



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

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ
ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ
ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ
ΑΡΓΟΛΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

ΜΑΚΑΡΑΤΖΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Ανδρέας Καλλιώρας

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ
ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΡΓΟΛΙΚΟΥ
ΠΕΔΙΟΥ**

ΜΑΚΑΡΑΤΖΗ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2020

Τριμελής Επιτροπή:

Καλλιώρας Ανδρέας, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Τσιχριντζης Βασίλειος, Καθηγητής ΕΜΠ

Παπακωνσταντής Ηλίας, Λέκτορας ΕΜΠ

Copyright © Χριστίνα Μακαρατζή, 2020

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Ε.Μ.Π.

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Διεπιστημονικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών πόρων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το αντικείμενο της διατριβής είναι η διαχείριση των παράκτιων υδροφορέων μέσα και η προσομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης, μελετώντας την περίπτωση του Αργολικού πεδίου.

Η επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας από το αρχικό στάδιο της ανάθεσης και καθ' όλη την διάρκεια της ανάπτυξης του θέματος πραγματοποιήθηκε από τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Ανδρέα Καλλιώρα. Σημαντική παράμετρος για την ομαλή ολοκλήρωση της εργασίας αποτέλεσε η άριστη συνεργασία με τον επιβλέποντα και θεωρώ καθήκον μου να τον ευχαριστήσω για την ουσιαστική καθοδήγησή του και τις καίριες και εμπειριστατωμένες παρεμβάσεις του.

Εγκάρδιες ευχαριστίες οφείλω στην μητέρα μου, η οποία αποτελεί στήριγμα και έμπνευση σε κάθε μου απόφαση όλα αυτά τα χρόνια. Ευγνωμονώ, ακόμα τους ανθρώπους που με στήριξαν στο εγχείρημα μου και ιδιαίτερα τον φίλο μου Θανάση Γεωργόπουλο και την οικογένειά του, όπως και την Κυριακή Τσιφλίδου για την βοήθεια που μου προσέφεραν. Τέλος, οφείλω ένα ευχαριστώ στους καρδιακούς μου φίλους για την παρουσία τους όλα αυτά τα χρόνια, όπου τους χρειάζομαι.

Περίληψη

Η αύξηση της συγκέντρωσης του πληθυσμού σε παράκτιες περιοχές που συνδυάζονται με δραστηριότητες, όπως η γεωργία, η βιομηχανία αλλά και οικιακές, ασκούν σημαντικές πιέσεις στους υδατικούς πόρους και προκαλούν θαλάσσια διείσδυση και παρόμοια προβλήματα υποβάθμισης. Με το φαινόμενο αυτό εξετάζεται η διείσδυση αλμυρού νερού σε ένα υπόγειο υδροφόρο στρώμα, με την θεώρηση της διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους και μεταβλητής πυκνότητας.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή διερευνάται η περίπτωση του Αργολικού πεδίου, το οποίο αποτελεί μια περιοχή ιδιαίτερης σημασίας, καθώς το φαινόμενο της υφαλμύρισης του υδροφόρου έγινε αντιληπτό από τις αρχές του 1960 και έκτοτε έλαβαν χώρα σειρά μελετών και εφαρμογών που έχουν σχέση με τον τεχνητό εμπλουτισμό και την αντιμετώπιση του φαινομένου. Ωστόσο, πρόκειται για μία περιοχή που δέχεται έντονες πιέσεις από τις εκτεταμένες καλλιέργειες και τις έντονες αντλήσεις για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών και σε συνδυασμό με την γεωμορφολογία και τις ήπιες κλίσεις επιδεινώνουν την υφαλμύριση προς την ενδοχώρα.

Αρχικά, παρουσιάζονται εισαγωγικές έννοιες και γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, τα οποία προέκυψαν από βιβλιογραφική έρευνα. Στα πλαίσια καλύτερης κατανόησης της υφιστάμενης κατάστασης και των υποδομών που υπάρχουν στην περιοχή έγινε αναλυτική αναφορά στις εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού που έχουν λάβει χώρα και τα αποτελέσματα αυτών. Επιπλέον, έγινε συλλογή υδροχημικών και πιεζομετρικών δεδομένων από προγενέστερες μελέτες στην περιοχή έρευνας για την περίοδο 2014-2019. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν μέσω του λογισμικού QGIS 2.18 και συγκεκριμένα της εφαρμογής AkvaGIS που εισήχθησαν τα υδροχημικά δεδομένα, καθώς και του λογισμικού ArcMap 10.5.

Η προσομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης στο Αργολικό πεδίο έγινε με τη χρήση της πλατφόρμας του FREEWAT, η οποία περιέχει κωδικές αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης, όπως και ο κώδικας SEAWAT που αξιοποιήθηκε για την συγκεκριμένη περιοχή. Το πλεονέκτημα του κώδικα αυτού που οδήγησε στην επιλογή του για την προσομοίωση αποτελεί η δυνατότητα προσομοίωσης ροής σε συνθήκες μεταβλητής πυκνότητας του υπόγειου νερού, με τον συνδυασμό του κώδικα MODFLOW και MT3DMS. Αφού έγινε αναφορά στα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο ροής και της μεταφοράς του ρύπου, έγινε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν τέθηκαν σε σύγκριση με την κατανομή της πιεζομετρίας, αλλά κυρίως της κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και των χλωριώντων, όπου προέκυψε ισχυρή συσχέτιση, όσον αφορά την χωρική κατανομή.

Abstract

The increasing urbanization in coastal regions, associated with expanding agricultural and industrial activities, poses significant stress on local water resources, resulting in seawater intrusion and other related degradation of water quality.

This study focuses on the hydrogeological processes of the coastal part of Argolis alluvial aquifer system. The salinization of the unconsolidated aquifer is a subject of investigation in this region since 1960, so the area has been focal point for various researches, technical applications and experimental activities of Managed Aquifer Recharge (MAR), in order to combat the problem of seawater intrusion. Argolis region is particularly important due to the important economic impacts of the agricultural production for the region. To cover the needs from these activities, the needed amount of water that is being exploited from the aquifer and the natural characteristics of the area resulted in the groundwater salinization problem that has progressed inland.

Firstly, a bibliographic review was conducted for the ground-knowledge and the general characteristics of the study area. A significant part of the thesis also provides information, on both technical and scientific level, with respect to the application of Managed Aquifer Recharge through the last decades. In addition, this study involved the application of a geospatial database implemented in Spatialite and a set of tools which are designed in order to improve the management, visualization and interpretation of collected hydrogeological and hydrochemical data. This database engine allows the user: (1) to manage and query any hydrogeological measurement (e.g. groundwater hydraulic heads, groundwater abstractions etc.) that are stored within the database; (2) to apply one or several query criteria (e.g. time interval, groundwater measurement) and to combine them for advanced spatio-temporal queries on the hydrogeological data stored in the database; (3) to create thematic maps (e.g. groundwater quality maps) of the selected points, time interval and parameters; (4) to calculate some general statistics, i.e. minimum, maximum or average for each selected hydrogeological parameter, such as piezometric level, pumping rates etc.; (5) to query the depth or the thickness of the defined hydrogeological units and to represent these values in a map as point features, with the possibility to interpolate results..

The simulation of the hydrogeological process of seawater intrusion for the case of Argolis field was achieved by using the FREEWAT platform, which incorporates appropriate codes for numerical groundwater flow simulation, such as MT3DMS and SEAWAT. The phenomenon of seawater intrusion was achieved through the application of the SEAWAT code which actually incorporates the use of MT3DMS to solve the solute transport equation, using the solutions from the MODFLOW with respect to the groundwater flow under variable density conditions.

The synthesis of the application of all the above Information Technologies, are proved to be a managerial tool of ample importance for the water resources management of coastal aquifer systems that suffer from seawater intrusion due to extensive irrigation practices.

Πίνακας περιεχομένων

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
1.1	Διαχείριση υπόγειων υδροφορέων	9
1.2	Διαχείριση εμπλουτισμού υδροφορέων	13
2	ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	18
2.1	Γεωγραφικά στοιχεία.....	18
2.1.1	Πληθυσμιακά στοιχεία.....	18
2.2	Χρήσεις Γης.....	19
2.3	Παραγωγικός τομέας.....	22
2.4	Γεωμορφολογικές συνθήκες	22
2.5	Υδρολογικές συνθήκες	23
2.5.1	Κλιματολογικά χαρακτηριστικά.....	23
2.5.2	Υδρολογικό ισοζύγιο	26
2.6	Γεωλογικές συνθήκες	27
2.6.1	Γενικά Στοιχεία	27
2.6.2	Προαλπικό Υπόβαθρο.....	28
2.6.3	Αλπικό Υπόβαθρο	30
2.6.4	Μεταλλικά ιζήματα.....	33
2.6.5	Τεκτονική.....	34
3	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ-ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	35
3.1	Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.....	35
3.1.1	Υδρογεωλογικές συνθήκες.....	35
3.1.2	Υδροφόροι σχηματισμοί	37
3.1.3	Πιεζομετρία.....	38
3.1.4	Πιεζομετρικοί Χάρτες.....	38
3.2	Υδροχημικά χαρακτηριστικά	44
3.2.1	Εισαγωγή.....	44
3.2.2	Θαλάσσια Διείσδυση	44
3.2.3	Η Θαλάσσια Διείσδυση στο Αργολικό Πεδίο	45
3.2.4	Υδροχημικά στοιχεία περιοχής έρευνας	46
3.3	AkvaGIS	47
3.3.1	Εισαγωγή.....	47
3.3.2	Επεξεργασία και αποτελέσματα επεξεργασίας χημικών δεδομένων	48
4	ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ	62

4.1	Υδατικό ισοζύγιο υδροφόρων σχηματισμών	62
4.2	Εκμετάλλευση αλλουβιακών υδροφορέων	64
4.3	Εκμετάλλευση καρστικών υδροφορέων (ύδρευση/ άρδευση)	65
4.4	Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο.....	67
4.4.1	1 ^η Φάση εμπλουτισμού	67
4.4.2	2 ^η Φάση εμπλουτισμού	68
4.4.3	Εφαρμογή εμπλουτισμού Ιανουαρίου-Απριλίου 2009.....	69
4.4.4	Εφαρμογή εμπλουτισμού Φεβρουάριο- Μάρτιο 2017,.....	73
5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ	76
5.1	Υδρογεωλογικά ομοιώματα	76
5.2	Εισαγωγή στον κώδικα MODFLOW	78
5.3	Εισαγωγή στον κώδικα SEAWAT	81
5.4	Προσομοίωση θαλάσσιας Διείσδυση	84
5.4.1	Εννοιολογικό μοντέλο	84
5.4.2	Ρύθμιση του μοντέλου με τον κώδικα SEAWAT.....	85
5.4.3	Εισαγωγή της εφαρμογής MT3DMS	88
5.4.4	Αποτελέσματα Προσομοίωσης του κώδικα SEAWAT	90
6	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	93
7	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	96

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Διαχείριση υπόγειων υδροφορέων

Η ανάπτυξη των υδατικών πόρων σε μια λεκάνη απορροής οφείλονται κατά ένα σημαντικό μέρος τους στους υπόγειους υδροφορείς. Αυτοί παρουσιάζουν ποικίλες λειτουργίες όπως:

- Η τροφοδοσία των υδρομαστευτικών έργων.
- Η μεταφορά του νερού από μια περιοχή σε μία άλλη, χωρίς κόστος και με προστασία του από την εξάτμιση και την ρύπανση.
- Η επεξεργασία του νερού κατά διέλευσή του από την ακόρεστη ζώνη. Στην περιοχή αυτή λαμβάνουν χώρα διεργασίες και αντιδράσεις που συμβάλλουν στον καθαρισμό του νερού.
- Η αποθήκευση ποσοτήτων νερού μέσα στους σχηματισμούς για μελλοντική αξιοποίησή τους, όταν η ζήτηση το απαιτεί.
- Η λειτουργία των υδροφορέων ως πηγή ενέργειας, κυρίως για την αξιοποίηση της γεωθερμίας, αλλά και για την αποθήκευση ορυκτών πόρων (πχ. Φυσικού αερίου).

Το υπόγειο νερό αντιμετωπίζεται γενικότερα ως ανανεώσιμο πόρος. Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου θεωρείται μη ανανεώσιμος, καθώς ο ετήσιος ρυθμός ανανέωσης είναι πολύ μικρός, αλλά έχει πολύ μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα.

Η εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων προκαλεί αλλαγές στο υδραυλικό φορτίο και την υπόγεια ροή (Custodio, 2002), και γι αυτό το λόγο παρατηρούνται επιπτώσεις που οφείλονται σε αυτή την διαδικασία:

- Εμφάνιση κώνου πτώσης στάθμης, έως ότου αποκατασταθεί μια σταθερή κατάσταση. Αυτό οδηγεί σε εκμετάλλευση βαθύτερων οριζόντων και αύξηση του κόστους άντλησης.
- Σταδιακή μείωση των παροχών των πηγών, βασικής ροής υδατορευμάτων και έκτασης των λιμνών.
- Αλλαγή ροής υπογείου νερού που οδηγεί συχνά στη διήθηση υποβαθμισμένων ποιοτικά νερών και θαλάσσιας διείσδυσης.
- Ποιοτική μεταβολή αντλούμενου νερού.
- Καθιζήσεις και υποχωρήσεις εδαφών λόγω ελαττωμένης πίεσης των πόρων στους σχηματισμούς, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για ασύνδετα υλικά. Οι περιοχές που δομούνται από καρστικούς σχηματισμούς ή εβαπορίτες συνδέονται με φαινόμενα ξαφνικής κατάρρευσης, λόγω της μείωσης της υδροστατικής πίεσης.

Η ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων περιλαμβάνει και την βασική έννοια της βιωσιμότητας. Η έννοια της βιώσιμης ή αιφορικής ανάπτυξης των υπόγειων νερών αναφέρεται στην ανάπτυξη που καλύπτει τις σημερινές ανάγκες χωρίς να θέτει σε κίνδυνο την ικανότητα

των μελλοντικών γενεών να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες (Βουδούρης, 2015). Η βιώσιμη απόδοση ενός υδροφορέα καθορίζεται από τους εξής παράγοντες (Pierce et al., 2013):

- Το ρυθμό εμπλουτισμό και τις συνθήκες αποθήκευσης
- Την ποιότητα του νερού
- Τις εκροές και την οικολογική παροχή
- Τους νομικούς περιορισμούς
- Το εθμικό δίκαιο.

Αντίθετη με την έννοια της βιωσιμότητας εμφανίζεται η έννοια της υπερεκμετάλλευσης του υδροφορέα. Αναφέρεται στην περίπτωση που οι απολήψιμες ποσότητες από έναν υδροφορέα είναι μεγαλύτερες από τις ποσότητες εμπλουτισμού και αυτό συμβαίνει επί σειρά ετών. Ουσιαστικά η υπερεκμετάλλευση ενός υδροφορέα συνδέεται με μια σειρά αρνητικών αποτελεσμάτων, όπως η κατάπτωση του υδροφόρου ορίζοντα, η ποιοτική υποβάθμιση, η οικολογική καταστροφή και αυξημένες δαπάνες για την άντληση του υπόγειου νερού. Στον Ελλαδικό χώρο κυριαρχεί ένα καθεστώς κακής διαχείρισης και χρήσεις των υδατικών πόρων. Αυτό οφείλεται σε διάφορους παράγοντες όπως η ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση, το ιδιοκτησιακό καθεστώς, η μη τήρηση του νομικού πλαισίου αλλά και η ανάθεση διαχείρισης υδατικών υποθέσεων σε διάφορους φορείς αντικρουόμενων συμφερόντων με αποτέλεσμα να εκλείπει ένα ολιστικό σχέδιο αξιοποίησης των υδατικών αποθεμάτων.

Οι γενικές αρχές διαχείρισης υδατικών πόρων περιλαμβάνουν (Καλλέργης, 2001):

- Ποσοτική και ποιοτική διατήρηση των υδατικών πόρων
- Προστασία του περιβάλλοντος κατά την αξιοποίηση των υδατικών πόρων
- Αποφυγή πρόκλησης ανεπιθύμητων επιπτώσεων σε υδατικά συστήματα, όπως πηγές ή υδροβιότοποι, που συνδέονται με τους υπό ανάπτυξη υδατικούς πόρους.
- Κατασκευή έργων πολλαπλού σκοπού (πχ. Φράγματα)
- Ενιαία αντιμετώπιση επιφανειακών, υπόγειων και πηγαίων νερών
- Σωστή ιεράρχηση της διάθεσης των υδατικών πόρων, δίνοντας πάντα προτεραιότητα στις ανάγκες της ύδρευσης.
- Προστασία από ακραία υδρολογικά φαινόμενα
- Οικονομική βελτιστοποίηση της χρήσης του νερού.

Ωστόσο η διαχείριση των υδατικών πόρων απαιτεί την συνεργασία πολλών φορέων και πολλών επιστημονικών κλάδων, έχοντας ο καθένας δικούς τους στόχους και δεδομένα, με κοινό και απώτερο στόχο την εξασφάλιση των υδατικών αναγκών της περιοχής και την εξάλειψη των αβεβαιοτήτων και των αστοχιών που ενδέχεται να προκύψουν κατά την εφαρμογή του έργου.

Η διττή λειτουργία ενός υπόγειου υδροφορέα τόσο ως μέσο αποθήκευσης όσο και ως αγωγός μεταφορά νερού συνδέεται με την ιδιαιτερότητα στο τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να γίνει η διαχείριση του. Γενικά, ένα υδροφόρο σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ότι προσφέρει έναν ανανεώσιμο πόρο με τη ροή του να καθορίζεται από τις αλλαγές στο αποθηκευμένο νερό. Η φύση του υδροφορέα και οι υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν σε μία περιοχή υποδεικνύουν τον τρόπο που θα πρέπει να γίνει η εκμετάλλευση του συγκεκριμένου σχηματισμού. Για παράδειγμα οι αλλουβιακοί υδροφορείς είναι συνήθως ελεύθεροι, εξαρτώνται άμεσα από τα επιφανειακά νερά, είναι επιρρεπής στην ρύπανση και τις χρήσεις γης, έχουν περιορισμένη έκταση και αποθηκευτική ικανότητα και χαμηλή ρυθμιστική ικανότητα.

Αντίθετα, οι καρστικοί υδροφορείς έχουν δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων νερού, όπου το αποθηκευμένο νερό είναι πάνω από δέκα φορές μεγαλύτερο της μέσης ετήσιας ροής. Επιπλέον εμφανίζουν υψηλή ρυθμιστική ικανότητα και υδροδυναμική αδράνεια, όμως είναι ευαίσθητοι στις κλιματικές αλλαγές και ρυπαίνονται εύκολα.

Η άνιση χωροχρονική κατανομή των βροχοπτώσεων, αλλά και της ζήτησης του νερού σε συνδυασμό με μια σειρά από παράγοντες που έχουν σχέση με την αναβάθμιση του βιοτικού επιπέδου, την αύξηση του πληθυσμού, την κλιματική αλλαγή και τη μη ορθολογική διαχείριση, ρύπανση και μόλυνση από ανθρώπινες δραστηριότητες ασκούν σημαντικές πιέσεις στους υπόγειους υδροφορείς. Παράλληλα, η χώρας μας διαθέτει μεγάλο μήκος ακτών και πλήθος νησιών που δημιουργούν εκτεταμένο μέτωπο επαφής με την θάλασσα, αυξάνοντας την πιθανότητα διείσδυσης θαλασσινού νερού.

1.1.1. Διαχείριση παράκτιων υδροφόρων στρωμάτων

Τα παράκτια πεδία είναι αρκετά εκτεταμένα στον Ελλαδικό χώρο λόγω της έντονης γεωδυναμικής δραστηριότητας που επικρατεί. Οι παράκτιες περιοχές λόγω των ήπιων κλιματικών συνθηκών που διαθέτουν, αποτελούν εστίες οικονομικής ανάπτυξης. Ωστόσο, τόσο η έρευνα όσο και η εκμετάλλευση τους δημιουργούν κάποιους προβληματισμούς, όπως (Καλλιώρας, 2015):

- Ο τρόπος δημιουργίας (έντονη τεκτονική δραστηριότητα, ύπαρξη μεγάλων ρηγμάτων, βύθιση κτλ.)
- Η γειτονία με την θάλασσα (διείσδυση της θάλασσας, υφαλμύριση υδροφόρων) και η συνύπαρξη του με υδροβιότοπους και δέλτα ποταμών.
- Αγροτικές και αστικές δραστηριότητες.
- Τεχνητές επεμβάσεις, με στόχο κυρίως την βελτίωση του εδάφους
- Υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών για την κάλυψη κυρίως των αρδευτικών αναγκών
- Φυσικές πηγές ρύπανσης.

Η ιζηματολογική προέλευση των παράκτιων υδροφόρων στρωμάτων μπορεί να είναι είτε ποταμοχειμάρια, είτε θαλάσσια. Τα παράκτια πεδία αποτελούνται από τεταρτογενείς, τριτογενείς και Μεσοζωϊκές αποθέσεις. Συνήθως, οι παλαιότεροι σχηματισμοί εντοπίζονται στην ενδοχώρα και τα νεότερα πετρώματα κοντά στην ακτή. Τα υδροφόρα στρώματα αποτελούνται κυρίως από ηπειρωτικής ή θαλάσσιας προέλευσης άμμους, ασβεστολίθους, ψαμμίτες και χαλίκια. Τα αδιαπέρατα στρώματα αποτελούνται από αργίλους και ιλύς αντίστοιχης προελεύσεως. Ιδιαίτερο γνώρισμα αυτού του είδους των υδροφόρων αποτελούν τα εναλλασσόμενα στρώματα διαφορετικής λιθολογίας, διαπερατών και αδιαπέρατων σχηματισμών, δημιουργώντας μια επαλληλία υδροφόρων στρωμάτων που εκτείνονται από μερικά μέχρι εκατοντάδες χιλιόμετρα και είναι ιδιαίτερα δυναμικοί σε αρκετές περιπτώσεις.

Η εκροή γλυκού νερού που παρουσιάζεται σε έναν υδροφόρο εξαρτάται από τον όγκο του υδροφόρου και τον όγκο του γλυκού που μπορεί να διαφύγει με του διαθέσιμων μηχανισμών εκφόρτισης. Οι μηχανισμοί αυτοί είναι:

- Η εξατμισοδιαπνοή
- Η διαρροή διαμέσου πηγών, εκφόρτιση στη θάλασσα, υδατορεύματα κτλ
- Ανάμειξη με το υπόγειο αλμυρό νερό στη ζώνη διάχυσης

- Διαρροή διαμέσου ημιπερατού στρώματος με την επίδραση της υδραυλικής κλίσης
- Διαρροή διαμέσου ενός ημιπερατού στρώματος κατά την διαδικασία της ώσμωσης, λόγω της διαφοράς αλατότητας.

Τα παράκτια πεδία βρίσκονται συχνά υπό καθεστώδες ρύπανσης. Η πηγή της ρύπανσης ποικίλει ανά περίπτωση. Συχνότερη μορφή ρύπανσης παράκτιων υδροφορέων, κυρίως στον ελλαδικό χώρο είναι η ρύπανση από φυσικά αλμυρά νερά και από ανθρωπογενής δραστηριότητες όπως η νιτρορύπανση. Τέλος, ρύπανση ενός υδροφόρου μπορεί να επέλθει από φυσικές ενδογενείς διαδικασίες όπως η γεωθερμία.

Θαλάσσια διείσδυση

Η διείσδυση του θαλασσινού νερού στα παράκτια πεδία μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε επιφανειακά, είτε υπόγεια, καθώς και από το υπολειμματικό νερό. Η ύπαρξη υπολειμματικού νερού οφείλεται σε κατάκλυση μιας περιοχής λόγω της συνεχούς διακύμανσης του επιπέδου της θάλασσας, από διάλυσης ορυκτών ή προϋπάρχοντα άλατα. Επιπλέον, σε περιπτώσεις που η αλατότητα συνδέεται με υδρογεωλογικές συνθήκες, δηλαδή υδροφόρος που συνίσταται από λεπτόκοκκο υλικό, και μεγάλο χρόνο παραμονής του νερού σε αυτό, παρατηρείται βελτίωση της ποιότητα του νερού σε μικρό χρονικό διάστημα από την έναρξη των αντλήσεων, αφού δημιουργούνται συνθήκες καλύτερης κυκλοφορίας.

Η σύσταση του νερού που έχει υποστεί υφαλμύριση λόγω της θάλασσας παρουσιάζει αυξημένες συγκεντρώσεις σε ιόντα χλωρίου και νατρίου, καθώς το επικρατούν άλας είναι το NaCl. Τα ιόντα Na^+ έχουν την δυνατότητα να αντικαθιστούν μεταλλικά ιόντα όπως το ασβέστιο και το μαγνήσιο κατά την παραμονή τους για μεγάλη γεωλογική περίοδο μέσα στα υδροφόρα στρώματα.

Ο Fetter (1994) διαχωρίζει την θαλάσσια διείσδυση σε παθητική και ενεργή. Η παθητική θαλάσσια διείσδυση συνδέεται με την είσοδο της θάλασσας στον παράκτιο υδροφορέα χωρίς να αναστραφεί η υδραυλική κλίση. Η διεπιφάνεια αλμυρού- γλυκού νερού μετατοπίζεται με αργό ρυθμό προς την ενδοχώρα, έως ότου αποκατασταθεί νέα υδραυλική ισορροπία μεταξύ των ρευστών. Η ενεργή θαλάσσια διείσδυση προκαλεί σοβαρές επιπτώσεις, διότι προκαλείται αναστροφή της υδραυλικής κλίσης λόγω υπεράντλησης και δημιουργία κώνου κατάπτωσης της στάθμης. Το γλυκό νερό αντικαθίσταται με γρήγορο ρυθμό από το θαλασσινό νερό. η μετακίνηση της διεπιφάνειας σταματά όταν φτάσει στο χαμηλότερο σημείο της υδραυλικής κλίσης στο κέντρο της άντλησης.

Για την αντιμετώπιση, αλλά και την προστασία των παράκτιων κρίνεται απαραίτητος ο σχεδιασμός υδρολογικού ισοζυγίου και ισοζυγίου υπογείων νερών με βάση την ανάλυση των εισροών και εκροών, απ' όπου και αν προέρχονται ή προορίζονται. Παράλληλα, απαιτείται η συστηματική παρακολούθηση της στάθμης και της ποιοτικής διακύμανσης των υπόγειων υδάτων. Επιπλέον είναι σημαντικό να γίνεται καθορισμός στην κρίσιμη παροχή μια γεώτρησης και στον καθορισμό της ενεργής ακτίνας της. Τα υδρομαστευτικά έργα για την εκμετάλλευση των υδατικών πόρων μια περιοχής θα πρέπει να προσαρμόζονται στα χαρακτηριστικά και την φύση των υδροφορέων.

Αναλυτικότερα, θα πρέπει να λαμβάνονται μέτρα σχετικά με την άντληση προσαρμοσμένα κάθε φορά στην δυναμικότητα του υδροφορέα, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο σχεδίασης και κατασκευής των υδρογεωτρήσεων. Ειδική πρόνοια θα πρέπει να

λαμβάνεται για τις εγκαταλειμμένες γεωτρήσεις στα παράκτια υδροφόρα στρώματα, αφαιρώντας τους φιλτροσωλήνες και πληρώνοντας τις οπές με λεπτόκοκκο υλικό, όπως άμμο ή χάλικες, ώστε να αποκατασταθούν οι αρχικές υδραυλικές συνθήκες στην ευρύτερη περιοχή της γεώτρησης (Καλλιώρας, 2012).

Θεωρώντας τη θαλάσσια διείσδυση απόρροια της υπεράντλησης σε μια περιοχή και την απόληψη μεγαλύτερων ποσοτήτων νερού από το ετήσιο εμπλουτισμού του υδροφορέα αποτελεί σημαντικό διαχειριστικό εργαλείο να γίνουν έργα και σχεδιασμοί που οδηγούν στην αύξηση του φυσικού εμπλουτισμού. Τα τελευταία χρόνια σε πολλές περιοχές γίνονται εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού για την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου φαινομένου. Ένα ακόμα μέτρο προστασίας των παράκτιων πεδίων αποτελούν οι υπόγειοι υδραυλικοί φραγμοί, που θεωρούνται από πολλούς ως είδος τεχνητού εμπλουτισμού.

Ωστόσο, η διαχείριση των καρστικών υδροφορέων αποτελεί μια πιο περίπλοκη περίπτωση μελέτης. Σε έναν καρστικό παράκτιο υδροφορέα διακρίνονται τρεις ζώνες, η ζώνη γλυκού νερού, η ζώνη υφάλμυρου νερού και η ζώνη αλμυρού νερού. Το όριο της μεταβατικής ζώνης καθορίζεται από την πιεζομετρική στάθμη, η οποία είτε λόγω φυσικών είτε τεχνητών διεργασιών συνεχώς μεταβάλλεται. Ο νόμος Ghyben-Herzbergπου υπολογίζει την διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού ισχύει στην περίπτωση των καρστικών υδροφορέων μόνο όταν υπάρχει ομοιογενές δίκτυο διακλάσεων.

Οι παράκτιοι καρστικοί υδροφορείς διακρίνονται σε (Mijatovic, 2008):

- Υδροφορείς ανοικτούς στη θάλασσα
- Υδροφορείς με ημιτελή φυσικό ή επικρεμάμενο φραγμό, όπου η επικοινωνία γλυκού και αλμυρού νερού γίνεται μόνο δια μέσου τοπικών επιφανειών.
- Καρστικούς υδροφορείς πλήρως φραγμένους.

Οι υδρογεωλογικές συνθήκες, η θέση και το σχήμα της διεπιφάνειας γλυκού και αλμυρού νερού, καθώς και η παρουσία φραγμών αποτελούν παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή κατάλληλων υδραμαστευτικών έργων (οριζόντιων, κατακόρυφων, κτλ). Τα μέτρα προστασίας των καρστικών υδροφόρων είναι ίδια ή παρόμοια με αυτά των υδροφορέων οι οποίοι δομούνται από χαλαρά υλικά.

1.2 Διαχείριση εμπλουτισμού υδροφορέων

(Βιβλιογραφικά δεδομένα από Πλιάκας, 1998)

Εμπλουτισμός υπόγειου νερού ή υπόγειων υδροφορέων ορίζεται ως το νερό που κινείται από την επιφάνεια του εδάφους ή την ακόρεστη ζώνη. Η έννοια του εμπλουτισμού του υπογείου νερού περιλαμβάνει όλες τις διαδικασίες με τις οποίες τροφοδοτείται ένας υδροφορέας, χωρίς να περιορίζεται μόνο στην κατείδυση του βρόχινου νερού. Η τροφοδοσία των υπογείων νερών πραγματοποιείται μέσω του φυσικού εμπλουτισμού και του τεχνητού εμπλουτισμού.

Ένας υπόγειος υδροφορέας εμπλουτίζεται κατά κύριο λόγο με τον διάχυτο ή άμεσο εμπλουτισμό, που προέρχεται από το νερό της βροχής και πραγματοποιείται με κατακόρυφη κατείδυση διαμέσου της ακόρεστης ζώνης, ομοιόμορφα κατανεμημένη σε μια περιοχή. Ένα ακόμα τρόπο εμπλουτισμού είναι ο εστιασμένος εμπλουτισμός που γίνεται από επιφανειακά

σώματα σε υδραυλική επικοινωνία. Αυτός προέρχεται από επιφανειακά νερά (χειμάρρους, ποτάμια κτλ), είτε καταβόθρες, ρωγμές ή τοπογραφικές ταπεινώσεις. Πολλές φορές οι υπόγειοι υδροφορείς τροφοδοτούνται έμμεσα ως αποτέλεσμα άλλων διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στην ευρύτερη περιοχή. Μια τέτοια περίπτωση είναι ο επαγωγικός εμπλουτισμός που παρατηρείται όταν υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων νερών. Για παράδειγμα, όταν αντλείται υπόγειο νερό από έναν υδροφορέα που γειτνιάζει με ένα υδρόρευμα, δημιουργείται υδραυλική κλίση από το υδρόρευμα προς την γεώτρηση. Ο εμπλουτισμός πολλές φορές προκύπτει από ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όπως οι απώλειες αρδευτικών, αποχετευτικών δικτύων κτλ. Τέλος, σε πολλές περιπτώσεις πραγματοποιούνται ακανόνιστες και σποραδικές περιπτώσεις εμπλουτισμού.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός ή όπως καλείται τα τελευταία χρόνια η διαχείριση εμπλουτισμού των υδροφόρων χαρακτηρίζεται η διαδικασία κατά την οποία αυξάνεται η φυσική ροή του επιφανειακού νερού προς τους υπόγειους υδροφορείς με την κατασκευή κατάλληλων υποδομών, την κατάκλυση με νερό ή την μεταβολή φυσικών ροών (Todd and Mays, 2005). Σε παγκόσμιο επίπεδο ο τεχνητός εμπλουτισμός εφαρμόζεται τουλάχιστον 2 αιώνες, με ελάχιστες εφαρμογές στον Ελλαδικό χώρο. Οι εφαρμογές αυτές αποσκοπούν συνήθως:

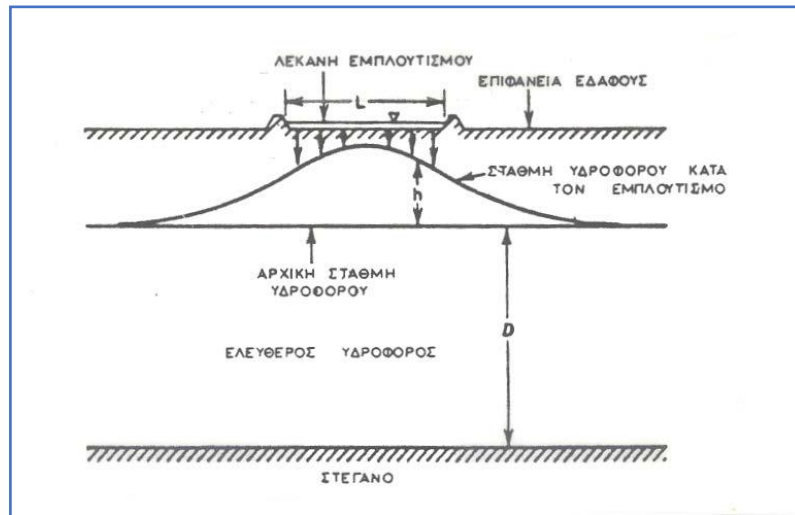
- Συνδυασμένη διαχείριση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων
- Επαναπλήρωση υπόγειων υδροφορέων και βελτίωση της ποιότητας των νερών
- Αποθήκευση ποσοτήτων νερού για μελλοντική χρήση.
- Ανάσχεση της θαλάσσιας διείσδυσης
- Αξιοποίηση επεξεργασμένων αποβλήτων
- Άντληση πετρελαίου με μικρό κόστος
- Αύξηση επιφανειακής απορροής
- Έλεγχος πλημμυρικών απορροών
- Αντιμετώπιση φαινομένων καθιζήσεων λόγω υπεράντλησης.

Κατά την διάρκεια των χρόνων εφαρμογών έχουν προκύψει πλήθος μεθόδων, οι οποίες μπορούν να ομαδοποιηθούν ως εξής (Καλλέργης, 1986, Bouwer, 1995 Διαμαντής& Πλιάκας, 2012):

- Επιφανειακές μέθοδοι: μέθοδος λεκάνης, τάφρων και αυλάκων, μέθοδος πλημμύρας, μέθοδος διευθέτησης υδρορρεύματος, μέθοδος άρδευσης
- Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στο υπέδαφος: μέθοδος με φυσικά ανοίγματα, μέθοδος ορυγμάτων, αντίστροφη αποστράγγιση, γεωτρήσεις εμπλουτισμού, μέθοδος αποθήκευσης-άντλησης νερού από μια γεώτρηση και πηγάδια νερού στην ακόρεστη ζώνη
- Συνδυασμοί επιφανειακού και υπεδαφικού εμπλουτισμού: συνδυασμός λεκάνης εμπλουτισμού και αποστραγγιστικού δικτύου, συνδυασμός λεκανών και ορυγμάτων, εκσκαφών ή γεωτρήσεων
- Έμμεσος εμπλουτισμός, όπως ο επαγωγικός, ο συμπτωματικός και η διευθέτηση υδροφορέων
- Εμπλουτισμός με επεξεργασμένα απόβλητα: συστήματα φυσικής επεξεργασίας μέσω εδάφους- υδροφορέα, γεωτρήσεις μετά από διαδικασίες καθαρισμού.

Οι λεκάνες εμπλουτισμού συνιστούν μια μέθοδο εμπλουτισμού με ιδιαίτερη απλοϊκή χρήση, αφού επιτρέπει επαρκή χρήση της επιφάνειας του εδάφους και η συντήρησή της είναι

πολύ απλή. Συνήθως, χρησιμοποιείται μια σειρά διαδοχικών λεκανών. Με την διήθηση του νερού δημιουργείται ένα ύψωμα στην πιεζομετρική επιφάνεια που ποικίλει ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα, την παροχή και την χρονική διάρκεια του εμπλουτισμού (Σχήμα 1). Το νερό του εμπλουτισμού υπόκειται σε μια υποτυπώδη επεξεργασία για την αφαίρεση αιωρούμενων υλικών και την προσθήκη οργανικών και χημικών ουσιών. Παράλληλα, προτείνεται η αποξήρανση κάποιων λεκανών ή το όργωμα τους για την αποφυγή εμφάνισης του φαινομένου απόφραξης εδαφικών πόρων (clogging).



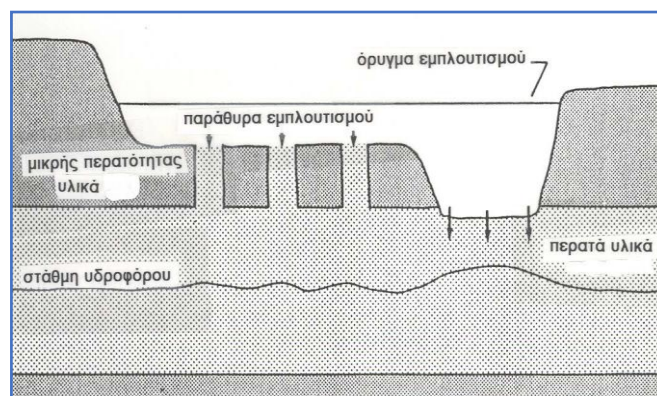
Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση υψώματος υδροστατικής επιφάνειας κάτω από την λεκάνη εμπλουτισμού (Καλλέργης, 1986)

Η μέθοδος ταφρών και αυλάκων ενδείκνυται όταν το νερό εμπλουτισμού περιέχει μεγάλη ποσότητα ιλύος ή αργίλου, ενώ προτιμάται σε περιπτώσεις ανώμαλου αναγλύφου, παρόλο που σε αυτή την περίπτωση η επιφάνεια νερού και εδάφους είναι πολύ μικρή. Μια από τις μεθόδους με πολύ χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης είναι η μέθοδος της πλημμύρας. Εφαρμόζεται σε περιοχές με πολύ μικρή κλίση αναγλύφου, όπου το νερό απλώνεται με την βοήθεια καναλιών και αυλάκων διανομής. Σκοπός είναι η κατάκλιση μεγάλης έκτασης μιας περιοχής σχηματίζοντας ένα στρώμα μικρού πάχους, ώστε να διατηρείται αδιατάρακτο το εδαφικό υλικό. Ωστόσο, με την πλημμυρική μέθοδος απαιτείται μεγάλη επιφάνεια εφαρμογής, χάνονται σημαντικές ποσότητες νερού λόγω εξάτμισης, ενώ παράλληλα είναι δύσκολη η ανάσχεση του νερού που πλημμυρίζει.

Ως εργαλείο του τεχνητού εμπλουτισμού χρησιμοποιούνται πολλές φορές τα υπάρχοντα υδρορεύματα. Μια μέθοδο αποτελεί η διευθέτηση υδρορεύματος. Ουσιαστικά με την μέθοδο αυτή τίθεται ως στόχος η αύξηση της διηθητικής ικανότητας του υδρορεύματος με την κατάλληλη διευθέτηση του, που συνήθως περιλαμβάνει διαδικασίες με σκοπό την επιβράδυνση του νερού και την αύξηση της επιφάνειας της κοίτης. Τα έργα που απαιτούνται για την εφαρμογή έχουν συνήθως χαμηλό κόστος, ωστόσο είναι ιδιαίτερα κοστοβόρα η συντήρησή τους. Μια ακόμα εφαρμογή που συνδέεται με τα υδρορεύματα είναι η επανενεργοποίηση ή η αύξηση της ροής του. Η μέθοδος χρησιμοποιείται σε περιοχές που υπάρχουν εγκαταλελειμμένες κοίτες, κάτι που είναι πολύ σημαντικό εκτός από την εξυπηρέτηση του σκοπού του εμπλουτισμού και για την ανάκτηση της οικολογικής ισορροπίας στον περιβάλλοντα χώρο. Όμως το υψηλό κόστος και η δυσκολία να επιτευχθεί η κατάλληλη ταχύτητα ροής που να

διευκολύνει την διήθηση του νερού αποτελούν ανασταλτικούς παράγοντες για την εφαρμογή του.

Οι μέθοδοι εμπλουτισμού με την διάθεση νερού κατευθείαν στο υπέδαφος χρησιμοποιείται όταν μεταξύ της πηγής εμπλουτισμού και του υδροφόρου παρεμβάλλει ένα ημιπερατό στρώμα. Στην περίπτωση αυτή το νερό του εμπλουτισμού θα πρέπει να είναι πολύ καλής ποιότητας καθώς δεν υπόκεινται την επεξεργασίας της ακόρεστης ζώνης όπως στην προηγούμενη περίπτωση. Μια μέθοδος με πολύ χαμηλό κόστος είναι η παροχέτευση του νερού μέσα από φυσικά ορύγματα, όπως από διακλάσεις ή ευδιάλυτα πετρώματα (πχ. ασβεστόλιθοι). Η μέθοδος των ορυγμάτων εφαρμόζεται αν σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους εντοπίζονται σχηματισμοί μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας τότε ο υποκείμενος υδροφόρος εμπλουτίζεται από ορύγματα ή φρέατα που κατασκευάζονται έτσι ώστε να διαπεράσουν τα υπερκείμενα στρώματα (Σχήμα 2). Είναι πολύς σημαντική για την αποδοτικότητα του έργου η γεωμετρία των ορυγμάτων, ωστόσο το κόστος κατασκευής και συντήρησης είναι μεγάλο. Γι αυτό το λόγο προτιμάται η χρήση εγκαταλελειμμένων ή χαλικωδών ορυγμάτων.



Σχήμα 2: Μέθοδος εμπλουτισμού ορυγμάτων και καναλιών (Καλλέργης, 1986)

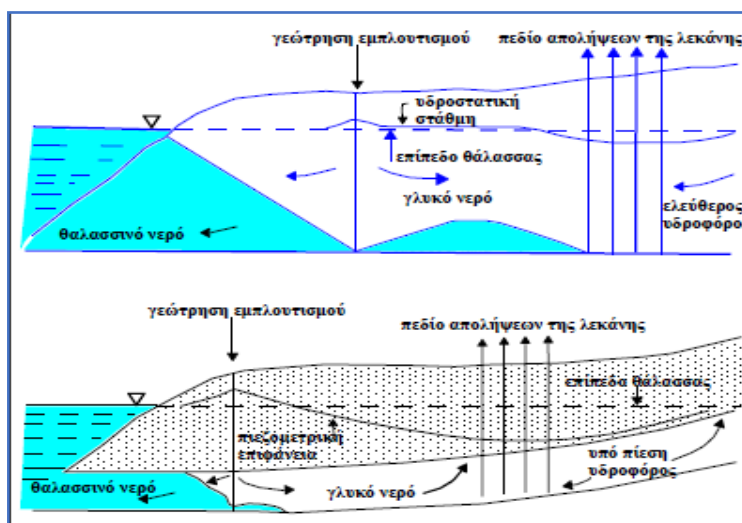
Μια ακόμα μέθοδος εμπλουτισμού είναι η μέθοδος της αντίστροφης αποστράγγισης κατά την οποία διοχετεύεται νερό εμπλουτισμού μέσω υπογείων δικτύου και εμπλουτίζει τα υποκείμενα υδροφόρα στρώματα. Για την εφαρμογή του εμπλουτισμού αξιοποιούνται γεωτρήσεις που διαβιβάζουν νερό από την επιφάνεια προ τους υδροφορείς. Οι γεωτρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται για τον εμπλουτισμό αρτεσιανών υδροφόρων απομονωμένων από την επιφάνεια, ενώ για λόγους οικονομίας πολλές φορές εξυπηρετεί και την τροφοδοσία υπερκείμενων υδροφόρων στρωμάτων. Η μέθοδος αυτή περά από την τροφοδοσία του υδροφορέα παίζει σημαντικό ρόλο και στην ανάσχεση του μετώπου υφαλμύρισης σε παράκτιων περιοχών που αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα. Μια νέα μέθοδος που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια είναι η αποθήκευση του πλεονάζοντος νερού κατά την υγρή περίοδο προκειμένου να αξιοποιηθούν το καλοκαίρι, όταν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη. Η μέθοδος αυτή αυξάνει τα αποθέματα σε πόσιμο νερό μειώνοντας το κόστος αφού μετά την άντληση το νερό χρειάζεται να υποστεί μόνο χλωρίωση πριν τη διάθεση του στο δίκτυο. Μια αρκετά οικονομική μέθοδος εμπλουτισμού αποτελεί η τροφοδοσία νερού μέσω πηγαδιών στην ακόρεστη ζώνη. Ωστόσο, αποφεύγεται η συγκεκριμένη μέθοδος καθώς ενέχει κινδύνους ως προς τη ρύπανση ή μόλυνση του υδροφορέα και δυσκολία αντιμετώπισης προβλημάτων clogging.

