μια εύφορη πεδιάδα που φιλοξενεί πολλές καλλιεργητικές δραστηριότητες. Ειδικότερα, το Αργολικό πεδίο αποτελεί περίπου το 75% των καλλιεργήσιμων εκτάσεων ολόκληρης της Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας.
- Η περιοχή μελέτης αποτελεί ένα τεκτονικό βύθισμα με πολύ μικρές μορφολογικές κλίσεις (0 – 20°) και περικλείεται από τους ορεινούς όγκους του Αραχναίου όρους, των Αρκαδικών όρων και των Δερβενακίων.
- Από γεωλογικής άποψης η περιοχή αποτελείται από Τεταρτογενείς σχηματισμούς που δημιουργήθηκαν από την έκπλυση των ανθρακικών σχηματισμών από τους γειτονικούς όγκους. Από υδρογεωλογικής άποψης, ενδιαφέρον παρουσιάζουν ο φλύσχος και οι αλλουβιακές αποθέσεις.
- Στην περιοχή εντοπίζονται τρεις τύποι υδροφορέων από βόρεια προς νότια: ο ελεύθερος υδροφόρος, ο υπό πίεση υδροφόρος και ο φρεάτιος υδροφόρος που βρίσκεται κοντά στην ακτογραμμή. Ο εμπλουτισμός τους πραγματοποιείται από τις πλευρικές τροφοδοσίες των καρστικών σχηματισμών, από τις πηγές που βρίσκονται στις δυτικές παρυφές και από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.
- Σύμφωνα με τα κλιματικά δεδομένα της περιόδου 2012 – 2022, η κλιματική κατάταξη της περιοχής κατά Korpen χαρακτηρίζεται από χειρσαίο μεσογειακό ξηρού και θερμού τύπου θέρους και η κατάταξη κατά Thornthwaite χαρακτηρίζει το κλίμα πολύ ξηρό προς ξηροθερμικό, με επίδραση της θάλασσας. Επίσης, η μέση ετήσια θερμοκρασία υπολογίστηκε σε 18,5 °C, ενώ το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται στα 480,9 mm.
- Το εκτεταμένο καθεστώς αρδεύσεων έχει οδηγήσει σε καταγραφή αρνητικών πιεζομετρικών

φορτίων εντός της πεδιάδας επί σειρά ετών, ιδιαίτερα τους θερινούς μήνες. Γι' αυτόν τον λόγο στην περιοχή έχουν γίνει προσπάθειες εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού για την μετρίαση του προβλήματος χωρίς να έχει βρεθεί μια μόνιμη λύση.

- Σύμφωνα με σταθμημετρήσεις που πάρθηκαν κατά την περίοδο Σεπτεμβρίου – Οκτωβρίου του 2022 εντοπίστηκαν δύο μέτωπα υφαλμύρινσης στα κεντρικά και τα ανατολικά τμήματα της πεδιάδας. Η χαμηλότερη μέτρηση στάθμης που καταγράφηκε είναι τα -29,4 m, στην περιοχή του Κουτσοποδίου.
- Με βάση τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των ιόντων Cl^- και Na^+ , οι περιοχές που παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές στις συγκεντρώσεις αυτών των ιόντων ταυτίζονται με τα μέτωπα υφαλμύρινσης που φαίνονται στις σταθμημετρήσεις. Το ίδιο ισχύει και για τις τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας.
- Οι χημικές αναλύσεις των νιτρικών ιόντων έδειξαν ότι η Αργολική πεδιάδα έχει προσληφθεί από νιτρορύπανση, με τις τιμές της συγκέντρωσης των νιτρικών να ξεπερνούν το όριο των 50 mg/l πάνω από το 80% των δειγμάτων.

Για την εκτίμηση των ποσοτικών και ποιοτικών συνθηκών του κοκκώδη υδροφορέα πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της υπόγειας ροής και μεταφοράς μάζας με βάση την ανάπτυξη τριών σεναρίων χρησιμοποιώντας τις τωρινές συνθήκες (Σεπτέμβριος – Οκτώβριος 2022). Για την προσομοίωση της υπόγειας ροής χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MODFLOW και για την προσομοίωση μεταφοράς μάζας χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας SEAWAT, ο οποίος βασίστηκε στους κώδικες MODFLOW και MT3DMS. Από τις παραπάνω προσομοιώσεις προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Εφαρμόζοντας τα δύο πρώτα σενάρια στην προσομοίωση της υπόγειας ροής παρατηρήθηκε ότι και στις δύο περιπτώσεις ότι το μέτωπο υφαλμύρινσης ανατολικά εξαφανίστηκε, ενώ το κεντρικό μέτωπο μετακινήθηκε προς την ακτογραμμή κοντά στις περιοχές Πυργέλλα, Λάλουκας και Δαλαμανάρα. Στο 3^ο σενάριο δεν παρουσιάστηκαν αρνητικά πιεζομετρικά φορτία μέσα στην πεδιάδα, ενώ φαίνονται έντονα οι πλευρικές τροφοδοσίες. Επομένως, το 3^ο σενάριο φαίνεται αρκετά αισιόδοξο για την μετρίαση του προβλήματος.
- Στην προσομοίωση μεταφοράς μάζας εξετάστηκαν τα ίδια σενάρια με δείκτη αναφοράς την συγκέντρωση των ολικών αιωρούμενων στερεών (TDS) στο νερό του υδροφόρου σε kg/m^3 . Οι διαφορές μεταξύ των σεναρίων είναι πολύ μικρές και αυτό ίσως οφείλεται στη μικρή διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ μπορεί αυτό να είναι δείκτης της έντονης καταπόνησης του συστήματος που δεν μπορεί να φέρει αρκετές αλλαγές λόγω της κακής ποιοτικής κατάστασής του. Αυτό δικαιολογείται συγκρίνοντας και το μοντέλο ροής, στο οποίο οι πιεζομετρικές συνθήκες άλλαξαν αισθητά, ενώ η συγκέντρωση της αλατότητας δεν παρουσιάζει ευδιάκριτες αλλαγές, δείχνοντας ότι η δυναμικότητα του συστήματος έχει καταπονηθεί.

Με την εκπόνηση της παρούσας εργασίας προκύπτουν ορισμένες προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο

παράκτιο υδροφόρο σύστημα του Αργολικού πεδίου:

- Για την πιο αντιπροσωπευτική και επιστημονικά σωστή προσομοίωση είναι απαραίτητη η πρόσβαση σε ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα του υδατικού ισοζυγίου του Αργολικού πεδίου. Η εγκατάσταση δικτύου μετεωρολογικών σταθμών θα ενισχύσει τις γνώσεις της επιφανειακής υδρολογίας της περιοχής, μελετώντας την κάθε υπολεκάνη.
- Η αναθεώρηση των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφόρου συστήματος και των υδρογεωλογικών συνθηκών προωθεί την κατανόηση του εννοιολογικού μοντέλου του συστήματος, καθιστώντας κατά συνέπεια το μαθηματικό μοντέλο αρκετά αξιόπιστο.
- Η εγκατάσταση πυκνού δικτύου γεωτρήσεων παρακολούθησης, θα μπορούσε να δώσει λύσεις στην αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης εφαρμόζοντας τεχνικές εμπλουτισμού των υπογείων νερών ακόμα και διακανονισμό των αρδεύσεων σε γεωργικές δραστηριότητες.
- Όσον αφορά την εφαρμογή μοντέλων ροής και μεταφοράς μάζας στην περιοχή μελέτης, σημαντική είναι η αναδιατύπωση της χωρικής διακριτοποίησης του μοντέλου για να κατανοήσουμε σε μικρότερη κλίμακα την υπόγεια υδρολογική και υδρογεωλογική συμπεριφορά του υδροφορέα.
- Τέλος, θα ήταν ενδιαφέρον η χρονική διακριτοποίηση σε υδρολογικό έτος για να εντοπίζονται άμεσα οι αλλαγές στα υδραυλικά φορτία και κατά συνέπεια και τα φορτία αλατότητας.