Σε ιδιαίτερες περιπτώσεις για την κάλυψη των αναγκών μπορούν να χρησιμοποιηθεί συνδυασμός επιφανειακών και υπεδάφινων μεθόδων αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα και των

δύο. Πιο συγκεκριμένα, σε περιπτώσεις όπου εντοπίζονται στρώματα μεγάλου πάχους και μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας, όπου επάνω τοποθετούνται λεκάνες εμπλουτισμού θεωρείται αποτελεσματικό να συνδυάζεται με αποστραγγιστικό δίκτυο το οποίο συλλέγει το νερό που κατεισδύει και το οδηγεί σε γεωτρήσεις που εμπλουτίζουν βαθύτερους υδροφορείς. Ένας ακόμα συνδυασμός μεθόδων αφορά μια διαδικασία κατά την οποία οι λεκάνες αποθηκεύουν νερό το οποίο στη συνέχεια διανέμεται μέσω ορυγμάτων, εκσκαφών ή γεωτρήσεων σε ζώνες μεγαλύτερης περατότητας.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός παρουσιάζει μεγάλα οφέλη ως προς την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης. Γενικά, είναι σημαντικό η στάθμη του γλυκού νερού να παραμένει υψηλότερα από το απόλυτο επίπεδο για να αποφευχθεί η αναστροφή της υδραυλικής κλίσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την αύξηση του φυσικού εμπλουτισμού ή την εφαρμογή τεχνητού. Οι κύριες μέθοδοι για την παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης είναι (ASCE, 1987):

- Μείωση των αντλούμενων ποσοτήτων νερού και τροποποίηση του σχεδίου άντλησης.
- Εφαρμογή επιφανειακού εμπλουτισμού με λεκάνες κατάκλυσης με στόχο της αναστροφή της υδραυλικής κλίσης.
- Δημιουργία υπόγειων φυσικών φραγμών σε αβαθείς σχηματισμούς ανακόπτοντας την επικοινωνία με την θάλασσα.
- Δημιουργία κοιλώματος άντλησης. Αποτελεί μια ιδιαίτερα αποτελεσματική διαδικασία κατά την οποία δημιουργείται μια σειρά από γεωτρήσεις που αντλούν ελεγχόμενα αλμυρό νερό. μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα και ασφάλεια εφαρμογής προσφέρεται όταν η μέθοδος συνδυάζεται με την λειτουργία γεωτρήσεων εμπλουτισμού γλυκού νερού (Bruington and Seares, 1965).
- Δημιουργία υβώματος μετά από εκτεταμένο εμπλουτισμό (Σχήμα 3). Η αλατότητα που θα προκληθεί στο γλυκό νερό θα είναι τόσο μικρή που το μεγαλύτερο μέρος του είναι και πάλι διαθέσιμο προς χρήση. Η μέθοδος αυτή έχει σημαντικά αποτελέσματα σε υπό πίεση υδροφορείς (Larson et al., 1977)



Σχήμα 3: Δημιουργία υβώματος από εμπλουτισμό σε ελεύθερο (επάνω) και υπό πίεση υδροφορέα (κάτω) (Καλλιώρας, 2012)

2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

2.1 Γεωγραφικά στοιχεία

Η περιοχή έρευνας του Αργολικού πεδίου εντάσσεται διοικητικά στην Περιφέρεια Πελοποννήσου και συγκεκριμένα, στην Περιφερειακή ενότητα Αργολίδος. Η ενότητα Αργολίδος έχει πρωτεύουσα το Ναύπλιο, έχει έκταση 2.214 Km² και πληθυσμό 97.044 κατοίκους. Το βόρειο τμήμα της συνορεύει με την ενότητα Κορινθίας, ενώ δυτικά και νότια με την ενότητα Αρκαδίας. Όσον αφορά, το παράκτιο τμήμα της, βορειοανατολικά βρέχεται από το Σαρωνικό κόλπο και νοτιοανατολικά από τον Αργολικό κόλπο.

Γενικότερα, η Περιφέρεια της Πελοποννήσου αποτελεί μία από τις δεκατρείς περιφέρειες της χώρας και περιλαμβάνει τις ενότητες της Αρκαδίας, Κορινθίας, Αργολίδος, Μεσσηνίας και Λακωνίας. Η πόλη της Τρίπολης είναι η έδρα της Περιφέρειας Πελοποννήσου, ενώ η πόλη με το μεγαλύτερο πληθυσμό είναι η Καλαμάτα. Η έκτασή της είναι 15.490 Km² και έχει πληθυσμό 577.903 κατοίκους, σύμφωνα με την απογραφή του 2011.



Σχήμα 4: Χάρτης Νομού Αργολίδας (Πηγή: <http://el.wikipedia.org/wiki>)

2.1.1 Πληθυσμιακά στοιχεία

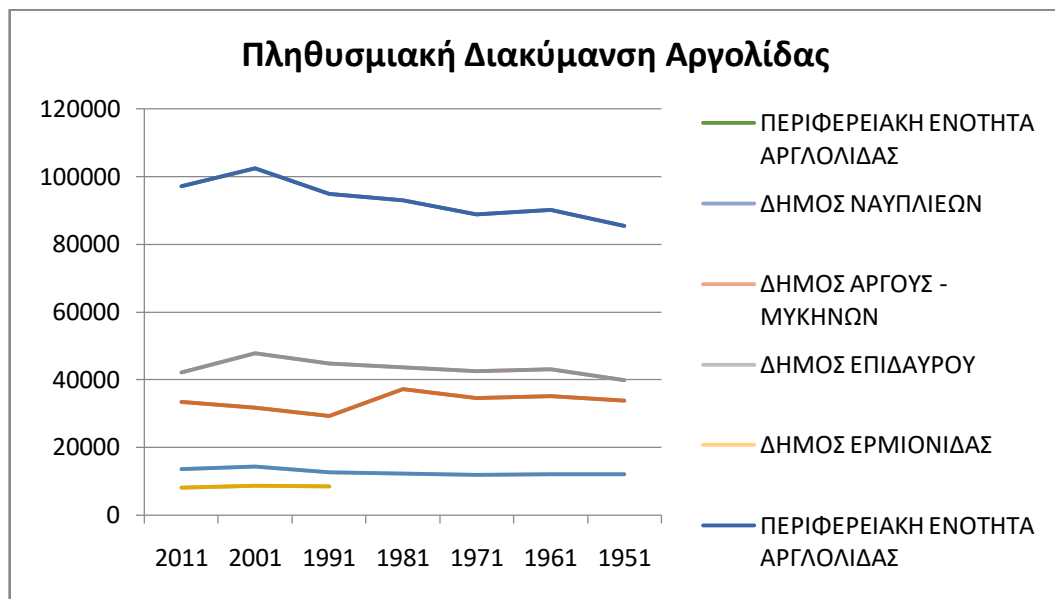
Ο νομός Αργολίδας έχει ως πρωτεύουσα την πόλη του Ναυπλίου. Με την καθιέρωση του Σχεδίου Καλλικράτη οι δήμοι του νομού Αργολίδας συγχωνεύτηκαν σε 4 από 16. Συγκεκριμένα:

- Δήμος Ναυπλιέων με έδρα το Ναύπλιο αποτελείται από τους δήμους Ναυπλιέων, Τίρυνθας, Μιδέας και Ασίνης, οι οποία καταργούνται.
- Δήμος Άργους-Μυκηνών με έδρα το Άργος και ιστορική έδρα τις Μυκήνες αποτελείται από τους δήμους Άργους, Νέας Κίου, Λέρνας, Μυκηναίων,

Κουτσοποδίου, Λύρκειας και τις κοινότητες Αχλαδόκαμπου και Αλέας οι οποίοι καταργούνται.

- Δήμος Επιδαύρου με έδρα το Ασκληπιείο και ιστορική έδρα την Αρχαία Επίδαυρο που αποτελείται από τους δήμους Ασκληπιείου και Επιδαύρου, οι οποίοι καταργούνται.
- Δήμος Ερμιονίδας με έδρα το Κρανίδι, που αποτελείται από τους δήμους Ερμιόνης και Κρανιδίου, οι οποίοι καταργούνται.

Σύμφωνα, με την απογραφή του 2011 συγκεντρώνει το 17% του πληθυσμού της Περιφέρειας Πελοποννήσου. Συνολικά, στο νομό κατοικούν 97.044 μόνιμοι κάτοικοι. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2 από το 1951 έως τα μέσα της δεκαετίας του 90' σημειώνεται μικρής τάξεως αυξητική τάση στο σύνολο των δήμων. Ωστόσο, από την απογραφή του 2001 υπάρχει περίπου 8% μείωση του πληθυσμού στην περιοχή, ως το 2011 (ΕΛΣΤΑΤ).

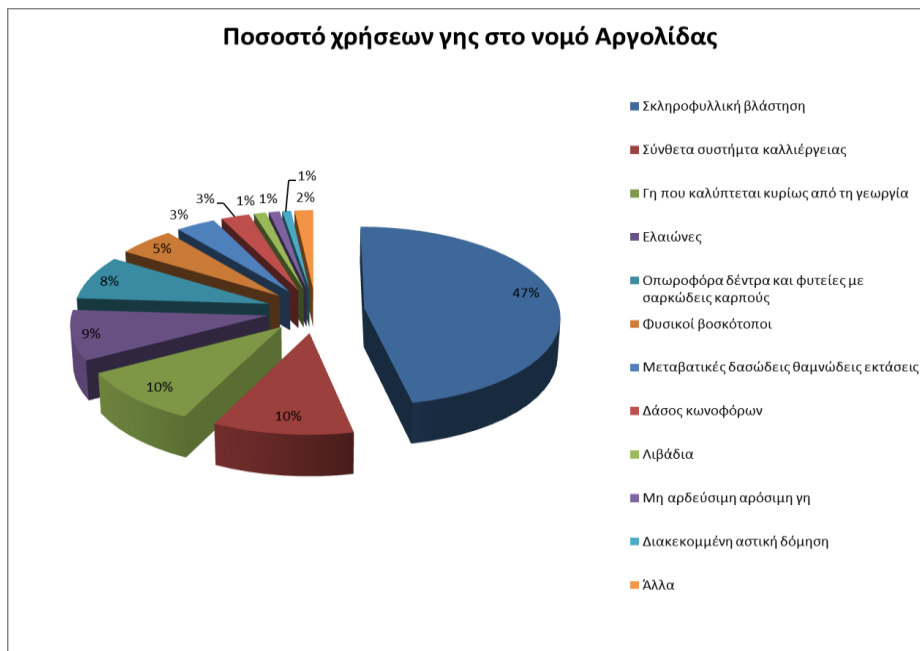


Σχήμα 5: Πληθυσμιακή Διακύμανση πληθυσμού Περιφερειακής Ενότητας Αργολίδας και Δήμων (1951-2011)

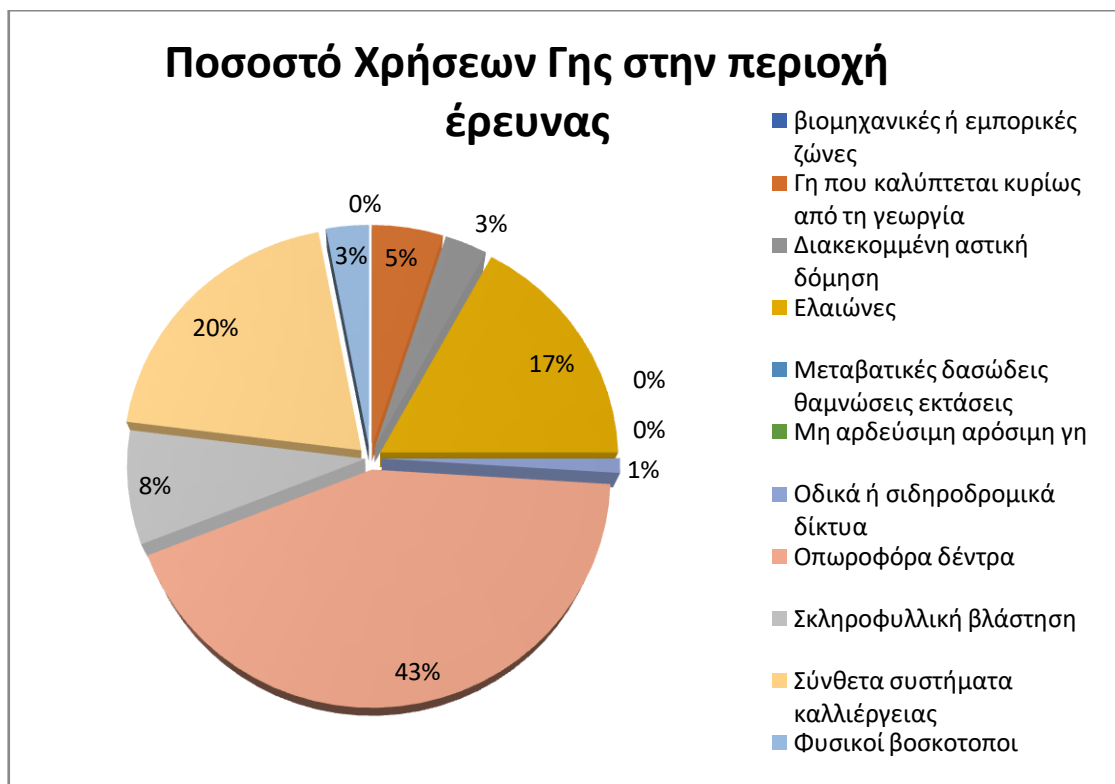
Η περιφερειακή ενότητα Αργολίδας διαθέτει δύο μεγάλα αστικά κέντρα, του Άργους και του Ναυπλίου, τα οποία συγκεντρώνουν τα $\frac{3}{4}$ του συνολικού πληθυσμού.

2.2 Χρήσεις Γης

Οι χρήσεις γης αποτελούν πηγή πληροφοριών σχετικά με τις δραστηριότητες που αναπτύσσονται σε μια περιοχή, τις εκτάσεις που καταλαμβάνουν και παράλληλα υποδεικνύουν την πιθανότητα εκδήλωσης ενός επεισοδίου ρύπανσης. Για την μελέτη της Κάλυψης γης στην περιοχή έρευνας, αλλά και την ευρύτερη περιοχή της Αργολίδας έγινε χρήση του προγράμματος Corine Land Use 2000. Με βάση τα δεδομένα που αντλήθηκαν έγινε εξαγωγή διαγραμμάτων με την ποσοστιαία συμμετοχή των χρήσεων, καθώς και χάρτης που αποτυπώνει την γεωγραφική κατανομή των χρήσεων στην περιοχή έρευνας.



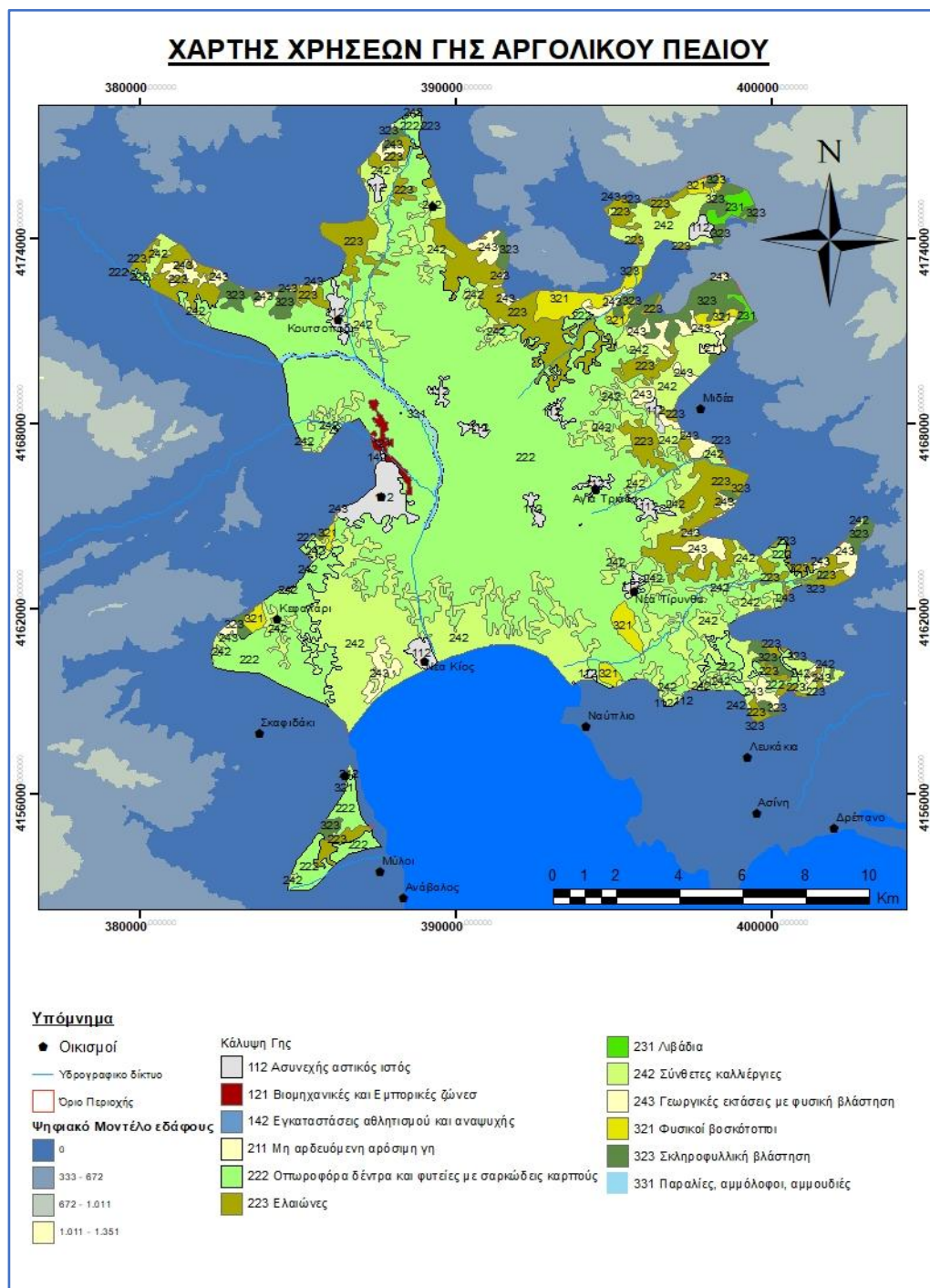
Σχήμα 6: Ποσοστιαία κατανομή χρήσεων γης στο Νομό Αργολίδας (Corine 2000)



Σχήμα 7: Ποσοστιαία κατανομή χρήσεων γης εντός του Αργολικού πεδίου (CORINE 2000)

Στην Περιφερειακή ενότητα Αργολίδας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6, επικρατεί σε ποσοστό 50% η κάλυψη από σκληρόφυλλη βλάστηση, ενώ σημαντικό μέρος καλύπτουν οι ελαιώνες, τα οπωροφόρα δέντρα, σύνθετα συστήματα καλλιέργειας και γεωργικές εκτάσεις με

τιμήματα φυσικής κάλυψης. Στην Αργολική πεδιάδα μεγάλη έκταση καλύπτουν τα οπωροφόρα δέντρα με σαρκώδης καρπούς και μαζί με τους ελαιώνες και τα σύνθετα συστήματα καλλιέργειας καλύπτουν σχεδόν ολόκληρη την περιοχή.



Σχήμα 8: Χάρτης Χρήσεων γης του Αργολικού πεδίου (CORINE 2000)

2.3 Παραγωγικός τομέας

Ο πρωτογενής και ο τριτογενής τομέας είναι αυτοί που στηρίζουν την οικονομία του Νομού Αργολίδας. Η ευρύτερη περιοχή του Αργολικού πεδίου εμφανίζει μια ιδιαιτερότητα σε σχέση με οποιαδήποτε άλλη περιοχή της Ελλάδας. Το ποσοστό του ΑΕΠ που αντιστοιχεί στον Νομό Αργολίδας είναι πολύ μεγάλο σε σχέση με την έκταση του νομού που καταλαμβάνει. Σύμφωνα με την απογραφή του 2015 (ΕΛΣΤΑΤ), το ακαθάριστο εγχώριο προϊόν που αντιστοιχεί στο νομό Αργολίδας είναι το 0,81% του συνόλου. Παράλληλα, το κατά κεφαλήν ακαθάριστο εγχώριο προϊόν ανέρχεται στα 14.693 ευρώ σε σχέση με τα 16.294 που αντιστοιχεί συνολικά στην Ελλάδα.

Ο πρωτογενής τομέας στην περιοχή αποτελείται από την γεωργία, την κτηνοτροφία και την αλιεία. Η γεωργία συμβάλει στον πρωτογενή τομέα κατά 29,6% του ΑΕΠ, ποσοστό το οποίο συμφωνεί με τον ΑΕΠ της Περιφέρειας, σχετικά με τα βασικά γεωργικά προϊόντα. Η συνολική έκταση που καλλιεργείται ανέρχεται σε 710.000 στρέμματα εκ των οποίων τα 228.000 είναι αρδευόμενα. Οι γεωργικές δραστηριότητες αποτελούν διάχυτη πηγή ρύπανση. Η ρύπανση αυτή συνιστά απόρροια της λίπανσης ανάλογα το είδος της καλλιέργειας, και της χρήσης φυτοφαρμάκων και ζιζανιοκτόνων για την αντιμετώπιση ασθενειών και παρασίτων που δυνητικά βλάπτουν τις καλλιέργειες.

Η κτηνοτροφία συμμετέχει στο ακαθάριστο γεωργοκτηνοτροφικό εισόδημα της Περιφερειακής ενότητας είναι 16,37%. Η παραγωγική απόδοση του συγκεκριμένου τομέα φθίνει σταδιακά, εκτός από τα πρόβατα, τις αίγες και την μελισσοκομία τα οποία παρουσιάζουν αύξηση. Μέσα από την διαδικασία του σταβλισμού και των οργανωμένων κτηνοτροφικών μονάδων ζώων και πτηνών οδηγεί στην παραγωγή υγρών και στερεών αποβλήτων και θεωρείται σημειακή πηγή ρύπανσης. Αντίθετα, η ποιμενική κτηνοτροφία, η οποία αναφέρεται στην εκτροφή ζώων ελευθέρως βοσκής αντιμετωπίζεται ως διάχυτη πηγή ρύπανσης.

Στην περιοχή της Αργολίδας συγκεντρώνεται το 50% της συνολικής αλιευτικής παραγωγής της Περιφερειακής ενότητας Πελοποννήσου, ενώ συνιστά το 13% του συνολικού ακαθάριστου εισοδήματος. Η αλιευτική παραγωγή στην περιοχή προέρχεται από την ελεύθερη αλιεία, τις λιμνοθάλασσες, τις ιχθυοκαλλιέργειες, και γενικότερα τις υδατοκαλλιέργειες.

Ο τριτογενής τομέας παρουσιάζει συνεχόμενη αύξηση τόσο στην περιοχή της Αργολίδας, αλλά και γενικότερα στην Περιφέρεια της Πελοποννήσου. Έχει παρατηρηθεί ο τύπος του μαζικού τουρισμού, όπου αφορά επισκέπτες που καταφθάνουν οργανωμένοι σε ομάδες, με προκαθορισμένες επισκέψεις σε περιοχές. Οι ξενοδοχειακές μονάδες και τα καταλύματα που λειτουργούν στην περιοχή και εξυπηρετούν τις ανάγκες των επισκεπτών, θεωρούν πηγή σημειακής ρύπανσης αστικών λυμάτων. Ωστόσο, αρκετές από τις μεγάλες μονάδες στην περιοχή εφαρμόζουν επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων για την άρδευση των εγκαταστάσεων τους.

2.4 Γεωμορφολογικές συνθήκες

Η μορφολογία του Νομού Αργολίδας είναι κατά κύριο λόγο ορεινή, με μοναδική εξαίρεση την Αργολική πεδιάδα, η οποία είναι σχηματισμένη με προσχωματικά υλικά Τεταρτογενούς ηλικίας και παράκτιες αποθέσεις στην περιοχή του Κρανιδίου, της Ερμιόνης και την κοιλάδα του Λιγουριού. Το ορεινό ανάγλυφο της περιοχής διαμορφώνεται από τα όρη τα οποία αρχίζουν από την περιοχή της Κυλλήνης στο νομό Αργολίδας. Αυτά είναι: το Τραχύ (το

μεγαλύτερο μέρος του βρίσκεται στην Αρκαδία, με την υψηλότερη κορυφή το Κουρούμπαλο στα 1808m, στην Αργολίδα, το Λύρκειο (1755m), το Αρτεμίσιο (1711m), το Κτένιας (1634m), το Παρθένιο (1215m) που κατευθύνεται προς τα νότια και υψώνεται ο Πάρνανας, ο Ολίγυρτος (1935m), Φαρμακάς (1616m), Μεγαλοβούνι (1273m) και Κορακοβούνι. Στη συνέχεια, ακολουθούν τα Δερβενάκια όρη με υψόμετρο στα 318m, τα οποία αποτελούν και τον υδροκρίτη μεταξύ του Κορινθιακού και του Αργολικού Κόλπου. Το κύριο ωστόσο βουνό της Αργολίδας είναι το Αραχναίο όρος (1199m κορυφή του Προφήτη Ηλία) (Μητρόπαπας, 2015).

Το υδρογραφικό δίκτυο στην περιοχή αποτελείται κυρίως από υδατορεύματα εφήμερης ροής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο χείμαρρος Ίναχος με μήκος 42km, περίπου η κύρια κοίτη του. Ο Ίναχος πηγάζει από το Αρτεμίσιο. Παράλληλα εξίσου σημαντικό χείμαρρος στην περιοχή είναι ο Ξεριάς. Οι χείμαρροι αυτοί είναι εξαιρετικά σημαντικοί λόγω της έκτασης των υδρολογικών τους λεκανών και τα πλημμυρικά φαινόμενα μεγάλης έκτασης που προκαλούν. Από την πηγή του Κεφαλαρίου πηγάζει ο μοναδικός ποταμός συνεχούς ροής στην πεδιάδα, ο Ερασινός, ο οποίος εκβάλλει εν μέρει στο βάλτο της Νέα Κίου. Κατά μήκος του έχουν δημιουργηθεί πλήθος τεχνητών καναλιών για την άρδευση στην περιοχή.

Μετά από την επεξεργασία του Ψηφιακού Μοντέλου εδάφους μέσω ειδικού λογισμικού σε περιβάλλον QGIS 2.18, προκύπτει πως η έκταση του Αργολικού πεδίου είναι περίπου 213Km². Στο νότιο τμήμα του πεδίου και το παράκτιο το υψόμετρο είναι από 0-30m ενώ κατά τόπους φτάνει και τα 250m στις λοφώδεις περιοχές. Η κλίση του εδάφους είναι πολύ μικρή με μέση κλίση στην περιοχή από 0-8%, ενώ φτάνει έως και 32% μέγιστη κλίση στα ορεινά. Σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Demek (1972) το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής χαρακτηρίζεται ως επίπεδη ή ελαφρά κεκλιμένη και μόνο στα ορεινά τμήματα είναι απότομη (Πίνακας 1)

Πίνακας 1: Κατανομή κλίσεων κατά Demek (1972)

Κλίση (%)	Κλίση (°)	Χαρακτηρισμός
0-3.5	0-2	Επίπεδο
3.5-8.75	2-5	Ελαφρά κεκλιμένο
8.75-26.8	5-15	Ισχυρά κεκλιμένο
26.8-70	15-35	Απότομο
70-135	35-55	Απόκρημνο

2.5 Υδρολογικές συνθήκες

2.5.1 Κλιματολογικά χαρακτηριστικά

Η περιοχή χαρακτηρίζεται από το Μεσογειακό της κλίμα. Ειδικότερα, στα ανατολικά παράλια της Πελοποννήσου φαίνεται η ηπειρωτική ευρωπαϊκή επίδραση σε όλες τις εποχές του χρόνου. Ο μεσογειακός τύπος αφορά το κλίμα της ευρύτερης Μεσογειακής λεκάνης και αντιπροσωπεύει μια μεταβατική κατάσταση μεταξύ της εύκρατης ζώνης στα βόρεια και της

τροπικής στα νότια. Κύριες παράμετροι αυτού του κλίματος είναι το ξηρό και θερμό καλοκαίρι και ο ήπιος και υγρός χειμώνας. Ο χειμώνας είναι έντονος καθ' όλη τη διάρκεια του ή λόγω ψυχρών μαζών που εισβάλουν κατά περιόδους. Αντιθέτως, το καλοκαίρι είναι ξηρό λόγω της μετατόπισης της υποτροπικής ζώνης στα βορειότερα (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Κατά το σύστημα Koppen (Καρράς, 1973), η περιοχή ανήκει στον κλιματικό τύπο Csa δηλαδή, "χερσαίο μεσογειακό ξηρού και θερμού θέρους". Στην ταξινόμηση αυτή, τα δύο πρώτα σύμβολα (Cs) χαρακτηρίζουν το κλίμα ως εύκρατο με ξηρό καλοκαίρι, ενώ το τρίτο σύμβολο (a) δηλώνει ότι η μέση θερμοκρασία του αέρα το θερμότερο μήνα είναι μεγαλύτερη από 22°C.

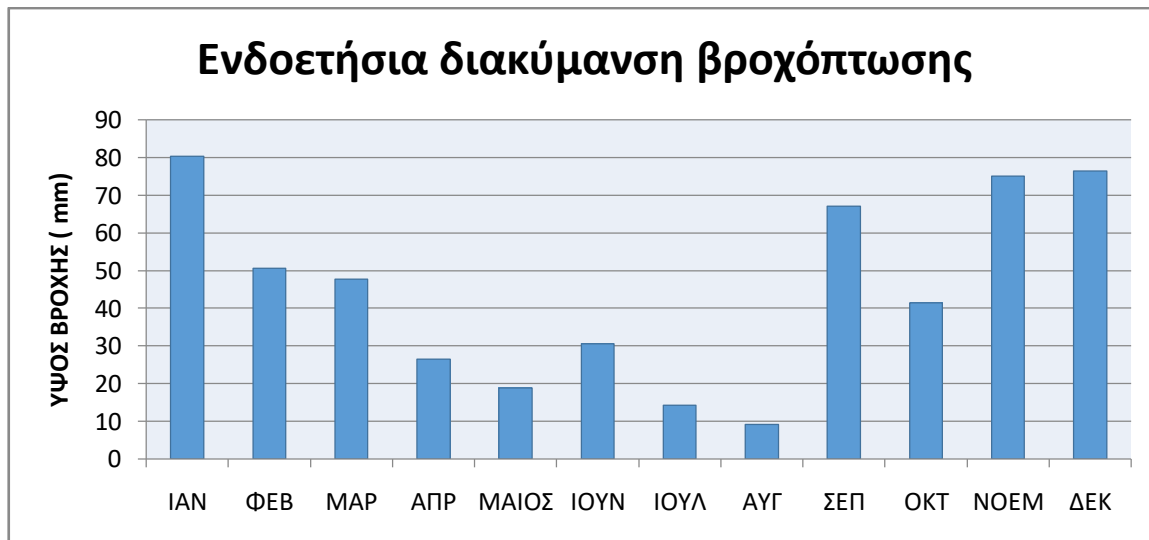
Κατά Thornthwaite, (Καρράς, 1973) το κλίμα της περιοχής ανήκει στα ξηρά κλίματα τύπου DdB3'B₄'>4". Ο συμβολισμός αυτός, δηλώνει ότι το κλίμα είναι ημίξηρο με δείκτη υγρασίας -40<I_m<-20, με μικρό πλεόνασμα ύδατος κατά το χειμώνα, με δείκτη υγρότητας Ph<16.7, και ανήκει στο μεσόθερμο B3' τύπο θερμικού κλίματος. Υφίσταται επίσης την επίδραση της θάλασσας στη διαμόρφωση του θερμικού του χαρακτήρα.

Στο παρελθόν ήταν εγκατεστημένοι 18 βροχομετρικοί και κλιματολογικοί σταθμοί, οι περισσότεροι από τους οποίους δεν ήταν πλήρως εξοπλισμένοι και σήμερα είναι εκτός λειτουργίας. Αυτό πρακτικά αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην πλήρη υδρολογική και υδρογεωλογική έρευνα στην περιοχή. Από την μελέτη των διαθέσιμων δεδομένων.

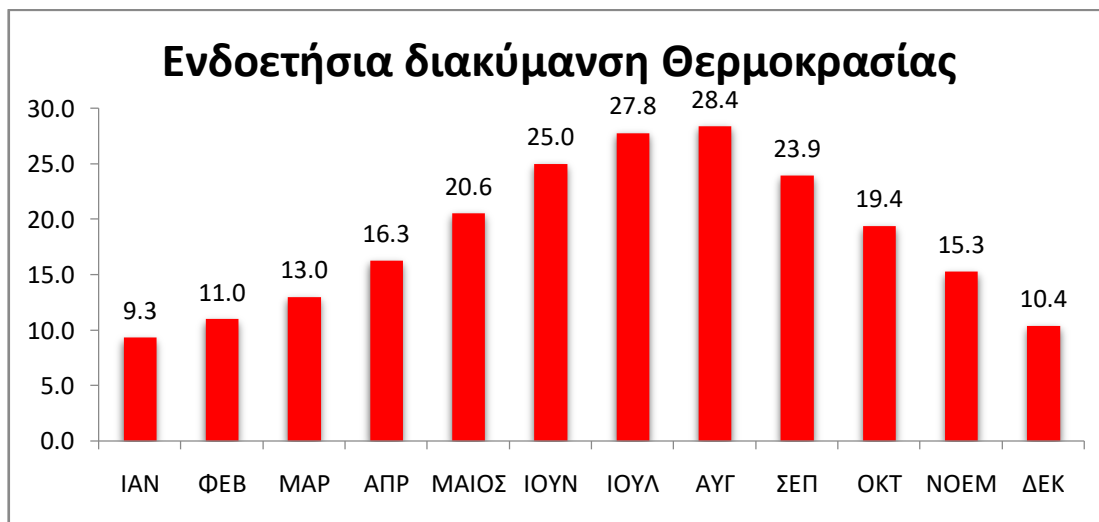
Στην ευρύτερη υδρολογική λεκάνη του Αργολικού πεδίου λειτουργεί συστηματικά και με καθημερινές καταγραφές ο κλιματολογικός σταθμός στην Πυργέλα Άργους. Ο μετεωρολογικός σταθμός του Άργους βρίσκεται σε υψόμετρο 38m και τοποθετείται γεωγραφικά στο κέντρο της πεδιάδας. Από το 2012-2019, η μέση ετήσια βροχόπτωση ανέρχεται σε 544mm. Από το Σχήμα 9 προκύπτει πως το πλήθος των βροχοπτώσεων λαμβάνουν χώρα από το Σεπτέμβριο έως τον Απρίλιο. Το μέγιστο ύψος βροχής εντοπίζεται τον Ιανουάριο με 80,3mm, ενώ το μέσο μηνιαίο ελάχιστο ύψος βροχής αφορά τον μήνα Αύγουστο με 9,2mm.

Πίνακας 2: μέση ετήσια βροχόπτωση και θερμοκρασία από το μετεωρολογικό σταθμό του Άργους για την περίοδο 2012-2019

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ	ΔΕΚ	Ετήσιο
ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ(mm)	80.3	50.6	47.7	26.5	18.9	30.6	14.3	9.2	67.2	41.5	75.1	76.5	44.9
ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (οC)	9.3	11.0	13.0	16.3	20.6	25.0	27.8	28.4	23.9	19.4	15.3	10.4	18.4



Σχήμα 9: Ενδοετήσια διακύμανση της βροχόπτωσης Μετεωρολογικού σταθμού Άργους για την περίοδο 2012-2019



Σχήμα 10: Ενδοετήσια διακύμανση θερμοκρασίας του μετεωρολογικού σταθμού του Άργους για την περίοδο 2012-2019

Από την επεξεργασία των θερμοκρασιακών δεδομένων που έχουν καταγραφεί για την περίοδο 2012-2019 στο μετεωρολογικό σταθμό του Άργους προκύπτει πως ο θερμότερος μήνας είναι ο Αύγουστος με μέση θερμοκρασία 28,4 °C, ενώ ψυχρότερος μήνας είναι ο Ιανουάριος με μέση θερμοκρασία 9,3 °C (Σχήμα10). Αναλυτικότερα, η μέση μέγιστη θερμοκρασία του Αυγούστου είναι 34,9 °C, ενώ η μέση ελάχιστη θερμοκρασία του Ιανουαρίου, ως ψυχρότερου μήνα, είναι 5,18 °C.

2.5.2 Υδρολογικό ισοζύγιο

2.5.2.1 Εξατμισοδιαπνοή

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται μέσω μια εμπειρικής σχέσης του Thornthwaite (1946) λαμβάνοντας υπόψη την μέση μηνιαία θερμοκρασία. Η σχέση αυτή έχει την ακόλουθη μορφή:

$$Ep = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^\alpha * N$$

Ep = η μέση μηνιαία τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής σε mm

T = η μέση μηνιαία θερμοκρασία σε °C

$$\alpha = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,792 * 10^{-3} * I + 0,49239$$

I = ετήσιος θερμικός συντελεστής και δίνεται από το άθροισμα των 12 μηνιαίων θερμικών δεικτών

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1.514}$$

Όπου T_i = η θερμοκρασία του μήνα i σε °C

N = συντελεστής που εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού.

Για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής από τη δυνητική εφαρμόζεται το ισοζύγιο κατά Thornthwaite- Mather (1955). Η εξίσωση του ισοζυγίου είναι:

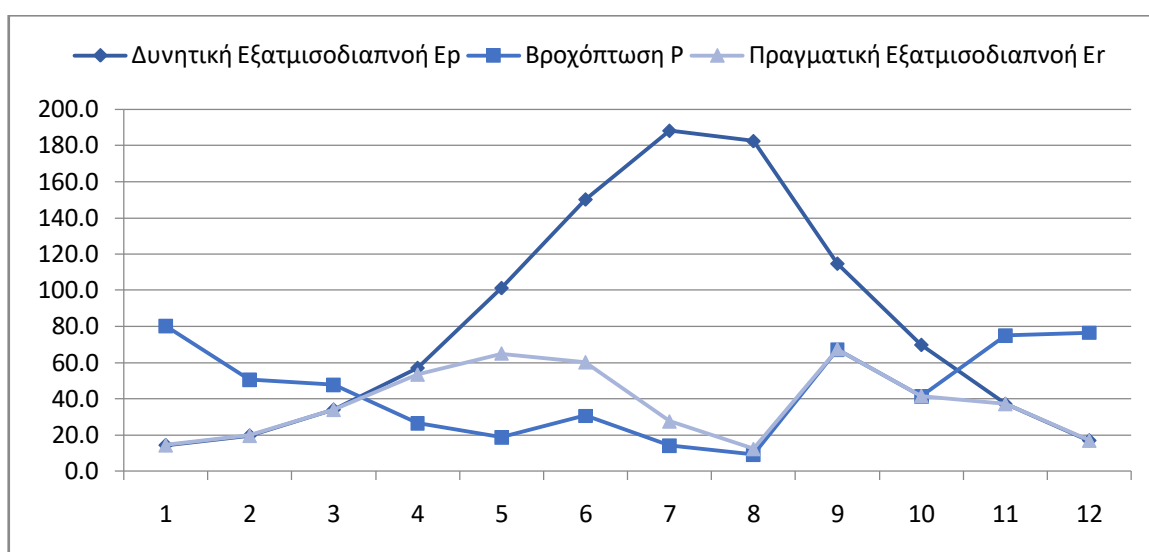
$$Q = P - Er$$

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των παραπάνω σχέσεων στην περιοχή έρευνας με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα. Η μέγιστη ικανότητα κατακράτησης νερού στο έδαφος θεωρήθηκε 120mm. Η μέση τιμή του συντελεστή πραγματικής εξατμισοδιαπνοής υπολογίστηκε σε 83,6%. Επομένως, διαπιστώνεται ότι το 15% του ετήσιου ύψους βροχής αντιστοιχεί σε διαδικασίες επιφανειακής απορροής και κατείσδυσης. Ο συνολικός όγκος νερού από την βροχόπτωση είναι $30,1 \times 10^6 \text{ m}^3$, εκ των οποίων εξατμίζονται $25,2 \times 10^6 \text{ m}^3$. Επομένως, ο όγκος που αντιστοιχεί στην ολική απορροή είναι $1,16 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Στο σχήμα 11 παρουσιάζεται η εικόνα του μέσου ισοζυγίου ύδατος. Από αυτό προκύπτει ότι η αναπλήρωση της εδαφικής υγρασίας ξεκινά από το μήνα Οκτώβριο έως το μήνα Ιανουάριο. Έλλειμμα εδαφικής υγρασίας εντοπίζεται από τον Απρίλιο έως τον μήνα Αύγουστο. Πλεόνασμα νερού εμφανίζεται τους μήνες Ιανουάριο Φεβρουάριο και Μάρτιο.