Βιβλιογραφία

- Anderson, M., & Woessner, W. (1992). *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. San Diego: Academy Press Inc.
- Bennert. (1972). Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Λυγουριό (1:50.000). .: ΙΓΜΕ.
- Boumaiza, L., Walter, J., Chesnaux, R., Zahi, F., Huneau, F., Garel, É., . . . Stumpp, C. (2022, December 10). Combined effects of seawater intrusion and nitrate contamination on groundwater in coastal agricultural areas: A case from the Plain of the El-Nil River (North-Eastern Algeria). *The Science of the total environment*, 851(1), p. 158153. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158153>
- Custodio, E., & Bruggeman, G. A. (1987). *Groundwater problems in coastal areas* (UNESCO ed., Vol. 45). Belgium: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Fetter, C. (1973). Water resources management in coastal plain aquifers. *Proceedings of the International Water Resources Association* (pp. 322 - 331). .: 1st World Congress on Water Resources.
- Freeze, R., & Cherry, J. (1979). *Groundwater: Englewood cliffs*. New Jersey: Prentice Hall, Inc.
- Guo, W., & Langevin, C. D. (2002). *SEAWAT User's Guide: A Computer Program for Simulation of Three - Dimensional Variable - Density Ground - Water Flow*. Florida: U.S. Geological Survey.
- Harbaugh, A. (2005). Techniques and Methods 6 - A16. In *MODFLOW - 2005: The U.S. Geological Survey Modular Groundwater Model - The groundwater Flow Process* (p. 253). .: U.S. Geological Survey.
- Karamanos, A., Aggelides, S., & Londra, P. (2007). WATER USE EFFICIENCY AND WATER PRODUCTIVITY IN GREECE. *Water use efficiency and water productivity: WASAMED project. Bari : CIHEAM*, pp. 91 - 99.
- Kresic, N., & Mikszewski, A. (2013). *Hydrogeological Conceptual Site Models: Data Analysis and Visualization*. Boca Raton: CRC Press.
- Mandel, S., & Shiftan, Z. (1981). *Groundwater Resources: Investigation and Development*. New York: Academic Press.
- Mitropapas, A., Koumantakis, I., Vasileiou, E., Perdikaki, M., & Kallioras, A. (2016). OVEREXPLOITATION OF GROUNDWATER RESOURCES IN THE COASTAL AQUIFER SYSTEM OF ARGOLIS. *Bulletion of the Geological Society of Greece*, 50(2), pp. 865 - 873. doi:<https://doi.org/10.12681/bgsg.11792>
- Mtoni, Y., Mjemah, C. I., Bakundukize, C., Van Camp, M., Kristine, M., & Walraevens, K. (2013, January 6). Saltwater intrusion and nitrate pollution in the coastal aquifer of Dar Es Salaam, Tanzania. *Environmental Earth Sciences*, 70, pp. 1091 - 1111. doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-012-2197-7>

- Oude Essink, J. (2000). *Groundwater Modelling*. Institute of Earth Sciences, Department of Geophysics. Utrecht: Utrecht University, Interfaculty Center of Hydrology Utrecht.
- Reilly, T. (2001). *System and Boundary conceptualization in groundwater flow simulation*. U.S. Geological Survey Techniques of Water - Resources Investigations.
- Sbai, M. A., Larabi, A., Fahs, M., & Doummar, J. (2021). A New Normalized Groundwater Age-Based Index for Quantitative Evaluation of the Vulnerability to Seawater Intrusion in Coastal Aquifers: Implications for Management and Risk Assessments. *Water*, 13(18). doi:10.3390/w13182496
- Scmork, S., & Mercado, A. (1969, December). Upconing of Fresh Water—Sea Water Interface Below Pumping Wells, Field Study. *Water Resources Research*, 5(6), pp. 1290 - 1311. doi: <https://doi.org/10.1029/WR005i006p01290>
- Todd, K. D., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology* (3rd Edition ed.). New York, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Torres - Martinez, J. A., Abraham, M., Mahlkecht, J., Kaown, D., & Barceló, D. (2021, September 5). Determining nitrate and sulfate pollution sources and transformations in a coastal aquifer impacted by seawater intrusion—A multi-isotopic approach combined with self-organizing maps and a Bayesian mixing model. *Journal of Hazardous Materials*, 417(126103). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126103>
- Wu, J., Lu, J., Zhang, Z., & Lin, Y. (2019, May 4). Severe Nitrate Pollution and Health Risks of Coastal Aquifer Simultaneously Influenced by Saltwater Intrusion and Intensive Anthropogenic activities. *Archives of Environmental Contamination & Toxicology*, 77(1), pp. 79 - 87. doi:10.1007/s00244-019-00636-7
- Zhibi, A., Tarhouni, J., & Zouhri, L. (2013, November). Assessment of seawater intrusion and nitrate contamination on the groundwater quality in the Korba Coastal plain of Cap - Bon (North - east of Tunisia). *Journal of Africa Earth Sciences*, 87, pp. 1 - 12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2013.07.009>
- Βουδούρης, Κ. (2009). *Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος: Υπόγεια νερά και Περιβάλλον*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Βουδούρης, Κ. (2013). *Τεχνική Υδρογεωλογία: Υπόγεια Νερά*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.
- Γάκη - Παπαναστασίου, Κ. (1991). *ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΤΟΥ ΑΡΓΟΛΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΟ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ*. Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος. Αθήνα: Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Γιαννούλας, Ε. (2017). *Εκθεση εφαρμογής Τεχνητού Εμπλουτισμού στις περιοχές Αργολικού πεδίου & Ασίνης - Δρεπάνου*. Περιφέρεια Πελοποννήσου.
- Γιαννούλας, Ε. (2021). *Εκθεση Εφαρμογής Τεχνητού Εμπλουτισμού στην περιοχή Ασίνης - Δρεπάνου*. Π.Ε.

Αργολίδα: Περιφέρεια Πελοποννήσου.