Πίνακας 3: Ισοζύγιο κατά Thornthwaite στην περιοχή έρευνας

	Sto=			120 α=			1.979572302			Συντ. Πραγματική Εξατμισοδιαπνοή					83.565
	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕΜ	ΔΕΚ	ετησιο		
T(Oc)	9.3	11.0	13.0	16.3	20.6	25.0	27.8	28.4	23.9	19.4	15.3	10.4	18.4		
i	2.6	3.3	4.3	6.0	8.5	11.4	13.4	13.9	10.7	7.8	5.4	3.0	90.3		
N	0.8	0.8	1.0	1.1	1.2	1.3	1.3	1.2	1.0	1.0	0.8	0.8			
Er	14.4	19.6	34.0	57.0	101.1	150.1	188.0	182.3	114.6	69.7	37.2	17.0	985.0		
P	80.3	50.6	47.7	26.5	18.9	30.6	14.3	9.2	67.2	41.5	75.1	76.5	538.2		
P-Er	65.9	30.9	13.7	-30.5	-82.2	-119.5	-173.7	-173.1	-47.5	-28.3	37.9	59.5			
APWL	0.0	0.0	0.0	-30.5	-112.8	-232.2	-405.9	-579.0	-626.5	-654.8	0.0	0.0			
St	120.0	120.0	120.0	93.0	46.9	17.3	4.1	1.0	0.6	0.5	120.0	120.0			
ΔSt	0.0	0.0	0.0	-27.0	-46.2	-29.6	-13.3	-3.1	-0.3	-0.1	119.5	0.0			
Er	14.4	19.6	34.0	53.4	65.1	60.2	27.6	12.3	67.5	41.6	37.2	17.0	449.8		
ΟΛΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΗ	65.9	30.9	13.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.9	59.5	207.9		



Σχήμα 11: Πορεία του μέσου ισοζυγίου ύδατος στο Αργολικό πεδίο

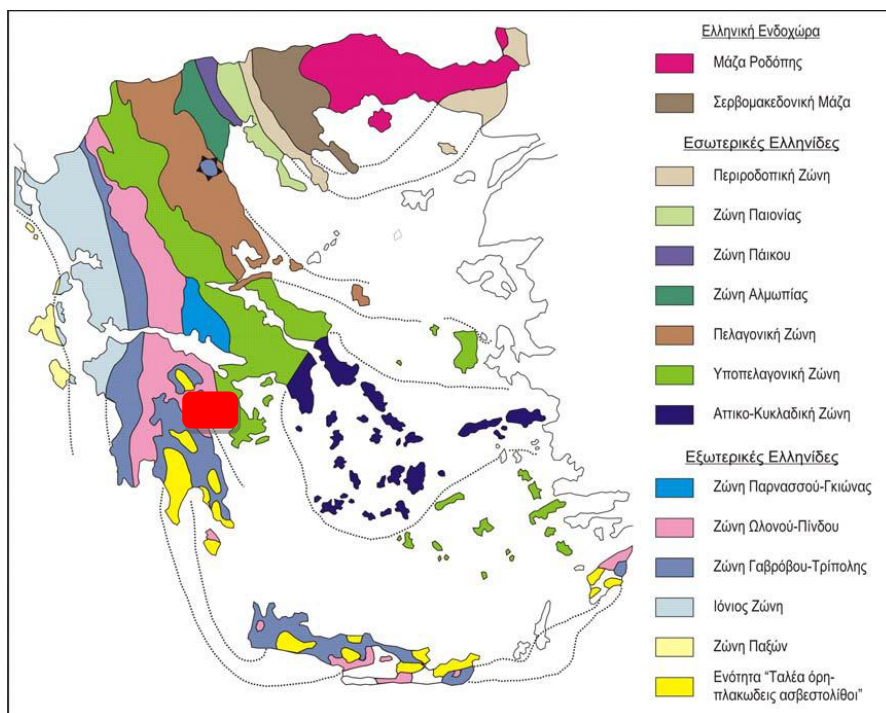
2.6 Γεωλογικές συνθήκες

2.6.1 Γενικά Στοιχεία

Η ευρύτερη περιοχή έρευνας αποτελείται από το πεδινό τμήμα του Αργολικού πεδίου και οριοθετείται από το οροπέδιο της Τρίπολης στα δυτικά και το Αραχναίο όρος ανατολικά. Γεωτεκτονικά, τοποθετείται στο όριο των Εξωτερικών και Εσωτερικών Ελληνίδων. Συγκεκριμένα, εντοπίζονται σχηματισμοί, από δυτικά προς ανατολικά, της ενότητας Γαβρόβου-Τρίπολης, Ωλονού- Πίνδου και της Υποπελαγονικής Ζώνης, που αποτελούν το Αλπικό υπόβαθρο. Το προαλπικό υπόβαθρο έχει περιορισμένη εμφάνιση. Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται δυτικά του Αργολικού πεδίου, στα χωριά Μερκούρι και Σπηλιά (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Το πεδινό τμήμα αποτελεί ένα Νεογενές τεκτονικό βύθισμα, στο οποίο έχουν αποθεθεί μεταλλικά ιζήματα Νεογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας. Γενικά, το Αργολικό πεδίο δύναται να διαχωριστεί σε δύο ενότητες (Balcer, 1974). Το ανώτερο μέρος του πεδίου εκτείνεται από

τους πρόποδες των Μυκηνών έως βόρεια του Άργους. Έχει μεγαλύτερη κλίση από το κατώτερο μέρος του πεδίου και αποτελείται, κυρίως, από αλλουβιακούς σχηματισμούς. Το κατώτερο μέρος του πεδίου από το Άργος μέχρι την Τίρυνθα και το Ναύπλιο έχει πολύ μικρή κλίση προς τη θάλασσα και οι αλλουβιακές αποθέσεις συνιστούνται από χαμηλού ειδικού βάρους χαλίκια, ιλύ και άμμο. Οι ορεινές και ημιορεινές μάζες δομούνται λιθολογικά από ασβεστόλιθους, φλύσχη και Πλείο- Πλείστοκαινικά ιζήματα στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα της πεδιάδας.

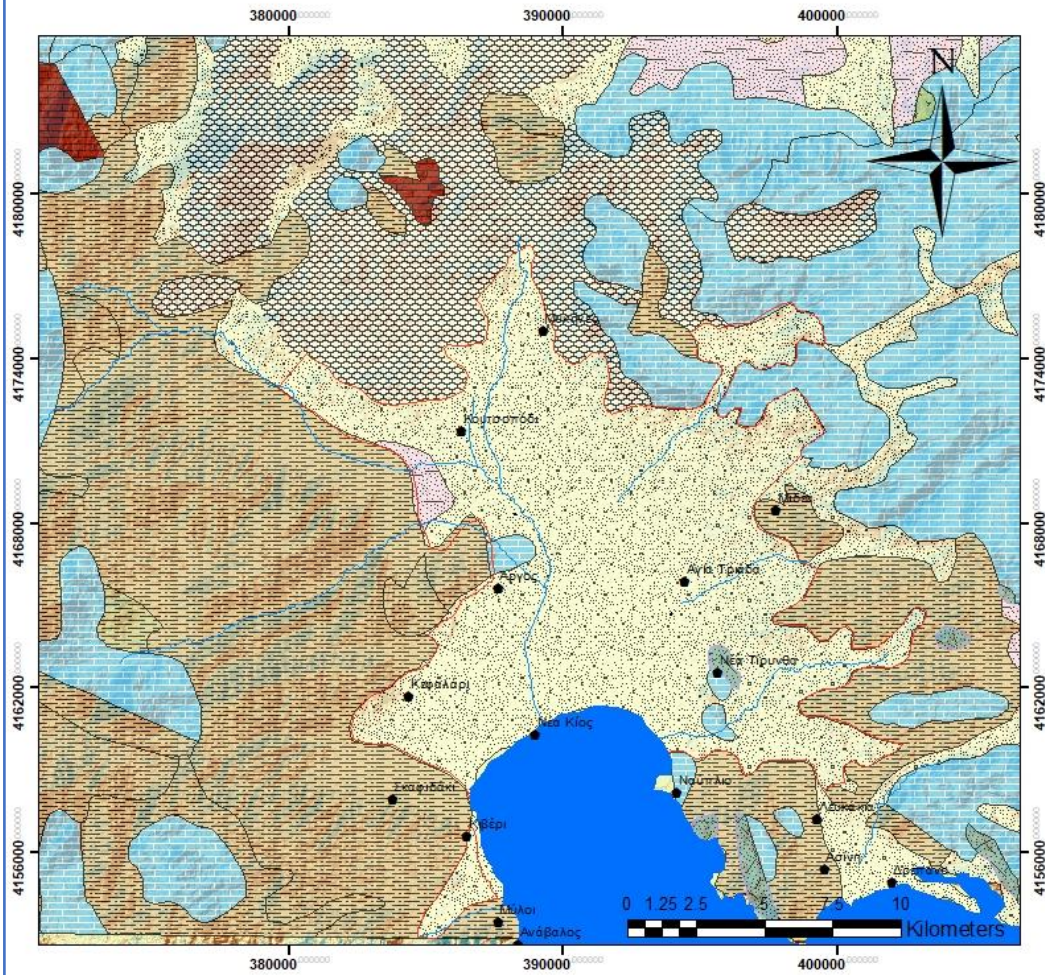


Σχήμα 12: Γεωτεκτονικές ζώνες της Ελλάδος με επίσημανση στην περιοχή έρευνας (Μουντράκης,2010)

2.6.2 Προαλπικό Υπόβαθρο

Το προαλπικό υπόβαθρο, γνωστό και ως ενότητα Άρνας, αποτελείται λιθολογικά από μεταμορφωμένα και ηφαιστιογενή πετρώματα. Η ενότητα της Άρνας παρεμβάλλεται τεκτονικά μεταξύ της ενότητας Πλακωδών Ασβεστολιθών και των «στρωμάτων Τυρού», τα οποία αποτελούν και υπόβαθρο της ενότητας Γαβρόβου- Τρίπολης. Στην περιοχή συναντώνται κυρίως σχιστόλιθοι και φυλλίτες, ενώ κατά θέσεις υπάρχουν φλέβες αιματίτη και σιδερίτη. Το σύστημα αυτό έχει υποστεί μεταμόρφωση σε πίεση 7 Kbar και θερμοκρασία 350 °C κυανοσχιστολιθικού τύπου, καθώς και μία ανάδρομη πρασινοσχιστολιθική φάση. (Σκαρπέλης, 1982).

ΧΑΡΤΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΑΡΓΟΛΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ



Υπόμνημα

● Οικισμοί

— Υδρογραφικό δίκτυο

□ Όριο Περιοχής

Γεωλογικοί Σχηματισμοί

■ Σύγχρονες προσχώσεις και παράκτιες αποθέσεις

■ Λιμναίες και ποταμιολιμναίες αποθέσεις

■ Κροκαλοπαγή Βορείας Πελοποννήσου.

■ Ασβεστόλιθοι (κυρίως μικροουδίτες) συχνά με Hirnerites

■ Πελαγικοί ασβεστόλιθοι (κυρίως βιομικρίτες).

■ Ασβεστόλιθοι και δολομίτες τοπικά της φάσεως "Hallstatt"

■ Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες)

■ Αμμοπητικό Rosso και πυρπικοί σχιστόλιθοι με "Ποσειδώνιες".

■ Ασβεστόλιθοι (κυρίως βιοσπαρουδίτες, ωομικροουδίτες).

■ Ασβεστόλιθοι και δολομίτες μη διαχωριζόμενοι

■ Φλύσχης

■ Φυλλική σειρά Πελοποννήσου - Κρήτης.

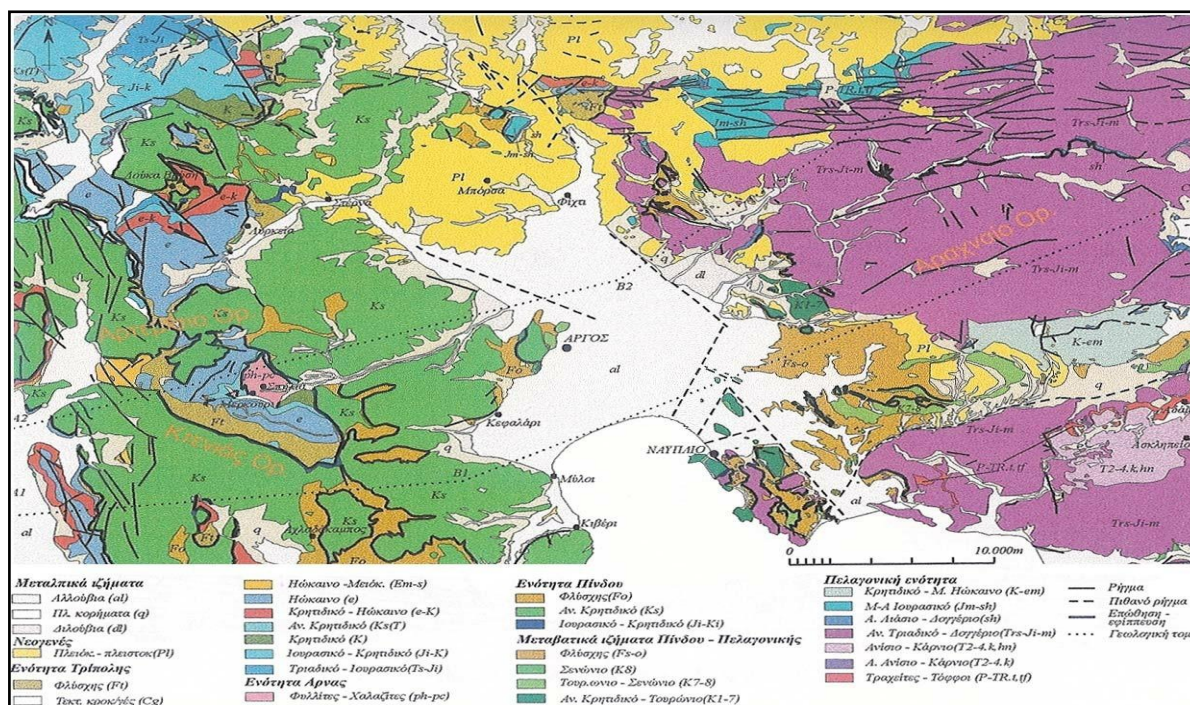
■ Σχιστοκρατολιθική διάπλαση

■ Οφιόλιθικοί σχηματισμοί

Σχήμα 13: Χάρτης Γεωλογικών σχηματισμών στην περιοχή έρευνας (Τροποποιημένο από υφιστάμενος Γεωλογικός χάρτης έκδοσης ΓΓΜΕ, κλ. 1:50.000)

2.6.3 Αλπικό Υπόβαθρο

Το αλπικό σύστημα στην περιοχή αντιπροσωπεύεται από ασβεστολιθικές μάζες και το φλύσχη. Τα πετρώματα αυτά εμφανίζονται στα δυτικά ορεινά συμπλέγματα του Αρτεμισίου και Κτενιά, των λόφων Δερβενακίων στα Βόρεια, και του ορεινού συστήματος Τραπεζώνας-Αραχναίου στα Ανατολικά. Επιπλέον, στο ίδιο σύστημα ανήκουν και οι λοφώδεις εξάρσεις ασβεστολίθου της Τίρυνθας και του Προφήτη Ηλία, αλλά και κάποιες μικρότερες που βρίσκονται διεσπαρμένες στο πεδινό τμήμα (Γιαννουλόπουλος, 2000). Τα αλπικά ιζήματα που δομούν την περιοχή ανήκουν στις γεωτεκτονικές ενότητες Γαβρόβου- Τρίπολης, Ωλονού-Πίνδου και Υποπελαγονικής Ζώνης, από δυτικά προς ανατολικά αντίστοιχα. Στις παρυφές του Αργολικού πεδίου παρεμβάλουν μεταβατικά ιζήματα της ενότητας Πίνδου προς την Υποπελαγονική (Τάταρης- Καλλέργης, 1965).



Σχήμα 14: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής (σύνθεση από υφιστάμενους Γεωλογικούς Χάρτες έκδοσης ΠΓΜΕ, κλ. 1:50.000, Γιαννουλόπουλος, 2000)

2.6.3.1 Ενότητα Γαβρόβου- Τρίπολης

Η ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης βρίσκεται δυτικά της ζώνης της Πίνδου και εκτείνεται σε διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ από την Ήπειρο έως την Πελοπόννησο. Θεωρείται αυτόχθονη ή παρά-αυτόχθονη ζώνη του Ελληνικού χώρου όπου επάνω έχει επωθηθεί η ενότητα της Πίνδου, με αποτέλεσμα η ζώνη Γαβρόβου να εμφανίζεται μέσα από πλήθος τεκτονικών παραθύρων σε πολλές περιοχές και κυρίως στην Πελοπόννησο και την Στερεά Ελλάδα. Σύμφωνα με τις σύγχρονες αντιλήψεις θεωρείται τμήμα ηπειρωτικής πλατφόρμας της Απούλιας, η οποία αποσπάστηκε από την Γκοτβάνα και δέχθηκε ανθρακική νηριτική ιζηματογένεση (Μουντράκης, 2010).

Κύριο χαρακτηριστικό της ζώνης όπως αναφέρθηκε είναι η συνεχής νηριτική ιζηματογένεση από το Άνω Τριαδικό έως το Ηώκαινο. Πρόκειται για μαύρους βιταμενιούχους ασβεστόλιθους (Phillipson, 1892). Το Ανώτερο Ηώκαινο ξεκινά η απόθεση του φλύσχη, ο

οποίος αποτελεί και το ανώτερο στρώμα της ενότητας αυτής. Στη βάση αυτής της στρωματογραφικής στήλης βρίσκονται τα στρώματα του Τυρού. Λιθογραφικά αποτελούνται από ασθενικά μεταμορφωμένους πηλίτες και ψαμίτες Άνω Παλαιοζωικής ηλικίας.

Όσον αφορά την ευρύτερη περιοχή του Αργολικού πεδίου υπάρχει περιορισμένη εμφάνιση των ανθρακικών στην περιοχή Μερκουρίου και Λυρκείας, τα οποία στη συνέχεια καταλήγουν σε φλύσχη. Αναλυτικότερα η στρωματογραφική στήλη παρουσιάζεται με (Παπασταματίου κ.α, 1970):

- Το Αν. Παλαιοζωικό- Τριαδικό περιλαμβάνει σύμπλεγμα από λάβες και ασβεστόλιθους με πηλίτες και ψαμίτες, γνωστά και ως «στρώματα Τυρού», ωστόσο δεν εμφανίζονται στην περιοχή έρευνας.
- Το Μέσο- Ανώτερο Ιουρασικό δομείται από ασβεστόλιθους, δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους νηριτικής φάσης. Έχουν συνήθως μεγάλο πάχος, είναι ανοιχτότεφροι, λευκοί έως ροδόχρωμοι με μαλάκια και ελασματοβραχία. Παρουσιάζουν περιορισμένη ανάπτυξη στην περιοχή «Δούκα βρύση».
- Το Ανώτερο Ιουρασικό- Κατ. Κρητιδικό αναπτύσσεται στην ίδιο θέση σε συνέχεια με τους προηγούμενους ασβεστόλιθους. Αφορά, βιταμενιούχους ασβεστόλιθους, δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους σκοτεινότεφρους έως μαύρου χρώματος με απολιθώματα Cladocoropsis, οι οποίοι στους βαθύτερους ορίζονται γίνονται κρυσταλλικοί.
- Στο Κατώτερο Κρητιδικό υπάρχουν κυρίως δολομίτες με Cladocoropsis. Περιορίζονται σε δακτυλιοειδή εμφάνιση γύρω από το τεκτονικό παράθυρο του μεταμορφωμένου υποβάθρου στην περιοχή Μερκουρίου- Σπηλιάς.
- Στο Ανώτερο Κρητιδικό εμφανίζεται μια μικρή λωρίδα ρουδιστοφόρων ασβεστολίθων σε συνέχεια με τους προηγούμενους στην περιοχή Κτενιά. Πρόκειται για τεφρούς έως μαύρους ασβεστόλιθους, δολομίτες και δολομιτικούς ασβεστόλιθους, άλλοτε παχυστρωματώδεις άλλοτε λεπτοστρωματώδεις.
- Το Αν. Κρητιδικό- Ηώκαινο αντιπροσωπεύεται από ασβεστολίθους με *Milionides* ενώ στο Μαιστρήγιο απαντούν μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθοι με *Orbitolites* και *Rosalines*. Συναντώνται δυτικά του Αχλαδόκαμπου και ΒΔ της Λυρκείας.
- Στο Ηώκαινο – Μειόκαινο ακολουθούν παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθοι, δολομίτες και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι ανοιχτόχρωμοι έως υπόλευκοι κατά θέσεις κυρίως στιφροί και κλαστικοί, οι οποίοι μεταβαίνουν σε μελανούς βιταμενιούχους νουμουλιτοφόρους ασβεστόλιθους (Αν. Ηώκαινο). Κατά θέσεις εντοπίζονται μεταβατικοί ορίζοντες προς το φλύσχη με χαρακτηριστικά απολιθώματα. Αναπτύσσονται δυτικά του άξονα Λυρκεία- Καπαρέλι, στην περιοχή Μερκουρίου Σπηλιάς, καθώς και στα Δερβενάκια.
- Ο φλύσξης αναπτύσσεται κατά το μεγαλύτερο τμήμα του σε συνέχεια με τους υποκείμενους ασβεστολίθους. Συνιστάται από μαργαϊκές και ψαμιτομαργαϊκές ενστρώσεις με φακούς κροκαλοπαγών και ασβεστολίθων.

2.6.3.2 Ενότητα Ωλονού- Πίνδου

Η ζώνη Ωλονού- Πίνδου πήρε το όνομα της από το Philippon(1989) από το βουνό Ωλονό και την οροσειρά της Πίνδου. Σύμφωνα με τις σημερινές απόψεις για γεωδυναμική και γεωτεκτονική άποψη που επικρατεί η ζώνη της Πίνδου μαζί με την Υποπελαγονική συνιστούν τον κατεστραμμένο ωκεανό της Νέο-Τιθύος που βρίσκονται δυτικά της Πελαγονικής. Αυτό επιβεβαιώνεται από την παρουσία οφιολίθων και της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης (Μουντράκης, 2010).

Αναφορικά με την περιοχή έρευνας, παρόλο που παρουσιάζει σημαντική εξάπλωση δεν έχει ξεκάθαρη γεωτεκτονική ταυτότητα. Δεν έχει αποσαφηνιστεί αν πρόκειται για μια αυτόνομη ενότητα, όπως στην υπόλοιπη Πελοπόννησο ή για μετάβαση στην Υποπελαγονική ζώνη.

Στην περιοχή της Αργολίδας δύο υποζώνες της ενότητας Πίνδου. Το Αρκαδικό κάλυμμα και τα ιζήματα μεταβάσεως από τη ζώνη Ωλονού- Πίνδου προς την Υποπελαγονική. Το Αρκαδικό κάλυμμα εκτείνεται από τις δυτικές παρυφές του αργολικού πεδίου μέχρι και το οροπέδιο της Τρίπολης. Η στρωματογραφία της ενότητας Πίνδου στην περιοχή της Αργολίδας έχει ως εξής (Παπασταματίου κ.α, 1970):

- Το Ιουρασικό- Κατ. Κρητιδικό αποτελείται από τεφρούς λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους και σχιστοκερατόλιθους με Filaments. Έχει περιορισμένη εμφάνιση στην περιοχή του Αχλαδόκαμψου και στη Στέρνα.
- Το Μέσο –Κατώτερο Κρητιδικό συνιστάται από ένα σύστημα αργλικών σχιστολίθων, κερατολίθων και ψαμμιτών ερυθρού χρώματος με κλαστικά ιζήματα και ασβεστόλιθους. Αποτελεί την κύρια επιφάνεια αποκόλλησης και επώθησης στην υποκείμενη σειρά της Τρίπολης και περιγράφεται ως 1^{ος} φλύσχης της Πίνδου. Η περιορισμένη εμφάνιση του οριοθετεί το αρκαδικό κάλυμμα με την ενότητα της Τρίπολης.
- Στο Ανώτερο Κρητιδικό εντοπίζεται το κάλυμμα με την μεγαλύτερη εξάπλωση στον Κτενιά και Αρτεμίσιο. Περιέχει λεπτοπλακώδεις ασβεστόλιθους λευκού, κίτρινου και ερυθρού χρώματος με ενστρώσεις και κονδύλους κερατολίθων. Περιλαμβάνει επιπλέον, παχυστρωματώδεις κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους με ακτινόζωα και τρηματοφόρα.
- Στο Μαιστρήχτιο- Παλαιόκαινο αποτέθηκε ο 2^{ος} φλύσχης που αποτελείται από σύμπλεγμα ασβεστιτικών σχιστολίθων, μαργών και μικρής έκτασης σερπεντινωμένα εκρηξιγενή πετρώματα. Εντός των ασβεστολίθων εντοπίζονται πυριτικοί κόνδυλοι και απολιθώματα. Λόγω του έντονου τεκτονισμού εμφανίζονται λεπιώσεις με σημαντική εξάπλωση.

2.6.3.3 Υποπελαγονική Ζώνη

Η ζώνη αυτή είχε χαρακτηριστεί αρχικά είχε την ονομασία Ανατολική ζώνη της Ελλάδας (Renz, 1955) και (Μαρίνο, 1957). Ο Aubuin (1959) την ονόμασε Υποπελαγονική ζώνη για να τονίσει την στενή σχέση της με την Πελαγονική ζώνη. Αποτελεί ουσιαστικά την δυτική κατωφέρεια του υβώματος της Πελαγονικής ζώνης προς την αύλακα της ζώνης Πίνδου. Κύριο χαρακτηριστικό της Υποπελαγονικής είναι οι μεγάλες οφιολιθικές μάζες και οι συνοδούσα σχιστοκερατολιθική διάπλαση. Το υπόβαθρο της ενότητας αυτής είναι κοινό με το υπόβαθρο της Πελαγονικής ζώνης και συγκροτείται από γνευσίους, μαρμαρυγιακούς σχιστολίθους, αμφιβολίτες και παρεμβολές μαρμάρων (Μουντράκης, 1985).

Στην περιοχή έρευνας εξαπλώνεται στην ανατολική και βορειοανατολική περιφέρεια του Αργολικού πεδίου και στην ανατολική Αργολίδα. Η στρωματογραφική στήλη είναι η ακόλουθη (Bennert, 1972, Τάταρης κ.α. 1964):

- Το υπόβαθρο δομείται από τραχείτες και τραχειτικούς τόφφους. Εμφανίζεται σε αντικλινικές δομές στην περιοχή του Θεάτρου και στον οικισμό Αδάμι.
- Το Κατ. Ανίσιο- Κάρνιο συνιστάται από βαθυκόκκινοι έως καστανοί κερατόλιθοι επικείμενοι στους τραχείτες.
- Στο Ανίσιο- Κάρνιο απαντούν κιτρινωποί ασβεστόλιθοι με σαφή στρώση και συχνές παρεμβολές στρωμάτων και κονδύλων κερατολίθων. Κατά θέσεις εμφανίζονται οι αμμωνιτοφόροι ασβεστόλιθοι, οι οποίοι είναι παχυστρωματώδεις γνωστοί και ως ασβεστόλιθοι του Ασκληπιείου.
- Στο Κάρνιο –Alamo απαντούν οι ασβεστόλιθοι του Παντοκράτορα. Πρόκειται για ανοιχτότεφρους ασβεστόλιθους με λεπτά στρώματα δολομίτη που υπόκεινται της σχιστοκερατολιθικής διάπλασης. Οι ασβεστόλιθοι βρίσκονται κυρίως στην Ανατολική Αργολίδα. Ο ορεινός όγκος του Αραχναίου δομείται εξολοκλήρου από έντονα ρωγματομένοι και καρστικοποιημένοι.
- Στο Αν. Amerio- Αογγέριο αναπτύσσεται το AmmoniacοRosso.
- Μέσο- Αν. Ιουρασικού. Το μέσο Ιουρασικό δομείται από χονδροπλακώδεις έως μεσοπλακώδεις με ενστρώσεις και κονδύλους πυριτολίθων και μέσα σε αυτούς αναπτύσσεται η σχιστοκερατολιθική διάπλαση. Το Αν. Ιουρασικό αντιπροσωπεύεται από ωολιθικούς ασβεστόλιθους και συναντάται στο βόρειο τμήμα του Αραχναίου όρους.
- Η σχιστοκερατολιθική διάπλαση Ιουρασικό- Κ. Κρητιδικό αποτελεί την πιο αντιπροσωπευτική σειρά της Υποελαγονικής ζώνης. Δομείται από σχιστολίθους, ψαμμίτες και κερατόλιθους. Επιπλέον περιέχει οφιολιθικά σώματα, τοφφικά κροκαλοπαγή και φακούς ασβεστολίθων.
- Το Κρητιδικό- Μ. Ηώκαινο δομείται από παχυστρωματώδεις, λεπτοκρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, κατά θέσεις υπάρχουν απολιθώματα Ιππουρίτων.

2.6.4 Μεταλλικά ιζήματα

Το Αργολικό βύθισμα, καθώς και οι λόφοι βόρεια και βορειοδυτικά, στην περιοχή Φίχτια- Μπόρσα καλύπτονται από ιζήματα Νεογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας. Η ηλικία των Νεογενών αυτών ιζημάτων είναι Πλειοκαινική- Άνω Πλειοκαινική και έχει περιορισμένη εμφάνιση στην περιοχή της Στέρνας- Φιχτίων και στις βορειοανατολικές παρυφές της πεδιάδας. Αποτελείται από λευκοκίτρινες μάργες που εναλλάσσονται με χονδρόκοκκους ψαμμίτες, ψαμμιτομάργες, ψηφίτοπαγή και κροκαλοπαγή σε εναλλαγές με ψαμμιτοκροκαλοπαγή (Γιαννουλόπουλος, 2000). Το πάχος του είναι μεγαλύτερο των 100m και είναι Καλάβριας ηλικίας (Ζαμάνη, 1970). Το κύριο χαρακτηριστικό των στρωμάτων είναι η απουσία μικροπανίδας, καθώς και το γεγονός ότι κλίνουν προς το νότο κατά 20°. πρόκειται για ποταμοχειμάρριες και λιμναίες αποθέσεις που επικάθισαν στο αλπικό υπόβαθρο της ενότητας Τρίπολης, Πίνδου και την Υποελαγονική (Παπασταματίου κ.α., 1970).

Στο Κεφαλάρι, Κιβέρι και το Ναύπλιο συναντώνεται θαλάσσιες αναβαθμίδες από κροκαλοπαγή που χρονολογούνται στο Τυρήνιο. Σύμφωνα με το Maull στο Διλούβιο

σχηματίστηκαν στις παρυφές τις πεδιάδας κώνοι κορημάτων (Θεοδωρόπουλος και Παπαπέτρου-Ζαμάνη, 1970)

Τα ιζήματα Τεταρτογενούς ηλικίας είναι μείζουσας σημασίας για την περιοχή. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω της λιθοστρωματογραφίας τους και της εξάπλωσής τους φέρουν αξιοσημείωτες ποσότητες νερού. Οι ερευνητικές γεωτρήσεις της Υπηρεσίας Εργείων Βελτιώσεων έδειξαν ότι το πάχος τους φτάνει έως και 600m. Ειδικότερα, ερευνητική γεώτρηση στο κέντρο της πεδιάδας στην περιοχή Ανυφί το πάχος των ιζημάτων βρέθηκε σε 617 m. Λόγω της παρουσίας πλειοκαινικών κροκαλοπαγών στην ευρύτερη περιοχή είναι δύσκολος ο διαχωρισμός τους από τα Τεταρτογενή (Πουλοβασίλης κ.α, 1996).

Η λιθολογική σύσταση και δομή των Τεταρτογενών περιγράφηκε εκτεταμένα από τα αποτελέσματα των ερευνητικών γεωτρήσεων της ΥΕΒ, που έγιναν την περίοδο Οκτωβρίου 1962- Μαΐου 1964. Η έρευνα είχε σκοπό τη στρωματογραφική απεικόνιση των αλλουβιακών αποθέσεων, τον εντοπισμό, την ανάπτυξη και την δομή των υδροφόρων οριζόντων (Μητρόπαπας Αναστάσιος, 2015).

Έπειτα από σχετική έρευνα του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών δημιουργήθηκε μια ολοκληρωμένη εικόνα μέσα από νεώτερες γεωτρήσεις. Η ομαδοποίηση που προέκυψε από τα ιζήματα που διατρήθηκαν έχει ως εξής (Πουλοβασίλης α., Μιμίδης Θ., Γιαννουλόπουλος, 1996):

- 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)

Το αλπικό υπόβαθρο της λεκάνης απαντάται κατά τόπους και αποτελείται κυρίως από φλύσχη και ασβεστολίθους.

2.6.5 Τεκτονική

Χαρακτηριστικό της αλπικής τεκτονικής της περιοχής είναι η διαδοχική επώθηση των γεωτεκτονικών ενοτήτων από τα ανατολικά προς τα δυτικά. Σύμφωνα με τις γραμμές ολίσθησης διαπιστώθηκε ότι οι τεκτονικές κινήσεις πραγματοποιήθηκαν σε διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ (Τάταρης& Καλλέργης, 1965, Γιαννουλόπουλος, 2000).

Η περιοχή της αργολικής πεδιάδας, όπως έχει αναφερθεί, τοποθετείται γεωτεκτονικά στο όριο των «εσωτερικών» και «εξωτερικών» Ελληνίδων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο ρηγματογόνος τεκτονισμός να χωρίζεται σε δύο ομάδες. Στο δυτικό τμήμα κυριαρχούν ρήγματα μικρής έκτασης με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Ανατολικά που βρίσκεται το Αραχναίο όρος εντοπίζονται πιο εκτεταμένα ρήγματα με διεύθυνση ΑΒΑ-ΔΝΔ, τα οποία είναι κυρίως ρήγματα οριζόντιας μετατόπισης.

Όσον αφορά, την πτυχογόνο τεκτονική διακρίνονται δύο κύριες παραμορφωτικές φάσεις, η νεοκιμμερική, η οποία αποτυπώθηκε σε ασβεστόλιθους Τριαδικής και Ιουρασικής ηλικίας. Η διεύθυνση των πτυχών αυτών είναι ΒΑ-ΝΔ. η δεύτερη φάση πτυχώσεων είναι η

πυρηναϊκή που αποτυπώνεται κυρίως στους κρητιδικούς ασβεστολίθους με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ (Θεοδωρόπουλος & Παπαπέτρου- Ζαμάνη 1970, Γιαννουλόπουλος, 2000).

Η μεταλλική τεκτονική χαρακτηρίζεται από κατακόρυφες κινήσεις, διαρρήξεις, καταβυθίσεις και εξάρσεις, οι οποίες δημιούργησαν ρηξιγενή βυθίσματα, που συνέβαλαν στην δημιουργία του τεκτονικού βυθίσματος του αργολικού πεδίου. Κατά το Τεταρτογενές έλαβαν χώρα κατακόρυφες κινήσεις, οι οποίες μετατόπισαν το επίπεδο βάσης του καρστ. Αυτό προκάλεσε τη δημιουργία πηγών του υποθαλάσσιου μετώπου του Ανάβαλου (Δάλλας κ.α., 1973).

3 ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ-ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

3.1 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά

3.1.1 Υδρογεωλογικές συνθήκες

Η παρουσία διαφορετικών τύπων υδροφόρων συστημάτων στην Αργολίδα οδηγούν στον διαχωρισμό τεσσάρων κύριων υδρογεωλογικών ενοτήτων. Συγκεκριμένα, διακρίνονται οι εξής ενότητες:

- Το καρστικό σύστημα της δυτικής Αργολίδας, το οποίο είναι το μοναδικό που διαθέτει μεγάλα αποθέματα νερού, σε καλή ποιότητα.
- Ο κοκκώδεις υδροφορέας, που αναπτύσσεται στο τεκτονικό βύθισμα του αργολικού πεδίου και την περιοχή της Ασίνης.
- Το καρστικό σύστημα του Αραχναίου όρους και
- Το ρωγμώδες- καρστικό σύστημα των περιοχών Τραχείας- Ερμιονίδας.

Εκτός από το καρστικό σύστημα δυτικής Αργολίδας, που, όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, έχει πολύ καλή ποιότητα νερού, στα υπόλοιπα εντοπίζεται πρόβλημα ποσοτικής επάρκειας αλλά και ποιοτικής υποβάθμισης. Τα προβλήματα στην ποιότητα εντοπίζονται κυρίως στις μεγάλες συγκεντρώσεις από χλωριόντα και νιτρικά ιόντα.

Μελετώντας την υδρογεωλογία στην περιοχή της Αργολικής πεδιάδας διακρίνονται δύο παράμετροι, όπου συμβάλλουν καθοριστικά στις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν. Οι αλλουβιακοί υδροφόροι που αναπτύσσονται, αλλά και η παρουσία πηγών αποτελούν δύο παράγοντες που σημειώνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

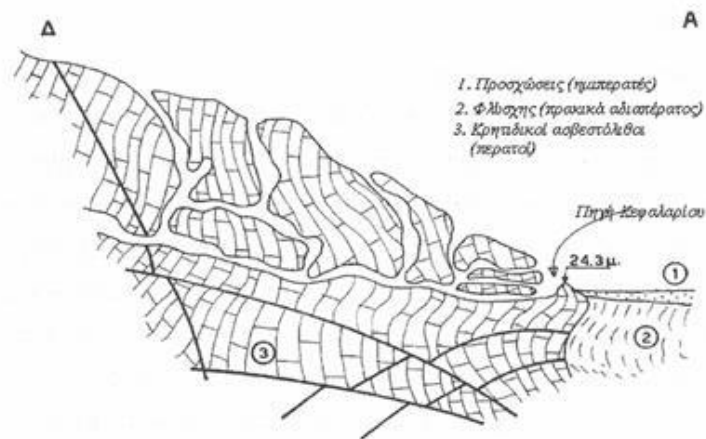
Αλλουβιακοί υδροφόροι

Η ανάπτυξη των υδροφόρων εντοπίζεται σε λεκάνες Νεογενούς Τεταρτογενούς ηλικίας. Συνιστώνται από εναλλαγές είτε οριζόντιες, είτε κατακόρυφες λεπτομερών υλικών, κυρίως άμμους, αργίλους, ψηφίδες και κροκαλοπαγή. Η ποικιλία που εμφανίζουν τα υλικά αυτά στο μέγεθος των κόκκων τους προκαλεί έντονη διακύμανση της περατότητας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η παροχή των γεωτρήσεων να κυμαίνεται σε κάποιες περιπτώσεις από 2-3 m³/h

έως $>150\text{m}^3/\text{h}$. Η πλειονότητα των καλλιεργούμενων εκτάσεων αναπτύσσονται επάνω σε αυτούς τους υδροφορείς, με αποτέλεσμα να είναι οι περισσότερο εκμεταλλεζόμενοι. Οι ετήσιες εισροές των αλλουβιακών υδροφόρων είναι της τάξης των $850 \cdot 10^6 \text{m}^3$. Ο εμπλουτισμός γίνεται μέσω της βροχόπτωσης, διήθησης χειμάρρων, επιστρεφόμενες αρδευτικές ροές, απώλειες του δικτύου ύδρευσης, τεχνητό εμπλουτισμό και πλευρικές υπόγειες εισροές (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Πηγαία ύδατα

Στην περιοχή του αργολικού πεδίου εντοπίζεται μεγάλο πλήθος πηγών. Αυτές είναι παραθαλάσσιες, υποθαλάσσιες, αλλά και κάποιες ορεινές πηγές μικρότερης σημασίας. Βασική συνιστώσα στο υδατικό δυναμικό, από άποψη, παροχής αποτελούν οι πηγές που αναπτύσσονται στις δυτικές παρυφές του αργολικού πεδίου. Αυτές είναι οι πηγές Κεφαλαρίου, Λέρνης, Κρόης και οι πηγές του Κιβερίου. Η πηγή Κεφαλαρίου είναι μια καρστική πηγή υπερχειλίσσης που αναβλύζει μέσα από τους Κρητιδικούς ασβεστολίθους της ενότητας Ωλονού Πίνδου στην επαφή τους με τον φλύσχη της Πίνδου. 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 $25-140 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{έτος}$ (Πουλοβασίλης κ.α., 1996), ενώ στις ξηρές περιόδους η παροχή μηδενίζεται. Η πηγή της Λέρνης έχει συνεχή ροή κατά την διάρκεια του έτους, ανάλογη παροχή με αυτή του Κεφαλαρίου αλλά παρουσιάζει μικρότερη διακύμανση μεταξύ $19-63,5 \cdot 10^6 \text{m}^3$ (Πουλοβασίλης κ.α., 1996). Η πηγή της Κρόης σημειώνει ετήσιες παροχές μεταξύ $3,8-11,3 \cdot 10^6 \text{m}^3$ (Πουλοβασίλης κ.α., 1996). Η ποιότητα των παραπάνω πηγών είναι αρκετά καλή και το νερό τους βρίσκεται εντός των ορίων ποσιμοποίησης. Οι πηγές του Κιβερίου συνιστούν μια ομάδα υποθαλάσσιων και παράκτιων καρστικών πηγών. Μετά την κατασκευή του φράγματος του Ανάβαλου υπολογίστηκε μια παροχή της τάξεως των $409 \cdot 10^6 \text{m}^3$. Η ποιότητα των πηγών Κιβερίου εκτός της συγκεντρώσεως των χλωριώντων που συνήθως είναι $>250 \text{mg/L}$, παρουσιάζει αυξημένες συγκεντρώσεις μαγγανίου, σιδήρου και μολύβδου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άρδευση σε εναλλαγή με νερό καλύτερης ποιότητας, ώστε να αποφευχθεί η απόθεση αλάτων στο καλλιεργούμενο έδαφος (Γιαννουλόπουλος Π., 2000, Μαραβέγιας Δ., 2008)



Σχήμα 15: Γεωλογικό σκαρίφημα πηγής Κεφαλαρίου (Γιαννόπουλος, 2000)

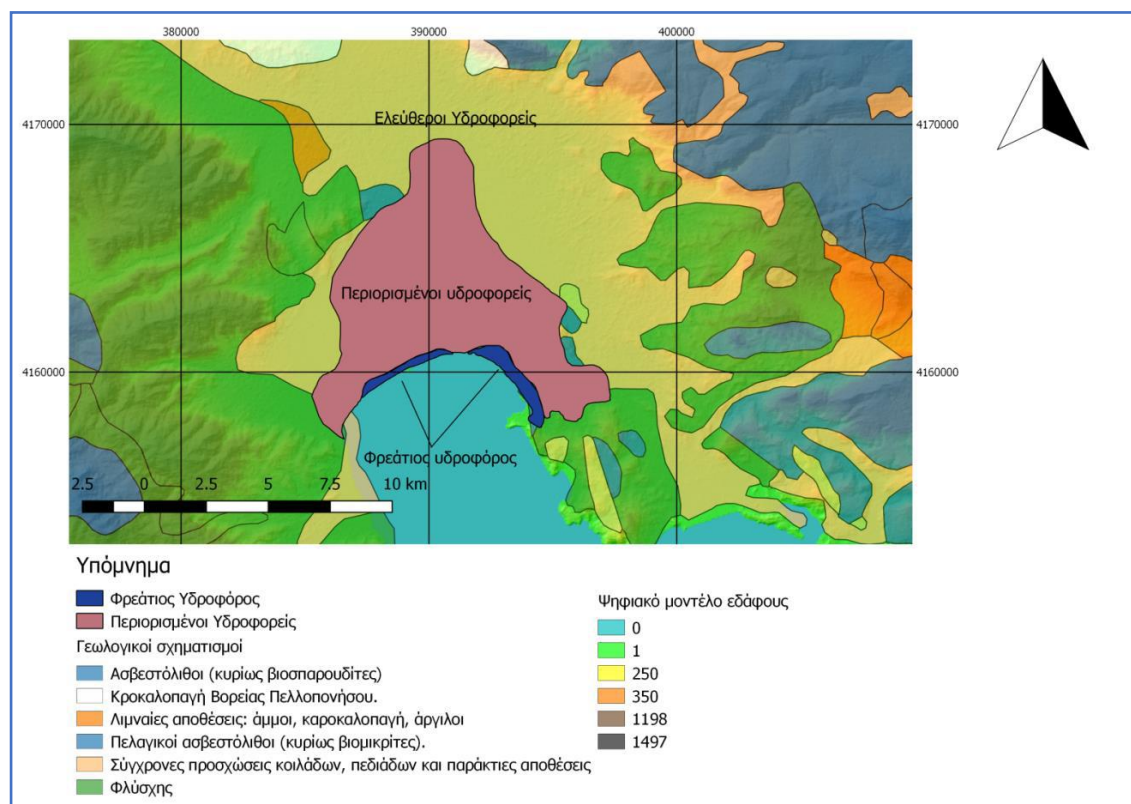
3.1.2 Υδροφόροι σχηματισμοί

Οι υδροφόροι σχηματισμοί που συναντώνται στην περιοχή ταυτίζονται με τους αλλουβιακούς σχηματισμούς. Αυτοί διακρίνονται σε κώνους αλλουβιακών αποθέσεων, δελταϊκές αποθέσεις και αλλούβιες πεδιάδες ανάλογα με το περιβάλλον απόθεσης.

Η περιοχή έρευνας δομείται από μια αλληλουχία υδροφόρων στρωμάτων, στα οποία παρεμβάλλονται αργιλικές ενστρώσεις. Γενικότερα, διαχωρίζονται σε 3 υδροφόρα συστήματα (Γιαννουλόπουλος, 2000):

- I. Το φρεάτιο υδροφόρο σύστημα. Αποτελεί μια στενή λωρίδα κατά μήκος της παραλιακής ζώνης, που αναπτύσσεται πάνω από το αργιλικό κάλυμμα. Δεν φέρει εκμεταλλεύσιμες ποσότητες νερού και έχει μικρό πάχος. Συνήθως περιγράφεται και ως «Ζώνη εδαφικού νερού».
- II. Τα υπο-πίεση υδροφόρα στρώματα. Πρόκειται για τα στρώματα τα οποία εντοπίζονται κάτω από το αργιλικό κάλυμμα και οριοθετείται από αυτό. Προς τις παρυφές τις πεδιάδας όπου σταδιακά μειώνεται ο αργιλικός ορίζοντας ο υδροφόρος μεταπίπτει σε ελεύθερο.
- III. Οι ελεύθεροι υδροφορείς. Αναπτύσσονται εκτός των ορίων το αργιλικού καλύμματος. Η βάση των υδροφόρων είναι ο φλύσσης ή άλλα αργιλικά στρώματα και η οροφή τους μεταβάλλεται με βάση την ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού.

Στο Σχήμα 16 παρουσιάζονται τα όρια των υδροφορέων που αναπτύσσονται στην Αργολική πεδιάδα και η σχέση τους με τους σχηματισμούς που δομούν την ευρύτερη περιοχή.



Σχήμα 16: Κατανομή υδροφόρων Αργολικού πεδίου (Χρυσανθόπουλος Ε., 2018)

3.1.3 Πιεζομετρία

Η μελέτη της πιεζομετρίας αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι μια υδρογεωλογικής ή υδρολογικής έρευνας. Οι πιεζομετρικές συνθήκες σε μια περιοχή παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το ρυθμό αποστράγγισης και επαναπλήρωσης των υδατικών αποθεμάτων μιας περιοχής, την διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού που υποδεικνύει την τροφοδοσία των υδροφόρων. Τέλος, η τακτική και περιοδική μελέτη της πιεζομετρίας υποδηλώνει το βαθμό εκμετάλλευσης των υδροφόρων. Όταν αυτό γίνεται πέραν των ορίων ασφαλούς απόδοσης οδηγεί σε μια κατάσταση συνεχούς υποβάθμισης τόσο ποσοτικής αλλά και ποιοτικής.

Η περιοχή του Αργολικού πεδίου αποτελεί μια συστηματικώς παρακολουθούμενη περιοχή με μεγάλη χρονοσειρά μετρήσεων και τήρηση των μετρήσεων στην αρχή και το τέλος της ξηρής περιόδου. Αναλυτικότερα οι πρώτες μετρήσεις ξεκίνησαν το 1963 και συνεχίστηκαν σε μηνιαία βάση έως το 1975. Οι μετρήσεις έπαυσαν για δέκα χρόνια και από το 1985 έως σήμερα συνεχίζονται σε εξαμηνιαία βάση, με διάφορους φορείς να αναλαμβάνουν κατά καιρούς το έργο.

3.1.4 Πιεζομετρικοί Χάρτες

Οι πιεζομετρικοί χάρτες απεικονίζουν τον γεωμετρικό τόπο των σημείων την επιφάνεια που απέχουν συγκεκριμένη απόσταση από το επίπεδο αναφοράς. Οι επιφάνειες αυτές απεικονίζονται με τις ισοπιεζομετρικές καμπύλες. Κάθε μία ισοπιεζομετρική καμπύλη ενώνει τα σημεία που έχουν ίσο υδραυλικό φορτίο. Η μορφολογία μιας πιεζομετρικής επιφάνειας εξαρτάται από τις γεωμορφολογικές συνθήκες μιας περιοχής, τα χαρακτηριστικά του υδροφόρου και τις συνθήκες τροφοδοσίας και αποστράγγισης.

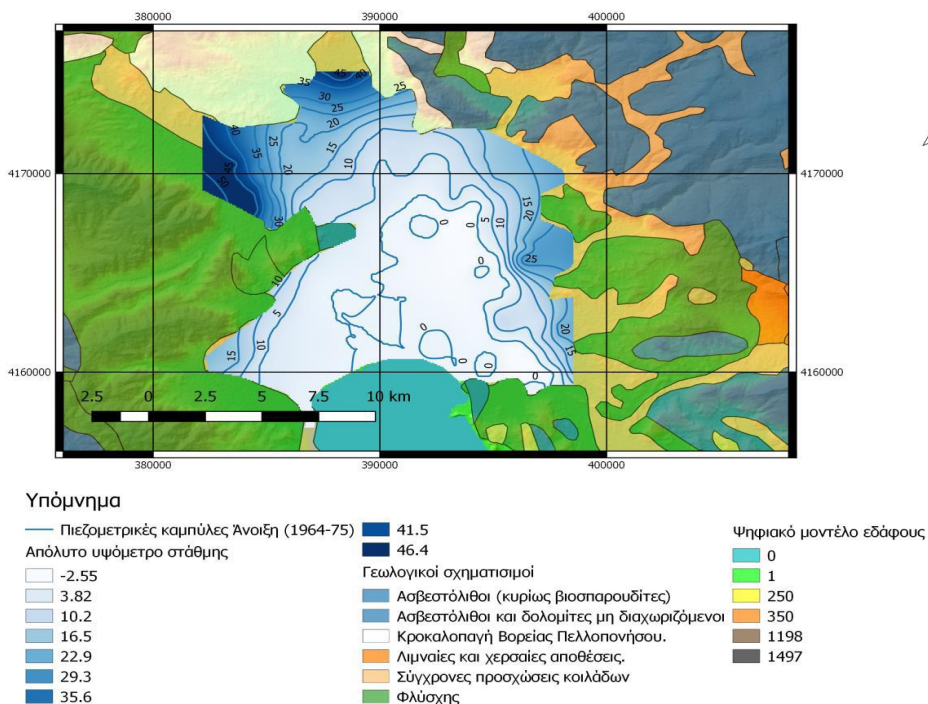
Γενικά, από ένα πιεζομετρικό χάρτη μπορούμε να:

- προσδιορίσουμε το βάθος που βρίσκεται η στάθμη των υπόγειων νερών,
- σχεδιάσουμε τις γραμμές υπόγειας ροής και τη διεύθυνση της ροής,
- σχεδιάσουμε τους άξονες υπόγειας αποστράγγισης και τον υπόγειο υδροκρίτη,
- υπολογίσουμε την υδραυλική κλίση,
- κατασκευάσουμε το προφίλ ταπείνωσης της πιεζομετρικής επιφάνειας,
- κατασκευάσουμε το χάρτη των ισοπαχών καμπύλων του υδροφορέα,
- υπολογίσουμε την αποθηκευτική ικανότητα του υδροφορέα (συνδυασμός δύο πιεζομετρικών χαρτών για δύο διαφορετικές περιόδους), πάρουμε πληροφορίες για την ύπαρξη ή όχι πλευρικής τροφοδοσίας, για τις περιοχές εκτόνωσης του υδροφορέα, για την τροφοδοσία από ποτάμια, λίμνες κλπ. και
- να αντλήσουμε πληροφορίες για την υδροπερατότητα, την παροχή και τον τύπο του υδροφορέα.

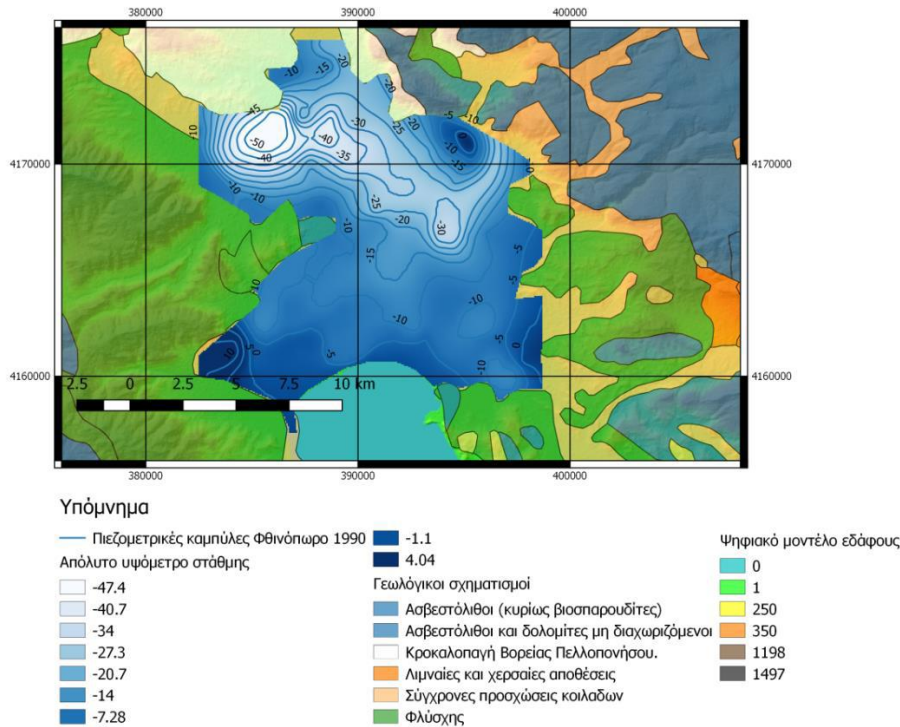
3.1.4.1 Πιεζομετρία στην περιοχή μελέτης

Για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την πιεζομετρία ενός υδροφορέα απαιτούνται στοιχεία που αφορούν στάθμες γεωτρήσεων και πηγαδιών της περιοχής σε διάφορες χρονικές περιόδους. Για την μελέτη του υδροφορέα χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις στατικής στάθμης γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια διατριβών από το 2014 έως 2018.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται οι πιεζομετρικοί χάρτες με ενδεικτικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά την τελευταία δεκαετία και παράλληλα δίνεται η δυνατότητα σύγκρισής τους με την επικρατούσα κατάσταση τόσο την πρώτη δεκαετία μετρήσεων στην αργολική πεδιάδα, αλλά και το 1990, κατά την μεγάλη ξηρασία.



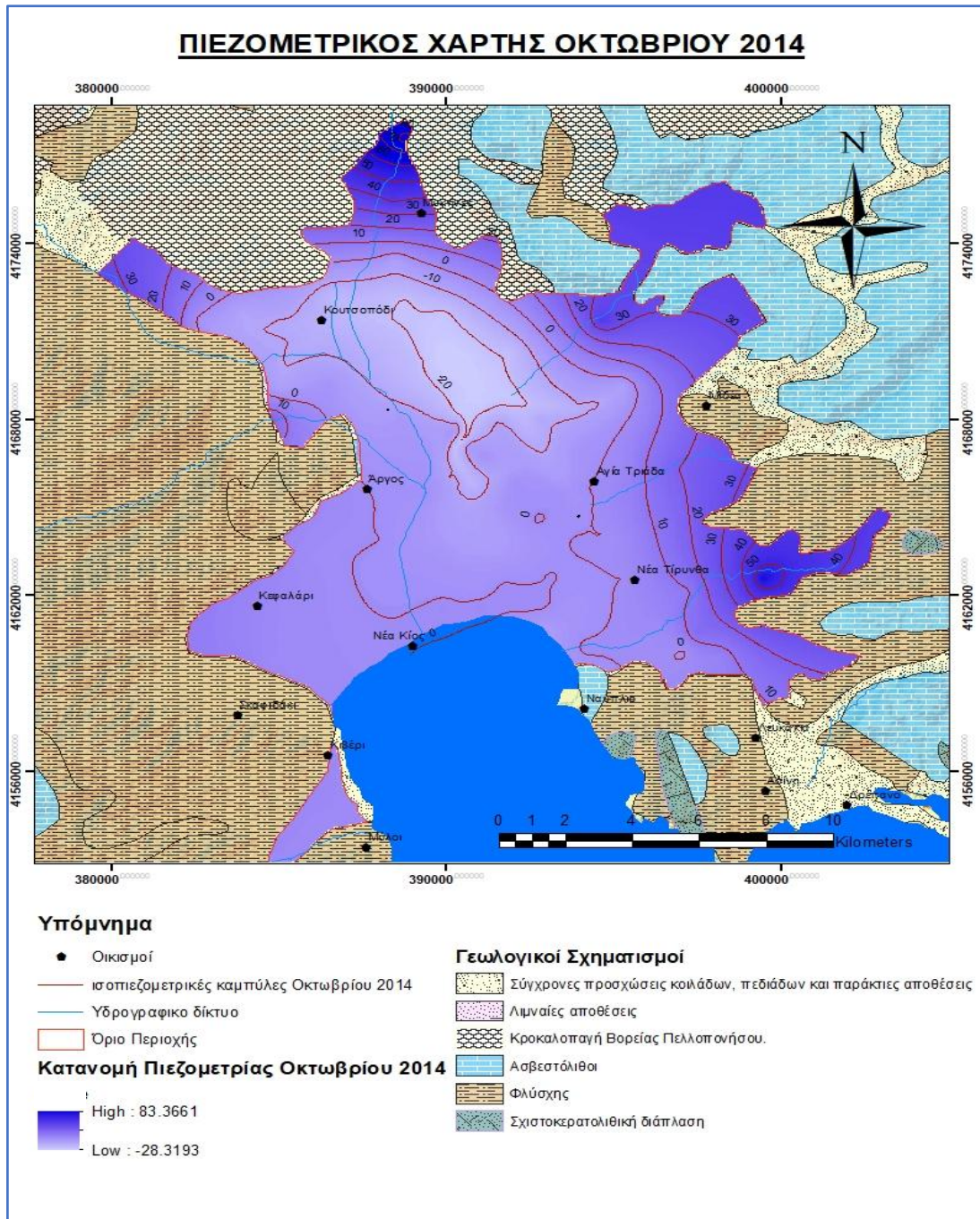
Σχήμα 17: Πιεζομετρικός χάρτης νγρής περιόδου 1964- 1975 με μετρήσεις από Γιαννουλόπουλος (Χρυσανθόπουλος,2018)



Σχήμα 18: Πιεζομετρικός χάρτης υγρής περιόδου 1990 από μετρήσεις Γιαννουλόπουλου, 2000 (Χρυσανθόπουλος Ε.,2018)

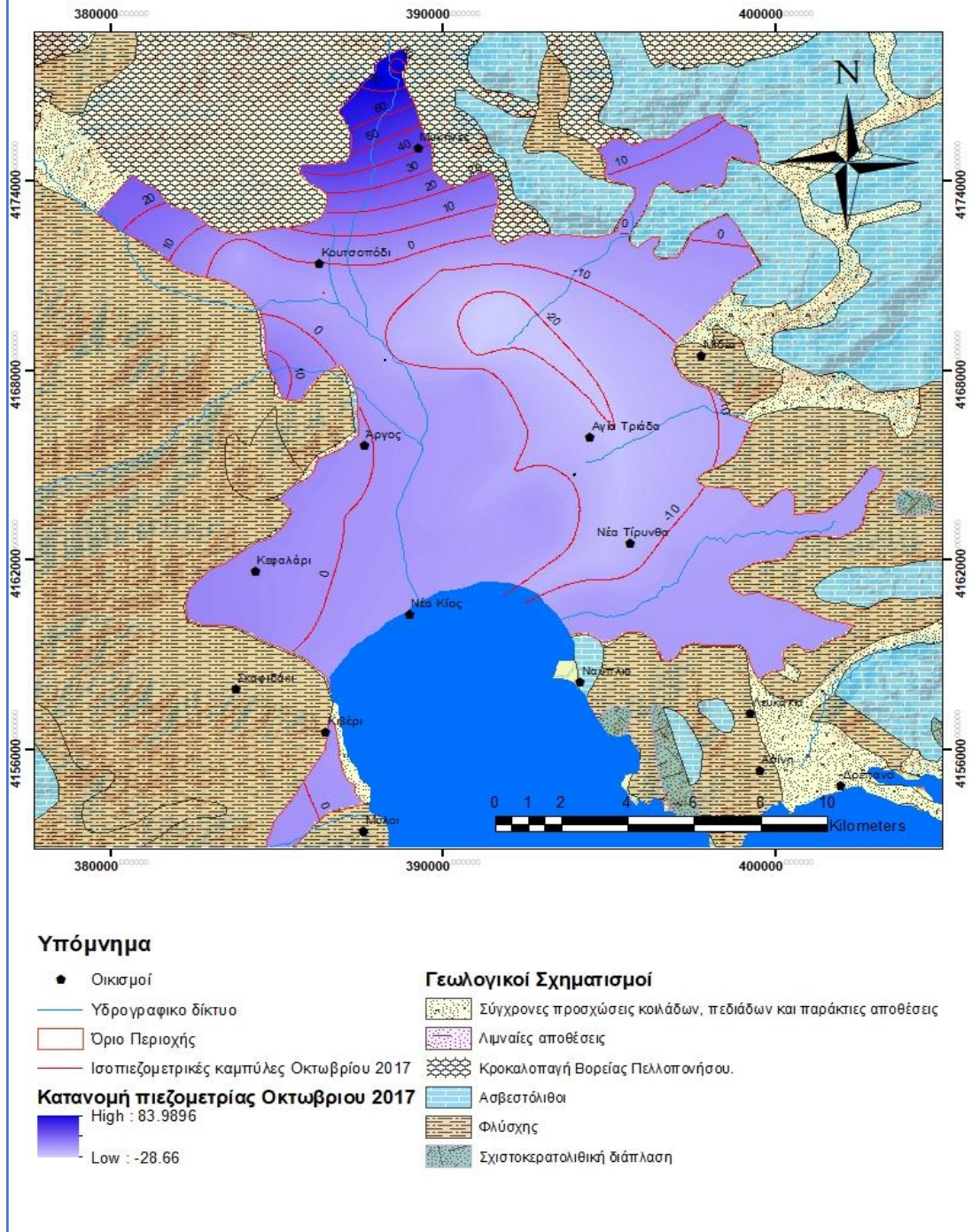
Κατά την περίοδο 1965- 1974 παρατηρείται στο Σχήμα 17, ως μέσο ελάχιστο ύψος στάθμης του υπόγειου νερού περίπου -2m από το απόλυτο υψόμετρο. Η τροφοδοσία πραγματοποιείται από τις παρυφές του αργολικού πεδίου και πιο συγκεκριμένα από τα κροκαλοπαγή στο βόρειο τμήμα και τον φλύσχη της Πίνδου στο δυτικό τμήμα του. Στο Σχήμα 15 παρατηρείται έντονη ταπείνωση του απόλυτου ύψους στάθμης, όπου παρουσιάζει ελάχιστη τιμή έως και -50m, ενώ η μέγιστη τιμή ήταν μόλις +4m από το απόλυτο υψόμετρο. Η κατάσταση αυτή είναι απόρροια της γενικότερης ξηρασίας, λόγω της έλλειψης βροχοπτώσεων που επικρατούσε σε ολόκληρη την χώρα.

Τα τελευταία χρόνια η κατάσταση έχει εξομαλυνθεί σε σχέση με την έλλειψη που υπήρχε στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Στο κεντρικό τμήμα του αργολικού πεδίου και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή που μεταπίπτει ο υπο-πίεση υδροφόρος σε ελεύθερο παρουσιάζεται έντονη ταπείνωση στην πιεζομετρία. Το ελάχιστο ύψος στάθμης κατά το τέλος της ξηρής περιόδου φτάνει και έως τα -20m (Σχήμα 19&20) και στο τέλος της υγρής περιόδου (Σχήμα 21) -15m. 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. Η αρνητική πιεζομετρία αποτελεί ευνοϊκό παράγοντα για την θαλάσσια διείσδυση καθώς συνοδεύεται με την αναστροφή της υδραυλικής κλίσης προς την ενδοχώρα. Η υφιστάμενη κατάσταση προέκυψε από την υπεράντληση των γεωτρήσεων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών στην πεδιάδα.

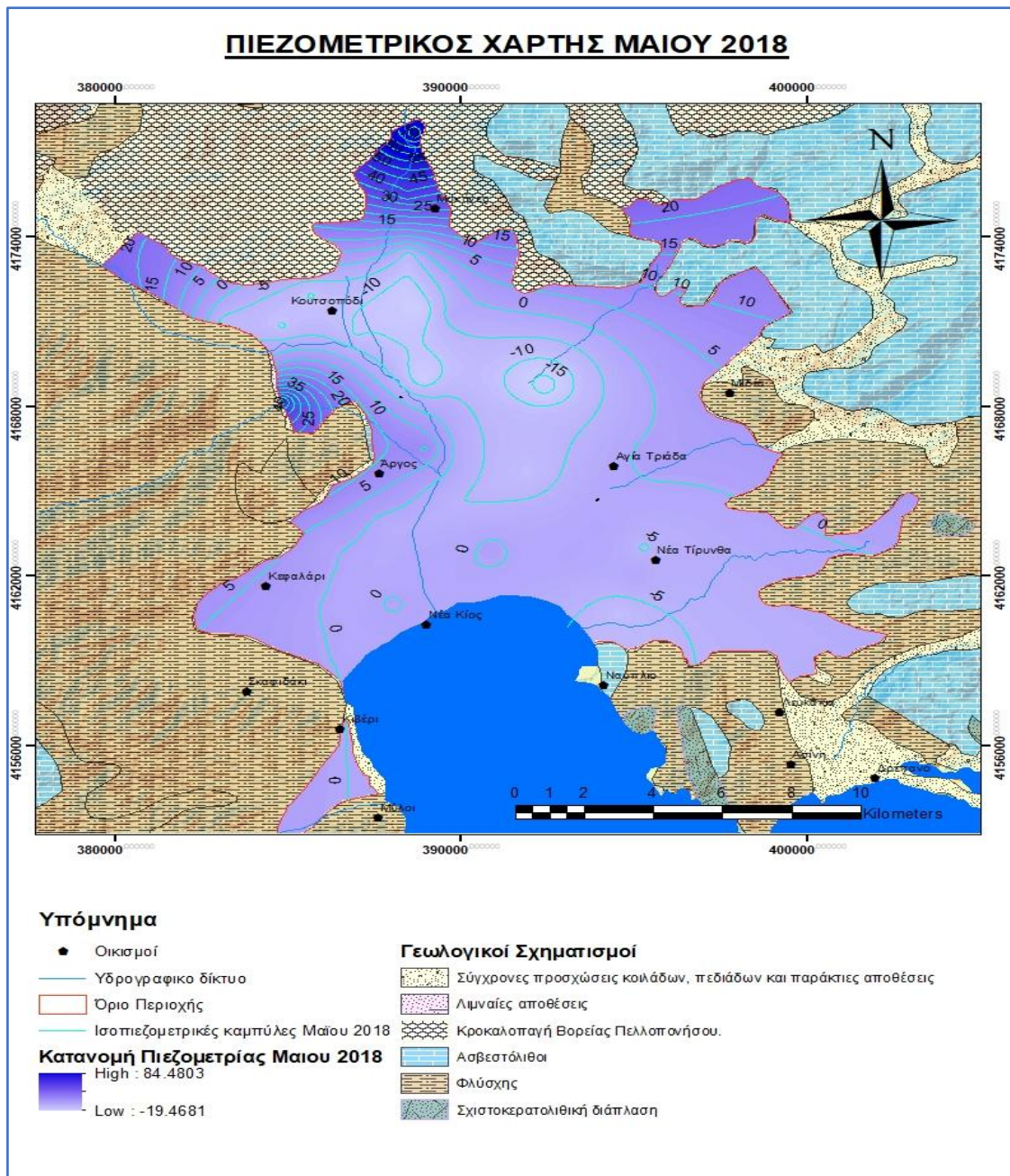


Σχήμα 19: Πιεζομετρικός χάρτης Οκτωβρίου 2014 (δεδομένα από Μητρόπουλος, 2014)

ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΤΗΣ ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2017



Σχήμα 20: Πιεζομετρικός χάρτης Οκτωβρίου 2017 (Λεδομένα από Χρυσανθόπουλος Ε., 2018)



Σχήμα 21: Πιεζομετρικός χάρτης Μαΐου 2018 (δεδομένα από Χρυσανθόπουλος Ε., 2018)

3.2 Υδροχημικά χαρακτηριστικά

3.2.1 Εισαγωγή

Η αναβάθμιση του σύγχρονου τρόπου ζωής και ο συνεχώς αυξανόμενος πληθυσμός έχουν ως συνέπεια την αύξηση των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών. Η κάλυψή τους γίνεται από επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους. Η συστηματική χρήση των επιφανειακών υδάτινων πόρων που πραγματοποιήθηκε τους προηγούμενους αιώνες είχε ως αποτέλεσμα την ποσοτική και ποιοτική τους υποβάθμιση. Αυτό οδήγησε στην εκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων, τα οποία πλέον καλύπτουν το συντριπτικό ποσοστό των αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών. Η μη ορθολογική χρήση μπορεί πολύ εύκολα να προκαλέσει ποιοτικά προβλήματα. Η ποιοτική αυτή υποβάθμιση εντοπίζεται κυρίως στο φαινόμενο της υφαλμύρισης στις παράκτιες περιοχές.

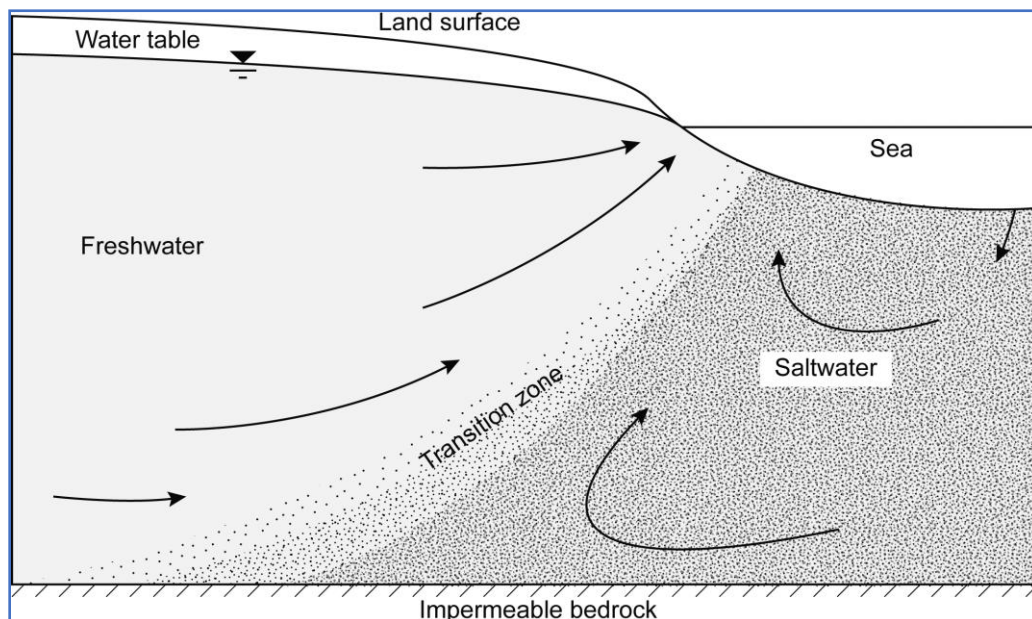
3.2.2 Θαλάσσια Διείσδυση

Το μεγάλο μήκος ακτών και νησιών της χώρας μας καθιστά ιδιαίτερα σημαντικό το ρόλο των παράκτιων υδροφορέων, καθώς εξυπηρετείται μεγάλο μέρος του πληθυσμού από αυτούς. Υπολογίζεται μάλιστα ότι το 65% του πληθυσμού ζει σε παράκτιες περιοχές και κατά συνέπεια καλύπτει μέρος των υδατικών του αναγκών από την εκμετάλλευση των παράκτιων υδροφόρων.

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης περιγράφεται ως η διαδικασία κατά την οποία η συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών (αλάτων) στο νερό, αυξάνει είτε λόγω φυσικών αιτιών, είτε λόγω ανθρωπίνων δραστηριοτήτων (Καλλιώρας, 2008) Η θαλάσσια διείσδυση είναι μια ειδική περίπτωση υφαλμύρισης, λόγω εισόδου θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς. Τα φαινόμενα αυτά παρατηρούνται όταν οι απολήψιμες ποσότητες υπόγειου νερού υπερβαίνουν τον φυσικό εμπλουτισμό ενός παράκτιου υδροφορέα. Η θαλάσσια διείσδυση περιλαμβάνει δύο αλληλένδετους παράγοντες (Werner&Simmons, 2009):

- Την κίνηση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα υποβαθμίζοντας την ποιότητα του νερού στα υδρομαστευτικά έργα και
- Την απώλεια του αποθηκευμένου όγκου γλυκού νερού.

Ο Fetter (1973) διαχωρίζει τη θαλάσσια διείσδυση σε παθητική και ενεργητική. Η παθητική θαλάσσια διείσδυση γίνεται με την εισχώρηση της θάλασσας στον παράκτιο υδροφόρο, χωρίς να πραγματοποιηθεί αναστροφή της υδραυλικής κλίσης. Στην περίπτωση αυτή γίνεται αργή μετατόπιση της διεπιφάνειας προς την ενδοχώρα, έως ότου αποκατασταθεί νέα ισορροπία μεταξύ των δύο ρευστών. Κατά την ενεργητική θαλάσσια διείσδυση λαμβάνει χώρα αναστροφή της υδραυλικής κλίσης και δημιουργία ανεστραμμένου κώνου πτώσης στάθμης λόγω υπεράντλησης του γλυκού νερού. Σε αυτή την περίπτωση η διεπιφάνεια μετακινείται γρηγορότερα προς την ενδοχώρα και αντικαθιστά το γλυκό νερό.



Σχήμα 22: Σχηματική αναπαράσταση διείσδυσης θαλασσινού νερού στη ζώνη γλυκού νερού σε παράκτιο υδροφόρα (Cooper, 1964)

Η ανάμειξη γλυκού και αλμυρού νερού προκαλεί σημαντικές μεταβολές στην ποιότητα των υπογείων υδάτων. Λόγω της αλατότητας το θαλασσινό νερό διαθέτει υψηλότερη ικανότητα αναπλήρωσης σε σχέση με το γλυκό υπόγειο νερό με αποτέλεσμα ακόμα και μία μικρή ποσότητα από αυτό μπορεί να υπερισχύσει στην χημική σύνθεση. Αναλυτικότερα, περίπου 1% αλμυρού νερού μέσα σε γλυκό νερό με περιεκτικότητα 100mg/L χλωρίου είναι ικανό να τριπλασιάσει την συγκέντρωση του χλωρίου. Η αλμυρότητα του θαλασσινού νερού παρουσιάζει διακυμάνσεις, οι οποίες εξαρτώνται από την ηπειρωτική επίδραση, τα ωκεάνια ρεύματα και την εξάτμιση (Custodio, 1987).

Το νερό περιέχει περίπου 35.000 mg/L διαλυμένων στερεών (TDS, Total Dissolved Solids), ενώ 1.000- 10.000 mg/L χαρακτηρίζεται ως υφάλμυρο. Τα κυρίαρχα ιόντα τα οποία συνδέονται και υποδηλώνουν θαλάσσια διείσδυση είναι το χλώριο και το νάτριο. Τα χλωριόντα σε συγκέντρωση μεγαλύτερη των 200 mg/L καθιστούν το νερό υφάλμυρο, ενώ πάνω από 1.000 mg/L πρόκειται για αλμυρό νερό.

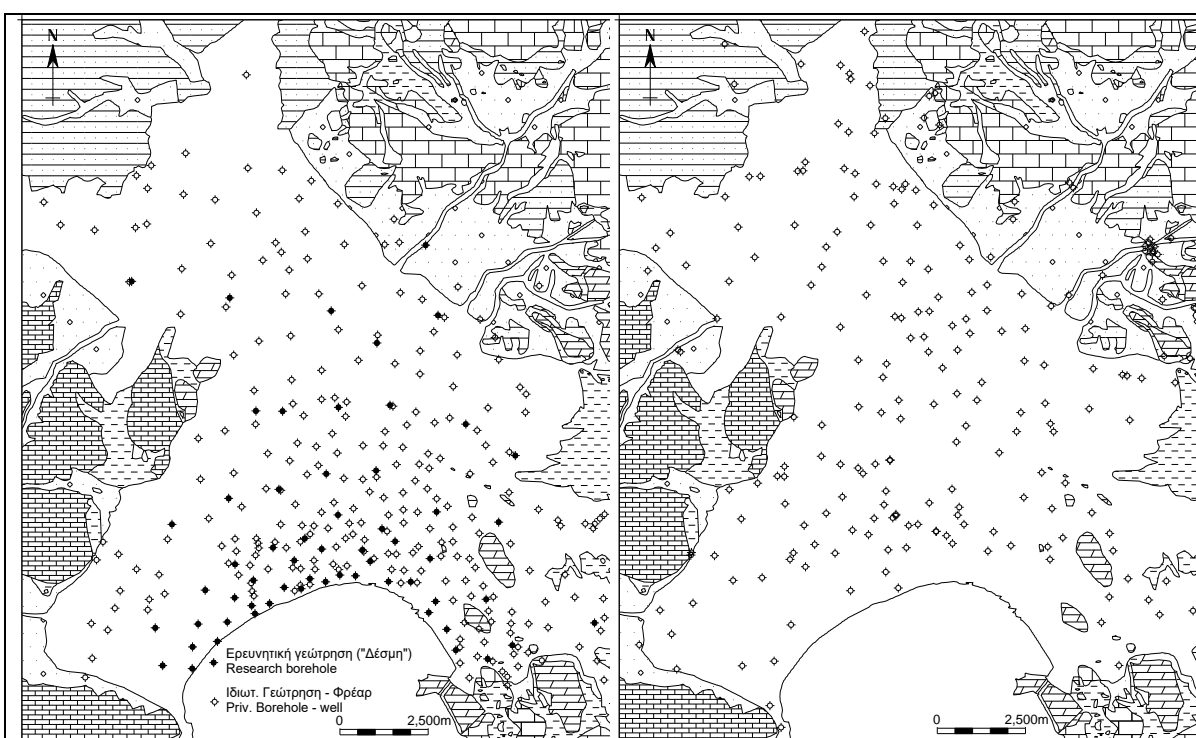
3.2.3 Η Θαλάσσια Διείσδυση στο Αργολικό Πεδίο

Μετά τα μέσα του προηγούμενου αιώνα παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση των αρδευόμενων εκτάσεων και κυρίως στην καλλιέργεια εσπεριδοειδών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την υφαλμύρωση του Αργολικού πεδίου. Το πρόβλημα ήταν δριμύτερο στην περιοχή των οικισμών Τίρυνθας και Άριας και στην αλλουβιακή πεδιάδα της Ασίνης-Δρεπάνου- Τολού. Οι αγροτικές εκτάσεις παρουσίασαν συμπτώματα ξήρανσης λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των νερών σε άλατα, ενώ παράλληλα αναζητούσαν νερό καλής ποιότητας για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος έχουν εφαρμοστεί διάφορες μέθοδοι εμπλουτισμού του υδροφόρα, για την ποσοτική και ποιοτική αναβάθμισή του.

Η υφαλμύριση έχει στην περιοχή έχει διευρυνθεί αρκετά με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος του Αργολικού πεδίου να καλύπτει τις αρδευτικές του ανάγκες από το φράγμα του Ανάβαλου. Παράλληλα, έχει παρατηρηθεί σε πολλές περιπτώσεις η προσπάθεια απομόνωσης των στρωμάτων που διαθέτουν υφάλμυρο νερό.

3.2.4 Υδροχημικά στοιχεία περιοχής έρευνας

Η ποιότητα των υδάτων στην περιοχή έρευνας αποτελεί αντικείμενο μελέτης για πολλές δεκαετίες. Η Υπηρεσία Εργείων Βελτιώσεων του Υπουργείου Γεωργίας ανέλαβε τις πρώτες μετρήσεις στην περιοχή το 1962, σε δίκτυο φρεάτων και γεωτρήσεων. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν συστηματικές λόγω του προβλήματος της υφαλμύρωσης και έτσι δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στις μετρήσεις των χλωριώντων. Μετά το 1964 πραγματοποιήθηκε διάνοιξη ερευνητικών γεωτρήσεων από τις οποίες έγινε πλήρης χημική ανάλυση των δειγμάτων (Σχήμα 22α). Οι μετρήσεις αυτές τα πρώτα χρόνια γίνονταν σε μηνιαία βάση.



(α). Δίκτυο γεωτρήσεων και φρεάτων ελέγχου της (β). Δίκτυο γεωτρήσεων ελέγχου της ποιότητας των υπ. Νερών της περιόδου 1962-75 των υπόγειων νερών της περιόδου 1985-2001

Σχήμα 22: Δίκτυο σημείων υδροληψίας ελέγχου ποιότητας (α) για την περίοδο 1962-1975 και (β) 1985-2001 (Γιαννουλόπουλος Π. κ.α., 2002)

Κατά την διάρκεια ενός νεότερου ερευνητικού προγράμματος (Πουλοβασίλης κ.α., 1996) ορίστηκε ένα δίκτυο ελέγχου γεωτρήσεων (Σχήμα 19β). αυτό περιέλαβε χημικές αναλύσεις περισσότερων στοιχείων, καθώς και φυσικοχημικών παραμέτρων. Με την σύνταξη χαρτών που απεικονίζουν ιόντα χλωρίου και ηλεκτρικής αγωγιμότητας και την επεξεργασία των δεδομένων από συγκεκριμένες γεωτρήσεις εξήχθησαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

Αναλυτικότερα, έγινε υπόδειξη σημείων τα οποία ποιοτικά είναι κατάλληλα να ικανοποιήσουν τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής.

Ο φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας που καλύπτει την παραλιακή ζώνη έχει υποβαθμιστεί ιδιαίτερα λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης. Η αμελητέα εδαφική κλίση στο παραλιακό τμήμα σε συνδυασμό με την διακύμανση του επιπέδου της θάλασσας οδήγησε στην συνεχή κατάκλυση των εδαφών με θαλασσινό νερό. Όταν η επιφάνεια της θάλασσας υποχωρούσε σε λιγότερο από μισό μέτρο προκλήθηκε έντονη εξάτμιση των ελωδών αυτών εκτάσεων με αποτέλεσμα να συγκρατήσουν μεγάλες ποσότητες αλάτων. Η περιεκτικότητα χλωρίου που υπολογίστηκε έφτασε έως 35.000- 40.000 mg/L.

Λόγω της έντονης γεωργικής δραστηριότητας και των πυκνών καλλιεργητικών εκτάσεων εντοπίστηκαν υψηλοί δείκτες ρύπανσης των υπόγειων νερών που οφείλονται σε περιεκτικότητα νιτρικών ιόντων και σχετίζονται, κυρίως με την χρήση φυτοφαρμάκων. Οι συγκεντρώσεις αυτές πολλές φορές είναι τόσο υψηλές που ξεπερνούν τόσο τα διεθνή όσο και τα εγχώρια όριο ποσιμότητας. Αιτία της ρύπανσης αποτελεί, πέραν της χρήσης φυτοφαρμάκων, η ανεξέλεγκτη απόρριψη στερεών και υγρών αποβλήτων. Η παρουσία ωστόσο του αργλικού καλύμματος στο νότιο τμήμα του πεδίου, λειτουργεί ως φραγμός στην άμεση κατείσδυση του ρύπου στα υπόγεια νερά. Αντίθετα, στα τμήματα του ελεύθερου υδροφορέα και ιδιαίτερα κοντά στους χειμάρρους οι συγκεντρώσεις είναι πιο υψηλές.

3.3 AkvaGIS

3.3.1 Εισαγωγή

Η πληρέστερη κατανόηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού προκύπτει από την συνδυαστική αποτύπωση υδρογεωλογικής και υδροχημικής πληροφορίας. Για την ανάλυση των χημικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή QGISσυνδεδεμένη με την πλατφόρμα του FREEWAT. Το FREEWAT είναι ένα ελεύθερο ανοιχτό λογισμικό, το οποίο διαθέτει εργαλεία για την διαχείριση των υδατικών πόρων. Η ενότητα AkvaGIS βρίσκεται ενσωματωμένη στο λογισμικό του FREEWAT. Η ενότητα αυτή παρέχει την δυνατότητα ανάλυσης υδρογεωλογικών και υδροχημικών στοιχείων.

Το AkvaGIS παρέχει μια σειρά από εργαλεία, τα οποία είναι:

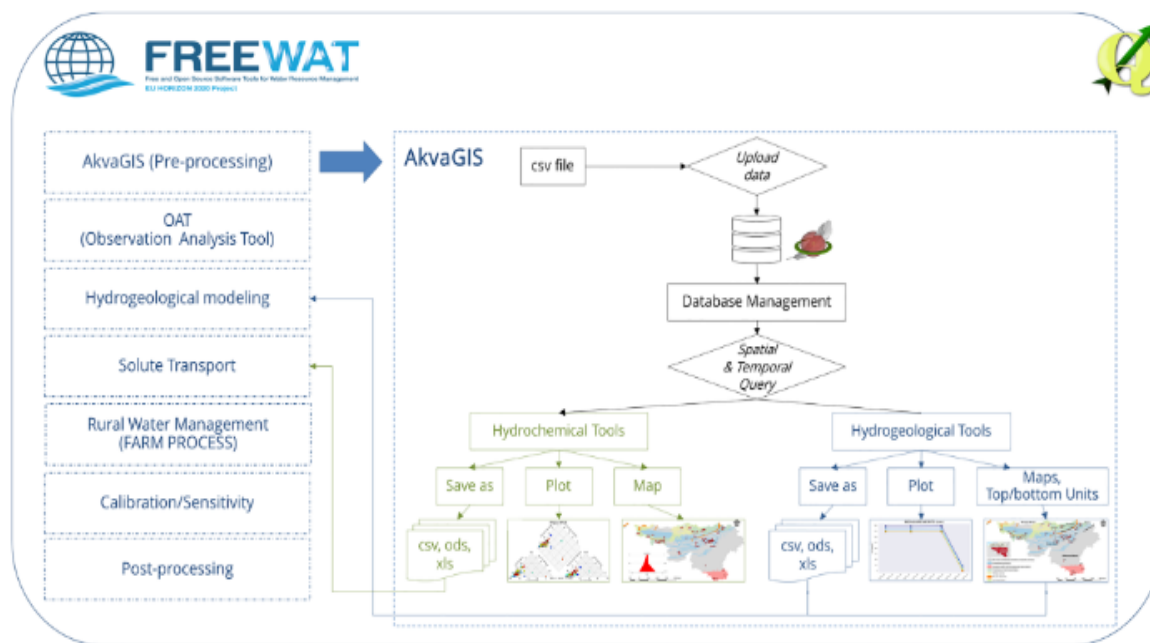
- Εργαλεία βάσης δεδομένων: Βοηθούν τη διαχείριση των δεδομένων σε μια χωρική βάση
- Υδροχημικά εργαλεία: Δημιουργούν χωροχρονικές κατανομές, υδροχημικά διαγράμματα και χρονικά διαγράμματα εξέλιξης, ποιοτική απεικόνιση υδροχημικής πληροφορίας
- Υδρογεωλογικά εργαλεία: Δημιουργούν θεματικούς χάρτες, χάρτες υδρογεωλογικών παραμέτρων.

Η βάση δεδομένων μέσω της οποίας γίνεται η επεξεργασία των στοιχείων στην πλατφόρμα του AkvaGIS είναι της μορφής SQLite, η οποία συνδυάζει τις δυνατότητες SQL και SpatiaLite. Πρόκειται για ένα σύστημα διαχείρισης δεδομένων που δίνει την δυνατότητα ανάκτησης δεδομένων με τον πιο αποτελεσματικό και γενικευμένο τρόπο. Η SQL δίνει την δυνατότητα να καθορίσεις τον τρόπο που είναι διαμορφωμένα τα δεδομένα, να τα

επεξεργαστείς, να διαγράψεις ή να προσθέσεις δεδομένα μέσα στην γεωβάση. Η SpatiaLite είναι μία βάση που περιέχει χωρικές εφαρμογές με στόχο την οπτικοποίηση και διαχείριση των δεδομένων. Ενώ διαθέτει μια σειρά πλεονεκτημάτων, όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι προσφέρει απλοϊκή και εύκολη χρήση, καταλαμβάνοντας μικρή χωρητικότητα. Κάθε SQLite database είναι απλά ένας φάκελος που μπορεί να αντιγραφεί και να μεταφερθεί σε υπολογιστικά περιβάλλοντα με διαφορετικό λογισμικό.

Τα κύρια βήματα που ακολουθήθηκαν για την επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων με το AkvaGIS είναι:

- Η εισαγωγή δείγματος στο QGIS
- Αντιγραφή των δεδομένων στη βάση δεδομένων του AkvaGIS
- Δημιουργία υδροχημικών ή υδρογεωλογικών ερωτημάτων (Query) αντίστοιχα, μέσω της βάσης δεδομένων του AkvaGIS
- Και τέλος η ανάλυση δεδομένων και ερμηνεία του μέσω διαγραμμάτων, χαρτών κλπ.

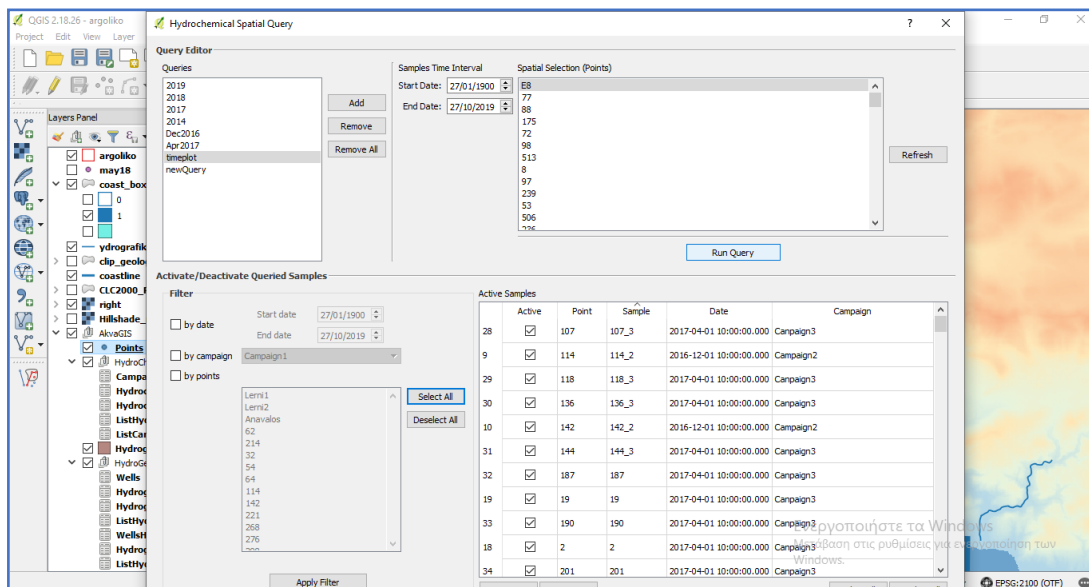


Εικόνα 1.1: Εργαλεία AkvaGIS ανάλυσης υδρογεωλογικών και υδροχημικών στοιχείων

3.3.2 Επεξεργασία και αποτελέσματα επεξεργασίας χημικών δεδομένων

Για την παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκαν υδροχημικά δεδομένα από την βιβλιογραφία. Τα δεδομένα αυτά αξιολογήθηκαν και επιλέχθηκαν με βάση την χωροχρονική τους κατανομή, προκειμένου να προκύψουν αποτελέσματα, τα οποία θα αντιπροσωπεύουν σε μεγάλο βαθμό τις υπάρχουσες συνθήκες. Τα διαθέσιμα δεδομένα αφορούν μετρήσεις που έγιναν από τον Οκτωβρίου 2014 έως το 2019. Κατά την επεξεργασία τους συντάχθηκαν υδροχημικά διαγράμματα και υδροχημικοί χάρτες κατανομή ιόντων χλωρίου και ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Η επιλογή των δειγμάτων έγινε με αντιπροσωπευτική χωρική κατανομή

προκειμένου να προκύψει αποτέλεσμα με ουσιαστική πληροφορία για όλη την επιφάνεια της περιοχής έρευνας (Spatial Query).