Γιαννούλας, Ε., & Ζύμης, Α. (2009). *Έκθεση εφαρμογής Τεχνητού Εμπλουτισμού στις περιοχές Αργολικού πεδίου & Ασίνης - Δρεπάνου*. Περιφέρεια Πελοποννήσου.

Γιαννουλόπουλος, Π. (2000). *Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό πεδίο*. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής. Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Γιαννουλόπουλος, Π. (2000). *Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό Πεδίο*. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής. Αθήνα: Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Δαναλάτος, Γ. (2018). *Το πρόβλημα της ρύπανσης με νιτρικά γεωργικής προέλευσης: Η περίπτωση του Αργολικού πεδίου*. Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Γεωγραφίας, Μυτιλήνη: Πανεπιστήμιο Αιγαίου.

Δούνας, Α., & Ελευθερίου, Α. (1978). *Έρευνα επί της δυνατότητας αναρρυθμίσεως των υδάτων της πηγής Κεφαλαρίου Άργους*. Υδρολογικά και Υδρογεωλογικά Έρευνα. ΙΓΜΕ.

Ζιώγας, Α. (2013). *Μελέτη Θεμάτων Διαχείρισης Παράκτιων Υδροφορέων με Αριθμητικά Μοντέλα*. Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Καλλέργης, Γ. (2000). *Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία* (2η Έκδοση εκδ., Τόμ. Β' Τόμος). Εκδόσεις ΤΕΕ.

Καλλιώρας, Α. (2008). *Διαχείριση υπογείων υδατικών πόρων σε υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος του Ν. Ροδόπης*. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών. Κομοτηνή: Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.

Καλλιώρας, Α. (2015). *Ειδικά θέματα Αξιοποίησης και Διαχείρισης Υπογείων Νερών: Παράκτια Υδροφόρα Συστήματα*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καλλιώρας, Α. (2015). *Ειδικά θέματα Αξιοποίησης και Διαχείρισης Υπογείων Νερών: Υδρογεωλογικά Μοντέλα και Υπολογιστικοί κώδικες*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Καλλιώρας, Α. (2017). *Νιτρορύπανση*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών. Αθήνα: Σημειώσεις μαθήματος "Προστασία & Αξιοποίηση Παράκτιων Υδροφόρων Συστημάτων", ΔΜΠΣ "Επιστήμη & Τεχνολογία των Υδατικών Πόρων".

Καμπόσος, Π. (2016). *Καταγραφή των πλημμυρών και του πλημμυρικού κινδύνου στην ευρύτερη περιοχή του Αργολικού πεδίου*. Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος. Αθήνα: Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Καρράς, Γ. (1973). *ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΙΣ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΘΟΡΝΤΗΒΑΙΤΕ*. Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών. Αθήνα: Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. doi:10.12681/eadd/5715

- Μακαρατζή, Χ. (2020). *ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΓΟΛΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Μιμίκου, Μ., & Μπαλτάς, Ε. (2018). *Τεχνική Υδρολογία* (6η Έκδοση εκδ.). Αθήνα: Εκδόσεις Παπασωτηρίου.
- Μουντράκης, Δ. (2010). *Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας*. Θεσσαλονίκη: University Studio Press.
- Παπάκης, Ν. (1966). Υδρογεωλογική μελέτη πηγών Αγίου Γεωργίου Κιβερίου Αργολίδος. *XI*(3).
- Παπανικολάου, Δ. (2014). *Γεωλογία της Ελλάδας* (1η Έκδοση εκδ.). Αθήνα: Εκδόσεις Πατάκη.
- Παπασταματίου. (1970). Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Άργος (1:50.000). ΙΓΕΥ.
- Περδικάκη, Μ. (2016). *ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΟ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΚΟΚΚΩΔΟΥΣ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΜΑΡΑΘΩΝΑ ΑΤΤΙΚΗΣ*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σκαρπέλης, Ν. (1982). *Μεταλλογένεση συμπαγών θειούχων μεταλλευμάτων και Πετρολογία της εξωτερικής μεταμορφικής τεκτονικής ζώνης των Ελληνίδων (ΝΑ Πελοπόννησος)*. Αθήνα: Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Τατάρης, Καλέργης, & Κούνης. (1964). Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας, Φύλλο Ναύπλιο (1:50.000). ΙΓΜΕ.
- Υ.Π.ΕΝ. (2021). *Έκθεση για την Οδηγία 91/676/ΕΟΚ: Κατάσταση Νιτρορύπανσης στον Ελληνικό Χώρο (Περίοδος Αναφοράς 2016 - 2019)*. Αθήνα: Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας.
- Χρυσανθόπουλος, Ε. (2018). *ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΚΚΩΔΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΑΡΓΟΛΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΧΡΗΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ (FREEWAT)*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.