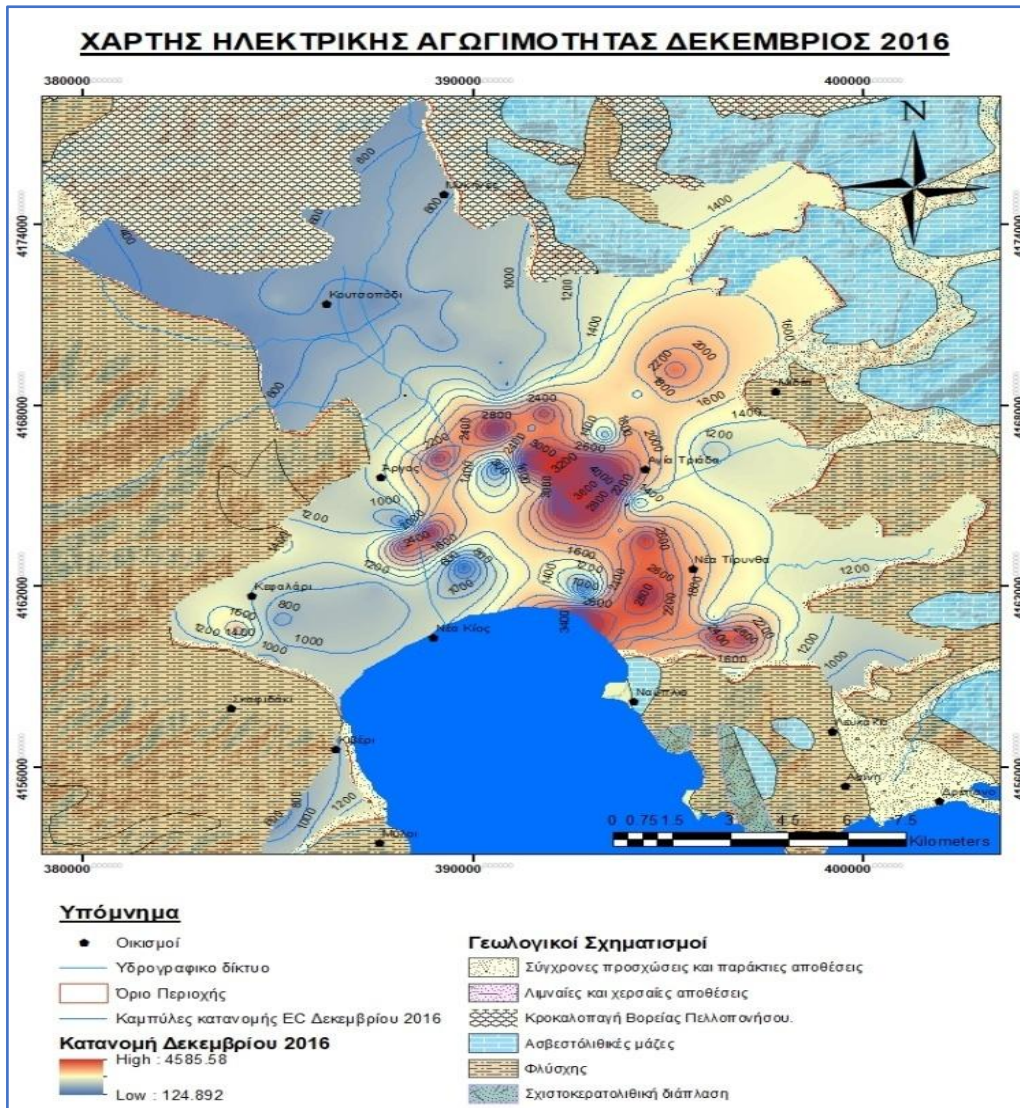


Σχήμα 23: Διαχείριση χωρικής κατανομής δειγμάτων προ-επεξεργασίας του προγράμματος AKVAGIS

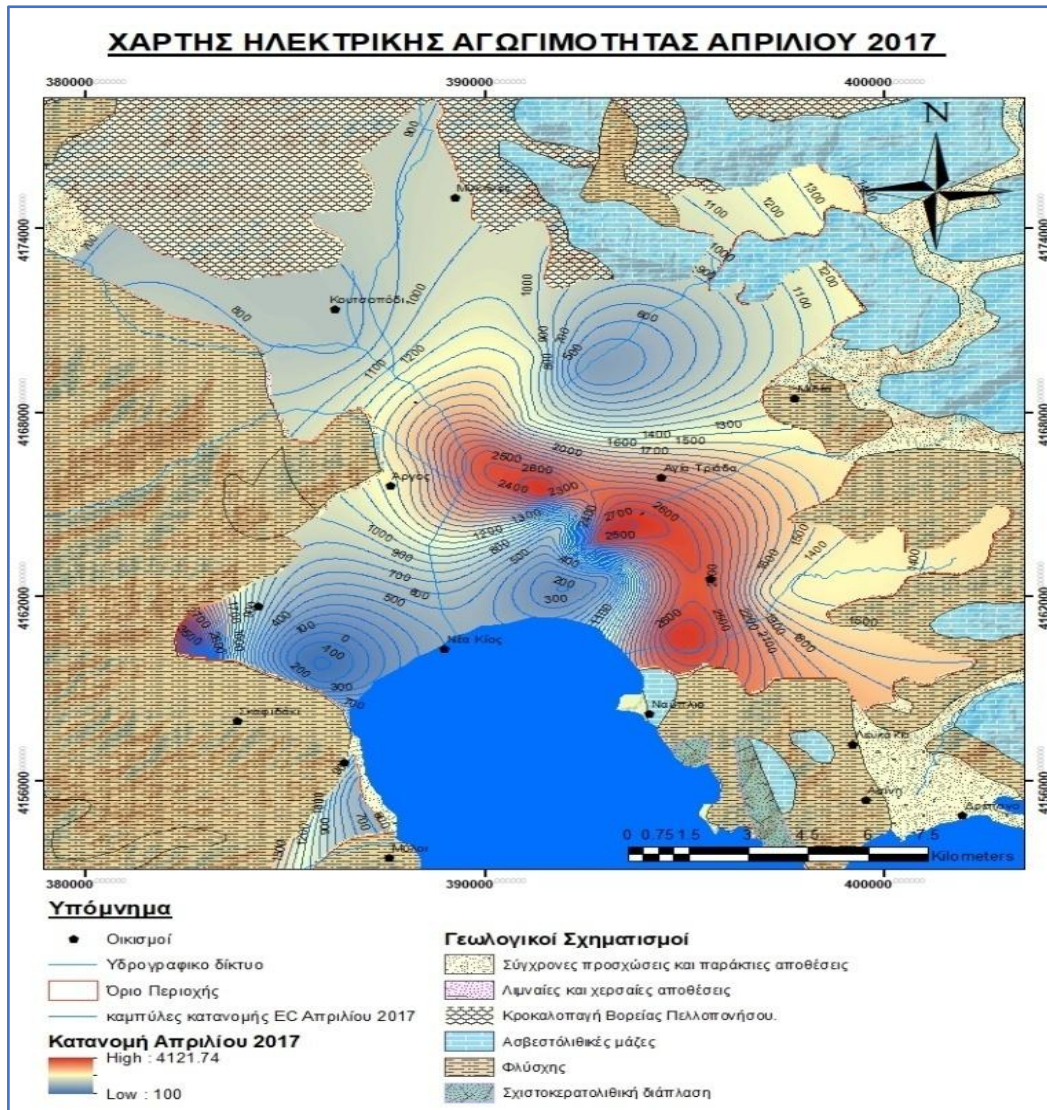
3.3.2.1 Υδροχημικοί χάρτες

Οι υδροχημικοί χάρτες αποτελούν εργαλείο στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων, όσον αφορά την ποιότητα και τα χημικά χαρακτηριστικά του υπόγειου νερού. Η χωρική κατανομή των διαφόρων ιόντων και παραμέτρων που μας ενδιαφέρουν κατά περίπτωση γίνεται με καμπύλες ίσης συγκέντρωσης ενός ιόντος ή ίσης τιμής μιας παραμέτρου αντίστοιχα. Από τους υδροχημικούς χάρτες δίνεται η δυνατότητα να εξάγουμε συμπεράσματα για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο ή την εξέλιξη ενός φαινομένου, να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα διαφόρων χρονικών περιόδων, να διαπιστώσουμε την τάση μεταβολής των συγκεντρώσεων, αλλά και να βγάλουμε συμπεράσματα για τους λόγους που οδήγησαν στις μεταβολές αυτές.

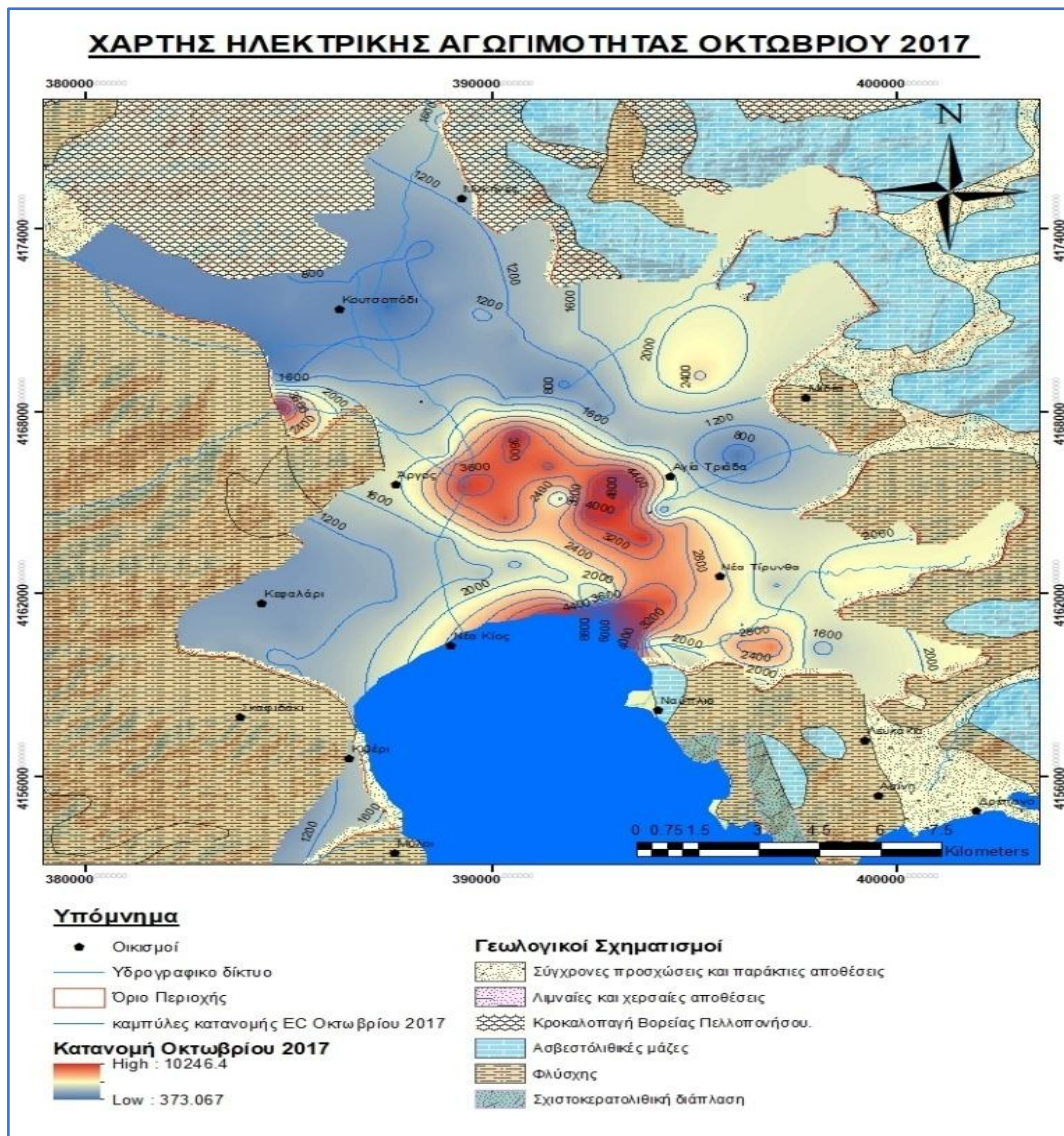
Όπως προαναφέρθηκε οι χάρτες που έχουν συνταχθεί αφορούν την κατανομή των χλωριώντων και την ηλεκτρική αγωγιμότητα. Η Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα αποτελεί μια παράμετρο, η οποία είναι η πρώτη ένδειξη για την ποιοτική κατάσταση ενός δείγματος. Συνήθως η μέτρησή της γίνεται στην ύπαιθρο με ειδικό φορητό εξοπλισμό (αγωγιμόμετρο) και η μέτρηση γίνεται συνήθως σε θερμοκρασία 25 °C. Το καθαρό νερό δεν είναι καλός αγωγός του ηλεκτρισμού. Η αύξηση των διαλυμένων αλάτων συνεπάγεται την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.



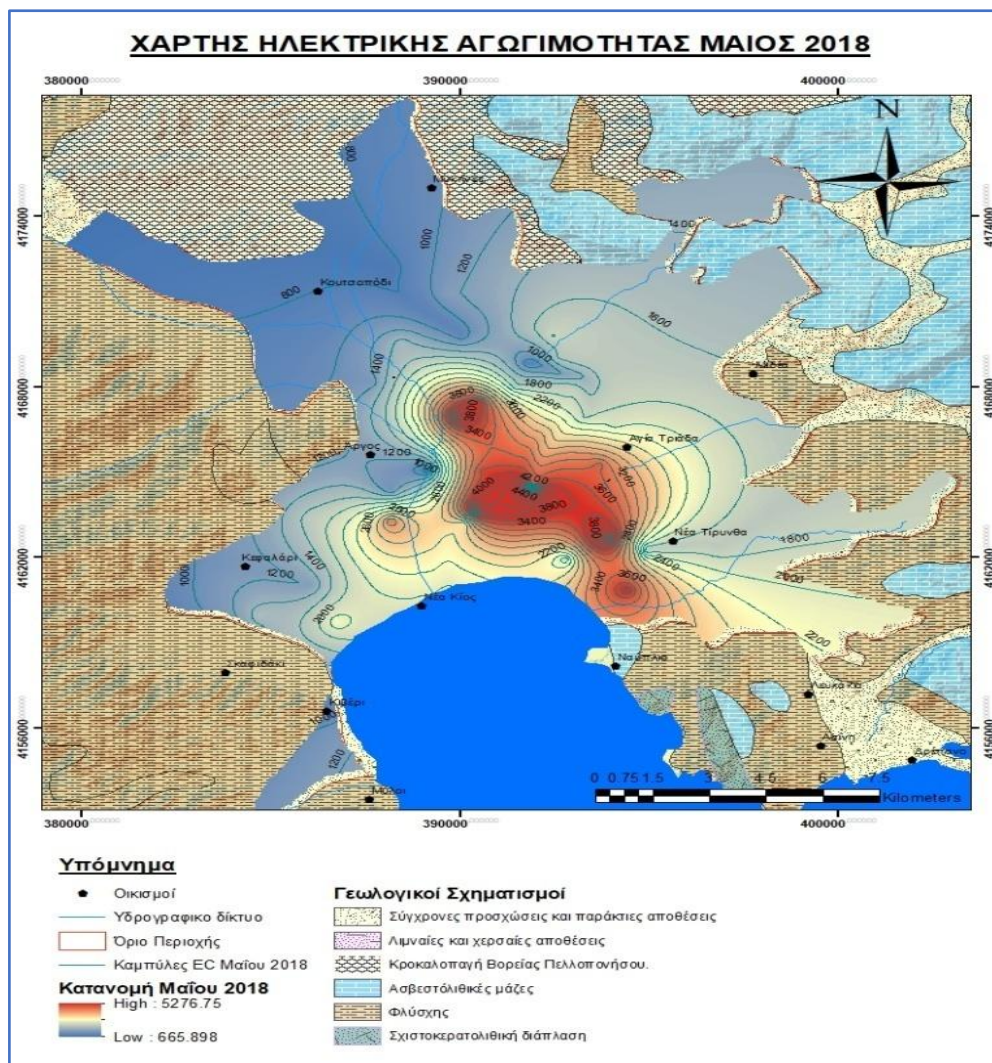
Σχήμα 24: Χάρτης κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας Δεκεμβρίου 2016 (δεδομένα από Γιαννουλας,2017)



Σχήμα 25: Χάρτης κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας Απριλίου 2017 (δεδομένα από Γιαννουλας, 2017)

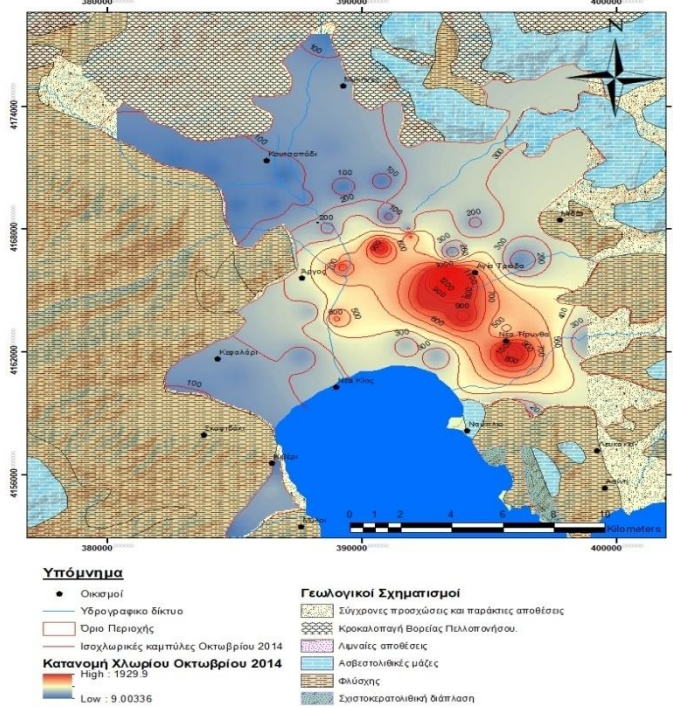


Σχήμα 26: Χάρτης κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας Οκτωβρίου 2017 (δεδομένα από Χρυσανθόπουλος, 2018)



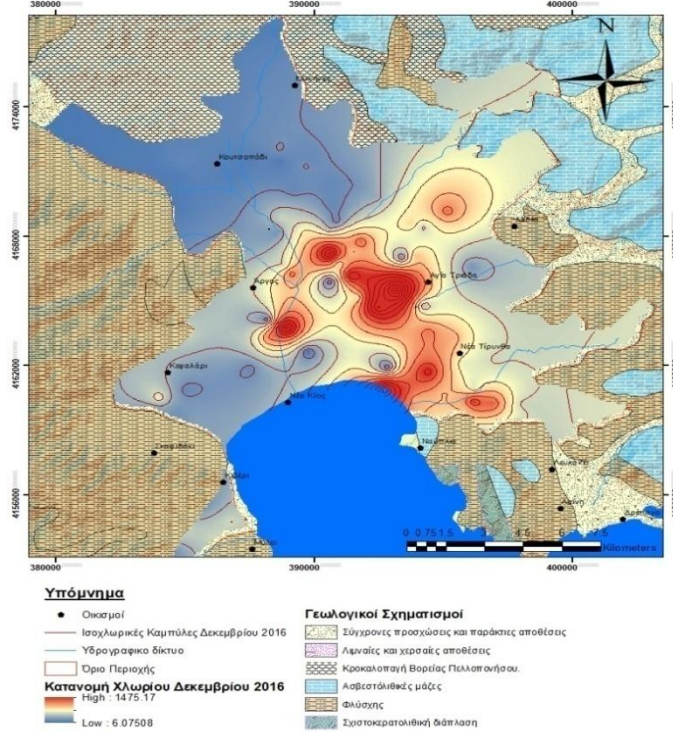
Σχήμα 27: Χάρτης κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας Μαΐου 2018(δεδομένα από Χρυσανθόπουλος, 2018)

ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΧΛΩΡΙΟΥ ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2014



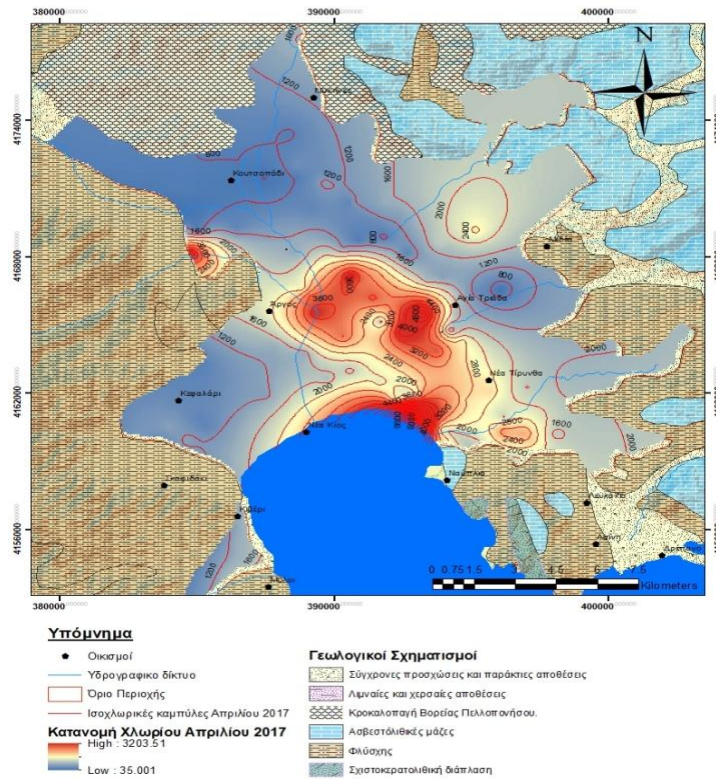
Σχήμα 28: Χάρτης κατανομής Χλωρίου Οκτώβριου 2014 (δεδομένα από Μητρόπαπας, 2015)

ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΧΛΩΡΙΟΥ ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΥ 2016

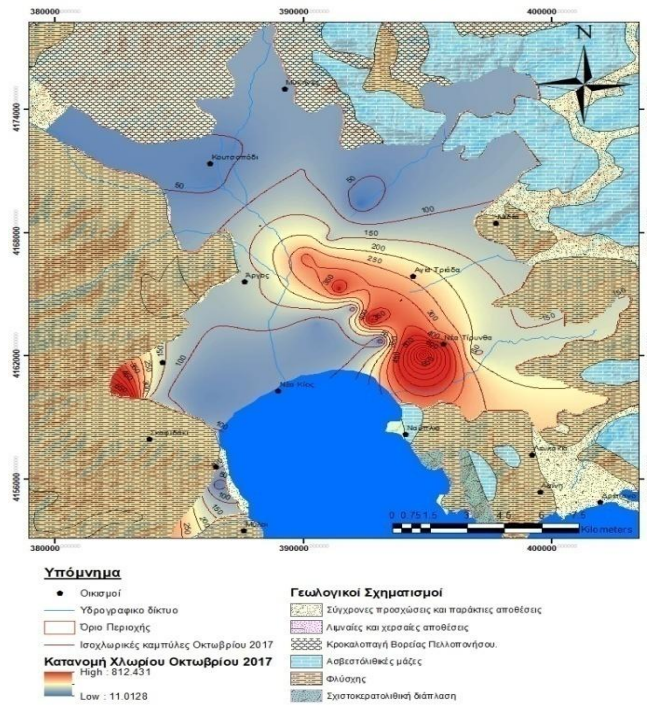


Σχήμα 29: Χάρτης κατανομής Χλωρίου Δεκεμβρίου 2016 (δεδομένα από Γιαννουλίας, 2017)

ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΧΛΩΡΙΟΥ ΑΠΡΙΛΙΟΥ 2017



ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΧΛΩΡΙΟΥ ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2017



Σχήμα 30: Χάρτες κατανομής Χλωρίου Απριλίου & Οκτωβρίου 2017 (δεδομένα από Γιαννουλάς, 2017&Χρυσανθόπουλος,2018)

Τα ιόντα χλωρίου προέρχονται κυρίως από ιζηματογενή πετρώματα που περιέχουν αργίλικα ορυκτά θαλάσσιας γένεσης, από εβαπορίτες και θερμές πηγές, ενώ υποδεικνύει και θαλάσσια διείσδυση (Βουδούρης, 2009). Στις παράκτιες και νησιωτικές περιοχές εντοπίζεται υψηλή αλατότητα στο βρόχινο νερό καθώς οι υγρές αέριες μάζες που προέρχονται από τη θάλασσα έχουν εμπλουτιστεί σε άλατα. Η απόθεση των αλάτων αυτών με την βροχόπτωση έχει επίδραση στην χημική σύσταση των νερών στις περιοχές αυτές (Lamprikis et al., 2000). Υψηλές συγκεντρώσεις χλωριόντων συνδέονται και με ανθρωπογενείς παράγοντες. Δραστηριότητες η υπεράντληση, η απόρριψη άλατος για αντιπαγετική προστασία τους δρόμους, οι αλμύρες σε περιοχές εξόρυξης πετρελαίου, αλλά και τα βιομηχανικά, οικιακά και αγροχημικά απόβλητα συμβάλλουν στην επιβάρυνση των υδάτων σε άλατα (Καλλιώρας, 2008).

Στα παραπάνω σχήματα παρουσιάζονται οι χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας από το Δεκέμβριο του 2016 μέχρι το Μάιο του 2018 (δεδομένα από Γιαννούλας & Χρυσανθόπουλος), καθώς οι χάρτες κατανομής χλωριόντων για τον Οκτώβριο 2014 έως Οκτώβριο 2017 (δεδομένα από Μητρόπαπας 2015, Γιαννούλας 2017, Χρυσανθόπουλος 2018). Η ποιοτική διακύμανση των υπογείων νερών δεν παρουσιάζει αξιοσημείωτη μεταβολή η οποία να παραπέμπει στον τεχνητό εμπλουτισμό που εφαρμόζεται διότι δεν είναι πολύ μεγάλες οι ποσότητες που διοχετεύονται στον υδροφόρο, αλλά και το χρονικό διάστημα είναι αρκετά μικρό ώστε να φανεί κάποια διαφορά. Ωστόσο από την σύγκριση των χαρτών εξάγονται κάποια συμπεράσματα.

Αρχικά, παρατηρώντας την χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων προκύπτει πως στο δυτικό τμήμα του Αργολικού πεδίου η ποιότητα των υπόγειων νερών είναι ανώτερη σε σχέση με την υπόλοιπη περιοχή. Αυτό είναι αποτέλεσμα της υπόγειας τροφοδοσίας από το καρστικό σύστημα δυτικότερα το οποίο διαθέτει νερό αρίστης ποιότητας και των κατεισδύσεων του ποταμού Ίναχου όταν εμφανίζει ροή. Στο βορειοανατολικό τμήμα της Πεδιάδας εντοπίζεται ένα μέτωπο υφαλμύρισης, το οποίο έχει την προέλευση του από τον Σαρωνικό Κόλπο, απ' όπου μεταφέρεται θαλασσινό νερό μέσω ρηγμάτων του Αραχναίου όρους. Το κύριο μέτωπο υφαλμύρισης, έχει προωθηθεί και εντοπίζεται στο κεντρικό τμήμα του Αργολικού πεδίου μεταξύ του Άργους και της Αγίας Τριάδας. Στην παραλιακή ζώνη παρουσιάζεται αναβαθμισμένη ποιότητα των υδάτων αυτό οφείλεται στην εκμετάλλευση βαθύτερων στρωμάτων προκειμένου να καλυφθούν αρδευτικές, κυρίως ανάγκες από μη υφαλμυρισμένους υδροφόρους.

Στην περιοχή έρευνας οι τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας και χλωριόντων είναι ιδιαίτερα υψηλές. Η μέγιστη τιμή ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι 10.250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ και η ελάχιστη τιμή είναι 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ στα σημεία πλευρικής τροφοδοσίας. Η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου κυμαίνεται από 6- 3.200 mg/L. Η συσχέτιση των χημικών παραμέτρων με τους πιεζομετρικούς χάρτες οδηγούν στο συμπέρασμα της θαλάσσιας διείσδυσης. Αναλυτικότερα, στην περιοχή που εμφανίζεται αρνητική πιεζομετρία τόσο η ηλεκτρική αγωγιμότητα, όσο και τα χλωριόντα παρουσιάζουν αυξημένες τιμές που συνάδουν με υφάλμυρο νερό.

3.3.2.2 Υδροχημικά διαγράμματα

Τα υδροχημικά διαγράμματα αποτελούν ένα εργαλείο ερμηνείας χημικών αποτελεσμάτων, προσδιορισμού χημικού είδους νερού, ελέγχου καταλληλότητας και γενικότερα προσδιορισμού της υδροχημικής φάσης του δείγματος. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα Wilcox (1955) και το διάγραμμα Piper (1948).

Το διάγραμμα Wilcox προσδιορίζει την καταλληλότητα του αρδευτικού νερού σε σχέση με τις ιδιότητες των καλλιεργούμενων εδαφών. Χρησιμοποιεί το συντελεστή προσρόφησης Νατρίου ή κίνδυνος Νατρίου (SAR) και την ηλεκτρική αγωγιμότητα EC. Ο συντελεστής προσρόφησης Νατρίου ισούται με

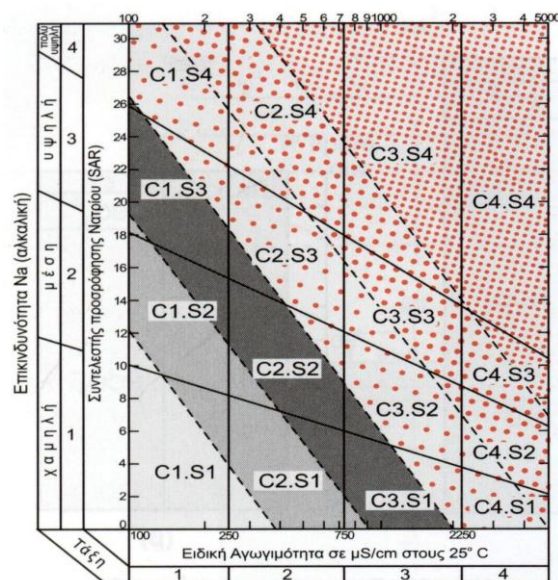
$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca+Mg}{2}}}$$

Όπου οι συγκεντρώσεις των ιόντων εκφράζονται σε meq/L.

Η σημαντικότητα προσδιορισμού του δείκτη SAR για την καταλληλότητα του αρδευτικού νερού έγκειται στο γεγονός ότι το νάτριο δημιουργεί αποκροκίδωση του εδάφους. Αυτό έχει ως συνέπεια της μείωσης του αερισμού, αλλά και της περατότητας του εδάφους.

Με βάση το διάγραμμα του Σχήματος η κατάταξη του αρδευτικού νερού διακρίνεται σε:

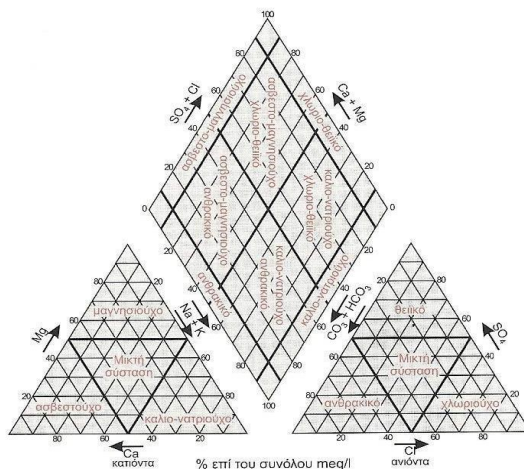
- C1-S1: Ποιότητα καλή
- C1-S2, C2-S1: Ποιότητα καλή έως μέτρια. Απαιτείται προφύλαξη σε εδάφη με μικρή αποστράγγιση.
- C1-S3, C2-S2, C3-S1. Ποιότητα μέτρια έως πολύ μέτρια. Το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μέτρα προφύλαξης.
- C1-S4, C2-S3, C3-S2, C4-S1. Ποιότητα πολύ μέτρια μέχρι κακή. Χρησιμοποιείται σε εδάφη που αποστραγγίζονται καλά ή προστίθεται γύψος.
- C2-S4, C3-S3, C4-S2. Ποιότητα κακή. Χρησιμοποιείται μόνο σε ανθεκτικά νερά και καλά αποστραγγιζόμενα εδάφη.
- C3-S4, C4-S4, C4-S3. Ποιότητα πολύ κακή. Δεν ενδείκνυται για καμία χρήση.



Σχήμα 31: Διάγραμμα ταξινόμησης αρδευτικών νερών

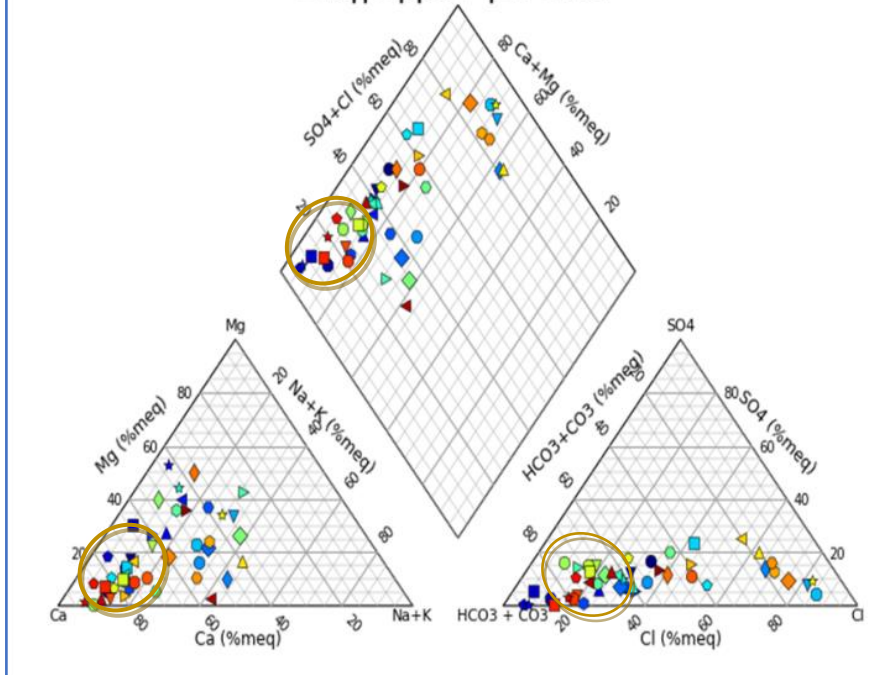
Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων και η επίδραση της ανταλλαγής των ιόντων είναι περισσότερη διακριτή με τη απεικόνιση τους σε διάγραμμα Piper.

Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 32 αποτελείται από δύο τριγωνικά διαγράμματα, ένα για τα ανιόντα, ένα για τα κατιόντα και ένα ενδιάμεσο ρομβικό, τα οποία στο σύνολό τους συνιστούν ένα τρίγωνο. Η χρήση του διαγράμματος δίνει την δυνατότητα απεικόνισης και άμεση σύγκριση διαφόρων δειγμάτων νερού και την ταξινόμησή τους σε κατηγορίες, δίνοντας παράλληλα την υδροχημική φάση του δείγματος. Το κεντρικό τμήμα τόσο του ρόμβου και των τριγώνων αποτυπώνονται τα νερά που προέρχονται από ανάμειξη. Στο αριστερό τμήμα του ρομβικού τμήματος αποτυπώνονται δείγματα με νερό καλής ποιότητας, ενώ από την αντίθετη πλευρά τα δείγματα χαρακτηρίζεται με αλμυρό νερό. Ο άξονας στον οποίο αποτυπώνεται το άθροισμα των ιόντων Na+K υποδεικνύει ότι το νερό είναι στη φάση του εμπλουτισμού. Αντίθετα ο άξονας του αθροίσματος ιόντων Ca+Mg υποδηλώνει θαλάσσια διείσδυση.

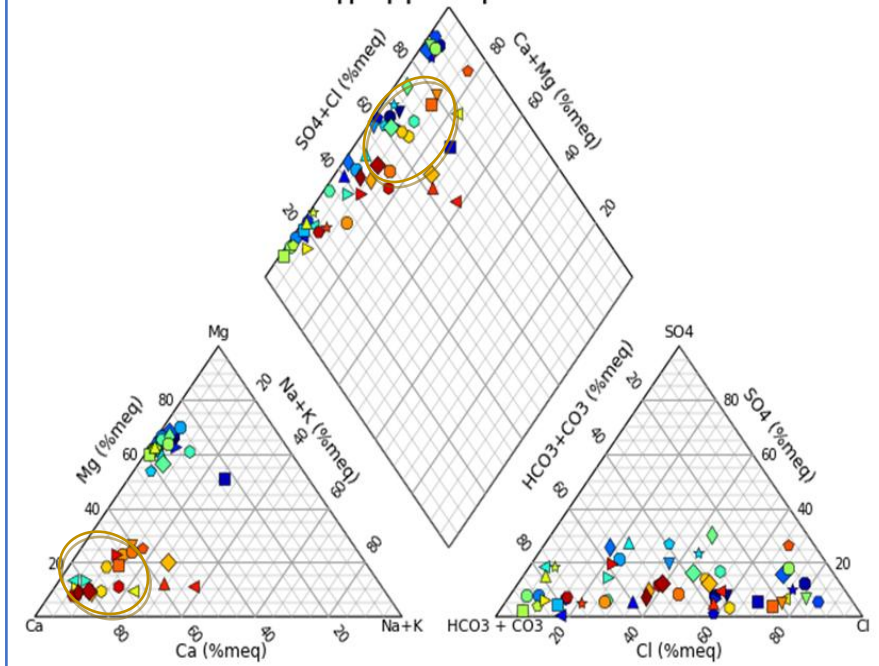


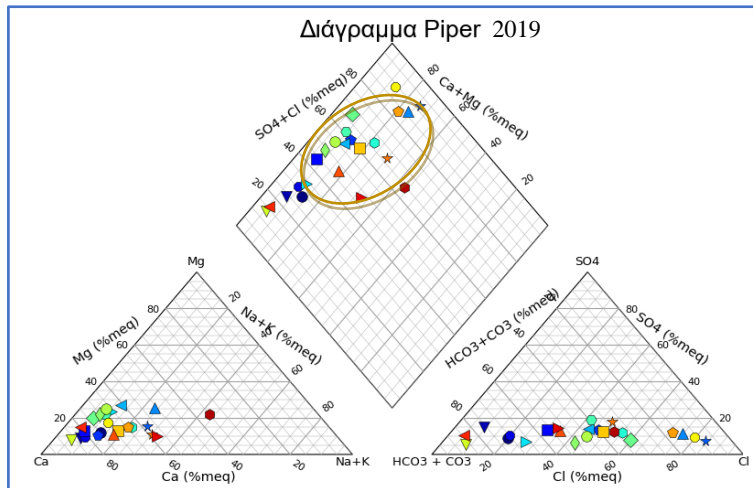
Σχήμα 32: Διάγραμμα Ρίτγκεν για την κατάταξη της κατηγορίας νερού.

Διάγραμμα Piper 2017



Διάγραμμα Piper 2014

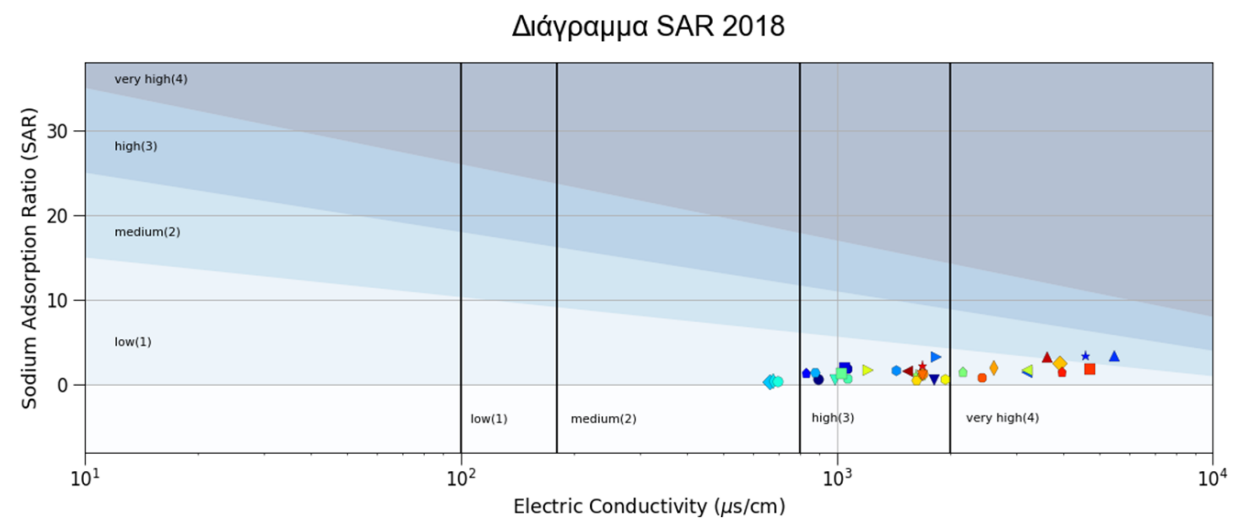
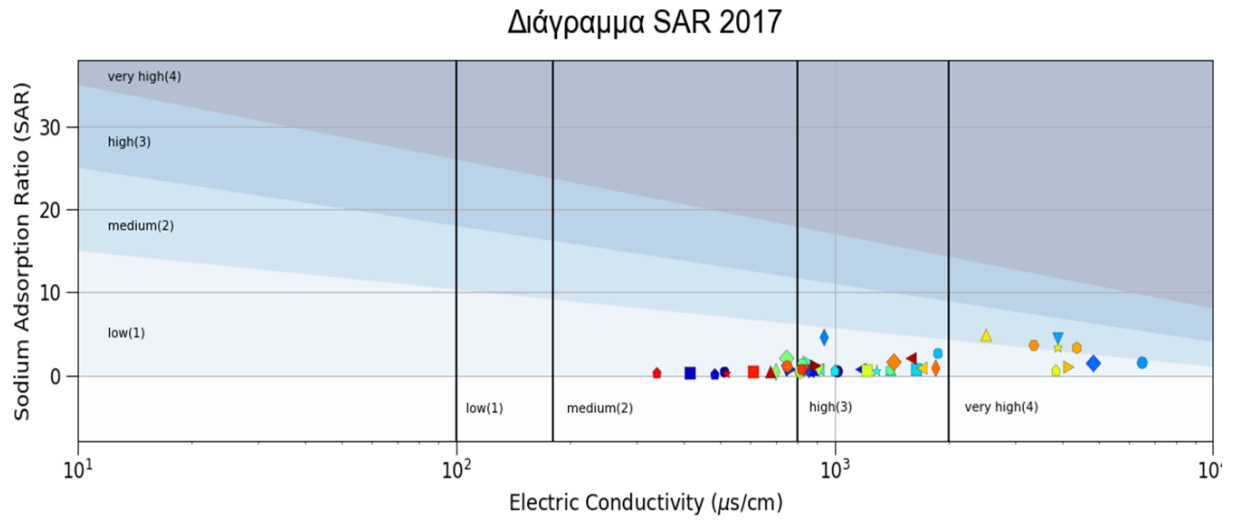
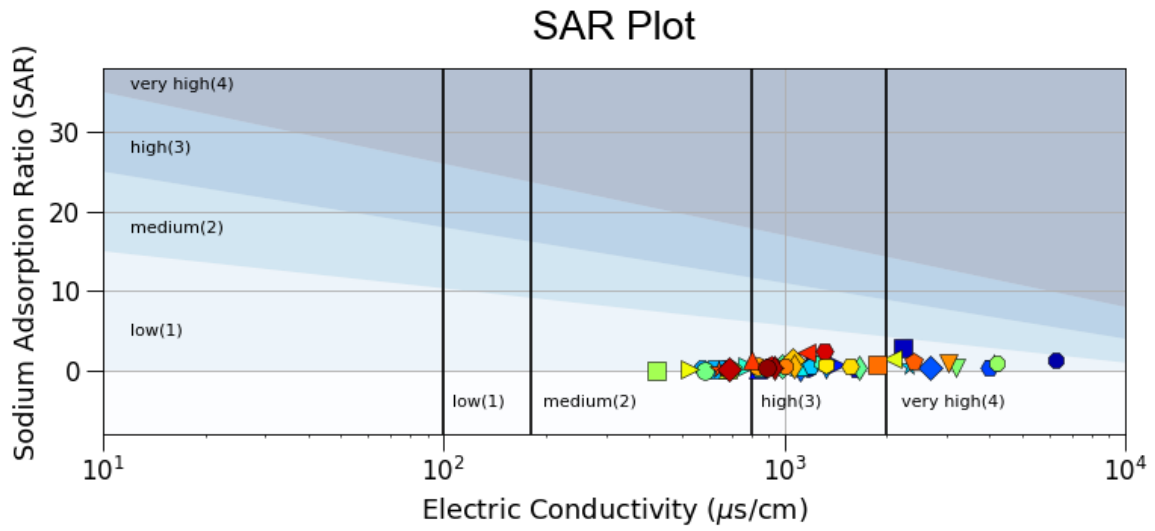




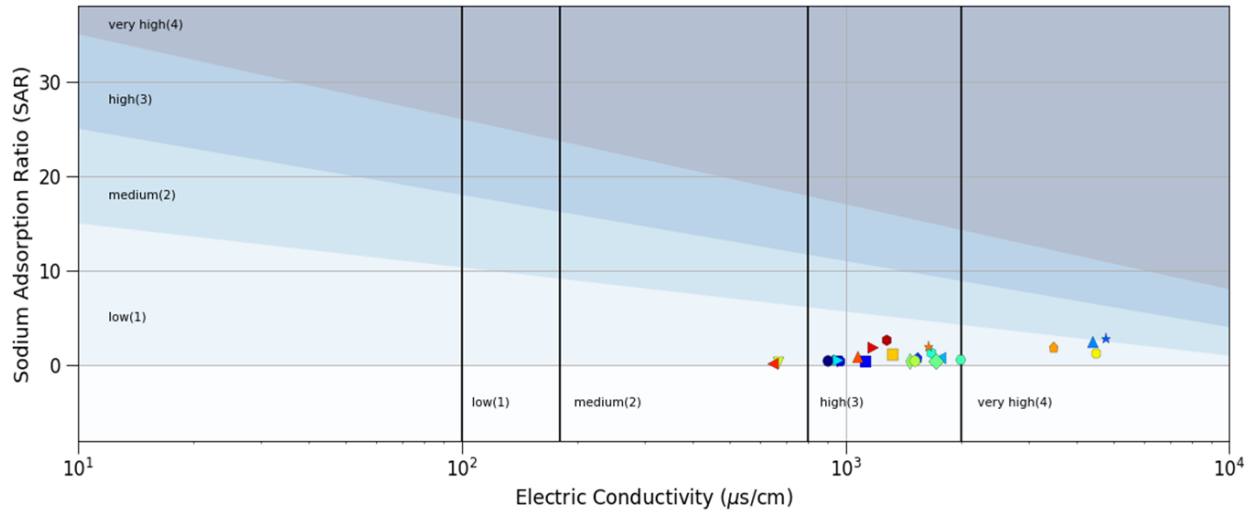
Σχήμα 33: Αποτύπωση δειγμάτων σε υδροχημικά διαγράμματα Piper για τα έτη 2014, 2017 και 2019

Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων με την εφαρμογή του AkvaGIS για τις διάφορες περιόδους μετρήσεων οδηγεί σε συμπεράσματα σχετικά με την υδροχημική φάση των δειγμάτων και την ποιότητα του νερού ως προς την άρδευση. Από το διάγραμμα Piper, η πλειονότητα των δειγμάτων δείχνει την υψηλή συγκέντρωση του νερού σε μαγνησίου και ασβέστιο. Στο Σχήμα 33 παρουσιάζονται με επισήμανση τα δείγματα τα οποία σε μεγάλο μέρος τους προέρχονται από διεϊσδυση και μείξη αλμυρού και γλυκού νερού. Παράλληλα πλήθος δειγμάτων παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις σε ασβέστιο και εμπίπτουν στην περιοχή που αντιστοιχεί σε γλυκό νερό.

Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται τα διαγράμματα του Δείκτη Προσρόφησης Νατρίου (SAR) για τα 2014,2017,2018 αντίστοιχα. Σε όλες τις περιόδους η συντριπτική πλειοψηφία των δειγμάτων χαρακτηρίζεται σε μέτρια έως πολύ μέτρια ποιότητα αρδευτικού νερού. Σε ελάχιστες περιπτώσεις η ποιότητα μπορεί να χαρακτηριστεί η ποιότητα καλή έως μέτρια και αυτό ισχύει για τα έτη 2014 και 2017, διότι για τις άλλες περιόδους ένα έως δύο δείγματα είναι αυτά που ανήκουν σε αυτή την κατάταξη. Τέλος είναι αρκετά τα δείγματα που διαθέτουν κακή ποιότητα νερού που προορίζεται για άρδευση και τελικά δεν προτείνεται για την χρήση αυτή, πάρα μόνο με πολλές προφυλάξεις.



Διάγραμμα SAR 2019



4 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

4.1 Υδατικό ισοζύγιο υδροφόρων σχηματισμών

Η σύνταξη του υδρολογικού ισοζυγίου σε μια λεκάνη απορροής συνιστά απαραίτητο εργαλείο για την ορθολογική διαχείριση των υδατικών της αποθεμάτων, αλλά και των σχεδιασμό διαφόρων υδροληπτικών έργων. Κύριος σκοπός του υδρολογικού ισοζυγίου είναι ο υπολογισμός των ποσοτήτων εισροών και εκροών στην μονάδα του χρόνου.

Το υδατικό ισοζύγιο των υδροφόρων σχηματισμών εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

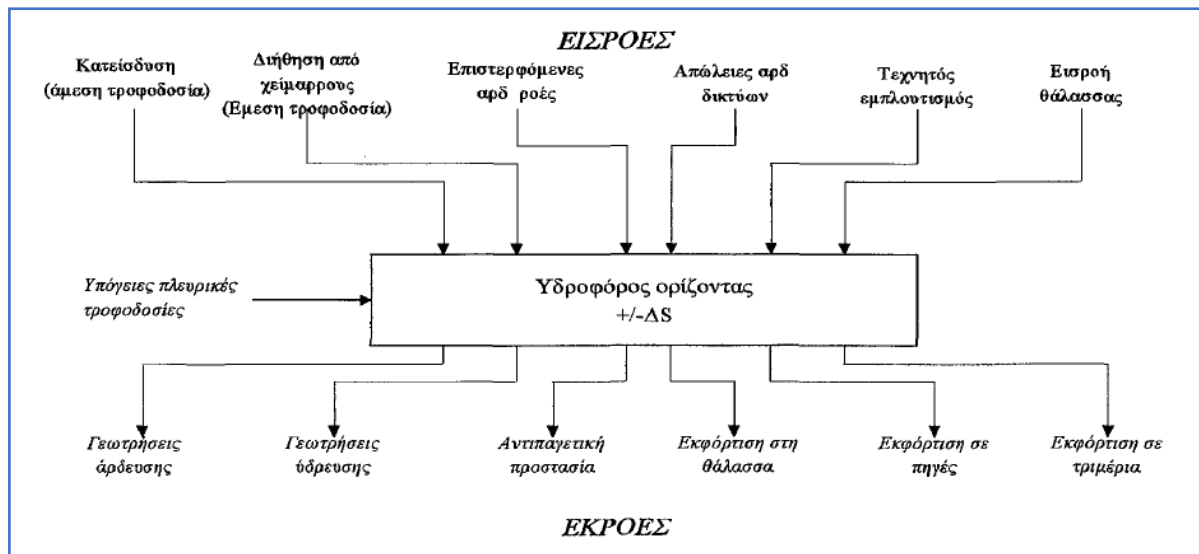
$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} \pm \text{Μεταβολή αποθεμάτων}$$

Στην περίπτωση του Αργολικού πεδίου οι εισροές εντοπίζονται:

- Στην κατείδυση του νερού της βροχής
- Διήθηση νερού από τους χειμάρους
- Επιστροφή αρδευτικών ροών
- Απώλειες αρδευτικού δικτύου
- Εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού
- Θαλάσσια διείσδυση

Οι εκροές των υδατικών αποθεμάτων πραγματοποιούνται μέσω:

- Γεωτρήσεων άρδευσης και ύδρευσης
- Αντιπαγετική προστασία
- Εκφόρτιση σε πηγές
- Εκφόρτιση στη θάλασσα



Σχήμα 34: Σχηματική απεικόνιση Υδατικού ισοζυγίου στο Αργολικό πεδίο (Γιαννουλόπουλος, 2000)

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διδακτορικής διατριβής (από Γιαννουλόπουλος, 2000) προσδιόρισε με επιτόπου καταγραφές την μεταβολή της εδαφικής υγρασίας αποδεικνύοντας ότι η περίσσεια ύδατος ανέρχεται σε 190mm ή $23 \cdot 10^6 \text{m}^3$ αναγόμενο στην επιφάνεια της περιοχής έρευνας. Η επιστρεφόμενες αρδευτικές ροές υπολογίστηκαν σε $7 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{στρέμμα}/\text{έτος}$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ποσότητα του νερού άρδευσης ανέρχεται σε $500\text{-}900 \text{m}^3/\text{στρέμμα}/\text{έτος}$ ανάλογα με την σύσταση και τις ιδιότητες του εδάφους, αλλά και τις ανάγκες της καλλιέργειας υπολογίζεται η περίσσεια νερού είναι της τάξης του 10-15% του ύψους νερού άρδευσης.

Όσον αφορά, την έμμεση κατείδυση και συγκεκριμένα την διήθηση χειμαρρικών υδάτων πραγματοποιείται κυρίως από τους χειμάρρους που τοποθετούνται στο ανατολικό περιθώριο του Αργολικού πεδίου. η ετήσια διήθηση που προέρχεται από τους χειμάρρους ανέρχεται σε $3\text{-}5 \cdot 10^6 \text{m}^3$, ανάλογα με το υδρολογικό έτος και με την προϋπόθεση οι χειμάρροι να έχουν μεγάλο χρόνο απορροής προκειμένου να εμπλουτίζουν τα υπόγεια νερά. Ίδιας τάξης μεγέθους εμπλουτισμό αποτελούν και οι απώλειες από τις δύο αρδευτικές διώρυγες που λειτουργούν περιορισμένο χρόνο σε ένα έτος.

Τέλος, μεγάλο μέρος της τροφοδοσίας του υδροφορέα προέρχεται από τις δυτικές παρυφές της Αργολικής πεδιάδας, όπου γίνεται η υπόγεια πλευρική εκφόρτιση των ασβεστολιθικών μαζών. Ωστόσο το καθεστώς μη μόνιμης ροής καθιστά πρόβλημα τον υπολογισμό της. Μια αξιοσημείωτη προσεγγιστική ανάλυση έχει ως εξής: θεωρώντας το άθροισμα των κατακόρυφων και χειμαρρικών διηθήσεων περίπου $30 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ και τις συνολικές μέσες εκροές $80 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{year}$, έχοντας παράλληλα την παράμετρο του ελλειμματικού ισοζυγίου, προκύπτει πως οι πλευρικές εισροές δεν ξεπερνούν τις $50 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{year}$. Ως πλευρικές εισροές θεωρούνται τόσο οι εισροές από τους καρστικούς υδροφορείς αλλά και οι εισροές από την θάλασσα. Ωστόσο επειδή οι εισροές από την θάλασσα είναι μικρότερες σε σχέση με τις πλευρικές εισροές εκτιμάται ότι η πλευρική τροφοδοσία δεν ξεπερνά $30\text{-}40 \cdot 10^6 \text{m}^3/\text{year}$ (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Οι εκροές που πραγματοποιούνται και αποτελούν μέρος του υδατικού ισοζυγίου υδροφόρων σχηματισμών emπίπτουν σε υδρογεωλογικά καθεστάτα που επικρατούν στην

περιοχή, αλλά στο καθεστώς εκμετάλλευσης των υδροφόρων για την κάλυψη υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών. οι εκροές που οφείλονται σε ανθρωπογενείς παρεμβάσεις θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους.

Οι φυσικές διεργασίες εκφόρτισης του υδροφορέα είναι η εκφόρτιση προς τη θάλασσα, εκφόρτιση πηγών και η περιοχή των Τριμερίων. Από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί παλαιότερα φαίνεται πως στην περιοχή της Νέας Κίου και μύλων και ιδιαίτερα την περίοδο του χειμώνα που υπάρχει περίσσεια νερού εντοπίζεται εκφόρτιση του προς τη θάλασσα. Αυτό προκύπτει από τις υψηλές στάθμες του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με την σαφή υδραυλική του κλίση προς την θάλασσα. Στην περιοχή του Ναυπλίου υπάρχει η πηγή Γλυκιά. Πρόκειται για μία πηγή υπερπλήρωσης περιοδικής λειτουργίας που δημιουργείται στην επαφή Τεταρτογενών και Μεσοζωικών αποθέσεων. Η παροχή της πηγής υπολογίζεται σε 250 m³/ώρα.

Παλιότερες περιγραφές αναφέρουν την ύπαρξη μερικών τμημάτων στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας όπου αναπτύσσονταν ελώδη περιβάλλοντα. Η περιοχές αυτές είναι γνωστά ως «Τριμέρια». Εκτείνονταν περίπου 300- 1000m στην περιοχή των οικισμών Ηραίο- Ανύφι- Ήρα Ίναχος και Χώνικας. Στις περιοχές αυτές η στάθμη των χειμώνα ανέβαινε μέχρι την επιφάνεια του εδάφους, ενώ το καλοκαίρι η επιφάνεια του εδάφους υποχωρούσε μέχρι και 20 cm από την απόλυτη στάθμη της θάλασσας, ενώ οι γεωργοί σχημάτιζαν αυλάκια για την εκμετάλλευση των πλεοναζόντων υδάτων. Με την υποχώρηση της στάθμης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες εμφανιζόταν έντονη βλάστηση. Σύμφωνα με απόψεις τα Τριμέρια εμφανίστηκαν από το 1905 και για 15 χρόνια περίπου, ενώ ξαναέκαναν την εμφάνισή τους το 1936 (Αναγνωστόπουλος & Γαλάνης, 1938).

Λαμβάνοντας υπόψη την συνολική εκροή της πηγής της Γλυκίας σε συνδυασμό με τα Τριμέρια, όταν αυτά εμφανίζονται, δεν ξεπερνούν τα 500 m³/ώρα. Δεδομένου ότι λειτουργία τους είναι περίπου 5 μήνες το χρόνο, υπολογίζεται η ετήσια εκροή σε 0-2*10⁶ m³/year.

4.2 Εκμετάλλευση αλλουβιακών υδροφορέων

Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί, μαζί με τους καρστικούς, αποτελούν τους σημαντικότερους υδροφορείς του ελληνικού χώρου. Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί είναι χερσαία ιζήματα που αποτέθηκαν πρόσφατα και διακρίνονται σε αλλουβιακούς κώνους, πλευρικά κορήματα και αλλουβιακές πεδιάδες. Στην αργολική πεδιάδα συναντώνται όλοι οι τυπικοί αλλουβιοί σχηματισμοί. Τα υδροφόρα στρώματα αποτέλεσαν προϊόν εκμετάλλευσης για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών. Ο τρόπος εκμετάλλευσης προσαρμόζεται με την πάροδο του χρόνου με βάση την ορθολογική διαχείριση υδατικών πόρων.

Τα υδροφόρα αυτά στρώματα είναι Νεογενούς και Τεταρτογενούς ηλικίας και αποτελούνται από κροκάλες, χαλίκια άμμους, και αργίλους. Λόγω της κοκκομετρίας των σχηματισμών παρουσιάζεται μεγάλη διακύμανση στις παροχές των γεωτρήσεων από 2-3m³/h έως πάνω από 150m³/h. Το μεγαλύτερο μέρος των καλλιεργειών εντοπίζονται πάνω σε αυτούς τους σχηματισμούς με αποτέλεσμα να είναι και οι περισσότεροι εκμεταλλεύσιμοι, μέσω των υδροληπτικών έργων που εντοπίζονται πάνω σε αυτούς.

Η εκμετάλλευση των αλλουβιακών υδροφορέων ήταν εντατική στην Αργολική πεδιάδα, αρχικά των ρηχών και αργότερα των βαθύτερων υδροφόρων στρωμάτων. Τα φρέατα εκμετάλλευσης κυμαίνονται από 3 έως 30m. Με την πάροδο του χρόνου ξεκίνησε η

εκμετάλλευση των υπό πίεση υδροφόρων στρωμάτων που παρουσιάζουν αρτεσιανισμό με την χρήση γεωτρήσεων. Στις αρχές του 1930 το Υπουργείο Γεωργίας προχώρησε στην ανόρυξη πέντε γεωτρήσεων, δύο στην περιοχή του Κουτσοποδίου και τρεις στην περιοχή της Νέας Κίου και ήταν όλες αρτεσιανές.

Κατά την μεταπολεμική περίοδο στις αρχές του 1950 ξεκίνησε η εντατική ανόρυξη των γεωτρήσεων στην περιοχή. Ο αριθμός των ανορυχθέντων γεωτρήσεων υπολογίζεται σε 15.000, ενώ σύμφωνα με στοιχεία της ΔΕΗ Αργολίδας υπολογίζεται από στο Αργολικό πεδίο λειτουργούν 5.000 γεωτρήσεις (Γιαννουλόπουλος, 2000). Ωστόσο η εντατική εκμετάλλευση προκάλεσε τη διείδυση του θαλασσινού νερού. Αυτό οδήγησε στην ανάγκη της συστηματικής παρακολούθησης τόσο της ποιότητας και της ποσότητας των υδάτων.

Τα τελευταία χρόνια τα αλλουβιακά υδροφόρα στρώματα δέχονται την θετική επίδραση του τεχνητού εμπλουτισμού που λαμβάνει χώρα στην περιοχή με σκοπό την αναβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού, ώστε να καλύπτεται μέρος των αρδευτικών αναγκών, αλλά και η ανάσχεση του φαινομένου της θαλάσσιας διείδυσης.

4.3 Εκμετάλλευση καρστικών υδροφορέων (ύδρευση/ άρδευση)

Τα διάφορα καρστικά συστήματα που εντοπίζονται επιφανειακά, υπόγεια, αλλά και υποθαλάσσια παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν. Στο δυτικό τμήμα εντοπίζεται ένα μεγάλης έκτασης μέτωπο όπου εντοπίζεται πλήθος πηγών μεγάλων παροχών, αλλά και μικρότερων παροχών μη αξιοποιήσιμων. Η εκμετάλλευση των καρστικών συστημάτων αφορά την διαδικασία της ύδρευσης, της άρδευσης, αλλά του τεχνητού εμπλουτισμού, με την χρήση των πηγών, αλλά και με την γεωτρήσεων μέσα στους καρστικούς υδροφόρους.

Στην περιφερειακή ενότητα Αργολίδας το ποσοστό που εκτιμάται ότι χρησιμοποιείται για την άρδευση είναι πολύ μεγαλύτερο από το ποσοστό του εθνικού μέσου όρου, καθώς αγγίζει το 92% των χρησιμοποιούμενων υδατικών πόρων. Σε αυτό το ποσοστό είναι αρκετά πιθανόν να μην συνυπολογίζονται οι τεράστιες ποσότητες που χρησιμοποιούνται την χειμερινή περίοδο για παγοπροστασία και αντλούνται αποκλειστικά από τα υπόγεια ύδατα. Τα συλλογικά αρδευτικά δίκτυα καλύπτουν μόνο το 15% των ετήσιων αναγκών που ανέρχονται σε $92 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, ενώ το υπόλοιπο 85% καλύπτεται από γεωτρήσεις, δηλαδή περίπου $80 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως. Παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχουν αξιόπιστοι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό του νερού που αντλείται για παγοπροστασία εκτιμάται πως πρόκειται για το 35% των αναγκαίων ποσοτήτων για άρδευση. Με βάση την ΚΥΑ Δ11/Φ16/8500/22-03-1991 (ΦΕΚ 174/Β'/26-03-1991) και το Π.Δ. 53/2002 (ΦΕΚ 43/Α'/7-3-2002) οι υδρευτικές ανάγκες υπολογίζονται σε $6,75 \times 10^6 \text{ m}^3$ ετησίως (Παναγιώτης Ντόντος, 2009)

Κατά την δεκαετία του 1960 δημιουργήθηκε ευρύτατο δίκτυο αρδευτικού σκοπού γύρω από της πηγές Κεφαλαρίου και Λέρνης. Η μεταφορά του νερού πραγματοποιείται χωρίς κάποιο επιπλέον ενεργειακό κόστος, καθώς η μεταφορά του νερού γίνεται με την βαρύτητα. Αργότερα, κατασκευάστηκε αρδευτικό δίκτυο το οποίο μετέφερε νερό στην περιοχή της Ασίνης, αξιοποιώντας την πηγή Κιβερίου. Η συλλογή νερού από την συγκεκριμένη πηγή συνδέεται με μία από τις λίγες περιπτώσεις έργου σύλληψης νερού από υποθαλάσσια καρστική πηγή (Ζύμης, 1990). Το 1970 κατασκευάστηκε το φράγμα του Ανάβαλου. Πρόκειται για ένα ημικυκλικό φράγμα με θυρίδες που ανοιγοκλείνουν, έτσι ώστε η στάθμη του νερού εντός του φράγματος να διατηρείται υψηλότερα από την απόλυτη στάθμη. Οι τέσσερις αντλίες που υπάρχουν δίνουν την δυνατότητα να αντλείται έως και $40.000 \text{ m}^3/\text{h}$.

Το πρωτεύον αρδευτικό δίκτυο του Ανάβαλου περιλαμβάνει, πλέον, αγωγούς που μεταφέρουν νερό μήκους 80km. Αποτελούνται στο σύνολό τους από ανοιχτούς τσιμεντένιους αγωγούς με τραπεζοειδή διατομή μήκους 35 km, ενώ οι υπόλοιποι αγωγοί είναι κλειστοί και τοποθετημένοι υπόγεια. Η κίνηση του νερού υποβοηθάται από δέκα αντλιοστάσια και τέσσερις λιμνοδεξαμενές συνολικής χωρητικότητας 76.000 m³. Για να ολοκληρωθεί η διακίνηση του νερού στους τελικούς χρήστες έχει δημιουργηθεί ένα δευτερεύον αρδευτικό δίκτυο με αγωγούς και κανάλια πολλών χιλιομέτρων αλλά και έξι μικρότερες λιμνοδεξαμενές με μέγιστη δυνατότητα αποθήκευσης 18 km³. Η άρδευση πραγματοποιείται με δύο τρόπους ανάλογα με το είδος του αγωγού που μεταφέρει το νερό. στους ανοιχτούς αγωγούς η άρδευση γίνεται με τον τρόπο της κατάκλισης, παρόλο που ξοδεύονται μεγαλύτερες ποσότητες νερού από αυτές που χρειάζονται. Όταν πρόκειται για κλειστούς υπόγειους αγωγούς η άρδευση πραγματοποιείται με άντληση από ειδικά στόμια. Η ανοιχτή διατομή του αγωγού του αρδευτικού δικτύου πέραν της μεθόδου κατάκλισης, επιφέρει γενικότερα απώλειες της τάξεως 40% σε σχέση με την αρχική αντληθείσα ποσότητα.

Παρά το γεγονός των εκτεταμένων αρδευτικών δικτύων για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, χρησιμοποιούνται συνδυαστικά με ιδιωτικές γεωτρήσεις, είτε σαν εναλλακτική λύση είτε για αντιπαγετική προστασία. Με την χρήση γεωτρήσεων εξυπηρετούνται και οι περιοχές που δεν υπάρχει ακόμα αρδευτικό δίκτυο. Ωστόσο δεν υπάρχουν έγκυρα στοιχεία για τις ενεργές ιδιωτικές γεωτρήσεις, εκτιμάται, όμως ότι ξεπερνούν τις 6.000 υδροληψίες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περιοχή μεταξύ των πηγών Κεφαλαρίου, Λέρνης και Κρόης, τα εσπεριδοειδή και οπωροφόρα δέντρα που καλύπτουν έκταση 17.500 στρέμματα αρδεύονται αποκλειστικά και μόνο από γεωτρήσεις παρόλο που περνά από εκεί το αρδευτικό δίκτυο.

Όσον αφορά την ύδρευση, από την δεκαετία του 1960 η πόλη του Ναυπλίου έχει εξασφαλίσει την κάλυψη των αναγκών της από την πηγή Κρόης ή Αμυμώνης, που βρίσκεται στην περιοχή του οικισμού Μύλων. Από το 1988 χρησιμοποιείται η πηγή της Λέρνης. Για την άντληση του νερού κατασκευάστηκαν δύο αντλιοστάσια με μέγιστη δυνατότητα άντλησης 600 m³/h και για την μεταφορά του υπόγειος αγωγός 13 km. Η διαχείριση του συστήματος γίνεται από την ΔΕΥΑ Ναυπλίου. Από την πηγή της Κρόης καλύπτονται και οι υδρευτικές ανάγκες των οικισμών Άριας και Πυργιώτικα και της περιοχής Ασίνης-Δρεπάνου-Τολού.

Η πόλη του Άργους μέχρι το 2003 χρησιμοποιούσε γεωτρήσεις με ακατάλληλο νερό, λόγω υψηλών συγκεντρώσεων σε νιτρικά. Μετέπειτα, άρχισε να χρησιμοποιεί την πηγή της Λέρνης για να καλύψει τις ανάγκες ύδρευσης. Το αντλιοστάσιο που εξυπηρετεί την υδροδότηση του Άργους έχει δυναμικότητα έως 500m³/h, ενώ η μεταφορά του νερού στην πόλη γίνεται με αγωγό μήκους 10km. Πλέον η ύδρευση καλύπτεται από τρεις υδρογεωτρήσεις που έχουν ανορυχθεί δυτικά τις πόλης μέσα στους καρστικούς ασβεστόλιθους του κρητιδικού, ενώ συμπληρωματικά χρησιμοποιείται η πηγή της Κρόης. Η ΔΕΥΑ Άργους διαχειρίζεται όλο το σύστημα. Οι υπόλοιπες κοινότητες καλύπτουν τις ανάγκες τους από υδρογεωτρήσεις που έχουν ανορυχθεί σε Τεταρτογενείς σχηματισμούς.

Η κατανάλωση του νερού ύδρευσης από την πηγή της Κρόης εκτιμάται ότι ανέρχεται σε 4*10⁶ m³/έτος. Το υπόγειο νερό, το οποίο προέρχεται από καρστικούς υδροφορείς συμπεριλαμβανομένου και τις γεωτρήσεις εντός καρστικών σχηματισμών ανέρχεται σε 5-8*10⁶m³/έτος.

4.4 Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο

Την δεκαετία του '50 ο νομός Αργολίδας παρουσίασε ραγδαία αύξηση της γεωργίας. Ωστόσο δεν υπήρχε ο κατάλληλος σχεδιασμός και προοπτική για το μέλλον με αποτέλεσμα οι υδατικοί πόροι να υποστούν σημαντική ποσοτική και ποιοτική υποβάθμιση. Οι επιπτώσεις της θαλάσσιας διεύδυνσης έγιναν αισθητές στις καλλιέργειες στο τέλος τις ίδιας δεκαετίας, στο ανατολικό τμήμα της Αργολικής πεδιάδας και ιδιαίτερα γύρω από την πόλη του Ναυπλίου και στην περιοχή της Ασίνης-Δρεπάνου και Ιρίων. Προκειμένου να σταματήσει η επιβάρυνση στους υδατικούς πόρους εφαρμόστηκε, αρχικά μια σειρά πειραματικών εφαρμογών τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο, αλλά και την πεδιάδα της Ασίνης-Δρεπάνου. Το 1990 μέχρι το 1996 ξεκίνησε η συστηματική εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού αρχικά στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος του Γ.Π.Α και ακολούθως από την Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων Αργολίδας έως και το 2010. Πλέον το έργο εκτελείται από την Περιφέρεια Πελοποννήσου.

4.4.1 1^η Φάση εμπλουτισμού

(Γιαννούλας Ε., Ζύμης Α.2009)

Την περίοδο 1964 έως 1968 τόσο στην περιοχή της Αργολίδας . αλλά και σε όλο τον ελληνικό χώρο εφαρμόστηκαν συστηματικά πειράματα τεχνητού εμπλουτισμού. Οι περιοχές στις οποίες δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή είναι η περιοχή του Πολυγώνου, Αγίου Αδριανού Ασίνης και Δρεπάνου, καθώς είναι αυτές στις οποίες παρατηρήθηκαν οι εντονότερες συνέπειες λόγω της υφαλμύρωσης. Ο Α. Πουλοβασίλης έχοντας παρακολουθήσει την περιοχή σχεδίασε τα πειράματα που εφαρμόστηκαν με την βοήθεια του γεωλόγου κ. Θάνο. Από την εφαρμογή των πειραμάτων προέκυψαν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την απορρόφηση του νερού εμπλουτισμού, αλλά και την ποιοτική και ποσοτική αναβάθμιση. Για την εφαρμογή 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 τοιχώματα τους.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός που εφαρμόστηκε το 1964 και ξεκίνησε τον Μάιο είχε μικρή διάρκεια. Αυτό συνέβη λόγω των χρήσεων της πηγής του Κεφαλαρίου κατά τους εαρινούς μήνες για άρδευση με αποτέλεσμα να υπάρξει έλλειψη νερού. Επαναλήφθηκε το Φεβρουάριου του 1965, όπου διήρκησε για 3 μήνες περίπου. Το 1966 ο εμπλουτισμός ξεκίνησε και πάλι τον Φεβρουάριο είχε διάρκεια για 60 μέρες, ωστόσο το νερό και πάλι δεν ήταν αρκετό να καλύψει την απορροφητική ικανότητα των φρεάτων.

Από το Δεκέμβριο του 1966 μέχρι τον Απρίλιο του 1967 ο εμπλουτισμός επαναλήφθηκε για 120 μέρες με δαπάνες του ΤΟΕΒ του Υπουργείου Γεωργίας. Κατά την διάρκεια του εμπλουτισμού τα φρέατα εφαρμογής του δεν ήταν σταθερά κατά την διάρκεια της διαδικασίας, αλλά συνεχώς άλλαζαν. Τέλος, την άνοιξη του 1968 ο ΤΟΕΒ επανέλαβε τον τεχνητό εμπλουτισμό σε επίπεδο εφαρμογής. Σε αυτή την περίπτωση πριν την έναρξη του εμπλουτισμού έγινε μέτρηση τόσο στις στάθμες, όσο και στις συγκεντρώσεις των χλωριδίωντων

στα φρέατα εμπλουτισμού και παρατηρήσεων. Κατά την διάρκεια του εμπλουτισμού καταγραφόταν τακτικά η παροχή στα φρέατα, οι στάθμες και η συγκέντρωση των χλωριόντων σε όλο το δίκτυο.

Οι συνολικές ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν για τεχνητό εμπλουτισμό τα έτη 1965, 1966 και 1967 ήταν αντίστοιχα 1.160.000, 745.000 και 1.400.000 m³. 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.

4.4.2 2^η Φάση εμπλουτισμού

(Γιαννούλας Ε., Ζύμης Α.2009)

Η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων που έλαβε χώρα στην Αργολική πεδιάδα από το 1968 έως και το τέλος της δεκαετίας του '80, προκάλεσε προώθηση του μετώπου υφαλμύρωσης έως τα όρια της περιοχής τους Κουρτακίου, Πυργέλας, Ηραίου και Αγίας Τριάδας, ενώ μέτωπα θαλάσσιας διείσδυσης εμφανίστηκαν και στο βορειοανατολικό τμήμα του πεδίου. η στάθμη του υπόγειου νερού στο κεντρικό και νότιο τμήμα της πεδιάδας έφτασε και έως 50 m κάτω από το απόλυτο ύψος στάθμης. Σε κάποιες περιοχές η ολική πτώση στάθμης από μετρήσεις του 1964 και 1990 άγγιξε τα 70 με 80m, με αποτέλεσμα μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων να γίνουν ανενεργές λόγω στείρευσης, ενώ δημιουργήθηκε μεγάλο πρόβλημα με την άρδευση των καλλιεργειών.

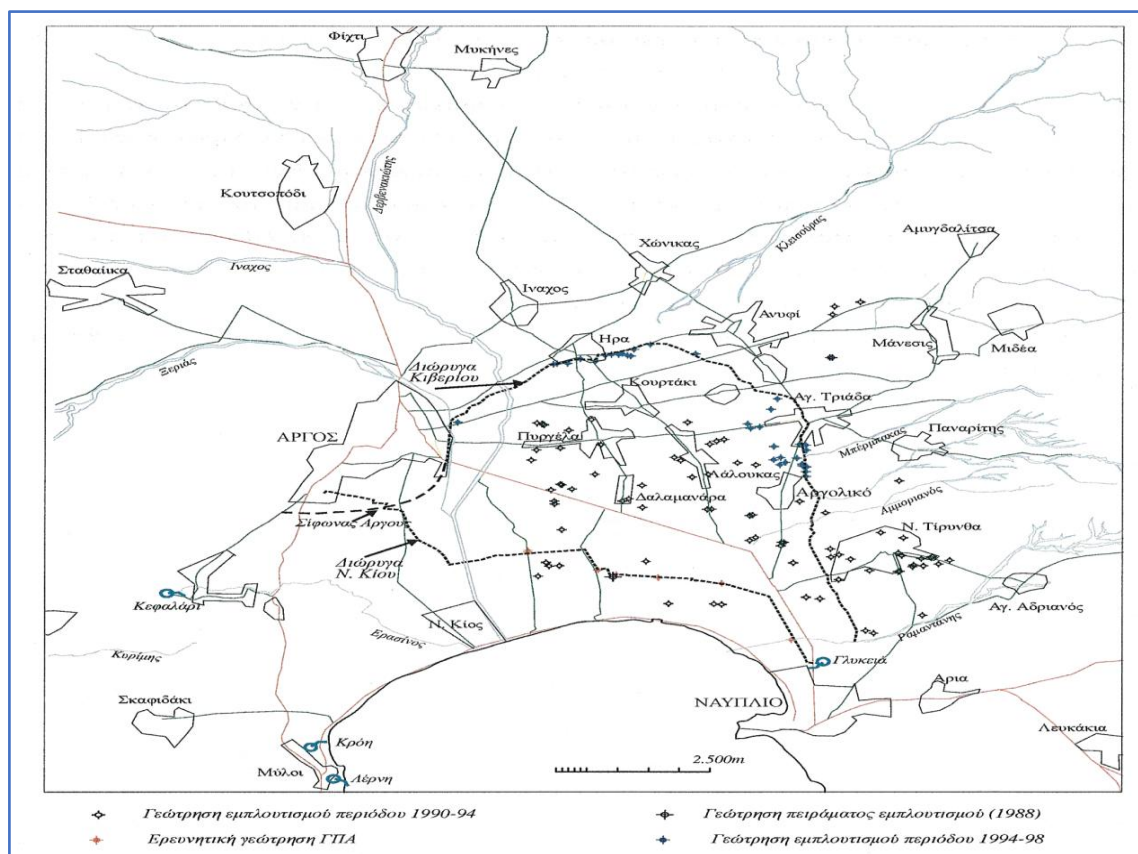
Η νομαρχία Αργολίδας το 1990 πιεζόμενη από την ιδιαίτερα δυσμενή κατάσταση που επικρατούσε για την αδυναμία κάλυψης των αρδευτικών αναγκών και λαμβάνοντας υπόψη παράλληλα πορίσματα από αντίστοιχο ερευνητικό πρόγραμμα (Πουλοβασίλης, 1998), υιοθέτησε τον τεχνητό εμπλουτισμό ως μέτρο επανόρθωσης της υφιστάμενης κατάστασης. Αρχικά, η εφαρμογή έγινε σε 130 ιδιωτικές γεωτρήσεις και φρέατα σε μια ευρύτερη ζώνη σε σχέση με την περιοχή εφαρμογής της 1^{ης} 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.

Η διώρυγα της Νέας Κίου τροφοδοτούσε τις γεωτρήσεις και τα φρέατα με το νερό από την πηγή Κεφαλαρίου, το οποίο είχε άριστη ποιότητα. Η διοχέτευση του νερού από την διώρυγα προς τις γεωτρήσεις και τα φρέατα γινόταν με τη λειτουργία αντλιοστασίων και τα αρδευτικά δίκτυα. Το πρόγραμμα του εμπλουτισμού έως το 1994 πραγματοποιούνταν κατά τους χειμερινούς μήνες.

Με την κατασκευή της νέας διώρυγας της Κιβερίου, την άνοιξη του 1994 εφαρμόστηκε ο τεχνητός εμπλουτισμός και σε γεωτρήσεις που βρίσκονταν εκατέρωθεν ης διώρυγας με μεγάλες ποσότητες νερού να διοχετεύονται στους υπόγειους υδροφόρους. Έκτοτε ο εμπλουτισμός πραγματοποιούνταν κατά κύριο λόγο από τη νέα διώρυγα Κιβερίου σε παρακαίμενες από αυτή γεωτρήσεις με φυσική ροή και αναρρόφηση νερού από τη διώρυγα (Σχήμα 35).

Τα ενθαρρυντικά αποτελέσματα του τεχνητού εμπλουτισμού σε συνδυασμό με την ανάγκη αύξησης της δυναμικότητας των υπογείων υδάτων της περιοχής οδήγησε κάποιους

συνεταιρισμούς στην απόφαση ανόρυξης 10 γεωτρήσεων που θα έχουν μοναδικό σκοπό τον εμπλουτισμό. Οι γεωτρήσεις αυτές διανοίχθηκαν κατά μήκος της διώρυγας Κιβερίου στις περιοχές των οικισμών Ήρας, Κουρτακίου και Αγίας Τριάδας. Αυτό έδωσε την δυνατότητα της αύξησης της τεχνητής τροφοδοσίας των υδροφόρων σχηματισμών. Παράλληλα, είχε στηθεί ένα εκτεταμένο δίκτυο παρακολούθησης ποιοτικών και ποσοτικών διακυμάνσεων, για την σωστή εκτίμηση της κατάστασης και τα οφέλη του τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή, αλλά και τον προσδιορισμό υδραυλικών χαρακτηριστικών των υδροφόρων.



Σχήμα 35: Θέσεις γεωτρήσεων εμπλουτισμού για την περίοδο 1990-98 (Πουλοβασίλης κ.α., 2002)

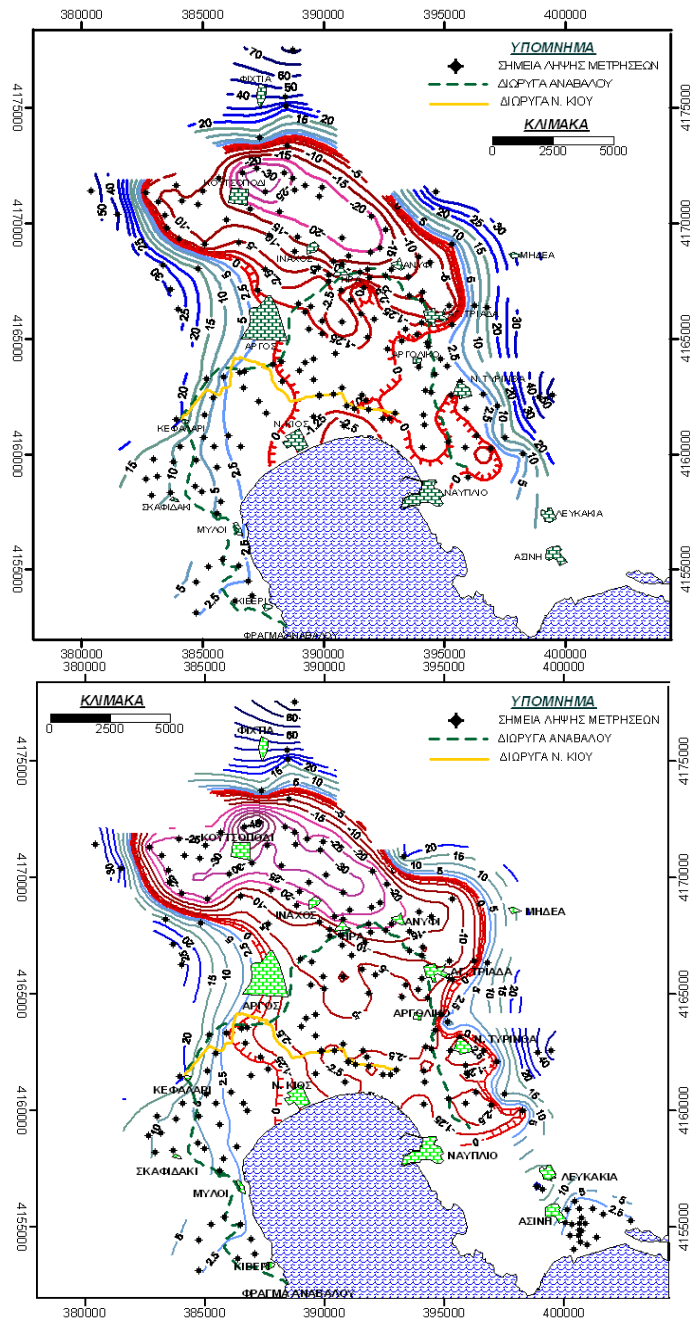
4.4.3 Εφαρμογή εμπλουτισμού Ιανουαρίου-Απριλίου 2009

(Γιαννούλας Ε., Ζυμής Α.: «Εκθεση εφαρμογής Τεχνητού Εμπλουτισμού στις περιοχές Αργολικού Πεδίου & Ασίνης – Δρεπάνου. Ιανουάριος – Απρίλιος 2009»)

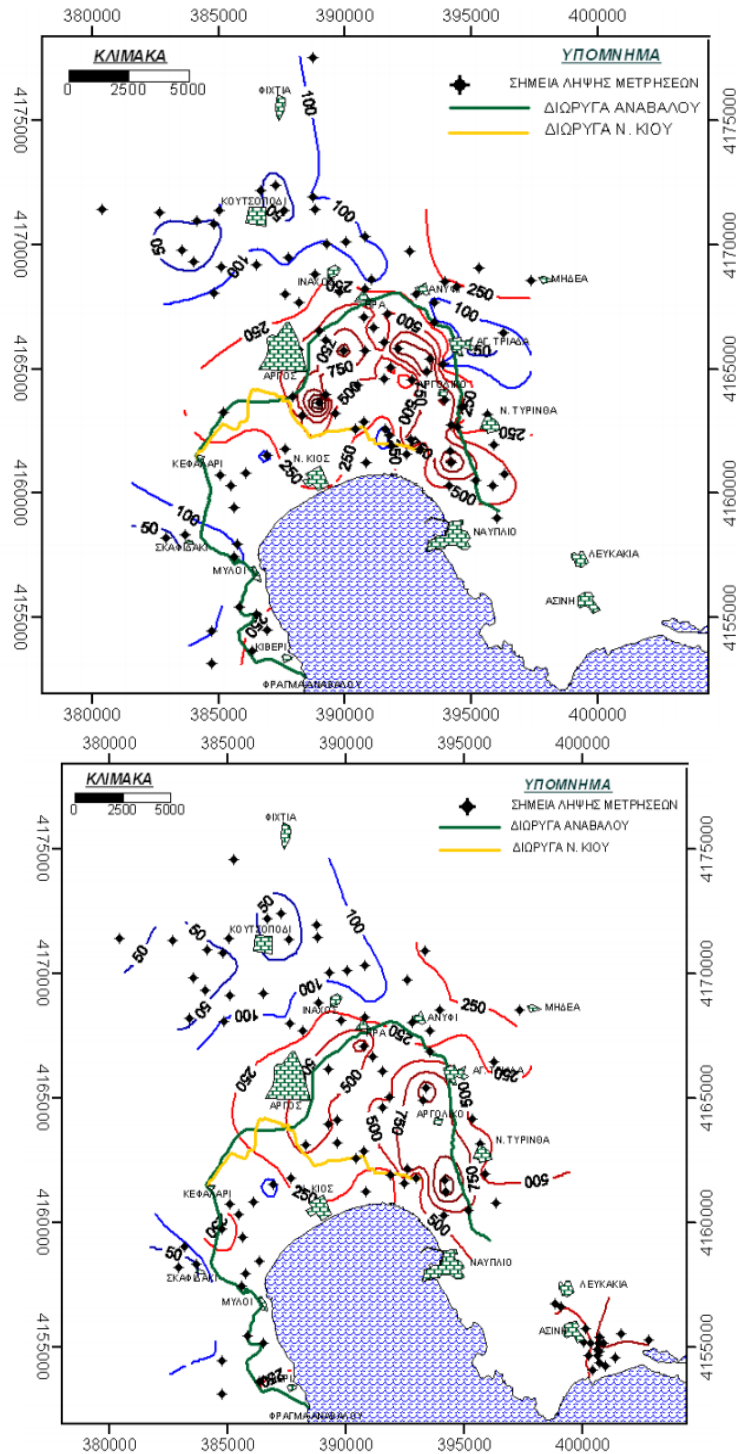
Κατά την περίοδο Ιανουαρίου 2009 μέχρι τον Απρίλιο του 2009 εφαρμόστηκε ένα έργο τεχνητού εμπλουτισμού στις περιοχές του Αργολικού πεδίου και Ασίνης- Δρεπάνου, με την οποία έγινε μεταφορά νερού άριστης ποιότητας από τις πηγές Κεφαλαρίου μέσω των υπάρχοντων αρδευτικών υποδομών. Η επιφάνεια των καλλιεργειών μεταξύ του Άργους και του Ναυπλίου είναι 95.000 στρέμματα, τα οποία στο σύνολό τους είναι αρδευόμενα. Αντίστοιχα, η

περιοχή της Ασίνης-Δρεπάνου καλύπτει 13.000 στρέμματα. Στις δύο περιοχές οι καλλιεργούμενες εκτάσεις καλύπτονται από εσπεριδοειδή με μέση ανάγκη σε νερό άρδευσης $700 \text{ m}^3/\text{χρόνο}/\text{στρέμμα}$, οι εκτιμώμενες ανάγκες σε νερό είναι περίπου $76.000.000 \text{ m}^3$ νερού, από τα οποία περίπου $15.000.000 \text{ m}^3$ καλύπτονται από το Φράγμα Αναβάλου και τα υπόλοιπα $61.000.000 \text{ m}^3$ από τα υπόγεια νερά. Για την αναβάθμιση της ποιότητας του νερού του Αναβάλου γίνεται ανάμειξη με νερό αρίστης ποιότητας από την πηγή κυρίως του Κεφαλαρίου.

Το έργο αφορούσε τον Τεχνητό Εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων σχηματισμών του Αργολικού Πεδίου και της περιοχής Ασίνης - Δρεπάνου κατά τους υγρούς μήνες, με χρήση νερού πρωτίστως από την πηγή Κεφαλαρίου και δευτερευόντως από την πηγή της Λέρνης. Η ποιότητα των υδάτων σε αυτές τις πηγές ικανοποιούν τα όρια ποσιμότητας και γι αυτό το λόγο επιλέχθηκαν. Η διάθεση του νερού πραγματοποιήθηκε μέσω υφιστάμενες αρδευτικές υποδομές. Συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκαν 91 γεωτρήσεις που είχαν βάθος από 60-80m, 3 φρέατα βάθους 3-15m στον 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 Αμαριανού. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες ποσότητες νερού για το Αργολικό πεδίο ήταν $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ και $4,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ 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.



Σχήμα 36: Πιεζομετρία Ιανουαρίου 2009 (πριν την εφαρμογή του εμπλουτισμού) και Απριλίου 2009 (μετά την εφαρμογή του εμπλουτισμού)(Γιαννούλας Ε., Ζύμης Α.,2009)



Σχήμα 37: Ισοχλώριες καμπύλες Ιανουαρίου 2009 (πριν την εφαρμογή του εμπλουτισμού) και Απριλίου 2009 (μετά την εφαρμογή του εμπλουτισμού)(Γιαννούλας Ε., Ζύμης Α.,2009)

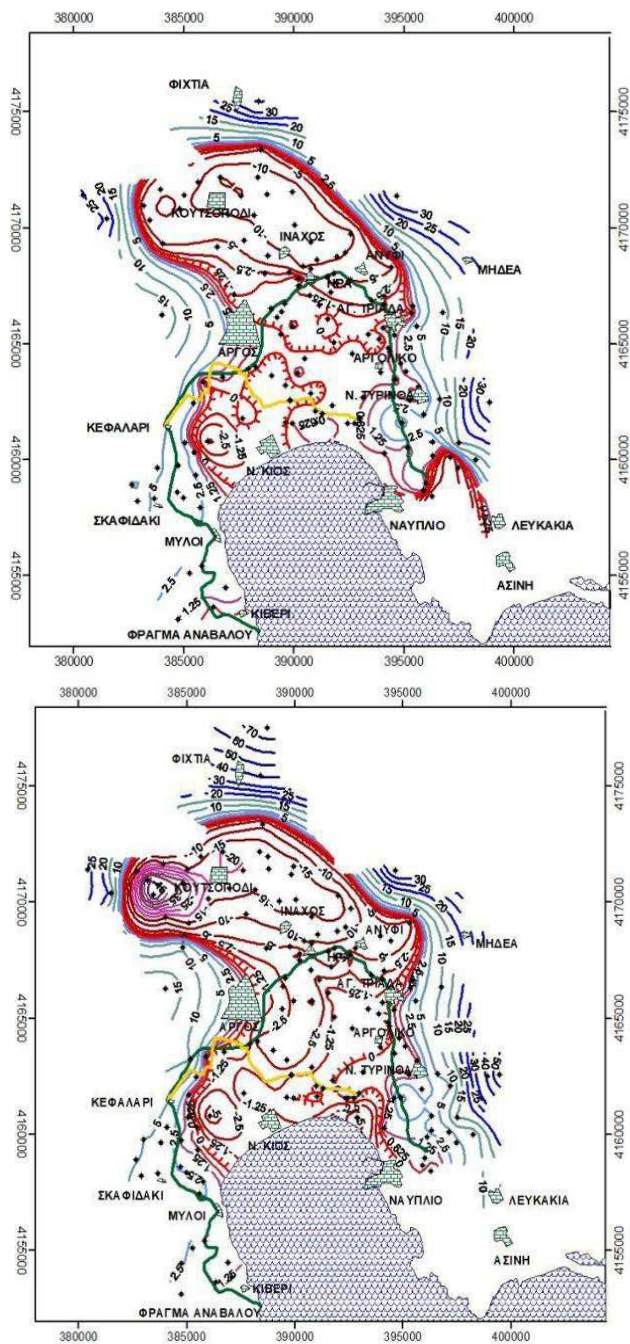
Τα αποτελέσματα της εφαρμογής ικανοποίησαν την πλειονότητα των στόχων που τέθηκαν πριν την έναρξη του έργου. Στο σχήμα 36 παρατηρείται σημαντική βελτίωση της πιεζομετρίας μετά το τέλος της εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού. Βελτίωση παρατηρήθηκε, ωστόσο και στην συγκέντρωση των χλωριώντων αλλά μικρότερης κλίμακας σε

σχέση με την ποσοτική αναβάθμιση του υδροφορέα (Σχήμα 37). Γενικότερα, η απομάκρυνση των αλάτων από τα νερά είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία.

4.4.4 Εφαρμογή εμπλουτισμού Φεβρουάριο- Μάρτιο 2017,

(Γιαννούλας Ε.: «Έκθεση εφαρμογής Τεχνητού Εμπλουτισμού στις περιοχές Αργολικού Πεδίου & Ασίνης – Δρεπάνου Φεβρουάριος-Μάρτιος 2017)

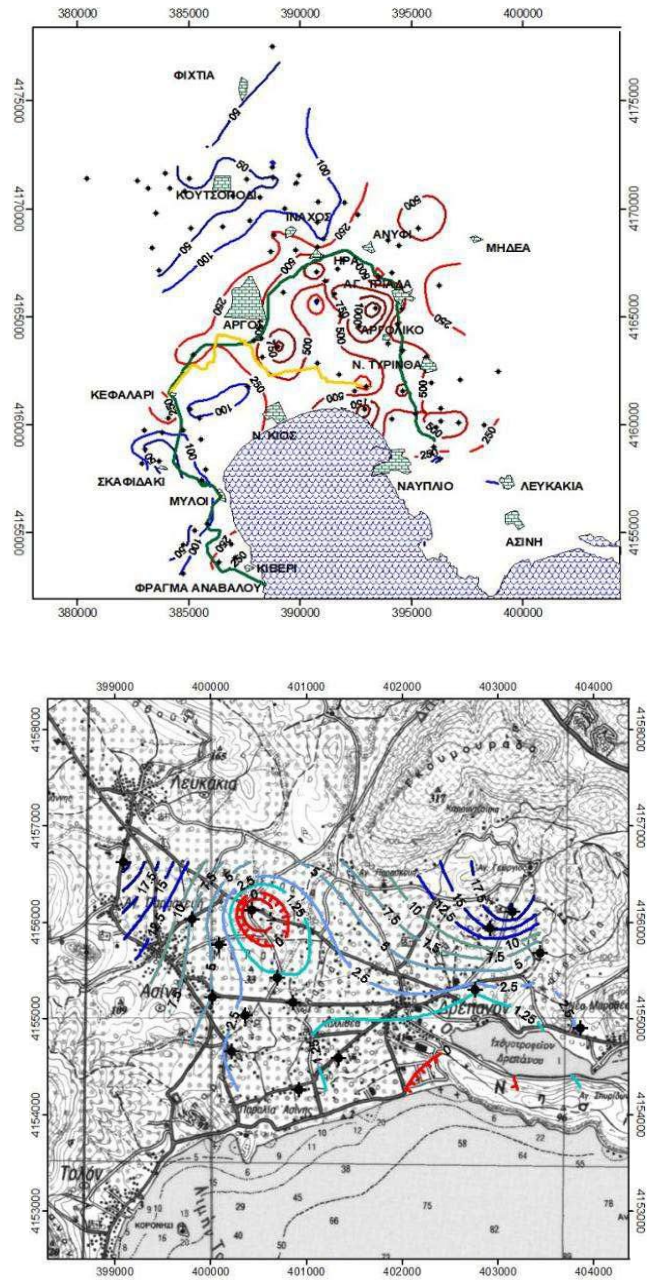
Η περιοχή εφαρμογής του έργου ορίστηκε με βάση περιβαλλοντικούς όρους από Ήρα έως Αργολικό κατά μήκος της διώρυγας του Αναβάλου, την περιοχή Πουλακίδας-Μάνεση, Αμαριανού και Ασίνης-Δρεπάνου σε συνεργασία της Περιφέρειας Πελοποννήσου και Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων της περιοχής. Για την εφαρμογή του 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 $2,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, όπως υπολογίστηκε από εγκατεστημένους ηλεκτρονικούς σταθμηγράφους.



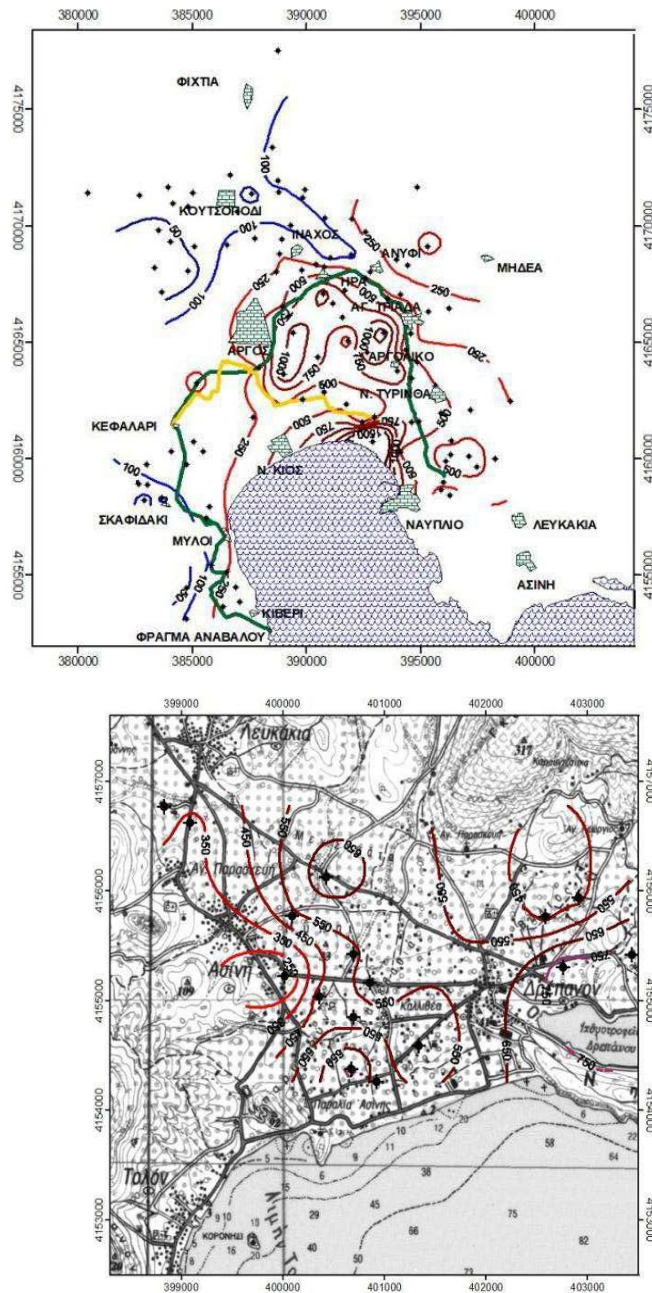
Σχήμα 38: Πιεζομετρία εφαρμογής εμπλουτισμού Δεκεμβρίου 2016 (πριν την εφαρμογή του εμπλουτισμού) και Απριλίου 2017 (μετά την εφαρμογή του εμπλουτισμού) (Γιαννούλας, 2017)

Από την απεικόνιση της πιεζομετρίας φαίνεται πως η στάθμη στην περιοχή του Αργολικού πεδίου είναι σταθερά κάτω από το απόλυτο υψόμετρο της θάλασσας. Το Δεκέμβριο του 2016 το ελάχιστο ύψος ήταν -58m, ενώ τον Απρίλιο του 2017 μετά την εφαρμογή του εμπλουτισμού στο τέλος της υγρής περιόδου η στάθμη έφτασε μέχρι -15,3m. Όσον αφορά την ποιότητα των υδάτων παρατηρείται συνήθως μέτρια επιβάρυνση. Στην περιοχή της Ασίνης- Δρεπάνου φαίνεται αξιόλογη βελτίωση της ποιότητας του νερού με την εφαρμογή του εμπλουτισμού (Σχήμα 39 & 40). Παρόλα αυτά φαίνεται να παρουσιάζεται μεγάλη συσχέτιση

ανάλογα με την ποσότητα νερού αλλά και το είδος του υδροφόρου που εμπλουτίζεται.



Σχήμα 39: Ισοχλωρικές καμπύλες Αργικού πεδίου και Ασίνης -Δραπετσών Δεκεμβρίου 2016(πριν την εφαρμογή του εμπλουτισμού)(Γιαννούλας Ε.,2017)



Σχήμα 40: Ισοχλωρικές καμπύλες Αργολικού πεδίου και Ασίνης-Αρεόπου Απριλίου 2017(μετά τη εφαρμογή του εμπλουτισμού)(Γιαννοπούλας Ε., 2017)

5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

5.1 Υδρογεωλογικά ομοιώματα

Τα υδρογεωλογικά ομοιώματα (μοντέλα) αποτελούν ένα εργαλείο, μέσω του οποίου προσεγγίζεται ένα φαινόμενο χωροχρονικά μεταβαλλόμενο. Τα μοντέλα υπόγειας ροής έχουν

την δυνατότητα να προσομοιώνουν και να προβλέπουν συγκεκριμένες μετρήσεις και δραστηριότητες, ενώ παράλληλα βοηθούν στο σχεδιασμό και την αποτίμηση διαφόρων σεναρίων και στρατηγικών. Τέλος, συμβάλλουν στην βελτιστοποίηση του διαχειριστικού πλαισίου των υδατικών πόρων. Τα υδρογεωλογικά μοντέλα διακρίνονται σε:

- Φυσικά μοντέλα, τα οποία αποτελούν πανομοιότυπα αντίγραφα συστημάτων υπόγειας ροής, τα οποία λαμβάνουν χώρα σε εργαστηριακό περιβάλλον.
- Αναλογικά μοντέλα, σύμφωνα με τα οποία η ροή των υπόγειων νερών περιγράφονται με μαθηματικές εκφράσεις και νόμους που παρουσιάζουν ομοιότητες με αυτά. Ωστόσο, βρίσκουν εφαρμογή μόνο στις υδραυλικές παραμέτρους και δεν αποτυπώνουν την κίνηση ρυπαντών του υπογείου νερού (Oude Essink, 2000)
- Μαθηματικά μοντέλα, έχουν ως στόχο την επίλυση διαφορικών εξισώσεων, τη γεωμετρία του συστήματος, τις οριακές του συνθήκες, όπως και τις αρχικές του συνθήκες που περιγράφουν την λειτουργία ενός υδροφορέα.

Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών είχε ως αποτέλεσμα την επικράτηση των μαθηματικών μοντέλων, όσον αφορά την εφαρμογή προσομοιώσεων που αφορούν την ροή του υπόγειου νερού. Η επίλυση των εξισώσεων πραγματοποιείται με τη χρήση αναλυτικών ή αριθμητικών μεθόδων. Οι αναλυτικές μέθοδοι αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο στον προσδιορισμό διαφόρων παραμέτρων, όπως η αποθηκευτικότητα και η μεταβιβαστικότητα ενός υδροφορέα και εφαρμογές προσομοιώσεις μονοδιάστατης ή δισδιάστατης ροής. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα των πρακτικών προβλημάτων που έχουν να κάνουν με την ανομοιογένεια την ανισοτροπία και τα ακανόνιστα γεωμετρικά όρια που συναντώνται σε πραγματικές συνθήκες οδήγησαν στην εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων, εφόσον δεν επαρκεί η αναλυτική λύση.

Οι αριθμητικές επιλύσεις των διαφορικών εξισώσεων χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν αρκετά προβλήματα υδρολογικής φύσεως, με την χρήση ψηφιακών υπολογιστών μεγάλης ταχύτητας. Η μέθοδος αυτή προσφέρει μια λογική επίλυση σύνθετων προβλημάτων (Faust and Mercer, 1980). Η διαδικασία επίλυσης ξεκινά με την διακριτοποίηση του πεδίου μελέτης. Στην συνέχεια πραγματοποιείται η μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων σε αλγεβρικές εξισώσεις πεπερασμένων διαφορών, των οποίων η επίλυση γίνεται με την βοήθεια H/Y.

Οι κυριότερες κατηγορίες μεθόδων επίλυσης είναι οι εξής:

1. Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών.

Με την μέθοδο αυτή γίνεται διακριτοποίηση του πεδίου μελέτης με την δημιουργία κανάβου ορθογωνικής μορφής και η επίλυση των εξισώσεων πραγματοποιείται επάνω στα σημεία του πλέγματος. Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών έχει πολύ καλή εφαρμογή σε προβλήματα δύο και τριών διαστάσεων, ενώ από αριθμητικής απόψεως συνιστά μια απλή, κατανοητή και εύκολα εφαρμόσιμη μέθοδο. Ωστόσο, η ορθογωνική μορφή του κανάβου αποτελεί δέσμευση και παράλληλα παρουσιάζει δυσκολία στην ακριβή αριθμητική διακριτοποίηση.

2. Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.

Το πεδίο εφαρμογής στην περίπτωση αυτή αντιμετωπίζεται σαν υποσύνολο περιοχών (πεπερασμένα στοιχεία). Η επίλυση των εξισώσεων γίνονται στο εσωτερικό κάθε υποσυνόλου

με την βοήθεια του λογισμικού των διαφορών ή με τη μέθοδο σταθμισμένων υπολοίπων. Με την συγκεκριμένη μέθοδο επιτυγχάνεται η φυσική αναπαράσταση των ακανόνιστα γεωμετρικά ορίων των πεδίων και οι οριακές συνθήκες, η ακριβής προσομοίωση της ετερογένειας και ανισοτροπίας των ροών, αλλά και περιοχών με έντονες μεταβολές του φορτίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία στη διακριτοποίηση του πεδίου και των ορίων του. Το μειονέκτημα της έγκειται στο γεγονός ότι οι τελικοί αλγόριθμοι που προκύπτουν είναι αρκετά περίπλοκοι και δύσκολα μεταφέρονται σε προγραμματιστικό περιβάλλον.

3. Μέθοδος οριακών στοιχείων.

Η μέθοδος των οριακών στοιχείων παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις άλλες μεθόδους. Αυτά είναι:

- Τα ακριβής αποτελέσματα στο εσωτερικό του πεδίου
- Η χαρακτηριστική απλότητα εισαγωγής δεδομένων του φυσικού προβλήματος,
- Το μικρό μέγεθος αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτουν μετά την διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων
- Η αντιμετώπιση ενός δισδιάστατου προβλήματος ως μονοδιάστατο.

Η δυσκολία περιγραφής ετερογενών πεδίων και η πολυπλοκότητα στην επίλυση μη μόνιμων ροών συνιστούν τα δύο σημαντικότερα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου.

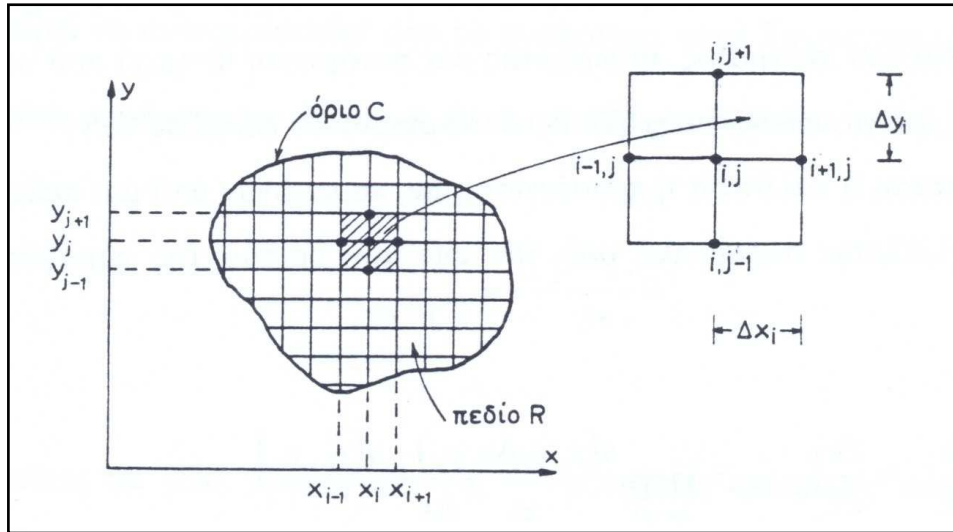
Γενικότερα τα αριθμητικά μοντέλα διακρίνονται σε μοντέλα πρόβλεψης, ερμηνείας και ανάλυσης (Ράπτη, 1995)

5.2 Εισαγωγή στον κώδικα MODFLOW

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Καλλιώρας, 2015, Βουδούρης, 2013)

Ο κώδικας MODFLOW (Modular three dimensional difference groundwater flow model) της Αμερικανικής Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (USGS) είναι ευρύτατα διαδεδομένος και χρησιμοποιούμενος ως προς την διερεύνηση και ερμηνεία της ροής του υπόγειου νερού. Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου συνιστά η συμβατότητά του με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π.), όπως και η δυνατότητα προσομοίωσης σταθερής, αλλά και μεταβαλλόμενης ροής για πρακτικές εφαρμογές σε τρεις διαστάσεις.

Το πρόγραμμα βασίζεται στην επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, που προκύπτει από την εξίσωση της μάζας και του νόμου Darcy. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών που επιλύεται στο κέντρο των κυψελίδων του καννάβου (Σχήμα 41).



Σχήμα 41: Τυπική μορφή καννάβου πεπερασμένων διαφορών (Λατινόπουλος, 1986)

Η αρχή του προγράμματος MODFLOW περιλαμβάνει ένα σύνολο μαθηματικών απλοποιήσεων κι υποθέσεων που αποβλέπουν στην μετατροπή των πραγματικών δεδομένων του υδρογεωλογικού συστήματος σε ένα μαθηματικό σύστημα στον υπολογιστή. Κάποιες από τις βασικές αρχές του κώδικα αυτού αποτελούν (Oude Essink, 2000) (Καλλιώρας, 2015):

- Το υδρογεωλογικό σύστημα δύναται να προσομοιωθεί για σταθερή κατάσταση και συνθήκες μεταβαλλόμενης ροής,
- Το μαθηματικό υδρογεωλογικό σύστημα εφαρμόζει και αξιοποιεί την αρχή των πεπερασμένων διαφορών για ένα block-center,
- Η ροή υφίσταται εντός των ορίων του μοντέλου,
- Το πορώδες μέσο που πρόκειται να προσομοιωθεί δύναται να είναι ομοιογενές,
- Το πορώδες μέσο δύναται να είναι ανισότροπο,
- Το σύστημα ροής ενδέχεται να έχει ακανόνιστο σχήμα, περικλείονται ελεύθερο ή μερικώς υπο-πίεση υδροφόρο, καθώς και συνδυασμό των παραπάνω,
- Η ροή μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

Η λειτουργία του μοντέλου βασίζεται σε μια σειρά από παραδοχές, όπως ότι η πυκνότητα του νερού είναι σταθερή, η κίνηση του υπόγειου νερού λαμβάνει χώρα και στις τρεις διαστάσεις ενός καννάβου με ορθογωνικά κελιά, ενώ παράλληλα οι ιδιότητες κάθε κυψελίδας θεωρείται ότι κατανομονται ομοιόμορφα και ομοιογενώς.

Η τρισδιάστατη κίνηση των υπόγειων νερών υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής σε ανισότροπο και ετερογενούς πορώδους μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση (Anderson & Woessner, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(T_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_y \frac{\partial h}{\partial t}$$

Όπου T_x, T_y, T_z = οι τιμές της μεταβιβαστικότητας κατά μήκος των x, y και z αξόνων συντεταγμένων, οι οποίες θεωρούνται να είναι παράλληλοι προς τους κύριους άξονες της μεταβιβαστικότητας (L^2T^{-1}).

h = το υδραυλικό φορτίο (L)

W = η παροχή ανά μονάδα χρόνου που προέρχεται από εισροές ή εκροές του νερού (T^{-1}).

S_y = η ειδική απόδοση του πορώδους μέσου και

t = ο χρόνος (T).

Η παραπάνω εξίσωση συνδυαζόμενη με τον προσδιορισμό της ροής, των αρχικών συνθηκών της πιεζομετρικής στάθμης στα όρια του υδροφόρου συστήματος, αποτελεί την μαθηματική αναπαράσταση του μοντέλου ροής. Η επίλυση του πραγματοποιείται με την αριθμητική μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών κατά την οποία γίνεται χωρική διακριτοποίηση. Το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την συγκεκριμένη αντικαθίσταται από ένα διακριτό πλέγμα που αποτελείται από επιμέρους κελιά και το μέγεθός τους καθορίζει την ακρίβεια του μοντέλου (Harbaugh, 2004). Το περιεχόμενο κάθε κελιού θεωρείται ομοιογενές κατά σειρά και κατά στήλη και ορίζονται από τον ερευνητή. Οι τιμές του αντιπροσωπεύουν τις ιδιότητες του υδροφορέα, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, οι οριακές συνθήκες, οι αρχικές συνθήκες καθώς και τις πιέσεις που εφαρμόζονται στο σύστημα, έτσι ώστε να επιτευχθεί η αναπαράσταση των πραγματικών συνθηκών υπαίθρου.

Οι οριακές συνθήκες αποτελούν βασική συνιστώσα για την κατάρτιση ενός μοντέλου και προσδιορίζουν με μαθηματικό τρόπο την εξαρτημένη μεταβλητή (φορτίο) ή το παράγωγο της εξαρτημένης μεταβλητής (ροή), στα όρια της περιοχής έρευνας. Οι βασικές μαθηματικές συνθήκες οριακών συνθηκών είναι (Panagopoulos, 1996):

- Συνθήκη Dirichlet ή συνθήκη σταθερού φορτίου, στην οποία δίνεται το φορτίο στα όρια της περιοχής μελέτης,
- Συνθήκη Neumann ή συνθήκη σταθερής ροής στην οποία δίνεται η ροή κατά μήκος των ορίων της περιοχής μελέτης,
- Συνθήκη Cauchy ή συνθήκη μεταβαλλόμενης ροής συναρτήσει σταθερού φορτίου και αφορά την ροή κατά μήκος των ορίων, υπολογιζόμενη από μια τιμή του φορτίου.

Το πρόγραμμα MODFLOW για την επίλυσή του χρησιμοποιεί την επαναληπτική μέθοδο. Χρησιμοποιούνται ουσιαστικά, τρεις διαφορετικές μέθοδοι: της Ισχυράς Πεπλεγμένης, της Σταδιακής υπερχαλάρωσης των κόμβων και της Υπό προϋποθέσεις συζυγών κλίσεων. Το πακέτο της Ισχυράς Πεπλεγμένης μεθόδου συνιστά μια μέθοδο επίλυσης που προκύπτει από μια σειρά επαναληπτικών επιλύσεων και καλύπτει γραμμικές, αλλά και μη γραμμικές συνθήκες ροής. Το πακέτο της Σταδιακής υπερχαλάρωσης των κόμβων αφορά κυρίως μεγάλα συστήματα γραμμικών εξισώσεων. Κατά την επίλυσή του το πλέγμα χωρίζεται σε κάθετες φέτες, οι οποίες ομαδοποιούν τις εξισώσεις σε δύο διακριτές ομάδες, όπου η κάθε φέτα αντιστοιχεί σε μία ομάδα. Τέλος, το πακέτο συζυγών κλίσεων έχει στόχο την επίλυση ταυτόχρονων εξισώσεων που δημιουργούνται από το μοντέλο, προσεγγίζοντας την επίλυση σε δύο επίπεδα.

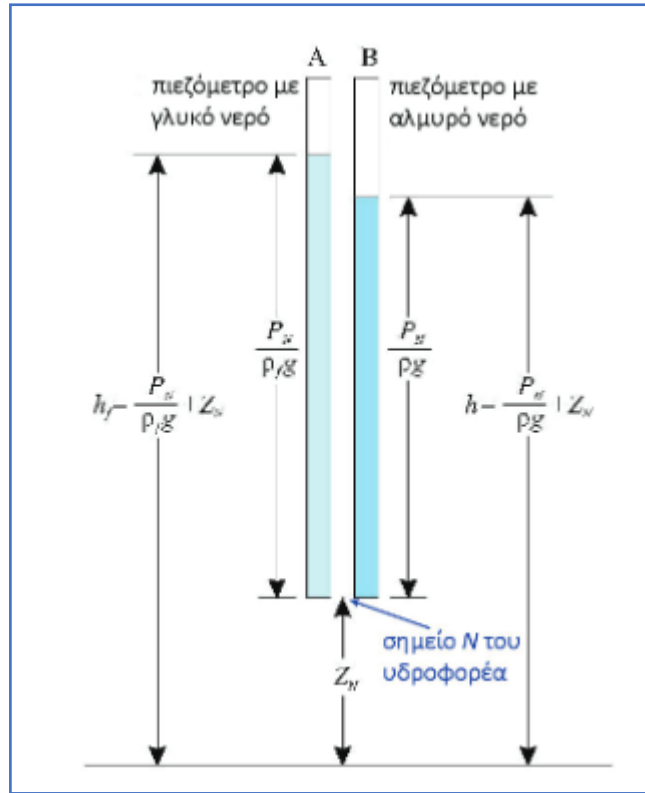
5.3 Εισαγωγή στον κώδικα SEAWAT

Ο κώδικας SEAWAT αποτελεί έναν συνδυασμό του κώδικα MODFLOW και του MT3DMS σε ένα ενιαίο πρόγραμμα με σκοπό την τρισδιάστατη προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού με μεταβολές στην πυκνότητά του. Ο κώδικας αυτός έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης ροής υπό την επιρροή διαφορών πυκνότητας βάσει μια σειράς τυποποιημένων προβλημάτων (Henry problem, Henry, 1964, Hydro coin problem, Konikow et al., 1997 and OECD, 1988, Elder problem, Elder, 1967), ενώ έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο αριθμό εργασιών για την προσομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης. Το πρόγραμμα ακολουθεί μια σπονδυλωτή δομή και αυτό διευκολύνει την εισαγωγή νέων δυνατοτήτων με την ελάχιστη τροποποίηση του πηγαίου κώδικα.

Ο κώδικας SEAWAT βασίζεται στο φορτίο του γλυκού νερού ή το ισοδύναμο φορτίο γλυκού νερού σε ένα περιβάλλον αλατότητας. Η κατανόηση του φαινομένου αυτού οδηγεί στην ανάπτυξη εξισώσεων ροής υπόγειου νερού μεταβλητής πυκνότητας, όπως και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της. Στην Εικόνα 3 απεικονίζεται περιγράφεται η ιδέα του ισοδύναμου φορτίου νερού. Τα δύο πιεζόμετρα περιέχουν το ένα γλυκό νερό και το άλλο αλμυρό, τα οποία έχουν διαφορετική πυκνότητα είναι εγκατεστημένα στο ίδιο σημείο N ενός υδροφορέα και δέχονται την ίδια πίεση του νερού των πόρων P_N . Η πίεση αυτή όταν εκφραστεί σε όρους υδραυλικού φορτίου για τα δύο αυτά ρευστά διαφορετικής πυκνότητας, οδηγεί στη σχέση μεταξύ του υδραυλικού φορτίου του υδροφορέα που χαρακτηρίζεται από υψηλή αλατότητα και του ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου γλυκού νερού:

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

- ρ και ρ_f (M/L^3) η πυκνότητα του αλμυρού νερού στον υδροφορέα και του γλυκού νερού, αντίστοιχα,
- h_f (L) το υδραυλικό φορτίο στη θέση N (Εικ. 3) για νερό πυκνότητας γλυκού νερού ρ_f ,
- h (L) το υδραυλικό φορτίο στη θέση N (Εικ. 3)
- Z (L) η απόσταση από το σημείο αναφοράς (Εικ. 3)



Εικόνα 2: Απεικόνιση ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου γλυκού και αλμυρού νερού (Ζιόγας, 2013 τροποποιημένο από Guo & Langevin, 2002)

Η εξίσωση της ροής ενός περιορισμένου υδροφορέα που είναι κεκλιμένος ως προς το επίπεδο των συντεταγμένων x, y , ξεκφράζεται από τη σχέση:

$$\frac{\partial}{\partial l} \left[\frac{\rho k_l}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial l} + \rho g \frac{\partial z}{\partial l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial m} \left[\frac{\rho k_m}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial m} + \rho g \frac{\partial z}{\partial m} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial n} \left[\frac{\rho k_n}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial n} + \rho g \frac{\partial z}{\partial n} \right) \right] = \rho S_\varphi \frac{\partial P}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \rho_s q_s$$

Όπου:

q_l, q_m, q_n οι ταχύτητες Darcy για τις τρεις διευθύνσεις

k_l, k_m, k_n η ειδική διαπερατότητα για τις τρεις διευθύνσεις

μ το δυναμικό ιξώδες

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

S η ειδική αποθηκευτικότητα

P η πίεση του ρευστού των πόρων

C η συγκέντρωση του διαλύματος

ρ_s η ποσότητα του νερού που προστίθεται ή αφαιρείται από το σύστημα μέσω πηγής/απαγωγής

q_s ο ρυθμός προσθήκης αφαίρεσης νερού από το σύστημα ανά μονάδα όγκου

θ το πορώδες

Η παραπάνω συνάρτηση λειτουργεί με την παραδοχή ότι το πορώδες μέσω είναι συμπιεστό.

Η εξίσωση της υπόγειας ροής επιλύεται με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Για την επίλυση της εξίσωσης χρησιμοποιούνται δύο τύποι πυκνότητας που μετατρέπουν την παροχή του όγκου σε παροχή μάζας και στον κώδικα του SEAWAT υπολογίζονται πριν από κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Οι άλλοι όροι της πυκνότητας είναι οι αριθμητικοί μέσοι όροι της πυκνότητας μεταξύ δύο διαδοχικών κελιών.

Η μεταφορά της μάζας ενός διαλύματος με το υπόγειο νερό, και συγκεκριμένα στην περίπτωση της θαλάσσιας διείσδυσης του διαλυμένου άλατος, το οποίο δεν υπόκεινται σε προσρόφηση ή χημική αποδόμηση για συνθήκες ίσης θερμοκρασίας εκφράζεται από την σχέση:

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

$i=1,2,3 \quad j=1,2,3$

C η συγκέντρωση του διαλυμένου άλατος

C_s η συγκέντρωση του διαλυμένου άλατος στο νερό που προστίθεται ή αφαιρείται από το σύστημα μέσω πηγής/ απαγωγής

q_s ο ρυθμός προσθήκης αφαίρεσης νερού από το σύστημα ανά μονάδα όγκου

D_{ij} ο τανυστής συντελεστών υδροδυναμικής διασποράς

q_i ταχύτητες Darcy

Η εξίσωση της μεταφοράς βρίσκει εφαρμογή τόσο σε περιπτώσεις ροής σταθερής πυκνότητας, όσο και ροή μεταβλητής πυκνότητας. Στην περίπτωση που εμφανίζεται ανισοτροπία ως προς τη διασπορά χρησιμοποιούνται η εγκάρσια, κατακόρυφη και διαμήκης διασπορά. Ο κώδικας SEAWAT χρησιμοποιεί για την επίλυσή της τις αριθμητικές μεθόδους του MT3DMS (Zheng and Wang, 1999). Ωστόσο για την επίλυσή της υπάρχει διαφορετική μέθοδος που εφαρμόζεται για καθένα από τους όρους της. Πιο συγκεκριμένα, για τους όρους της διασποράς και πηγής/ απαγωγής εφαρμόζεται η άρρητη μέθοδος GCG solver. Για τον όρο της μεταγωγής χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι της ρητής και άρρητης επίλυσης, οι μεικτές Eulerian- Lagrangian μέθοδοι και η 3^{ης} τάξης πεπερασμένων διαφορών ρητού σχήματος μέθοδος TVD.

Οι παραπάνω μέθοδοι παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και αδυναμίες που οδηγούν στην επιλογή ή απόρριψή τους, ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες μια εφαρμογής. Η μέθοδος ρητής και άρρητης επίλυσης είναι συντηρητική ως προς τη μάζα και μπορεί να επιλύσει με ακρίβεια προβλήματα όσον αφορά την διασπορά. Στην περίπτωση που κυριαρχεί η μεταγωγή εμφανίζεται σημαντικό σφάλμα λόγω μεγάλης αριθμητικής διασποράς. Η δεύτερη μέθοδος έχει την δυνατότητα επίλυσης της μεταγωγής χωρίς να παρουσιάζονται προβλήματα. Παρόλα αυτά ως προς την μάζα η επίλυση πολλές φορές οδηγεί σε αστάθεια και μεγάλο υπολογιστικό κόστος, αφού δεν αντιμετωπίζεται συντηρητικά, ιδιαίτερα όταν επικρατούν περίπλοκες οριακές

συνθήκες και μεγάλο αριθμό πηγών/απαγωγών. Η μέθοδοι 3^{ης} τάξης μειώνουν την αριθμητική διασπορά, ωστόσο σε μικρότερο βαθμό από την δεύτερη μέθοδο, λειτουργούν συντηρητικά ως προς τη μάζα, αλλά παρουσιάζουν μεγάλο υπολογιστικό κόστος.

Η χρονική διακριτοποίηση δεν εξαρτάται από το χρήστη, ο οποίος καθορίζει μόνο το πρώτο βήμα. Το κάθε βήμα εξαρτάται από την αριθμητική επίλυση που έχει επιλεγεί για την εξίσωση μεταφοράς και τα κριτήρια σταθερότητας και ακρίβειας της αριθμητικής επίλυσης. Οι οριακές συνθήκες είναι τριών τύπου, τύπου Dirichlet, Neumann και Cauchy, που χρησιμοποιούνται και στον κώδικα MODFLOW. Η ακριβής προσομοίωση της ακόρεστης ζώνης δεν είναι δυνατή. Ωστόσο, η προσέγγισή της γίνεται μέσα από τον έλεγχο του υδραυλικού φορτίου σε κάθε κελί και χρησιμοποιείται η μεταβολή του όγκου του νερού σε κάθε κελί, όπως και η ειδική αποθηκευτικότητα S_s ή ειδική απόδοση S_y , εάν η επιφάνεια της στάθμης βρίσκεται επάνω ή κάτω από την άνω έδρα του κελιού αντίστοιχα. Η στάθμη του νερού καθορίζει παράλληλα τα ενεργά και ανενεργά κελιά.

Ο κώδικας SEAWAT δύναται να προσομοιώσει ακτινική ροή σε μοντέλα δύο διαστάσεων, μόνο μέσα από κάποιες μετατροπές των υδραυλικών παραμέτρων, καθώς δεν έχει σχεδιαστεί για το σκοπό αυτό. Η δυνατότητα πύκνωσης των πεπερασμένων διαφορών του προγράμματος SEAWAT, παρέχει μια λεπτομερή χωρική διακριτοποίηση, η οποία ωστόσο δεν είναι εφαρμόσιμη σε τρισδιάστατη απεικόνιση λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους. Ο κώδικας MODFLOW-2005 και η έκδοση LGR παρέχει την δυνατότητα τοπικής πύκνωσης δημιουργώντας υπο-μοντέλα με λεπτομερέστερη πύκνωση εντός του αρχικού μοντέλου.

Τέλος, παρουσιάζει μια σειρά πλεονεκτημάτων που ελκύουν ένα χρήστη να το διαχειριστεί. Η δωρεάν διάθεση από την U.S.G.S και η χρήση του μέσω της εφαρμογής Visual MODFLOW, όπως και η δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων από περιβάλλον Excel, GIS κ.α. δημιουργεί ένα περιβάλλον φιλικό προς το χρήστη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα εύρος δυνατοτήτων που αφορά την προεπισκόπηση τόσο των δεδομένων εισόδου, αλλά και των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, με πολύ απλοϊκό τρόπο. Όλα αυτά προσδίδουν μια ευκολία στην διαδικασία της μοντελοποίησης του φυσικού συστήματος.

5.4 Προσομοίωση θαλάσσιας Διείσδυση

5.4.1 Εννοιολογικό μοντέλο

Για την προσομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης στην Αργολική πεδιάδα, χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας SEAWAT. Η επιλογή του συγκεκριμένου προγράμματος αποσκοπεί σε μια αντιπροσωπευτική προσομοίωση που περιλαμβάνει την προσομοίωση της ροής υπό καθεστώς διαφορών πυκνότητας του νερού εντός των Τεταρτογενών σχηματισμών του αργολικού πεδίου. Οι διαφορές πυκνότητας που εμφανίζονται σε ένα παράκτιο υδροφορέα επηρεάζουν το υδρολογικό ισοζύγιο και το ισοζύγιο μάζας του άλατος, καθώς επηρεάζεται η εκροή του γλυκού νερού στη θάλασσα και αντίστοιχα η εισροή αλμυρού νερού.

Βασική συνιστώσα στην προσομοίωση μιας περιοχής συνιστά το εννοιολογικό μοντέλο. Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί μια αναπαράσταση ενός πραγματικού συστήματος, το οποίο ερμηνεύει τις γεωλογικές και υδρολογικές του συνθήκες (Harbaugh, A.W., 2004). Η δόμηση του βασίζεται σε εκτεταμένη βιβλιογραφική έρευνα, συλλογή και αξιολόγηση δεδομένων πεδίου, με σκοπό την περιγραφή υδρογεωλογικών, υδρολογικών, φυσικοχημικών

συνθηκών και συνιστωσών του υδατικού ισοζυγίου. Η γεωλογική πληροφορία που είναι χρήσιμη στη δομή του μοντέλου είναι η περιγραφή των σχηματισμών με βάση την υδροπερατότητα τους (υδροφόροι, αδιαπέρατοι και ημιπερατού), το πάχος τους, όπως και η λιθολογία τους. Όσον αφορά, τα υδρολογικά χαρακτηριστικά καθοριστικό παράγοντα συνιστά το εύρος και τα όρια των υδροφόρων σχηματισμών, οι άξονες ροής και τροφοδοσίας και γενικότερα η υδραυλική και φυσική οριοθέτηση του υδροφορέα. Τέλος, ιδιότητες όπως η μεταβιβαστικότητα και η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα, αποτελούν βασικούς παραμέτρους στη ρύθμιση και την λειτουργία του μοντέλου, γι αυτό παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η διακύμανση τους σε όλη την έκταση της περιοχής έρευνας.

Για την μέγιστη αντίληψη των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης απαιτείται η γνώση των φυσικών συνθηκών που επικρατούν στην εκάστοτε περιοχή μελέτης. Η γνώση αυτή αποτελεί εργαλείο για την καλύτερη ρύθμισή του και οδηγεί, εν τέλει σε ένα αντιπροσωπευτικό αποτέλεσμα. Η χρήση ποιοτικών δεδομένων κατά την παραμετροποίηση του μοντέλου είναι απαραίτητη και προτιμάται από την χρήση μεγάλης ποσότητας δεδομένων που αυξάνει το υπολογιστικό κόστος.

Για την πλήρη κατανόηση των επικρατουσών συνθηκών πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα σε παλαιότερες μελέτες και διατριβές. Η ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου στην περιοχή του Αργολικού πεδίου που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια διδακτορικής διατριβής (Γιαννολόπουλος, 2000), έγινε η βάση για την ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης υπόγειας ροής με χρήση του κώδικα MODFLOW κατά την μεταπτυχιακή διατριβή (Χρυσανθόπουλος, 2018), ο οποίος αποτελεί και το ένα σκέλος για τον κώδικα SEAWAT.

Για την καλύτερη λειτουργία του μοντέλου προσομοίωσης του υδροφόρου συστήματος έγιναν ορισμένες παραδοχές. Οι υδροφόροι σχηματισμοί του Αργολικού πεδίου αντιμετωπίζεται σαν ενιαίο στρώμα και διαθέτει ισοδύναμες υδραυλικές ιδιότητες που προκύπτουν από τοα επιμέρους υδροφόρα στρώματα. Για τις ανάγκες του μοντέλου θεωρείται πως ο υδροφόρος αποτελείται από δύο στρώματα. το πρώτο συνιστά το κύριο υδροφόρο σύστημα, το οποίο οριοθετείται από την ελεύθερη πιεζομετρική επιφάνεια, που κατά τόπους ταυτίζεται με την επιφάνεια του εδάφους στην περιοχή των Τριμεριών και στην βάση του εντοπίζεται το αργιλικό κάλυμμα. Το αργιλικό κάλυμμα αντιπροσωπεύει το δεύτερο στρώμα το οποίο διαθέτει περιορισμένες υδραυλικές ιδιότητες.

5.4.2 Ρύθμιση του μοντέλου με τον κώδικα SEAWAT

5.4.2.1 Μοντέλο προσομοίωσης υπόγειας ροής MODFLOW

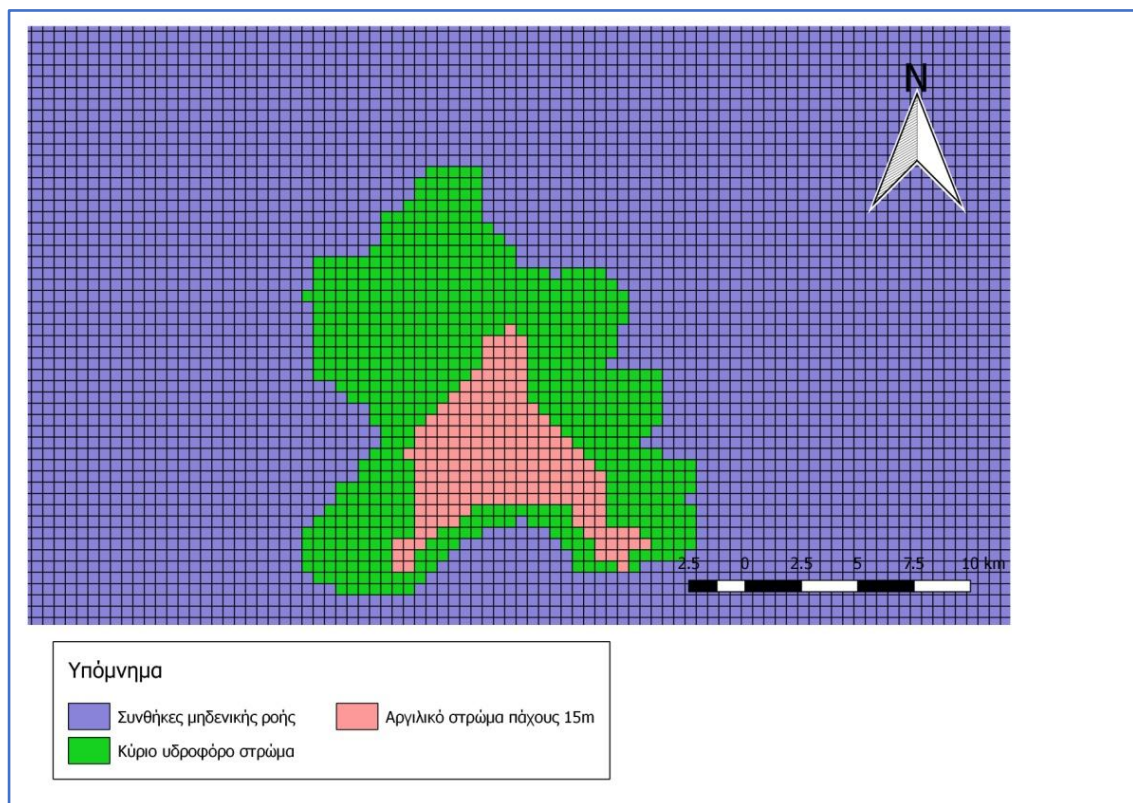
Όπως αναφέρθηκε η προσομοίωση της υπόγειας ροής σε περιβάλλον MODFLOW πραγματοποιήθηκε από στα πλαίσια μεταπτυχιακής διατριβής (Χρυσανθόπουλος, 2018). Για την προσομοίωση της υπόγειας ροής χρησιμοποιήθηκε ως υπόβαθρο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους, ενώ έγινε ψηφιοποίηση υδρογραφικού δικτύου και διαφόρων οντοτήτων που εντοπίζονται στην περιοχή με το σύστημα αναφοράς GGRS87/Greek Grid. Η συλλογή πληροφοριών βασίστηκε στον καθορισμό βασικών παραμέτρων που επηρεάζουν τις εισροές και τις εκροές του υδρολογικού συστήματος. Οι βασικές εκροές εντοπίζονται στην λειτουργία των γεωτρήσεων, όπως έχει περιγραφεί και στο υδατικό ισοζύγιο. Η κατανομή των αντλήσεων που λαμβάνουν χώρα βασίστηκε σε βιβλιογραφικά δεδομένα έρευνας που είχε πραγματοποιηθεί (Γιαννολόπουλος, 2000). Η τροφοδοσία του υδροφόρου συστήματος εξαρτάται από τις

πλευρικές εισροές, διηθήσεις χειμάρρων, επιστροφές αρδεύσεων και στην κατεύθυνση του βρόχινου νερού.

Οι μονάδες μετρήσεις των φυσικών μεγεθών που απεικονίζονται είναι οι εξής:

- Μήκος: m
- Χρόνος: day
- Υδραυλική αγωγιμότητα: m/day
- Ρυθμός άντλησης: m³/day
- Εμπλουτισμός: m/day

Ο κάναβος που καλύπτει την υδρολογική λεκάνη χωρίζεται σε κελία διαστάσεων 500x500m και καλύπτει έκταση 17.5x20 Km. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο το υδρογεωλογικό σύστημα παριστάνεται από δύο στρώματα, το ένα έχει πάχος 15m και αποτελείται από αργιλικό υλικό, ενώ το δεύτερο συνιστά τον κύριο υδροφόρο σχηματισμό που οριοθετείται μεταξύ του αργιλικού στρώματος και της επιφάνειας του εδάφους.



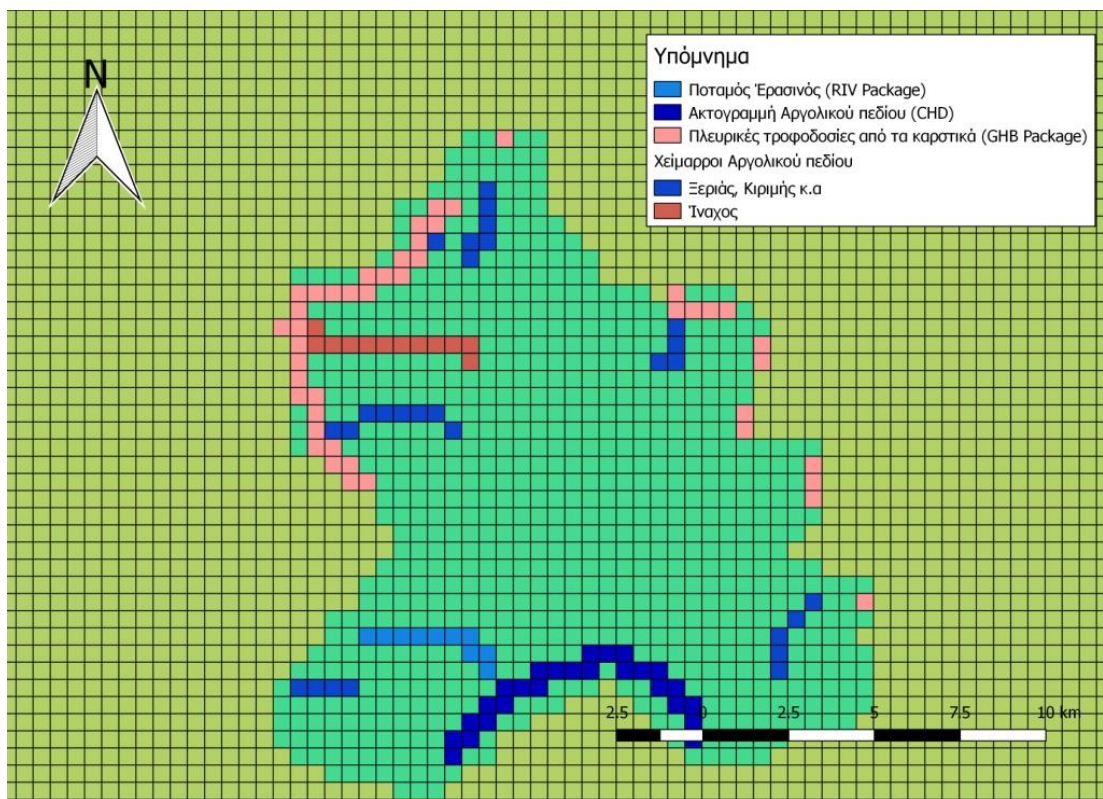
Σχήμα 42: Ενεργά (υδροφόρο στρώμα) και ανενεργά (μηδενικής ροής, αργιλικό στρώμα) κελιά του μοντέλου

Η συνολική προσομοίωση είχε διάρκεια 62 ημέρες και χωρίστηκε σε δύο περιόδους. Η πρώτη περίοδος έχει διάρκεια μιας ημέρας και πραγματοποιείται σε συνθήκες μόνιμης ροής, ενώ η δεύτερη διαρκεί 61 ημέρες και προσομοιώνει σε συνθήκες μη μόνιμης ροής στην αρχή της ξηρής περιόδου, όπου το καθεστώς των αντλήσεων είναι ιδιαίτερα αυξημένο για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.

Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της περιοχής έχουν προσδιοριστεί κατά την διάρκεια διαφόρων ερευνητικών προγραμμάτων και εργασιών που έχουν λάβει χώρα στην περιοχή (Πουλοβασίλης et al., 1989, Γιαννουλόπουλος, 2000). Ο συντελεστής εναποθήκευσης εμφανίζει μέση τιμή $2,8 \cdot 10^{-3}$. Η ειδική απόδοση παρουσιάζει μια διακύμανση μεταξύ $1,38 - 4 \cdot 10^{-2}$ με μέση τιμή $3,2 \cdot 10^{-2}$ (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση ροής της περιοχής μελέτης, όπως παρουσιάζονται και στο Σχήμα 41, είναι οι εξής (Χρυσανθόπουλος, 2018):

- Η ακτογραμμή του Αργολικού πεδίου αποτελεί ένα όριο σταθερού υδραυλικού φορτίου που αποτυπώνεται το πακέτο συνεχούς εισροής (Constant Head Package, CHD)
- Για το ποτάμι Ερασινός που πηγάζει από την πηγή Κεφαλαρίου και το οποίο αποτελεί το μοναδικό ποτάμι με συνεχή ροή στην περιοχή, χρησιμοποιήθηκε το πακέτο River Package (RIV)
- Οι πλευρικές τροφοδοσίες στον υδροφόρο του Αργολικού πεδίου προσομοιώθηκαν με το πακέτο των γεωτρήσεων (WEL Package) χρησιμοποιώντας θετικό πρόσημο, ώστε να υποδηλώνεται η εισροή νερού.
- Οι χείμαρροι παροδικής ροής που εμφανίζονται στην περιοχή θεωρείται ότι ένα μεγάλο ποσοστό της ροής τους εμπλουτίζει μετά την διήθησή του τον υδροφόρο. Επομένως προσομοιώνονται με το πακέτο τροφοδοσίας καθορισμένης ροής (Recharge Package).
- Στα τμήματα που δεν εμφανίζεται εισροή ή εκροή νερού χρησιμοποιούνται οριακές συνθήκες μηδενικής ροής.



Σχήμα 43: Απεικόνιση οριακών συνθηκών μοντέλου ροής

Για την ολοκληρωμένη παραμετροποίηση της απεικόνισης της ροής λήφθηκαν υπόψη στοιχεία του υδατικού ισοζυγίου, που αφορούν κυρίως την τροφοδοσία του υδροφόρου συστήματος. Ο εμπλουτισμός από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα υπολογίστηκε ως το 25% του ημερήσιου όγκου νερού κατακρημνισμάτων, δηλαδή $2,18 \cdot 10^{-4} \text{ m/day}$. Ο υπολογισμός του όγκου έγινε από τον υπολογισμό των μέσων μηνιαίων υψών βροχής για χρονική περίοδο 20 ετών (1964-1985) και στην συνέχεια έγινε αναγωγή του στην έκταση της περιοχής μελέτης. Στην κατεύθυνση του βρόχινου νερού προστίθεται και ο εμπλουτισμός από τις απώλειες του αρδευτικού δικτύου και επιστροφές αντλήσεων που υπολογίζονται συνολικά σε $0,000411 \text{ m/day}$. Ως παράμετρος του μοντέλου αντιμετωπίζεται και η εξατμισοδιαπνοή που εισάγεται με το πακέτο Evapotranspiration Package (EVT). Ο ρυθμός της για την περίοδο που αφορά το μοντέλο υπολογίστηκε σε $0,00168 \text{ m/day}$.

Η εκροή νερού από τις αντλήσεις των γεωτρήσεων υπολογίζεται σε 67 hm^3 . Οι διηθήσεις των χειμάρρων που λαμβάνουν χώρα μόνο κατά την υγρή περίοδο υπολογίστηκαν σε $3 \text{ hm}^3/\text{year}$ και δεν συνιστούν βασική παράμετρο του ισοζυγίου. Αντίθετα, η υπόγεια πλευρική τροφοδοσία που εντοπίζεται κυρίως στο δυτικό τμήμα της πεδιάδας που αποφορτίζονται οι καρστικοί σχηματισμοί αποτελεί την βασική πηγή τροφοδοσίας του υπόγειου υδροφορέα. Πιο συγκεκριμένα, σε ετήσια βάση δέχεται 40 hm^3 από τα καρστικά συστήματα που εντοπίζονται εκατέρωθεν της Αργολικής πεδιάδας.

5.4.3 Εισαγωγή της εφαρμογής MT3DMS

Το δεύτερο σκέλος του κώδικα SEAWAT αποτελεί η εφαρμογή MT3DMS, η οποία είναι αυτή που αναλαμβάνει την επίλυση την εξίσωση μεταφοράς του ρευστού σε καθεστώς διαφοράς

πυκνότητας. Ο ρόλος του κώδικα έγκειται στην προώθηση της ροής, διαμέσου της αλατότητας των καθορισμένων κελιών, μετατρέποντας το μοντέλο ροής σε μοντέλο μεταφοράς. Οι υπορουτίνες του κώδικα περιλαμβάνονται σε κάθε περίοδο εφαρμογής του μοντέλου και επικαιροποιούν την διαφορά πυκνότητας κατά την επίλυση της εξίσωσης μεταφοράς. Για την εφαρμογή του κώδικα πραγματοποιούνται ελάχιστες τροποποιήσεις, οι οποίες δεν επηρεάζουν τον τρόπο επίλυσης των εξισώσεων, αλλά αφορούν την ταυτόχρονη συνύπαρξή του με τον κώδικα MODFLOW σε έναν ενιαίο κώδικα.

Η προσομοίωση θαλάσσια διείσδυσης χρησιμοποιώντας τον κώδικα SEAWAT ξεκινά με την εισαγωγή του βασικού πακέτου μεταφοράς (BTN Package). Το πακέτο αυτό συνιστάται από τις παραμέτρους που διαθέτει το μοντέλο ροής του κώδικα MODFLOW. Συγκεκριμένα, μεταφέρει τις πληροφορίες που αφορούν τον αριθμό των σειρών και των στηλών, όπως και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά. Στην συνέχεια, έγινε ο καθορισμός της χημική παραμέτρου βάση τις οποίες θα γίνει η προσομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης. Η παράμετρος αναφοράς είναι η περιεκτικότητα σε άλας NaCl και ως μονάδα μέτρησης το κιλό. Ο κώδικας με αυτή την εγγραφή αναγνωρίζει την πυκνότητα του γλυκού νερού σε $1,000 \text{ kg/m}^3$ και την πυκνότητα του αλμυρού νερού σε $1,025 \text{ kg/m}^3$.

Η περίοδος εφαρμογής του μοντέλου όπως έχει αναφερθεί διαρκεί δύο μήνες. Το χρονικό βήμα υπολογισμού ορίστηκε στο μοντέλο ροής από τον χρήστη ως μία ημέρα. Ωστόσο, το χρονικό βήμα επίλυσης στον κώδικα SEAWAT ορίζεται αυτόματα από το πρόγραμμα και καθορίζεται από τους περιορισμούς της ευστάθειας της επίλυσης. Ο υπολογισμός των τιμών της πυκνότητας του νερού μεταξύ των υπολογιστικών κελιών έγινε με βάση τον αλγόριθμο central-in-space.

Οριακές και αρχικές συνθήκες

Η ακτογραμμή αποτελεί το όριο του υδροφορέα με την θάλασσα. Στο μοντέλο ροής η οριακή συνθήκη αντιπροσωπεύεται με σταθερό μηδενικό φορτίο που αντιστοιχεί στο επίπεδο της θάλασσας. Για την εξίσωση μεταφοράς της μάζας (Sink/Source Package), η συνθήκη αυτή αντιστοιχεί σε σταθερή συγκέντρωση άλατος για το νερό που εισέρχεται στο υδροφορέα και είναι ίση με 35.700 mg/L .

Για την ρύθμιση του μοντέλου έγινε ο καθορισμός κάποιων παραμέτρων στην εξίσωση μεταφοράς. Η διαμήκης εξάπλωση καθορίστηκε σε 50L, η αναλογία μεταξύ εγκάρσιας και διαμήκους διασποράς είναι 0,1 και η αναλογία κατακόρυφης και διαμήκους διασποράς 0,01. Οι τιμές αυτές θεωρούνται αντιπροσωπευτικές και τέτοιου είδους υδροφορείς. Ο συντελεστής μοριακής διάχυσης για το άλας είναι $1e^{-5} \text{ L}^2/\text{T}$. Τέλος, ως αρχική συγκέντρωση (αρχικές συνθήκες) δόθηκαν από αρχείο raster και αφορούν μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή (Σχήμα 43).

ID	ROW	COL	ACTIVE	LONG_D	TRPT	TRPV	SCONC_1	DMCOEF_1
1672	0	43	56	1	50	0.1	17.5499689308449	1e-05
1671	0	43	55	1	50	0.1	16.69841625976...	1e-05
1571	0	44	56	1	50	0.1	15.75374805591...	1e-05
1670	0	43	54	1	50	0.1	15.70484267246...	1e-05
1673	0	43	57	1	50	0.1	15.682031507704	1e-05
1570	0	44	55	1	50	0.1	15.64831764503...	1e-05
1772	0	42	55	1	50	0.1	15.30439656575...	1e-05
1569	0	44	54	1	50	0.1	15.10019267065...	1e-05
1773	0	42	56	1	50	0.1	15.08086360375...	1e-05
2275	0	37	53	1	50	0.1	14.96175306833...	1e-05
1572	0	44	57	1	50	0.1	14.80255052957...	1e-05
1373	0	46	60	1	50	0.1	14.766573887201	1e-05
1474	0	45	60	1	50	0.1	14.58911374089...	1e-05
1771	0	42	54	1	50	0.1	14.32772547743...	1e-05
2174	0	38	53	1	50	0.1	14.06253046181...	1e-05

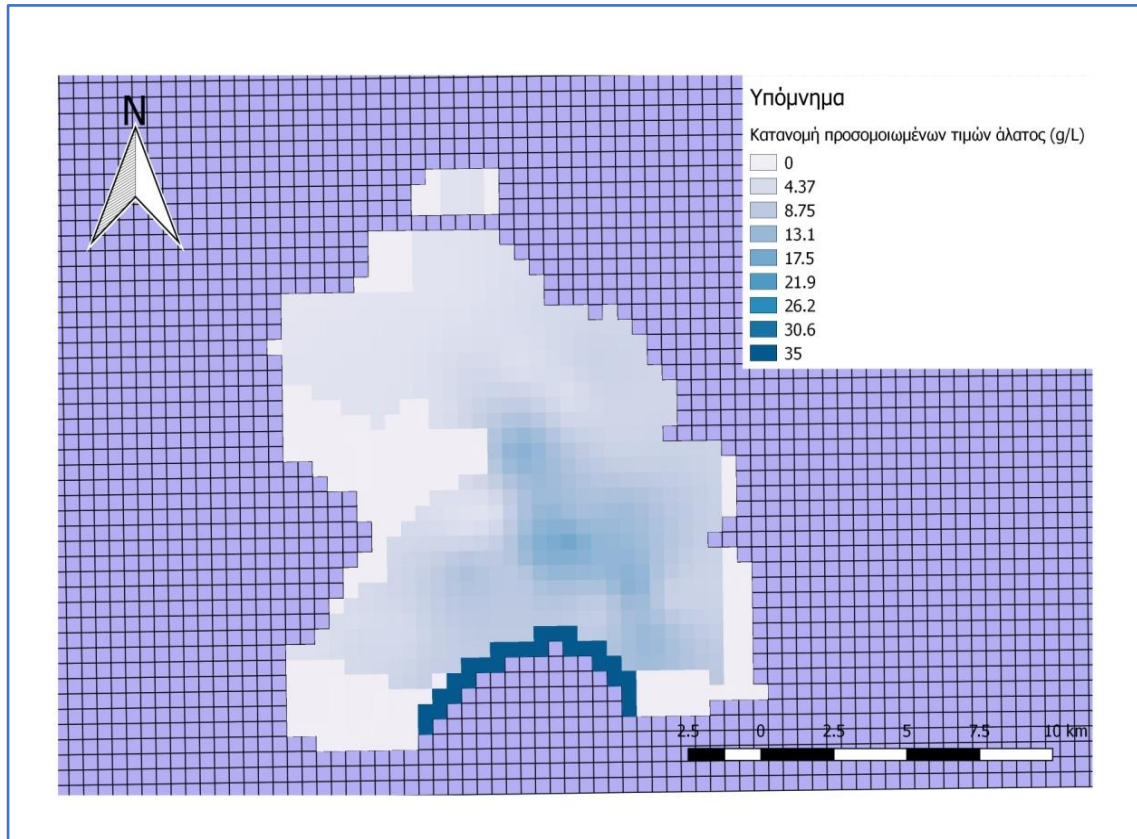
Σχήμα 44: Ρύθμιση παραμέτρων για το μοντέλο μεταφοράς

5.4.4 Αποτελέσματα Προσομοίωσης του κώδικα SEAWAT

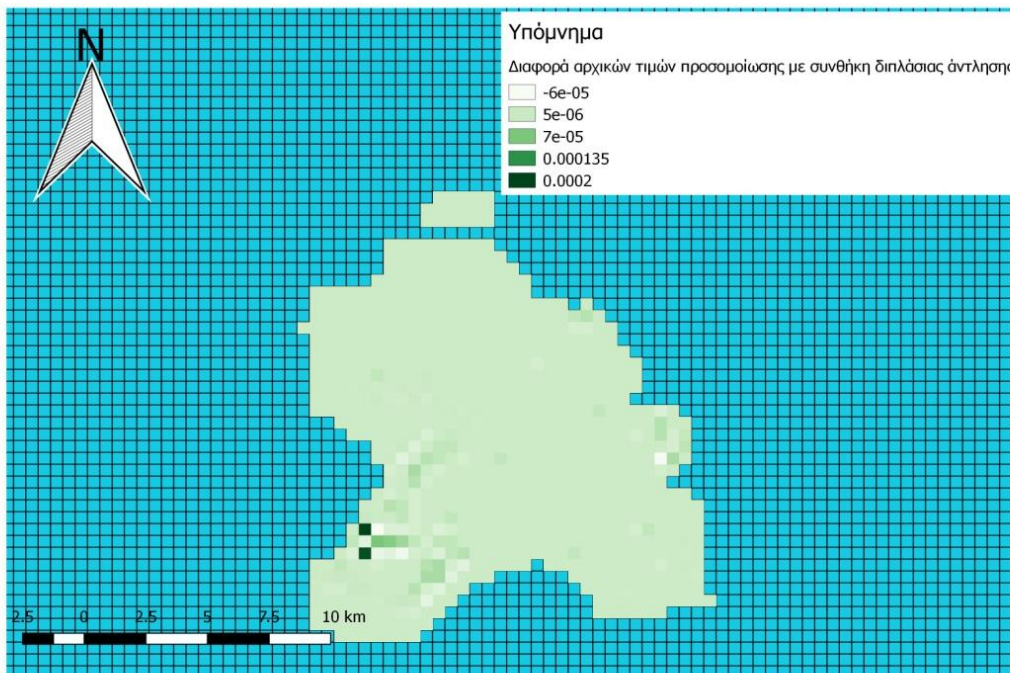
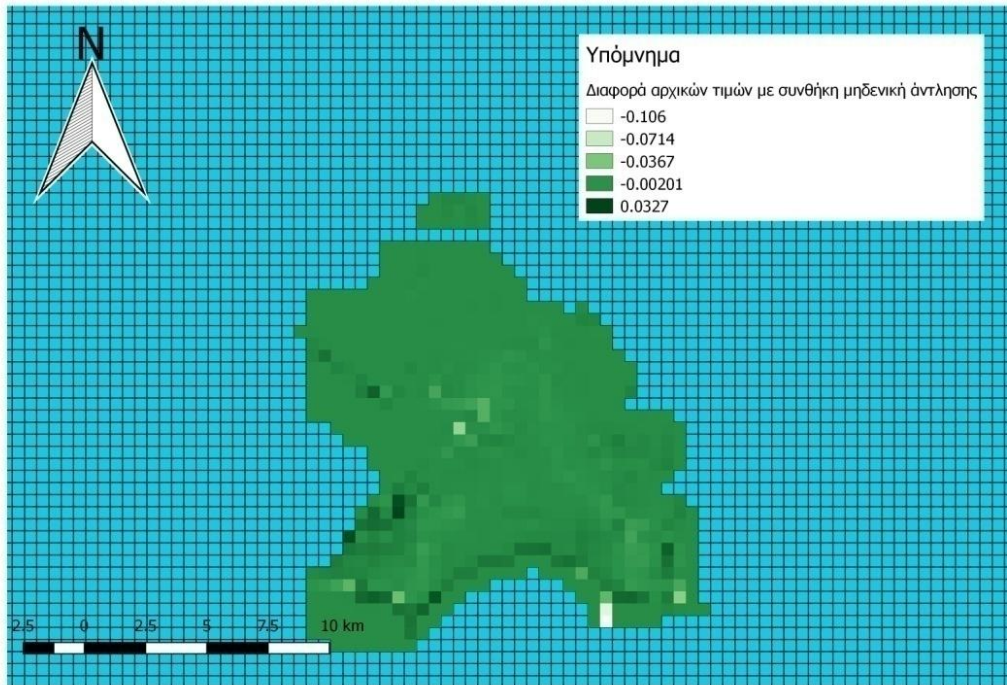
Η προσομοίωση της κατάστασης του υδροφορέα πραγματοποιείται σε δύο περιόδους για το κύριο υδροφόρο στρώμα, το οποίο παρουσιάζει και το πιο έντονο ενδιαφέρον, αλλά και για το αργιλικό στρώμα πολύ μικρής υδροπερατότητας. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε για δύο διαφορετικά σενάρια άντλησης, το πρώτο αφορά προσομοίωση με καθεστώς αντλήσεων, και το δεύτερο αφορά προσομοίωση χωρίς καθόλου αντλήσεις. Αυτό αποσκοπεί στην εξαγωγή ενός συμπεράσματος για το κατά πόσο οι ανθρώπινες δραστηριότητες επηρεάζουν την εισχώρηση του θαλασσινού νερού.

Στο Σχήμα 45 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με την βοήθεια της χρωματικής σκίασης που επεξηγούνται στο υπόμνημα του χάρτη. Παρατηρείται ότι το φαινόμενο της διείσδυσης του θαλασσινού νερού είναι πιο έντονο στο παράκτιο τμήμα, αλλά και στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας προς τις ανατολικές παρυφές. Σχετικά με το δυτικό μέτωπο όπου συναντάται η κύρια τροφοδοσία του υδροφορέα από το καρστικό σύστημα επιβεβαιώνεται με την προσομοίωση. Οι τιμές που προέκυψαν σε εκείνη την περιοχή είναι σχεδόν μηδενικές, επομένως πρόκειται για νερό που δεν έχει υποστεί οποιουδήποτε είδους υποβάθμιση από την θάλασσα.

Στο Σχήμα 46 απεικονίζεται η διαφορά της προσομοιωμένης συγκέντρωσης άλατος για τα δύο διαφορετικά σενάρια εφαρμογής. Το πρώτο σενάριο αφορά καθεστώς μηδενικών αντλήσεων, που ουσιαστικά καθιστά ανενεργές τις γεωτρήσεις. Κατά το δεύτερο σενάριο προσομοίωσης έγινε η παραδοχή πως οι γεωτρήσεις αντλούν την διπλάσια ποσότητα από αυτή των αρχικών συνθηκών. Οι διαφορές στην πρώτη περίπτωση εντοπίζονται στο ανατολικό τμήμα της ακτογραμμής και το κεντρικό τμήμα της πεδιάδας. Στη δεύτερη περίπτωση, παρατηρούνται στις δυτικές παρυφές του πεδίου. Παρόλα αυτά η τάξη μεγέθους της διαφοράς αυτής είναι εξαιρετικά μικρή που δεν επηρεάζει καθόλου τα αποτελέσματα.



Σχήμα 45: Χάρτης κατανομής προσομοιωμένων τιμών άλατος (g/L) με τον κώδικα SEAWAT για την περιοχή έρευνας



Σχήμα 46: διαφορά προσομοιωμένων τιμών άλατος σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες και την εφαρμογή των δύο σεναρίων

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η εκτεταμένη βιβλιογραφική μελέτη που διενεργήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την καλύτερη κατανόηση της περιοχής μελέτης, οδήγησαν στις εξής παρατηρήσεις:

- Η μελέτη επικεντρώνεται στην περιοχή του Αργολικού πεδίου, η οποία ανήκει διοικητικά στην Περιφερειακή ενότητα Αργολίδας. Το εμβαδόν της υπολογίζεται σε 213 Km², της οποίας η κύρια εκμετάλλευση αφορά γεωργική δραστηριότητα με εκτεταμένες αρδευόμενες καλλιέργειες.
- Η ευρύτερη ενότητα της Αργολίδας συνιστάται από ορεινούς όγκους και έντονο ανάγλυφο. Εξάιρεση αποτελεί η περιοχή έρευνας, η οποία αποτελείται από ήπιες έως μηδενικές κλίσεις σε όλη την έκταση της πεδιάδας.
- Από γεωλογικής άποψης συνιστά ένα τεκτονικό βύθισμα που αποτελείται από τεταρτογενείς αποθέσεις προερχόμενα από την έκπλυση ανθρακικών υλικών, από τους γειτονικούς ορεινούς όγκους. Σημαντική έκταση και ιδιαίτερο ρόλο στην υδρογεωλογία της περιοχής παρουσιάζει και ο φλύσχος στην περιοχή έρευνας.
- Σύμφωνα με τις κλιματολογικές αναλύσεις που έχουν γίνει το κλίμα της περιοχής έχει χαρακτηριστεί κατά Koppen, χερσαίο μεσογειακό ξηρού και θερμού θέρους. Η επεξεργασία θερμοκρασιακών και βροχομετρικών δεδομένων έγινε για τον μετεωρολογικό σταθμό Πυργέλα του Άργους. Η μέση ετήσια θερμοκρασία υπολογίστηκε σε 18,4 °C, ενώ το μέσο ετήσιο ύψος βροχής είναι 44,9 mm. Παράλληλα από την σύνταξη υδρολογικού ισοζυγίου κατά Thornthwaite υπολογίστηκε ο συντελεστής πραγματικής εξατμισοδιαπνοής σε ποσοστό 83,6% της συνολικής βροχόπτωσης.
- Στην περιοχή της αργολικής πεδιάδας εντοπίζονται ο ελεύθερος υδροφορέας, ένας υπό-πίεση υδροφορέας και στο παράκτιο τμήμα φρεάτιος υδροφορέας. Ο εμπλουτισμός τους πραγματοποιείται από την πλευρική τροφοδοσία των σχηματισμών και τις πηγές που εντοπίζονται στις δυτικές παρυφές του πεδίου καθώς και από την βροχόπτωση, όπως προκύπτει από την μελέτη του υδρολογικού ισοζυγίου.
- Το εκτεταμένο καθεστώς άντλησης για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών έχει οδηγήσει στην εμφάνιση αρνητικού πιεζομετρικού φορτίου επί σειρά ετών, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες. Αυτό οδήγησε στην εφαρμογή διαφόρων προγραμμάτων τεχνητού εμπλουτισμού με στόχο την ποσοτική αναβάθμιση του υδραυλικού φορτίου, χωρίς να υπάρχει μακροπρόθεσμα κάποιο σημαντικό αποτέλεσμα.

Στην συνέχεια, πραγματοποιήθηκε ειδική επεξεργασία των δεδομένων από χημικές αναλύσεις που έλαβαν χώρα από το 2014 έως το 2019 στα πλαίσια μελετών και διατριβών. Η ανάλυση των δεδομένων αυτό πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον AkvaGIS, απ' όπου έγινε εξαγωγή υδροχημικών χαρτών που απεικονίζουν την κατανομή ηλεκτρικής αγωγιμότητας και συγκέντρωσης χλωριώντων για ξηρή και υγρή περίοδο υδρολογικών ετών. Η επεξεργασία αυτή ολοκληρώθηκε με την σύνταξη υδροχημικών διαγραμμάτων Piper και SAR. Συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα εξής:

- Ο υδροχημικοί χάρτες παρέχουν μια πληροφορία που έρχεται να συμπληρώσει και να τεκμηριώσει τους κώνους πτώσεις, την περιοχή τροφοδοσίας και την

αρνητική πιεζομετρία. Παρουσιάζεται μια ταύτιση του αρνητικού υδραυλικού φορτίου με υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) και χλωριόντων (Cl⁻) που παραπέμπουν σε θαλάσσια διείσδυση και υφαλμύριση του υδροφορέα.

- Τα υδροχημικά διαγράμματα Piper παρουσιάζουν πλήθος δειγμάτων τα οποία βρίσκονται σε καθεστώς ανάμειξης γλυκού- αλμυρού νερού, ενώ κάποια από αυτά έχουν πολύ υψηλή περιεκτικότητα σε χλωριόντα και μαγνήσιο.
- Από τα υδροχημικά διαγράμματα Προσρόφησης Νατρίου προκύπτει πως τα περισσότερα δείγματα νερού ιδιαίτερα στο τέλος της ξηρής περιόδου δημιουργούν προβλήματα στην άρδευση των καλλιεργειών.

Τέλος, έγινε προσομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης μέσα από την εφαρμογή του FREEWAT και του κώδικα SEAWAT:

- Ο κώδικας SEAWAT συνδυάζει τον κώδικα MODFLOW και τον κώδικα MT3DMS που εφαρμόζεται σε περιβάλλον QGIS. Το πλεονέκτημά του έγκειται στο γεγονός ότι παρέχει την δυνατότητα προσομοίωσης σε συνθήκες μεταβλητής πυκνότητας νερού, αφού επιλύει ταυτόχρονα την εξίσωση ροής και εξίσωση μεταφοράς του ρύπου.
- Από την προσομοίωση του μοντέλου μεταφοράς της μάζας προέκυψε πως το μέτωπο υφαλμύρισης εντοπίζεται στο κέντρο της περιοχής μελέτης και κυρίως στο ανατολικό τμήμα. Οι δυτικές παρυφές του πεδίου δεν φαίνεται να επηρεάζονται από αυτό το φαινόμενο. Αυτό δικαιολογείται από τις μεγάλες ποσότητες που τροφοδοτούν τον υδροφορέα και προέρχονται από το καρστικό σύστημα.
- Δύο διαφορετικά σενάρια εφαρμόστηκαν, πέραν των αρχικών συνθηκών αντλήσεων, που αφορούν απενεργοποίηση των γεωτρήσεων και διπλασιασμό των αντλήσεων. Είναι αρκετά ενδιαφέρον το γεγονός ότι οι διαφορές που σημειώθηκαν κατά την προσομοίωση είναι μη παρατηρήσιμες και πολύ μικρής τάξεως μεγέθους. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι ο υδροφορέας είναι εξαιρετικά καταπονημένος.
- Τέλος, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία υδροχημικών δεδομένων στην πλατφόρμα του AquaGIS, αλλά και τους πιεζομετρικούς χάρτες μπορεί να επιβεβαιωθεί το πρόβλημα της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή έρευνας. Συγκεκριμένα η χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και των χλωριόντων συμπίπτει με την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του μοντέλου μεταφοράς της μάζας του ρύπου (άλατος).

Η εκπόνηση της παρούσας διατριβής οδήγησε σε κάποιες προτάσεις που βασίζονται στην έλλειψη δεδομένων που συναντήθηκαν και μπορεί να αποτελέσουν αντικείμενο μελλοντικής έρευνας για την περιοχή της Αργολικής πεδιάδας. Τα προβλήματα αυτά εντοπίζονται στην έλλειψη καλά ανεπτυγμένων βάσεων δεδομένων. Κρίνεται απαραίτητη η εγκατάσταση μετεωρολογικών σταθμών σε περισσότερα σημεία για την επαρκή κάλυψη των μετεωρολογικών δεδομένων. Επίσης παρόλη την πληθώρα υδροχημικών και πιεζομετρικών δεδομένων εντοπίζεται έντονη κατάτμηση των περιόδων μετρήσεων.

Κλείνοντας, είναι σημαντική η διερεύνηση των υδραυλικών και επικαιροποίηση εδαφικών δεδομένων χαρακτηριστικών του υδροφορέα με καλύτερη χωρική διακριτοποίηση. Παράλληλα, στο πλαίσιο της μείωσης του σφάλματος του μοντέλου και μια πιο ρεαλιστικής

αποτύπωσης της πληροφορίας θα πρέπει να συλλεχθούν οι κατάλληλες πληροφορίες προκειμένου να επιμηκυνθεί η περίοδος εφαρμογής του μοντέλου.

7 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Guo, W., Langevin, Christian, D. (2002): User's Guide to SEAWAT: A Computer Program for Simulation of Three –Dimensional Variable –Density Ground –Water Flow, Tallahassee, Florida: USGS.

Harbaugh, A.W., (2005): MODFLOW-2005. Te U.S.G.S. Modular Groundwater Model- the ground-Water Flow Process, U.S.Geological Survey, Techniques and Methods 6-A16

Jiao, J., Post, V. (2019): Coastal Hydrogeology, Cambridge University Press, United Kingdom, Cambridge, page 1-78

Serrano, A., et al, (2017): FREEWAT User's manual AkvaGIS (Hydrochemical Analysis Tools and Hydrogeological Analysis Tools, version 1.0, September 30th

Thorntwaite, C.W., Mather J.R., (1955): The water balance, Publications in Climatology, Laboratory of Climatology, Climatologic Dresel Institute of Technology.

Xue, Y., Wu, J. Lui, P., Wang, J., Jiang, Q., Shi, H., (1993): Sea-water intrusion in the coastal area of the Laizhou Bay, China: Distribution of seawater intrusion and its hydrochemical characteristics. Ground water31.

Ελληνική βιβλιογραφία

Βαλσαμίδου, Α.,(2017): Μοντελοποίηση του φαινομένου υφαλμύρισης με χρήση του προσομοιωτή MODFLOW- SEAWAT στην περιοχή Τυμπακίου, Κρήτης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά

Βουδούρης, Κ., (2013): Τεχνική Υδρογεωλογία- Υπόγεια Νερά, Εκδόσεις Τζιόλας, Θεσσαλονίκη.

Βουδούρης, Κ., (2014): Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος- Υπόγεια Νερά & Περιβάλλον, Εκδόσεις Τζιόλας, Θεσσαλονίκη

Βουδούρης, Κ., (2015): Εκμετάλλευση και Διαχείριση Υπογείου Νερού, Εκδόσεις Τζιόλας, Θεσσαλονίκη

Γιαννούλας, Ε.,(2017): Έκθεση εφαρμογής Τεχνητού Εμπλουτισμού στις περιοχές Αργολικού Πεδίου & Ασίνης – Δρεπάνου Φεβρουάριος-Μάρτιος 2017, Περιφέρεια Πελοποννήσου

Γιαννούλας, Ε., Ζύμης, Α.,2009: Έκθεση εφαρμογής Τεχνητού Εμπλουτισμού στις περιοχές Αργολικού Πεδίου & Ασίνης – Δρεπάνου. Ιανουάριος – Απρίλιος 2009, Άργος: Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων Αργολίδας.

Γιαννουλόπουλος, Π. (2000): ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΣΤΟ ΑΡΓΟΛΙΚΟ ΠΕΔΙΟ, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα

Γιαννουλόπουλος Π., Αλεξανδρή Σ., Ψυχογιού Μ. και Α. Πουλοβασίλης (2002): Υφαλμύρωση και ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου, Πρακτικά του 6^{ου} Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. σελ. 1-12.

Γιαννουλόπουλος Π. (2002): Υπόγεια υδραυλική και μηχανισμοί λειτουργίας των υδροφόρων σχηματισμών του Αργολικού πεδίου - Εννοιολογικό μοντέλο. (Πρακτικά του 6^{ου} Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου. σελ. 35-46.)

Ζιώγας, Α.,(2013): ΜΕΛΕΤΗ ΘΕΜΑΤΩΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα

Καλλιώρας, Α. (2015): ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ- ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΙ ΚΩΔΙΚΕΣ, Αθήνα, Δ.Π.Μ.Σ: Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

Μητρόπαπας, Α. (2015): Υπόγεια νερά Αργολικού πεδίου- Έρευνα βελτίωσης των με την εφαρμογή Τεχνητού Εμπλουτισμού, Ε.Μ.Π., Αθήνα

Μουντράκης, Δ., (2010): Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας, University Studio Press, σελ.146-155,176-211, Θεσσαλονίκη.

Πλιάκας Φ., (1998). Έρευνα επί των καταλλήλων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού σε ετερογενείς υδροφορείς αλλουβιακών σχηματισμών. Εφαρμογές σε υδροφορείς του πεδινού τμήματος Ξάνθης. Διδακτορική διατριβή που υποβλήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., 29/1/1998, 314 σελ., Ξάνθη

Πουλοβασίλης Α, Μιμίδης Θ, Γιαννουλόπουλος (1996): Ερευνητικό πρόγραμμα: "Χρησιμοποίηση για άρδευση του φράγματος του νερού Κιβερίου Αργολίδας και παρακολούθηση και αντιμετώπιση της υπαλμύρωσης των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου". Γεωπονικό πανεπιστήμιο Αθηνών Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής, Αθήνα

Χρυσανθόπουλος, Ε., (2018): ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΚΟΚΚΩΔΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΑΡΓΟΛΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΛΕΥΘΕΡΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ (FREEWAT), Ε.Μ.Π., Αθήνα

Ιστοσελίδες

www.geodata.gov.gr

<http://meteosearch.meteo.gr>

www.statistics.gr (Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία)