



Διπλωματική Εργασία

Μελέτη της υπόγειας ροής και του φαινομένου υφαλμύρισης στον
προσχωματικό υδροφορέα Καταπόλων της νήσου Αμοργού, με τη χρήση
του μοντέλου υπόγειας ροής PTC (Princeton Transport Code)

Μαρκέλλα Σιάκα

Εξεταστική Επιτροπή

Καρατζάς Γεώργιος (Επιβλέπων)
Παρανυχιανάκης Νικόλαος
Δόκου Ζωή

Αναπληρωτής Εξεταστής
Νικολαΐδης Νικόλαος

ΧΑΝΙΑ
ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

Ευχαριστίες

Στο ξεκίνημα αυτής της προσπάθειας, ήταν δύσκολο να φανταστώ τις δυσκολίες και τα εμπόδια που έπρεπε να αντιμετωπίσω, για την ομαλή ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας· εμπόδια μικρά και άλλα μεγαλύτερα που αφορούσαν τόσο στη συλλογή αξιόπιστων στοιχείων, όσο και στην καλή κατανόηση, αλλά και στην ορθή επεξεργασία αυτών. Ως εκ τούτου, έχω την ανάγκη να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου γενικά, σε όλα εκείνα τα συμβουλευτικά, συνεργατικά, οικογενειακά και φιλικά πρόσωπα που είναι αρωγοί της προσπάθειάς μου.

Καταρχάς, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέπων καθηγητή και κοσμήτορα της σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος, Γεώργιο Π. Καρατζά που μου έδωσε την ελευθερία να ακολουθήσω την ιδέα μου, ακόμη κι αν αυτή με οδήγησε την πρώτη φορά σε αδιέξοδη πορεία. Για την εξαιρετική συνεργασία και επικοινωνία θέλω να ευχαριστήσω τη μεταδιδακτορική ερευνητική συνεργάτιδα Δόκου Ζωή, που ήταν πάντα ευδιάθετη και πρόθυμη να λύσει όλες τις απορίες μου, να βάλει σε σειρά τις σκέψεις μου και να διορθώσει τις απροσεξίες μου· ένιωσα μεγάλη ασφάλεια υπό την επίβλεψή της.

Ευχαριστώ πολύ τον Προϊστάμενο Διεύθυνσης Υδάτων στην Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου, κο Νόκα Ηλία ο οποίος ήταν από την πρώτη στιγμή επικοινωνίας μας πρόθυμος να συζητήσει για την κατάσταση στην Αμοργό, να με συμβουλέψει σχετικά και να μου παρέχει βασικά δεδομένα, δίχως τα οποία δε θα ήταν εφικτό να πραγματοποιηθεί η μελέτη. Τον ευχαριστώ πολύ, επίσης, για την ιδέα του να επικεντρώσω την προσοχή μου στο Δημοτικό Διαμέρισμα των Καταπόλων της Αμοργού. Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω την κα Γαβαλά Ντιάνα από τη Δημοτική Κοινότητα Ηρακλείας για τις πληροφορίες που μου παρείχε σχετικά με το νησί και την ευγενική προθυμία της να βοηθήσει στην εργασία. Επίσης, ευχαριστώ τον Σαπουλίδη Βασίλη από την Εταιρεία Ύδρευσης και Αποχέτευσης Νήσων καθώς και τον κο Κοϊνάκη από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών Ρεθύμνου, για το χρόνο που αφιέρωσαν σε τηλεφωνικές συζητήσεις για την αναζήτηση γεωλογικών δεδομένων και σχετικών μελετών, για την ευγένειά τους καθώς και για τη σωστή καθοδήγηση πάνω στο θέμα μου. Ακόμη, ευχαριστώ τον Μπάτη Δημήτρη από το ΙΓΜΕ Αθήνας που προσφέρθηκε άμεσα να με εξυπηρετήσει στην αναζήτηση γεωλογικών χαρτών και μελετών. Για τον ίδιο λόγο θέλω να ευχαριστήσω και την κα Καλυβιώτη Αικατερίνη από το τμήμα της βιβλιοθήκης του ΙΓΜΕ, στην Αθήνα. Για την πολύτιμη βοήθειά του στην κατανόηση των συλλεχθέντων στοιχείων για τη νήσο της Αμοργού και για την από μέρους του παροχή χρήσιμων πληροφοριών, ευχαριστώ τον κο Κωβαίο Γιώργο από την Τεχνική Υπηρεσία του Δημοτικού διαμερίσματος της Αμοργού. Θέλω, επιπλέον, να ευχαριστήσω πολύ τον Γαβαλά Επαμεινώντα, εκπρόσωπο της Τοπικής Επιτροπής Αμοργού του προγράμματος της Ελληνικής Εταιρείας Προστασίας Περιβάλλοντος και Πολιτιστικής Κληρονομιάς και θείο μου, για την πολύτιμη βοήθειά του.

Επίσης, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω θερμά τους φίλους και συναδέλφους Ροδόπη Ζουμπουλάκη και Αντώνη Αποστολάκη για την υποστήριξή τους όλον αυτό τον καιρό, καθώς και τον Αλέξανδρο Δημητρίου για την πολύτιμη βοήθειά του στην χρήση του λογισμικού προγράμματος SWAT. Χωρίς αυτούς η πορεία μου ως εδώ θα ήταν σίγουρα πολύ δυσκολότερη. Τέλος, ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την αμέριστη υποστήριξή της τα τελευταία πέντε έτη.

Περίληψη

Η υφαλμύριση σε παράκτιους υδροφορείς είναι ένα κοινό φαινόμενο υποβάθμισης της ποιότητας του υπόγειου νερού, το οποίο μπορεί να προορίζεται για ύδρευση ή άρδευση. Τα μικρά νησιά, λόγω κλίμακας, αποτελούν πολύ ευαίσθητα στην επιρροή της θαλάσσιας διείσδυσης συστήματα, ιδιαίτερα τις θερινές περιόδους που το πρόβλημα οξύνεται, λόγω αυξημένης τουριστικής δραστηριότητας. Το γεγονός αυτό, καθιστά τη διαχείριση των υδάτινων πόρων στα μικρά νησιά, πρόκληση και παράλληλα επιτακτική ανάγκη. Η Αμοργός, είναι ένα από τα τέσσερα πιο απαιτητικά, σε υδατικές ανάγκες, νησί του Νοτίου Αιγαίου, καθώς δέχεται πάνω από 30.000 m³ πόσιμου νερού, από υδροφόρα πλοία, ετησίως. Παράλληλα, όλοι οι παράκτιοι οικισμοί του νησιού πλήττονται σοβαρά από το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Με σκοπό την παροχή βιώσιμων προτάσεων διαχείρισης του υπόγειου νερού, αναπτύχθηκε ένα τρισδιάστατο μαθηματικό μοντέλο υπόγειας ροής, για τον προσχωματικό υδροφόρα της Τοπικής Κοινότητας Καταπόλων.

Ως λογισμικό προσομοίωσης, επιλέχθηκε το Argus One με κώδικα PTC, που λειτουργεί χρησιμοποιώντας συνδυαστικά τις αριθμητικές μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, με σκοπό να επιλύσει ένα σύστημα χωρικά μεταβαλλόμενων εξισώσεων. Το μοντέλο, λαμβάνει υπόψη του γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως το βάθος, η υδραυλική αγωγιμότητα, η αποθηκευτικότητα και το πορώδες, ενώ παρέχει πληροφορία για τη χρονική και χωρική μεταβολή των υδραυλικών υψών του υδροφορέα και την ταχύτητα του υπόγειου νερού. Για τη μελέτη του μετώπου υφαλμύρισης, χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση απότομης διεπαφής σε συνδυασμό με την εξίσωση των Ghyben-Herzberg και ενός συντελεστή διόρθωσης που λαμβάνει υπόψη την υδροδυναμική διασπορά της υφάλμυρης ζώνης. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε, ώστε να υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ της προβλεπόμενης εξέλιξης της θαλάσσιας διείσδυσης και των αντίστοιχων μετρήσεων ποιότητας υπόγειου νερού από το πεδίο. Σε αυτή τη διαδικασία, βοήθησε ο συνυπολογισμός πέντε στατιστικών δεικτών αξιολόγησης της μοντελοποίησης.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου πρόβλεψης, έδειξαν ότι κάτω από τρέχουσες συνθήκες άντλησης του υδροφορέα (υπερεκμετάλλευση), το μέτωπο της υφαλμύρισης θα συνεχίσει να μετακινείται προς το εσωτερικό της περιοχής μελέτης υποβαθμίζοντας σοβαρά και μη αντιστρεπτά την ποιότητα του υπόγειου νερού. Σκοπός της διαχείρισης είναι βρεθεί η βέλτιστη μέθοδος ρυθμού άντλησης από τις υπάρχοντες γεωτρήσεις, ώστε να παρεμποδιστεί η περαιτέρω εξάπλωση της θαλάσσιας διείσδυσης. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν σενάρια διαχείρισης, που έλαβαν υπόψη επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στη βροχόπτωση, τη τροφοδοσία της λεκάνης, τη μέση στάθμη της θάλασσας και την αύξηση του πληθυσμού. Για να ελεγχθεί το πρόβλημα, κρίνεται απαραίτητη η περιοδική παύση λειτουργίας των βασικών γεωτρήσεων, και παράλληλα ο σχεδιασμός εύρεσης εναλλακτικών πηγών πόσιμου νερού.

Abstract

Saltwater intrusion is a common phenomenon in coastal aquifers that can degrade the quality of water intended for drinking and irrigation purposes. Small islands are small scale systems that are very vulnerable to saltwater intrusion. Especially, in dry periods, the problem is exacerbated, due to increased touristic activity and irrigation needs. This fact, makes water resources management, in small islands, a big challenge and, at the same time, an urgent need. Amorgos island, is one of the four most water demanding islands, of South Aegean Sea, receiving more than 30.000m³ of drinking water, from ships, annually. At the same time, Amorgo's coastal communities are seriously affected by saltwater intrusion. In order to provide groundwater management options for the alluvial aquifer of Katapola, located on Amorgo's island, a three-dimensional groundwater flow mathematical model was developed. Argus One was chosen for the simulation, coupled with Princeton Transport Code (PTC). PTC operates, using a combination of finite element and finite difference numerical methods, to solve a system of spatially varying equations. The model takes into account the system's geomorphological characteristics, such as depth, hydraulic conductivity, storativity and porosity, while providing information on temporal and spatial variations of hydraulic heads and groundwater's flow velocity. In order to study the extent of saltwater intrusion, the sharp-interface approximation combined with the Ghyben-Herzberg equation was used. Ghyben-Herzberg equation was used in conjunction with a correction factor that accounts for the hydrodynamic dispersion constant of the brackish zone. The model was calibrated until satisfactory agreement between simulated data and field measurements was achieved. To facilitate model evaluation, in terms of accuracy, model evaluation statistics were calculated, as well. The prediction model results show that under the current pumping strategies (overexploitation), the saltwater intrusion front will continue to move inland, posing serious and irreversible problem to the groundwater quality. The management goal is to find the optimal pumping rates from the existing wells, so as to prevent further spreading of saltwater intrusion. For this purpose, several water management scenarios were developed, taking into account the effects that climate change will have on rainfall, water supply, mean sea level and population growth. Controlling the expansion of seawater intrusion, in Katapola, includes the periodic deactivation of most pumping wells and the designing of alternative resources/plans for water supply.

Πίνακας Περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract	4
1. Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγή.....	7
1.1. Η πρόκληση διαχείρισης υδάτινων πόρων στα μικρά νησιά του Αιγαίου	7
1.2. Σκοπός Εργασίας	8
2. Κεφάλαιο 2 ^ο : Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής και του Φαινομένου Υφαλμύρισης... 9	
2.1. Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής.....	9
2.1.1. Το μαθηματικό μοντέλο PTC.....	11
2.1.2. Στατιστικοί Δείκτες Αξιολόγησης	12
2.2. Το Φαινόμενο της Υφαλμύρισης.....	13
2.2.1. Αιτίες Φαινομένου	14
2.2.2. Νομοθεσία και Ποιοτικές Παράμετροι Υπόγειου Νερού.....	16
2.2.3. Μαθηματική Προσομοίωση Υφαλμύρισης	19
2.2.4. Συντελεστής διόρθωσης Ghyben-Herzberg	22
3. Κεφάλαιο 3 ^ο : Περιοχή Μελέτης	24
3.1. Θέση και Διοικητική Υπαγωγή	24
3.2. Δημογραφικά Στοιχεία	25
3.2.1. Πληθυσμιακά Στοιχεία	25
3.2.2. Χρήσεις Γης.....	26
3.3. Κλιματολογικά και Μετεωρολογικά Χαρακτηριστικά.....	27
3.4. Γεωλογία.....	30
3.4.1. Μορφολογία.....	30
3.4.2. Στρωματογραφία.....	31
3.4.3. Υδρογεωλογία	33
3.4.4. Σεισμικότητα	34
3.5. Τροφοδοσία Λεκάνης.....	34
3.6. Υδρευτική Κατάσταση	36
4. Κεφάλαιο 4 ^ο : Εισαγωγή Δεδομένων στο μοντέλο Argus One.....	40
4.1. Εκτίμηση Υδρολογικού ισοζυγίου με το SWAT	40
4.2. Εισαγωγή γενικών Παραμέτρων	43
4.2.1. Διαμόρφωση Βασικών Πληροφοριών.....	43
4.2.2. Ορισμός του περιγράμματος της περιοχής μελέτης.....	45
4.2.3. Κατασκευή Πλέγματος	47
4.2.4. Υψόμετρα	48

4.2.5.	Εδαφικά Στρώματα και Υδραυλική Αγωγιμότητα.....	49
4.2.6.	Αρχικά Υδραυλικά Ύψη.....	50
4.2.7.	Βροχομετρικά Δεδομένα.....	51
4.2.8.	Αποθηκευτικότητα και Πορώδες	51
4.3.	Εισαγωγή Χωρικά Μεταβαλλόμενων Τιμών	52
4.3.1.	Οριακές Συνθήκες 1 ^{ου} Τύπου	52
4.3.2.	Οριακές Συνθήκες 2 ^{ου} Τύπου	52
4.4.	Εκτέλεση Αλγορίθμου	57
5.	Κεφάλαιο 5 ^ο : Βαθμονόμηση Μοντέλου και Αποτελέσματα.....	58
5.1.	Βαθμονόμηση Υδραυλικού Ύψους.....	58
5.2.	Αποτελέσματα Βαθμονόμησης	59
5.3.	Έλεγχος Συμφωνίας- Χλωριόντα	64
5.4.	Αποτελέσματα Ελέγχου	69
6.	Κεφάλαιο 6 ^ο : Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής	73
6.1.	Σενάριο 1	74
6.2.	Σενάριο 2	78
6.3.	Σενάριο 3	79
6.4.	Σενάριο 4	82
6.5.	Σενάριο 5	84
7.	Κεφάλαιο 7 ^ο : Συμπεράσματα και Προτάσεις.....	86
7.1.	Συμπεράσματα από την προσομοίωση ροής και της συγκέντρωσης χλωριόντων	86
7.2.	Συμπεράσματα από τα σενάρια πρόβλεψης	89
7.3.	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	90
7.4.	Προτάσεις διαχείρισης του υπόγειου νερού	91
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	93
	Ξένη Βιβλιογραφία.....	93
	Ελληνική Βιβλιογραφία	98
	Διαδικτυακές Πηγές	99
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	100

1. Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

1.1. Η πρόκληση διαχείρισης υδάτινων πόρων στα μικρά νησιά του Αιγαίου

Το νερό είναι ένας ανανεώσιμος αλλά και περιορισμένος πόρος. Τα αποθέματα γλυκού νερού ανανεώνονται μέσω του υδρολογικού κύκλου, ωστόσο η διαθέσιμη ποσότητά του είναι περιορισμένη και η κατανομή του χωρικά και χρονικά άνιση. Η έντονη ανθρωπογενής δραστηριότητα, υποβαθμίζει την ποιότητά του και περιορίζει περαιτέρω τη διαθεσιμότητά του. Συνεπώς, απαιτείται συνετή διαχείριση με στόχο την ικανοποίηση των πολλών και συχνά αντικρουόμενων χρήσεών του. Μέσω της Οδηγίας Πλαίσιο για τα Νερά (2000/60/ΕΚ), έχουν τεθεί οι βάσεις για μια ολοκληρωμένη προσέγγιση διαχείρισης, ώστε να σταματήσει άμεσα η υποβάθμιση της ποιότητας των νερών.

Τα νησιά του Αιγαίου χαρακτηρίζονται ως τα πλέον ευαίσθητα υδατικά διαμερίσματα της Ελλάδας. Οι κυριότεροι δυσμενείς παράγοντες που επικρατούν, και καθιστούν δύσκολη την αναζήτηση υπόγειου νερού, συνοπτικά είναι:

1. Η γεωλογική δομή των νησιών η οποία συνίσταται, κατά το μεγαλύτερο μέρος τους, από υδατοστεγείς σχηματισμούς.
2. Οι μικρές διαστάσεις των νησιών, που ως γνωστών δεν υπερβαίνουν τις μερικές δεκάδες km², με περιορισμένες διαστάσεις ανάπτυξης των υδροφόρων σχηματισμών.
3. Η μικρή υδροχωρητικότητα των υδροφόρων σχηματισμών με περιορισμένα αποθέματα νερού.
4. Οι υδροφορείς που είναι ανοικτοί προς τη θάλασσα με συνέπεια να υφίστανται την επίδρασή της με τη μορφή υφαλμύρισης (ποιοτική υποβάθμιση)
5. Η μορφολογία των νησιών που είναι συνήθως ημιορεινή με απότομα πρηνή που διευκολύνουν την ταχεία απορροή.
6. Η χαμηλή μέση ετήσια βροχόπτωση και η συνεπαγόμενη μικρή κατείσδυση, που δεν επαρκεί για την αναπλήρωση υδροφορέων υπό έντονη εκμετάλλευση.
7. Οι υψηλές μέσες ετήσιες θερμοκρασίες, η μεγάλη ηλιοφάνεια και ταχύτητα ανέμων που αποτελούν ευνοϊκούς παράγοντες για μεγάλα ποσοστά εξάτμισης.
8. Η υπερεκμετάλλευση περιορισμένων δυνατοτήτων υδροφορέων, με συνέπεια τη σταδιακή εξάντληση των αποθεμάτων τους (Κουρμούλης, Παπαπέτρος, Χαρμανίδης 1992). Η υπεράντληση οφείλεται στη δυσανάλογα αυξανόμενη ζήτηση σε σχέση με την αύξηση του πληθυσμού αλλά και του τουρισμού.

Υδροφορία, στα νησιωτικά συστήματα, συναντάται κυρίως σε πορώδεις προσχωματικούς και νεογενείς σχηματισμούς. Αυτού του τύπου οι σχηματισμοί αναπτύσσονται σε παράκτιες περιοχές, όπου απαντώνται φαινόμενα υφαλμύρισης, εξαιτίας του ολοένα και αυξανόμενου πληθυσμού που εγκαθίσταται στις παράκτιες ζώνες. Η υφαλμύριση του νερού υποβαθμίζει την ποιότητά του και κατά περιόδους το καθιστά μη πόσιμο.

Η Αμοργός, το ανατολικότερο νησί των Κυκλάδων, με έκταση 121km², συγκαταλέγεται στα πλέον απαιτητικότερα, σε υδατική ανάγκη, νησιά του Νοτίου Αιγαίου, καθώς παρουσιάζει σημαντικά ελλείμματα πόσιμου νερού τις θερινές περιόδους, ενώ η υδροδότησή της στηρίζεται αποκλειστικά στα υπόγεια αποθέματα ύδατος και στη μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων νερού με υδροφόρες. Σύμφωνα με στοιχεία της Γενικής Γραμματείας Αιγαίου, το 2014 η Πολιτεία έστειλε νερό με υδροφόρες σε επτά νησιά των Κυκλάδων, μεταξύ των οποίων και η Αμοργός, που δέχτηκε 33.936m³ με κόστος μεταφοράς 10€/m³. Στο νησί δεν δραστηριοποιείται, προς το παρόν, μονάδα αφαλάτωσης, ούτε υπάρχει άλλη εναλλακτική μορφή υδροδότησης των οικισμών με πόσιμο νερό. Το γεγονός αυτό, καθιστά ακόμη πιο

επιτακτική την ανάγκη ανάπτυξης ενός αποτελεσματικού και βιώσιμου σχεδίου διαχείρισης των υδάτινων πόρων του νησιού και γενικότερα του συνόλου των νησιών που ανήκουν στο Υδατικό Διαμέρισμα του Αιγαίου.

Η πρόταση ενός νέου και αποδοτικού σχεδίου διαχείρισης, απαιτεί την ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για τη μελέτη και ανάλυση του υπό εξέταση συστήματος, που θα στοχεύει σε ακριβή αποτελέσματα και θα προσφέρει δυνατότητες πρόβλεψης της μελλοντικής κατάστασης του συστήματος. Μία υπολογιστική μέθοδος, που έχει γνωρίσει μεγάλη εξέλιξη, κυρίως λόγω της ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, είναι η μέθοδος της προσομοίωσης, που ως σκοπό έχει τη βελτιστοποίηση συστημάτων, την ανάλυση της ευαισθησίας τους και τη μελέτη της λειτουργίας τους. Ως υπολογιστική μέθοδος, η προσομοίωση, εξαρτάται από την πιστότητα του μοντέλου που χρησιμοποιείται, καθώς και από την επιλογή εκείνων των παραμέτρων που απαιτούνται για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων και χρήσιμων συμπερασμάτων.

Ως εκ τούτου, κρίνεται χρήσιμη η κατασκευή ενός μοντέλου κατάλληλο για την πιστή αναπαράσταση, μελέτη και πρόβλεψη της συμπεριφοράς του υπό εξέταση συστήματος. Ως σύστημα μελέτης, στην παρούσα εργασία, ορίζεται ο υπόγειος υδροφορέας της Κοινότητας των Καταπόλων, που περιλαμβάνει τρεις οικισμούς και βρίσκεται σε παράκτια ζώνη. Η ζώνη αυτή σχηματίζει ένα φυσικό, κλειστό λιμάνι.

1.2. Σκοπός Εργασίας

Η δουλειά που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης του μετώπου υφαλμύρισης, στον προσχωματικό υδροφορέα της Κοινότητας των Καταπόλων, με χρήση της προσέγγισης απότομης διεπαφής και της εξίσωσης Ghyben-Herzberg για τη μαθηματική περιγραφή του φαινομένου. Για τη συγκεκριμένη μέθοδο, χρησιμοποιήθηκε το αριθμητικό μοντέλο Argus One με κώδικα PTC, που επιλύει μερικές διαφορικές εξισώσεις με συνδυασμό των μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών. Οι βασικοί στόχοι που αναμένεται να επιτευχθούν από τη μελέτη του συγκεκριμένου συστήματος είναι:

- Να επιτευχθεί ικανοποιητική προσομοίωση του υδραυλικού ύψους του υπόγειου νερού, ώστε να δημιουργηθεί μία πρώτη εικόνα για τη διεύθυνση και την ταχύτητα της υπόγειας ροής στο υδροφόρο τμήμα της περιοχής μελέτης.
- Να υπολογιστεί και να απεικονιστεί το μέτωπο της υφαλμύρισης, καθώς και να προσδιοριστεί η χωρική και χρονική του μεταβλητότητα.
- Να γίνει πρόβλεψη της εξέλιξης του φαινομένου για τα επόμενα 35 έτη.
- Να μελετηθούν σενάρια διαχείρισης του υπόγειου νερού, για την εύρεση της κατάλληλης διαχειριστικής πολιτικής που θα προταθεί.

2. Κεφάλαιο 2^ο: Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής και του Φαινομένου Υφαλμύρισης

2.1. Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής

Ως μοντέλο μπορεί να οριστεί μία επιλεγμένη, απλοποιημένη εκδοχή ενός αληθινού συστήματος και ενός φαινομένου που λαμβάνει χώρα μέσα σε αυτό, το οποίο προσομοιάζει τις σχέσεις διέγερσης-απόκρισης του συστήματος που ενδιαφέρουν το μελετητή (Bear & Cheng 2010). Διέγερση του συγκεκριμένου συστήματος μπορεί να προκληθεί από την άντληση, από την εισαγωγή ενός ρύπου, από την τεχνητή ανατροφοδότηση ή από την αλλαγή των οριακών του συνθηκών. Η απόκριση του συστήματος σε μία διέγερση, παίρνει τη μορφή χωρικών και χρονικών μεταβολών στο επίπεδο του νερού και στη συγκέντρωση πιθανού ρύπου.

Ο Ackoff (1962) προτείνει μια γενική κατάταξη των μοντέλων στις εξής κατηγορίες:

- Εικονικά μοντέλα (μακέτες, φωτογραφίες): Είναι μια αναπαράσταση σε σμίκρυνση της πραγματικότητας.
- Αναλογικά μοντέλα: Αναπαριστούν τη συμπεριφορά της πραγματικής κατάστασης

Αναλυτικά μοντέλα: Χρησιμοποιούν μαθηματικές σχέσεις που εκφράζουν τους φυσικούς νόμους την υπό μελέτη κατάσταση. Διαχωρίζονται συνήθως σε 4 κατηγορίες, αναλόγως της εξάρτησής τους από το χρόνο (στατικά-δυναμικά) και από τους φυσικούς νόμους ή τυχαίους παράγοντες (ντετερμινιστικά – μη ντετερμινιστικά). Βάσει αυτών των διακρίσεων, τα αναλυτικά μοντέλα ταξινομούνται με βάση τον Πίνακα 2.1

Πίνακας 2.1 Ταξινόμηση μοντέλων βάσει της εξάρτησης από το χρόνο και τους φυσικούς νόμους.

ΣΤΑΤΙΚΑ		ΔΥΝΑΜΙΚΑ
ΝΤΕΤΕΡΜΙΝΙΣΤΙΚΑ	Αλγεβρικές Σχέσεις	Διαφορικές Εξισώσεις
ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΑ	Στατιστικές/Πιθανολογικές Σχέσεις	Προσομοίωση

- Νεότεροι ερευνητές (Checkland, Wilson) προτείνουν και έναν τέταρτο τύπο μοντέλων, τα εννοιολογικά (conceptual models). Πρόκειται για γραφική – συμβολική αναπαράσταση των ποιοτικών χαρακτηριστικών μίας κατάστασης, όπως αυτή εννοείται από τον παρατηρητή (Τσαγγάρης, Σπύρου 2001).

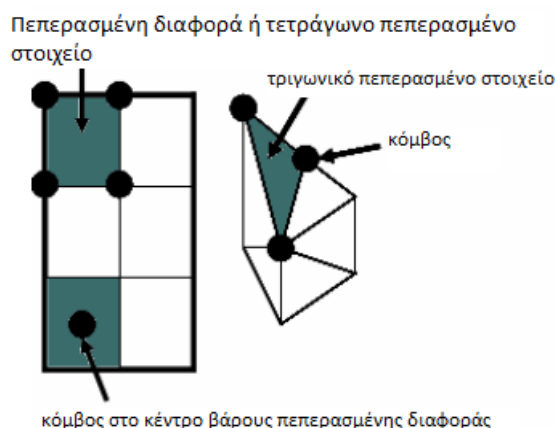
Τα αναλυτικά μοντέλα, υπάγονται στην κατηγορία των μαθηματικών μοντέλων, που χρησιμοποιούν μαθηματικές έννοιες για να περιγράψουν είτε τις φυσικές ιδιότητες του συστήματος (σχήμα, μέγεθος) είτε τις λειτουργίες του (κίνηση, αλλαγές της κατάστασης) είτε ακόμη τις σχέσεις ανάμεσα στα στοιχεία του συστήματος (Ρουμελιώτης 2001).

Το σύστημα ενός υπόγειου υδροφορέα, που μελετάται και στην παρούσα εργασία αποτελεί ένα μαθηματικό, δυναμικό, ντετερμινιστικό μοντέλο που χρησιμοποιεί διαφορικές εξισώσεις για την περιγραφή της κίνησης του υπόγειου νερού όπως είναι οι εξισώσεις του Darcy, η εξίσωση της συνέχειας και της ροής υπογείων υδάτων. Η μεθοδολογία επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων διακρίνεται σε δύο βασικές κατηγορίες. Τις αναλυτικές λύσεις και τις αριθμητικές μεθόδους. Μία αναλυτική λύση προσπαθεί να καθορίσει τη χωρική και χρονική κατανομή των μεταβλητών κατάστασης του προβλήματος, π.χ. $h=h(x,t)$ και $c=c(x,t)$, ως συνεχείς συναρτήσεις του χώρου και του χρόνου, ενώ η αριθμητική μέθοδος παρέχει

πληροφορία για τις ίδιες μεταβλητές μόνο σε ένα επιλεγμένο σύνολο από σημεία στο χώρο και το χρόνο (Bear & Cheng 2010). Πληροφορία του τι συμβαίνει σε όλα τα υπόλοιπα σημεία ενδιαφέροντος, αποκτάται μέσω γραμμικής παρεμβολής. Οι αριθμητικές μέθοδοι προτιμώνται στη παρούσα μελέτη, λόγω αδυναμίας των αναλυτικών λύσεων να καλύψουν με αξιοπιστία τα πρακτικά προβλήματα που προκύπτουν από την προσομοίωση ενός πολύπλοκου φυσικού συστήματος. Ειδικά όταν πρόκειται για δισδιάστατα ή τρισδιάστατα προβλήματα, δεν είναι εφικτό να βρεθούν άμεσες αναλυτικές λύσεις για τις γενικές μορφές των εξισώσεων. Κάποιες από τις πιο διαδεδομένες και αξιόπιστες αριθμητικές μεθόδους επίλυσης των εξισώσεων ροής είναι:

- Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών
- Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων
- Η μέθοδος των οριακών στοιχείων
- Η μέθοδος των χαρακτηριστικών
- Η μέθοδος των κινούμενων σημείων

Στην παρούσα μελέτη γίνεται χρήση προσομοιωτή, που χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών για να επιλύσει το σύστημα των χωρικά μεταβαλλόμενων εξισώσεων ροής. Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, οι διακριτές εξισώσεις εφαρμόζονται σε ένα σημείο. Συγκεκριμένα, το φυσικό σύστημα διακριτοποιείται σε μία σειρά πεπερασμένων στοιχείων που είναι συνδεδεμένα με ένα διακριτό αριθμό σημειακών κόμβων. Στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, η διακριτή εξίσωση εφαρμόζεται σε ένα σημειακό κόμβο (node), και συνήθως χρησιμοποιείται σε τετράγωνα πλέγματα. Όπως φαίνεται στο σχήμα της Εικόνας 2.1, δύο είδη διακριτοποίησης πεπερασμένων διαφορών είναι διαθέσιμα. Ένα που έχει κόμβους στις γωνίες του στοιχείου και ένα που έχει κόμβους στο κέντρο.



Εικόνα 2.1 Πλέγματα με Πεπερασμένα στοιχεία και Πεπερασμένες διαφορές (Pinder 2002)

Σύγκριση στη χρήση των δύο μεθόδων έχει πραγματοποιηθεί από την (Papadopoulou et al. 2009) όπου σημειώνεται το πλεονέκτημα της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων να προσομοιάζουν ακανόνιστες περιοχές μελέτης με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Η διαδικασία της μοντελοποίησης περιλαμβάνει τα εξής στάδια (Bear & Cheng 2010):

1. Προσδιορισμός των πληροφοριών που απαιτούνται για την πραγματοποίηση διαχειριστικών αποφάσεων
2. Ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου

3. Ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου
4. Ανάπτυξη του αριθμητικού μοντέλου και επιλογή κώδικα
5. Επαλήθευση του κώδικα
6. Αξιολόγηση μοντέλου
7. Βαθμονόμηση μοντέλου και εκτίμηση παραμέτρων
8. Εφαρμογή μοντέλου
9. Ανάλυση ευαισθησίας
10. Στοχαστική ανάλυση
11. Συμπεράσματα

Αφού έχει επιλεγεί το κατάλληλο αριθμητικό μοντέλο, μένει να επιλεγεί και ο κατάλληλος υπολογιστικός κώδικας που θα εκτελέσει τον μεγάλο αριθμό επαναληπτικών βημάτων που περιλαμβάνονται στην επίλυση του αριθμητικού μοντέλου. Παρόλο που υπάρχει ένα μεγάλο πλήθος από κώδικες με αλληλεπικαλυπτόμενες δυνατότητες, αξίζει να γίνει αναφορά σε μερικούς που έχουν ευρέως υιοθετηθεί, όπως είναι το MODFLOW (Papadopoulos et al. 2009), το FEFLOW (Dokou & Karatzas, 2012), (Tolika K., Maheras P., Vafiadis M., Flocas H.A. 2007), (Kopsiaftis et al. 2009), (Jakonovic et al. 2011), το SEAWAT (Guo & Langevin, 2002), το SUTRA (Voss & Souza, 1987), το SHARP (Essaid, 1990), και το UTCHEM (Pope & Nelson, 1978).

2.1.1. Το μαθηματικό μοντέλο PTC

Ο κώδικας του PTC (Princeton Transport Code) είναι ένας τρισδιάστατος προσομοιωτής υπόγειας ροής και μεταφοράς ρύπανσης, που λειτουργεί χρησιμοποιώντας συνδυαστικά τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών, με σκοπό να επιλύσει ένα σύστημα χωρικά μεταβαλλόμενων εξισώσεων που αναπαριστούν την υπόγεια ροή, την ταχύτητα και τη μεταφορά μάζας ρύπου του υπό μελέτη συστήματος (Pinder et al. 1997).

$$\nabla(K\nabla h) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} - \nabla(D\nabla c) - \nabla(vc) = 0 \quad (2.2)$$

$$v = -\frac{K}{n}\nabla h \quad (2.3)$$

Όπου,

h , είναι το υδραυλικό ύψος [L], K είναι ο τανυστής της υδραυλικής αγωγιμότητας [LT^{-1}], D είναι ο τανυστής της υδροδυναμικής διασποράς [M^2T^{-1}], C είναι η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας [ML^{-3}], t είναι ο χρόνος [T], v , είναι το διάνυσμα της ταχύτητας διαμέσου του πορώδους [LT^{-1}] και n είναι το ενεργό πορώδες [-]. Η εξ. (2.1) περιγράφει την υπόγεια ροή διαμέσου του πορώδους, η εξ. (2.2) τη μεταβολή της συγκέντρωσης ρύπου στο χρόνο, ενώ η εξ. (2.3) περιγράφει το νόμο του Darcy που δείχνει τη σχέση ανάμεσα στη ταχύτητα ροής και το υδραυλικό ύψος.

Το PTC επιτυγχάνει να εξοικονομήσει τόσο μνήμη όσο και επεξεργαστική ισχύ, με την εφαρμογή ενός διαχωριστικού αλγορίθμου επίλυσης των 3D εξισώσεων. Το πεδίο μελέτης διαχωρίζεται σε παράλληλα οριζόντια επίπεδα, σε καθένα από τα οποία, εφαρμόζεται διακριτοποίηση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα επίπεδα συνδέονται καθέτως με τη συνεφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων επιτυγχάνει τη διαίρεση των υπολογισμών σε δύο βήματα, κατά τη διάρκεια μίας επανάληψης. Στο πρώτο βήμα, επιλύονται όλες οι εξισώσεις οριζοντίως με χρήση

πεπερασμένων στοιχείων, και στο δεύτερο βήμα επιλύονται όλες οι εξισώσεις καθέτως με χρήση πεπερασμένων διαφορών (Pinder et al. 1997).

Ο κώδικας PTC συζευγνύεται με ένα προηγμένο γραφικό λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων (Graphical User Interface, GUI), το Argus ONE (Argus Open Numerical Environments), το οποίο είναι ένα Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical Information System, GIS) κατάλληλο για αριθμητική μοντελοποίηση. Το Argus ONE συνεργάζεται με το PTC μέσω μιας ρουτίνας (Plug-In Extension, PIE) και επιτρέπει την εισαγωγή ψηφιακών χαρτών, τη δημιουργία πλεγμάτων καθώς και την επεξεργασία μεταβλητών στους κόμβους του πλέγματος (οριακές και αρχικές συνθήκες), μέσω της δημιουργίας επιπέδων (layers).

Το PTC δέχεται 3 τύπους οριακών συνθηκών στην εξίσωση της υπόγειας ροής:

- Τύπος I: Το υδραυλικό ύψος είναι σταθερό και καθορισμένο (Συνθήκη Diriclet)
- Τύπος II: Το υδραυλικό ύψος μεταβάλλεται σταθερά με το χρόνο και ακολουθεί συγκεκριμένη εξίσωση, σταθερής ροής (Συνθήκη Neumann)
- Τύπος III: Αποτελεί μικτό τύπο οριακών συνθηκών, διότι συσχετίζει τα οριακά υδραυλικά ύψη με τις οριακές συνθήκες ροής (Συνθήκη Cauchy). Με αυτόν τον τύπο μπορεί να προσομοιαστεί, για παράδειγμα, η διαρροή από ή προς ένα αποθηκευτικό σώμα, ή η εξατμοδιαπνοή κατά μήκος της επιφάνειας του νερού (όπου η ροή θα εξαρτάται από το βάθος του νερού και από την επιφάνεια) (Anderson & Woessner, 2002)

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση μόνο των δύο πρώτων τύπων οριακών συνθηκών.

2.1.2. Στατιστικοί Δείκτες Αξιολόγησης

Στην προσπάθεια αξιολόγησης της καταλληλότητας του προγράμματος PTC, για την επαρκώς ακριβή προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα, έγινε η χρήση στατιστικών και γραφικών τεχνικών που έχουν προταθεί, βάσει της δουλειάς των Moriasi & Arnold (2007).

Στις στατιστικές τεχνικές αξιολόγησης μοντέλου, πρότυπης παλινδρόμησης (standard regression) περιλαμβάνεται ο συντελεστής συσχέτισης του Pearson (r) και ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2). Οι δύο συντελεστές περιγράφουν το βαθμό συγγραμμικότητας μεταξύ των προσομοιωμένων και των μετρημένων στο πεδίο δεδομένων. Ο συντελεστής συσχέτισης, ο οποίος κυμαίνεται από -1 ως +1, είναι δείκτης του βαθμού γραμμικής σχέσης μεταξύ των παρατηρήσεων και των προσομοιασμένων τιμών. Αν $r=0$, δεν υπάρχει γραμμική σχέση. Αν $r=-1$ ή $r=+1$, τότε υπάρχει μία τέλεια θετική ή αρνητική γραμμική σχέση. Ο r υπολογίζεται από την εξίσωση (2.4)

$$r = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{mean}^{obs})(Y_i^{sim} - Y_{mean}^{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_{mean}^{obs})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i^{sim} - Y_{mean}^{sim})^2}} \right] \quad (2.4)$$

Ομοίως, ο συντελεστής προσδιορισμού (R^2), περιγράφει την αναλογία της διακύμανσης στα μετρούμενα δεδομένα που εξηγούνται από το μοντέλο. Ο συντελεστής (R^2) κυμαίνεται από 0 ως 1, με τις μεγαλύτερες τιμές να δηλώνουν μικρότερη διακύμανση σφάλματος. (Santhi et al. 2001), (Van Liew et al. 2007).

Στις αδιάστατες στατιστικές τεχνικές αξιολόγησης μοντέλου περιλαμβάνεται ο δείκτης απόδοσης Nash-Sutcliffe (Nash Sutcliffe Efficiency, NSE). Η NSE είναι μία κανονικοποιημένη στατιστική που καθορίζει το σχετικό μέγεθος της υπολειμματικής διακύμανσης (“noise”) εν συγκρίσει με τη διακύμανση των μετρημένων στο πεδίο τιμών (“information”)(Nash & Sutcliffe, 1970). Υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (2.5)

$$NSE = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2 \right]} \quad (2.5)$$

Όπου,

Y_i^{obs} είναι η ισοτή παρατήρηση για το στοιχείο που αξιολογείται, Y_i^{sim} είναι η ισοτή προσομοιωμένη τιμή για το στοιχείο που αξιολογείται, Y^{mean} είναι η μέση τιμή των παρατηρήσεων και n , ο συνολικός αριθμός των παρατηρήσεων. Ο δείκτης NSE κυμαίνεται στο διάστημα $(-\infty, +1]$. Για $NSE=1$, η προσομοίωση είναι η βέλτιστη δυνατή. Γενικά τιμές μεγαλύτερες του μηδενός θεωρούνται αποδεκτές.

Στις στατιστικές τεχνικές αξιολόγησης μοντέλου, με δείκτη σφάλματος, συμπεριλαμβάνονται οι δείκτες PBIAS και RMSE.

Ο δείκτης PBIAS (Percent BIAS) μετράει τη μέση τάση των προσομοιωμένων δεδομένων να είναι μεγαλύτερα ή μικρότερα από τα αντίστοιχα παρατηρούμενα στο πεδίο (Gupta et al. 1999). Η βέλτιστη τιμή του δείκτη είναι $PBIAS=0$. Θετικές τιμές υποδηλώνουν υποεκτίμηση, ενώ αρνητικές τιμές υπερεκτίμηση των πραγματικών τιμών από το μοντέλο. Ο δείκτης υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (2.6)

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \cdot (100)}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \right] \quad (2.6)$$

Ο δείκτης RMSE (Root Mean Square Error) είναι ένας συχνά χρησιμοποιούμενος δείκτης της διαφοράς μεταξύ των τιμών που προβλέπονται από ένα μοντέλο και των τιμών που πραγματικά παρατηρούνται στο περιβάλλον (Chu & Shirmohammadi 2004), (G. G. Vazquez-Amábile & B. A. Engel, 2005). Αυτές οι διαφορές καλούνται και υπόλοιπα (residuals), και ο RMSE χρησιμεύει στο να τις συγκεντρώνει σε ένα ενιαίο μέτρο προβλεπτικής ισχύος. Ο δείκτης RMSE υπολογίζεται από την εξίσωση (2.7)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{n}} \quad (2.7)$$

Οι τιμές του RMSE δεν είναι αδιάστατες. Στην παρούσα μελέτη, ο δείκτης RMSE έχει μονάδες μήκους [L]. Αδιάστατη μορφή του RMSE είναι το NRMSE υπολογίζεται από την εξίσωση (2.8)

$$NRMSE = \frac{RMSE}{Y_{max}^{obs} - Y_{min}^{obs}} \quad (2.8)$$

2.2. Το Φαινόμενο της Υφαλμύρισης

Με τον όρο υφαλμύριση (saltwater intrusion) εννοείται η μεταφορά μάζας αλμυρού νερού μέσα σε ζώνη που είναι ήδη κατειλημμένη από γλυκό νερό, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η χημική σύνθεση του υπόγειου νερού (J. Bear, 1999). Η μάζα του αλμυρού νερού, που χαρακτηρίζεται από υψηλές συγκεντρώσεις ολικών διαλυμένων στερεών (Total Dissolved

Solids,TDS), κυρίως ιόντα χλωρίου και νατρίου, εισχωρεί κάτω από τη μάζα του γλυκού νερού, λόγω διαφοράς πυκνοτήτων, και το αντικαθιστά.

Ο παραπάνω ορισμός αναφέρεται σε παράκτιους υδροφόρους σχηματισμούς, όπου είναι φυσική η ύπαρξη του φαινομένου, λόγω της συνεχούς επαφής του θαλασσινού με το γλυκό νερό. Πέρα από την εισχώρηση της θάλασσας, το φαινόμενο της υφαλμύρισης επηρεάζεται και από άλλους γεωλογικούς παράγοντες (J. Bear, 1999).

2.2.1. Αιτίες Φαινομένου

Ένας φυσικός παράγοντας που επηρεάζει την ποιότητα του νερού σε παράκτιους υδροφορείς, αλλά δεν σχετίζεται άμεσα με την εισχώρηση θαλασσινού νερού, είναι το παγιδευμένο ορυκτό θαλασσινό νερό σε εκκενωθείσα τμήματα του υδροφορέα μετά από την εισχώρηση θαλασσινού νερού από παλιότερη γεωλογική εποχή, που χαρακτηριζόταν από υψηλότερη στάθμη της θάλασσας (Custodio, 1997). Ο J. Bear, (1999) χαρακτηρίζει αυτούς τους σχηματισμούς ως θόλους άλατος και αποδίδει τη δημιουργία τους στην τεκτονική κίνηση του φλοιού της Γης.

Ένας άλλος φυσικός παράγοντας που επηρεάζει το φαινόμενο της υφαλμύρισης, είναι το θαλάσσιο spray (sea spray ή sea salt aerosol, SSA) το οποίο αποτελείται από αιωρούμενα σωματίδια που σχηματίζονται απευθείας από τον ωκεανό, ως επί το πλείστον με απόρριψη στην ατμόσφαιρα από “έκρηξη” φυσαλίδων στη διεπαφή ατμόσφαιρας-ωκεανού (Lewis & Schwartz, 2004). Το θαλάσσιο spray περιέχει ανόργανα άλατα, οργανική ύλη από τον ωκεανό (Gantt & Meskhidze, 2013), ακόμη και ζωντανούς μικροοργανισμούς όπως βακτήρια και ιούς (Syzdek, 2012). Τα διαλυμένα στερεά εναποτίθενται στο έδαφος και μπορούν, έτσι, να εισέλθουν στο σύστημα των υπόγειων νερών μεταβάλλοντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του.

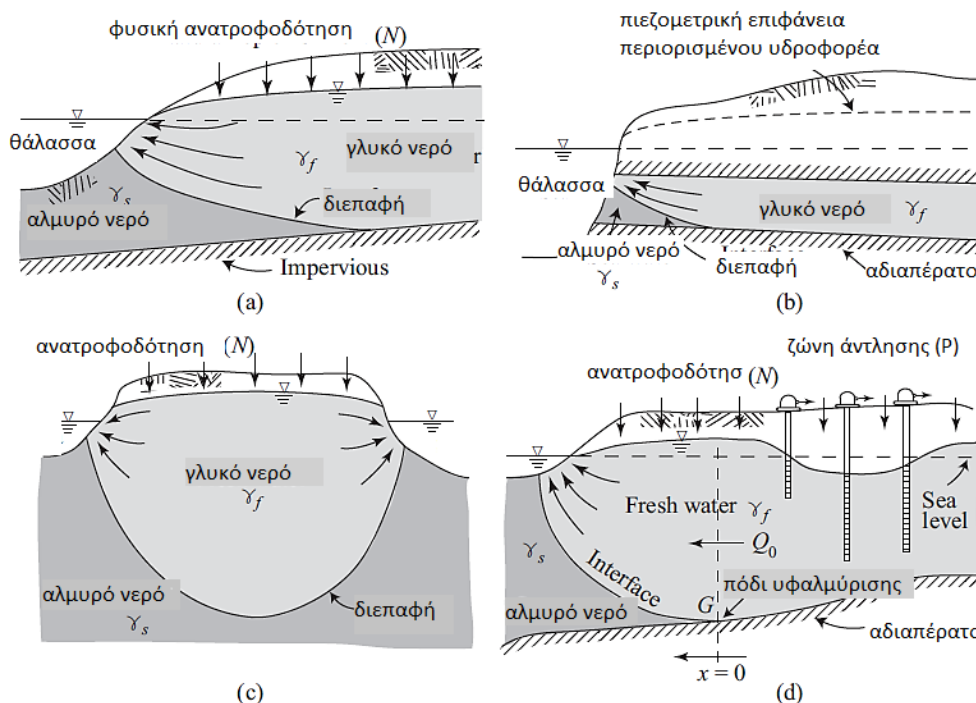
Ένας βασικός παράγοντας είναι η διάλυση στο υπόγειο νερό πετρωμάτων πλούσιων σε άλατα (Custodio, 1997), όπως το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3), που μπορεί να απαντηθεί σε ασβεστολιθικούς και μαργαϊκούς σχηματισμούς. Πετρώματα όπως τα προαναφερθέντα αποτελούν μέρος του γεωλογικού υποβάθρου της ευρύτερης περιοχής μελέτης της παρούσας εργασίας και θα αναλυθούν περαιτέρω στο Κεφάλαιο 3.

Καθώς το φαινόμενο της υφαλμύρισης σχετίζεται άμεσα με το ρυθμό τροφοδοσίας του υπόγειου υδροφορέα με γλυκό νερό, προκύπτει η ύπαρξη κι άλλων φυσικών παραγόντων πέρα των γεωλογικών, που συνεισφέρουν ανασταλτικά ή καταλυτικά σε αυτό. Κλιματικές μεταβλητές όπως η βροχόπτωση, η επιφανειακή απορροή και η θερμοκρασία είναι κάποιοι από αυτούς του παράγοντες. Μειωμένες βροχοπτώσεις σε συνδυασμό με αυξημένες τιμές θερμοκρασίας, συντελούν στη μείωση του ρυθμού τροφοδοσίας του υπόγειου νερού εξαιτίας του αυξημένου ρυθμού εξατμοδιαπνοής (Ranjana, 2006). Η αύξηση της στάθμης της θάλασσας (Μ.Σ.Θ), που είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την κλιματική αλλαγή (υπό τη μορφή μεταβολών στην ατμοσφαιρική πίεση, τη διεύρυνση του ωκεάνιου όγκου ένεκα αύξησης της μέσης θερμοκρασίας της Γης και του λιώσιματος των πάγων (Gerald A. Meehl, 2005)) αποτελεί μία διεργασία που αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο της υφαλμύρισης (Werner & Simmons, 2009). Η Διακυβερνητική Επιτροπή Κλιματικής Αλλαγής (Intergovernmental Panel on Climate Change) (IPCC 2014), προβλέπει ότι μέσα στα επόμενα 30 με 40 έτη, η Μ.Σ.Θ θα έχει ανέλθει από 0,24 ως 0,29 μέτρα, ενώ μέχρι το τέλος του αιώνα, η Μ.Σ.Θ θα ανέλθει από 0,44 ως 0,74 μέτρα. Η πιθανότητα επαλήθευσης αυτού του σεναρίου, καθιστά αναγκαίο το συνυπολογισμό της αύξησης της Μ.Σ.Θ στη μεταφορά της υφαλμύρισης σε ενδότερες ζώνες υδροφόρων στρωμάτων. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν λίγες

μελέτες που έχουν εξετάσει ποσοτικά την επίδραση της αύξησης της Μ.Σ.Θ στο φαινόμενο της υφαλμύρισης, και που αναφέρονται σε παρατηρήσεις και αριθμητικές προσομοιώσεις συγκεκριμένων πεδίων μελέτης (Meisler, 1984; Oude Essink, 1999; Sherif, 1999; Bobba, 2002; Werner & Simmons, 2009). Τα μικρά νησιά είναι από τα πιο ευάλωτα συστήματα στις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής (Mimura N, 2007). Η απουσία επιφανειακών απορροών κάνει τα μικρά νησιά να εξαρτώνται πλήρως από τις βροχοπτώσεις και την άντληση υπόγειου νερού. Αυτή η εξάρτηση σε συνδυασμό με την αύξηση της Μ.Σ.Θ, καθώς και τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση για νερό, αποτελούν επιπλέον πιέσεις που καθιστούν τα συγκεκριμένα συστήματα πολύ επιρρεπή στις αναμενόμενες κλιματικές μεταβολές και κατ' επέκταση στο φαινόμενο της υφαλμύρισης (Unsal et al. 2014).

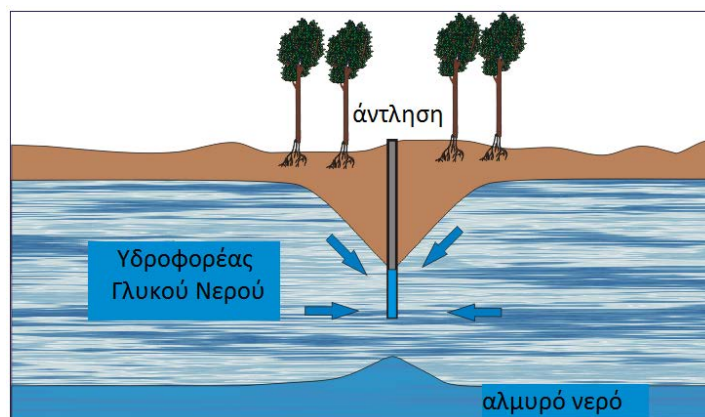
Όλοι οι παράγοντες που αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής ευθύνονται για τη φυσική υποβάθμιση υπόγειων νερών όπου υπάρχει υδραυλική επικοινωνία ανάμεσα σε γλυκό και αλμυρό νερό. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη πρόκειται να μελετηθεί η επιρροή και των ανθρωπογενών παραγόντων. Ο βασικός ανθρωπογενής παράγοντας που θα εξεταστεί είναι η υπερεκμετάλλευση του παράκτιου υδροφορέα, ένεκα της αύξησης του μόνιμου πληθυσμού και του τουρισμού. Εντούτοις, με το φαινόμενο της υφαλμύρισης σχετίζονται και άλλες ανθρωπινες δραστηριότητες που συνδέονται με τη χρήση λιπασμάτων, την παραγωγή υγρών αποβλήτων, τα αποστραγγιστικά δίκτυα και την απόρριψη άλμης από εργοστάσια αφαλάτωσης.

Η Εικόνα 2.2 αναπαριστά κάποιες τυπικές τομές, με τη διεπαφή γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς, υπό την επίδραση φυσικών (a,b,c) και ανθρωπογενών (d) παραγόντων.



Εικόνα 2.2 Τυπικές κάθετες τομές της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτιους υδροφορείς. (a) Ελεύθερος/Φρεάτιος υδροφορέας με ανεφοδιασμό γλυκού νερού, (b) Περιορισμένος υδροφορέας, (c) Φακοί γλυκού νερού σε νησί, (d) Ελεύθερος υδροφορέας με άντληση. Πηγή: (Bear & Cheng 2010)

Η αύξηση του ρυθμού άντλησης, σε έναν παράκτιο υδροφόρα, προκαλεί μείωση της ποσότητας ανεφοδιασμού με γλυκό νερό, ενώ παράλληλα πέφτει το πιεζομετρικό ύψος του νερού και η διεπαφή γλυκού-αλμυρού ανυψώνεται. Αυτή η ανύψωση παίρνει τη μορφή κώνου, ακριβώς αντίστροφου ως προς τον κώνο υποχώρησης (Εικόνα 2.3). Εάν η στάθμη του υδροφόρου επανέλθει, τότε βαθμιαία επανέρχεται και η διεπαφή, αφήνοντας όμως υπολείμματα αλμυρότητας, με αποτέλεσμα να διευρύνεται η υφάλμυρη ζώνη. Επιπλέον, η είσοδος του αλμυρού στο υδροφόρο στρώμα προκαλεί κατιοντικές ανταλλαγές με τα διάφορα ορυκτά του γεωλογικού σχηματισμού της περιοχής, το οποίο δρα ως δευτερογενής πηγή ρύπανσης. Το γεγονός αυτό, καθιστά συχνά την υφαλμύριση ένα φαινόμενο μη αναστρέψιμο.



Εικόνα 2.3 Ανύψωση διεπαφής αλμυρού-γλυκού νερού με τη μορφή κώνου. Το πιεζομετρικό ύψος του νερού υποχωρεί με τη μορφή αντίστροφου, προς τον πρώτο, κώνου. Πηγή: <http://iwmi.dhiigroup.com/>

Η απόσταση του σημείου άντλησης από τη διεπαφή εξαρτάται κυρίως από τη φύση του υδροφόρα, το ρυθμό άντλησης και την περίοδο άντλησης. Για παράδειγμα, υδροφορείς με μικρότερη αποθηκευτικότητα δημιουργούν βαθύτερους και πλατύτερους κώνους από υδροφορείς με μεγαλύτερη τιμή αποθηκευτικότητας.

2.2.2. Νομοθεσία και Ποιοτικές Παράμετροι Υπόγειου Νερού

Το νομοθετικό πλαίσιο που σχετίζεται με το ζήτημα της υφαλμύρισης προκύπτει από την Υπ. Απόφαση ΚΥΑ 15393, (ΦΕΚ 1022/5-8-2002) και την τροποποίησή της με το (ΦΕΚ 1002B/18-7-2005) που αφορά στην κατάταξη δημοσίων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες, σύμφωνα με το άρθρο 3 του Ν. 1650/1986, όπως αντικαταστάθηκε με το άρθρο 1 του Ν. 3010/2002. Στην κοινή υπουργική απόφαση ΚΥΑ 15393, τα έργα πρόληψης ή αντιμετώπισης της υφαλμύρισης των υπόγειων υδάτων ή των εδαφών, κατατάσσονται στο σύνολό τους, στην ομάδα των υδραυλικών έργων (1^η υποκατηγορία της Α κατηγορίας). Υπάγονται, δηλαδή στην κατηγορία των έργων που λόγω της φύσης, του μεγέθους και της έκτασής τους είναι πιθανό να προκαλέσουν σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Επίσης, με βάση την τροποποίηση της Υγειονομικής Διάταξης κοινής υπουργικής απόφασης Υ2/2600/2001 «Ποιότητα του νερού ανθρώπινης κατανάλωσης» σε συμμόρφωση προς την οδηγία 98/83/ΕΚ του Συμβουλίου της Ε.Ε της 3^{ης} Νοεμβρίου 1998 (ΦΕΚ 630 Β/26-4-2007), ορίζονται ενδεικτικές παράμετροι ποιότητας του πόσιμου νερού:

- Χλωριόντα : 250 mg/L
- Αγωγιμότητα : 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}@20^{\circ}\text{C}$

Η σημασία και η σχέση των δύο παραμέτρων ποιότητας, αναλύονται ακολούθως.

Οι κυριότερες παράμετροι του υπόγειου νερού που συνήθως εξετάζονται είναι οι φυσικές παράμετροι, όπως η θερμοκρασία, το χρώμα, η θολότητα, η οσμή και η ραδιενέργεια και οι χημικές παράμετροι όπως είναι το pH, η αγωγιμότητα, η σκληρότητα, η αλκαλικότητα και το δυναμικό οξειδοαναγωγής.

Άλλες χημικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν τη σύσταση του υπόγειου νερού είναι τα ιόντα, τα οποία διακρίνονται σε κύρια ιόντα (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) και δευτερεύοντα ιόντα (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , NH_4^+ , F^- , CO_3^{2-} , Al^{3+}), θρεπτικές ενώσεις του N,P, πρωτεΐνες, οργανικές ενώσεις, αέρια (O_2 , N_2 , H_2S , NH_3 , CH_4) και βαρέα μέταλλα (Pb^{2+} , Cr^{6+} , Hg^{2+} , As^{3+} , Cd^{2+}).

Ηλεκτρική αγωγιμότητα είναι εξ ορισμού η ικανότητα ενός υλικού να διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα και είναι αντιστρόφως ανάλογη της ηλεκτρικής αντίστασης. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού αναφέρεται στην ικανότητά του να άγει ηλεκτρικά φορτία και εξαρτάται από τη συγκέντρωση ιόντων, το σθένος των ιόντων και τη θερμοκρασία του διαλύματος.

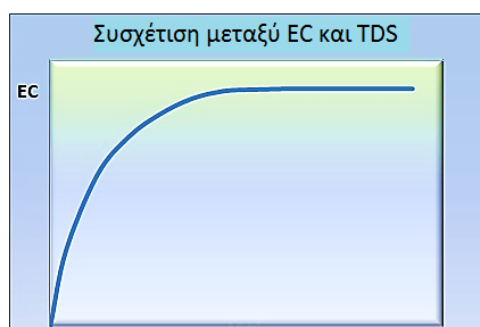
Ολικά διαλυμένα στερεά (TDS, Total Dissolved Solids) είναι το σύνολο των ανόργανων και οργανικών σωματιδίων σε ένα διάλυμα, που είναι μικρότερα από 2 μm και δεν περιλαμβάνουν αιωρούμενα ιζήματα, κολλοειδή και διαλυμένα αέρια. Με την παραδοχή ότι τα TDS στο νερό αποτελούνται κυρίως από ιοντικά συστατικά που άγουν ηλεκτρισμό, η ειδική αγωγιμότητα, όπως εκφράζεται η ηλεκτρική αγωγιμότητα που είναι κανονικοποιημένη στους 25 °C, του υπόγειου νερού είναι άμεσα συσχετισμένη με τα TDS (**Atekwanaa, 2004**).

Όσο υψηλότερη είναι η συγκέντρωση των διαλυμένων ανόργανων αλάτων σε ένα υδατικό διάλυμα, τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της αγωγιμότητας σε αυτό. Αυτή η αναλογικότητα εκφράζεται από τη σχέση

$$TDS = k EC \quad (2.9)$$

Όπου τα TDS εκφράζονται σε mg/L, και η ηλεκτρική αγωγιμότητα σε $\mu\text{S}/\text{cm}$ @25°C. Ο παράγων k διαφοροποιείται ανάλογα με την ιοντική σύσταση του νερού. Για διάλυμα νερού όπου επικρατούν τα ιόντα νατρίου(Na^+) και χλωρίου(Cl^-), ο παράγων k μπορεί να κυμαίνεται από 0,47- 0,5.

Καθώς η συγκέντρωση των αλάτων αυξάνεται ($\text{TDS} > 1000 \text{ mg/L}$ και αγωγιμότητα $> 2000 \mu\text{S}/\text{cm}$), ελαττώνεται η ενεργότητα των ιόντων και κατά συνέπεια ελαττώνεται η ικανότητά τους να άγουν το ηλεκτρικό ρεύμα, οπότε το σύνολο των TDS ισούται κατά προσέγγιση με την αγωγιμότητα. Η μεταβολή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας $EC_{@25^\circ\text{C}}$ σε σχέση με τη συγκέντρωση των TDS αναπαρίσταται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4 Η ποιοτική σχέση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας $EC_{@25^\circ\text{C}}$ με τη συγκέντρωση των ολικών διαλυμένων στερεών TDS.

Με βάση την τιμή των TDS γίνεται κατηγοριοποίηση των υδάτων βάσει του Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2 Κατηγοριοποίηση της ποιότητας του νερού βάσει της συγκέντρωσης των ολικά διαλυμένων σε αυτό στερεών

TDS (mg/L)	Κατηγορία ύδατος
<1000	Γλυκό/fresh
1000-10.000	Υφάλμυρο/brackish
10.000-100.000	Αλμυρό/saline
>100.000	Υπεράλμυρο (άλμη)/brine

Με την αγωγιμότητα συνδέεται και η **αλατότητα** η οποία ορίζεται ως η συνολική ποσότητα των στερεών ουσιών σε γραμμάρια που περιέχονται σε 1kg θαλασσινό νερό, όταν όλα τα ανθρακικά (CO_3^{2-}) έχουν μετατραπεί σε οξείδια, τα βρωμιούχα (Br^-) και ιωδιούχα (I^-) έχουν αντικατασταθεί από χλωριούχα (Cl^-) ιόντα και έχει οξειδωθεί όλη η οργανική ύλη. (Knudsen, 1901).

Η αλατότητα έχει επίσης οριστεί και με βάση τη χλωριότητα από τη σχέση

$$S\text{‰} = 1,80655 \text{ Cl}\text{‰} \quad (2.10)$$

(Cox, 1967). Η $\text{Cl}\text{‰}$, ορίζεται ως η ολική ποσότητα χλωρίου, βρωμίου και ιωδίου σε γραμμάρια που περιέχονται σε 1 kg θαλασσινού νερού, θεωρώντας ότι το βρώμιο και το ιώδιο έχουν αντικατασταθεί από το χλώριο. Η αναλογία μάζας των χλωριόντων (g/kg δ/τος) ως προς τη χλωριότητα $\text{Cl}\text{‰}$ (g/kg δ/τος) είναι

$$\left[\frac{\text{χλωριόντα (g/kg δ/τος)}}{\text{χλωριότητα (g/kg δ/τος)}} \right] = \left[\frac{0,99894 \text{‰}}{\text{Cl}\text{‰}} \right] \quad (2.11)$$

(Millero, 1974).

Η χλωριότητα δεν είναι η μόνη ποσότητα που έχει χρησιμοποιηθεί ως μέτρηση αναφοράς της αλατότητας (Millero, 2008). Ένας τρίτος ορισμός της αλατότητας του νερού έγινε από τους (Wooster, 1969) βάσει της δουλειάς του (Cox, 1967). Η αλατότητα συσχετίστηκε με την ηλεκτρική αγωγιμότητα βάσει της εξίσωσης

$$S\text{‰} = -0,08996 + 28,2972 R_{15} + 12,8083 R_{15}^2 - 10,67869 R_{15}^3 + 5,98624 R_{15}^4 - 1,32311 R_{15}^5 \quad (2.12)$$

Όπου R_{15} είναι ο λόγος της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του υδατικού δείγματος προς την ηλεκτρική αγωγιμότητα υδατικού δείγματος αναφοράς (standard seawater) με αλατότητα 35‰, όταν και τα δύο δείγματα είναι σε θερμοκρασία 15 °C και πίεση 1 atm.

$$R_{15} = \frac{C(S, t, p)}{C(35, 15, 1)} = \frac{C(S, t, p)}{4,2914 \left[\frac{S}{m} \right]} \quad (2.13)$$

Οι δύο παραπάνω προσεγγίσεις δεν είναι συμβατές μεταξύ τους, όταν παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στη σύσταση του δείγματος από το standard seawater (Frank J. Millero, 2008).

Το 1978 προτάθηκε ένας νέος ορισμός της αλατότητας μέσω του Practical Salinity Scale, PPS-78 (Unesco, 1981). Η πρακτική αλατότητα ενός δείγματος θαλασσινού νερού ορίζεται με βάση το λόγο K_{15} της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του δείγματος στους 15°C και πίεση 1atm, προς

την ηλεκτρική αγωγιμότητα διαλύματος αναφοράς χλωριούχου καλίου (KCl), στην ίδια θερμοκρασία και πίεση, και με σύσταση $32,4356 \text{ g KCl/kg}$ διαλύματος ή $32,4356 \text{ ppt (parts per thousand)}$.

$$S = 0.008 - 0.1692R_{15}^{\frac{1}{2}} + 25.3851R_{15}^{\frac{3}{2}} - 7.0261R_{15}^2 + 2.7081R_{15}^{\frac{5}{2}} \quad (2.14)$$

$$\text{Αν } R_{15} = 1, \text{ τότε } S = 35 \text{ ppt}$$

$$2 \leq S \leq 42$$

$$-2 \leq t \leq 35 \text{ }^\circ\text{C}$$

Όπου το R_{15} συνυπολογίζεται από τους λόγους

$$R = R_p r_t R_t \Rightarrow R_t = \frac{R}{R_p r_t} \quad (2.15)$$

$$R_t(S, t) = \frac{C(S, t, 0)}{C(35, t, 0)} = R_{15} \quad (2.16)$$

$$R_p(S, t, p) = \frac{C(S, t, p)}{C(S, t, 0)} \quad (2.17)$$

R_p , ο λόγος της αγωγιμότητας δείγματος πεδίου προς την αγωγιμότητα του ίδιου δείγματος στην ίδια θερμοκρασία, αλλά σε $p = 0 \text{ bars}$.

$$r_t(t) = \frac{C(35, t, 0)}{C(35, 15, 0)} \quad (2.18)$$

r_t , ο λόγος της αγωγιμότητας του θαλασσινού νερού αναφοράς (standard seawater) με πρακτική αλατότητα 35 ppt , σε θερμοκρασία t , προς την αγωγιμότητά του σε θερμοκρασία $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

Για υπολογισμούς αλατότητας που βασίζονται σε μετρήσεις πεδίου, οι λόγοι R_p και r_t δεν μπορούν να παραλειφθούν από την εξίσωση PSS-78 (Unesco, 1981).

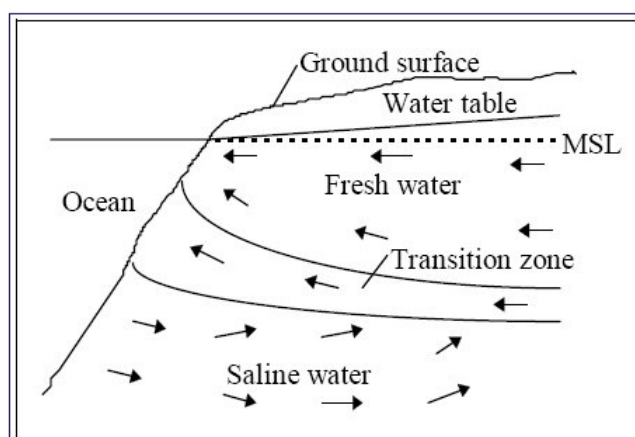
2.2.3. Μαθηματική Προσομοίωση Υφαλμύρισης

Ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει την κίνηση του γλυκού και του αλμυρού νερού είναι η σχετική πυκνότητα μεταξύ των δύο. Το γλυκό νερό, ως ελαφρύτερο ($1,0 \text{ gr/cm}^3$) κινείται πάνω από το αλμυρό νερό ($1,025 \text{ gr/cm}^3$) και εξέρχεται στη θάλασσα. Στην επαφή αλμυρού και γλυκού νερού, δημιουργείται μια μεταβατική ζώνη, που έχει παραβολική μορφή. Σε μερικές περιπτώσεις μπορεί αυτή η ζώνη, που είναι πρωτίστως το αποτέλεσμα υδροδυναμικής διασποράς διαλυμένου άλατος, να είναι αρκετά ευρεία, ώστε να θεωρείται ότι έχει πεπερασμένο πάχος. Κάτω από άλλες συνθήκες, μπορεί πάλι να θεωρηθεί ότι είναι στενή σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα και να χαρακτηριστεί ως μία απότομη διεπιφάνεια (Bear & Cheng 2010). Με βάση, λοιπόν, το είδος της μεταβατικής ζώνης, το πρόβλημα της υφαλμύρισης μπορεί να προσομοιαστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους.

- Ο πρώτος τρόπος, βασίζεται στη θεώρηση, ότι η διεπαφή αλμυρού και γλυκού νερού είναι απότομη (sharp interface), δηλαδή το πάχος της μεταβατικής ζώνης είναι πολύ μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα, άρα μπορεί να αγνοηθεί στους υπολογισμούς. Τα δύο υγρά θεωρούνται μη αναμίξιμα και με διαφορετικές πυκνότητες. Για το συγκεκριμένο τρόπο προσομοίωσης έχουν προταθεί πολλές

αναλυτικές λύσεις για διάφορες συνθήκες ροής και οριακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα, έχουν προταθεί αναλυτικές λύσεις που κάνουν παραδοχή μόνιμων συνθηκών (Ghyben, 1889; Herzberg, 1901; Hubbert, 1940), είτε προσπαθούν να καθορίσουν την ακριβή θέση και σχήμα της διεπαφής (Glover, 1959; Charmonman, 1965; Henry, 1959), είτε λαμβάνουν υπόψη συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, όπως η στρωματοποίηση του υδροφορέα και η κίνηση της διεπαφής λόγω ασταθούς άντλησης (Rumer & Shiau, 1968; Muallem, 1973; Muallem & Bear, 1974; Singh & Stammers, 1989, Bear & Dagan, 1964).

- Ο δεύτερος τρόπος, βασίζεται στη θεώρηση ότι η διεπαφή αλμυρού και γλυκού νερού έχει πεπερασμένο πάχος. Αυτό είναι αποτέλεσμα της ανάμιξης των δύο ρευστών και της δημιουργίας μίας ζώνης μετάβασης, που έχει διαφορετική συγκέντρωση διαλυμένων αλάτων από τις περιοχές εκατέρωθέν της. Το πάχος της μεταβατικής ζώνης περιγράφεται από τρία φαινόμενα:
 - ο Συμμεταφορά νερού –γλυκού και αναμεμιγμένου- προς τη θάλασσα (ή κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες προς την ενδότερη περιοχή)
 - ο Επανακυκλοφορία αλμυρού και αναμεμιγμένου νερού
 - ο Υδροδυναμική διασπορά (μηχανική διασπορά και μοριακή διάχυση) (Bear & Cheng 2010) (Εικόνα 2.5)



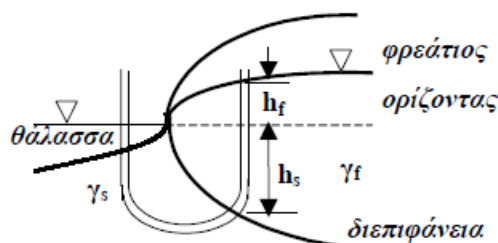
Εικόνα 2.5 Απεικόνιση της ροής του γλυκού, αλμυρού και υφάλμυρου νερού στον υδροφορέα, με θεώρηση διεπαφής πεπερασμένου πάχους. Πηγή: <http://iwmi.dhigroup.com/>

Οι εξισώσεις που επιλύονται σε αυτό το μοντέλο είναι: η διατήρηση μάζας, η εξίσωση υδροδυναμικής διασποράς, η εξίσωση κίνησης (Darcy) και η εξίσωση πυκνότητας εξαρτώμενη από τη συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών. Ο Cooper (1959) ήταν ο πρώτος που ανέπτυξε την υπόθεση ότι κάτω από δυναμικές συνθήκες, το θαλασσινό νερό δεν παραμένει στάσιμο αλλά ανακυκλοφορεί διαρκώς από τον πυθμένα της θάλασσας ως τη ζώνη ανάμιξης και πίσω στη θάλασσα. Μάλιστα, διαπιστώθηκε ότι ο μηχανισμός της διάχυσης ενισχύεται από παλιρροιακά φαινόμενα. Άλλες προσεγγίσεις που προτάθηκαν χρησιμοποιούν συζευγμένα την υπόγεια ροή με τη μεταφορά διαλυμένων αλάτων για να προσομοιάσουν τη μεταβατική ζώνη (Pinder & Cooper, 1970; Lee & Cheng, 1974; Segol & Pinder, 1976; Frind, 1982).

Στην παρούσα εργασία, γίνεται η θεώρηση απότομης διεπαφής, για αδιατάρακτες συνθήκες ροής (ακίνητη διεπαφή με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα) και παραδοχή οριζόντιας ροής (παραδοχή Dupuit). Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για το γλυκό και το θαλασσινό νερό είναι η εξίσωση συνέχειας και οι εξισώσεις κίνησης (νόμος του Darcy). Οι

άγνωστοι σε αυτή την περίπτωση είναι η πίεση, το βάθος της διεπαφής από την επιφάνεια της θάλασσας και οι ταχύτητες ροής για το γλυκό και αλμυρό νερό.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιείται η προσέγγιση κατά Ghyben-Herzberg, για υδροστατικές συνθήκες, κατά την οποία, η εκτόπιση του γλυκού από το θαλασσινό νερό μπορεί να απεικονιστεί ως ροή σε ένα έμβολο τύπου U (piston flow) (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6 Απεικόνιση του εννοιολογικού μοντέλου των Ghyben-Herzberg.

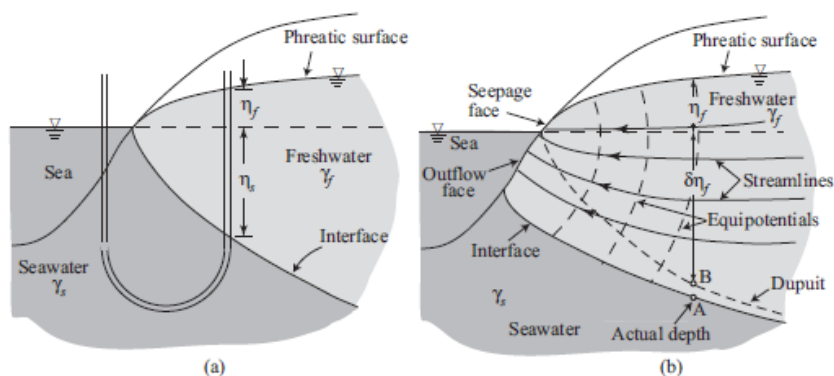
γ_s : ειδικό βάρος θαλασσινού νερού [$ML^{-2}T^{-2}$]

γ_f : ειδικό βάρος γλυκού νερού [$ML^{-2}T^{-2}$]

h_f : το ύψος μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας (υδροφόρος ορίζοντας) και της στάθμης της θάλασσας [L],

h_s : το ύψος ανάμεσα στη στάθμη θάλασσας και τη διεπαφή σ' ένα δεδομένο σημείο [L].

Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι υπάρχει στατική ισορροπία κάτω από συνθήκες σταθερής κατάστασης, με στάσιμη διεπαφή και υδροστατική κατανομή πίεσης στη ζώνη γλυκού νερού που ρέει προς τη θάλασσα. Δηλαδή, η ροή είναι οριζόντια και οι ισοπιεζομετρικές γραμμές κάθετες (Εικόνα 2.7)



Εικόνα 2.7 (α) Το μοντέλο Ghyben-Herzberg (β) Μοτίβο πραγματικής ροής (Bear & Cheng 2010)

Γίνεται φανερό ότι στην πραγματικότητα δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής (παραδοχή Dupuit), καθώς υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων. Μόνο, αν το μήκος της υφάλμυρης ζώνης είναι πολύ μεγάλο συγκριτικά με το πάχος του υδροφορέα μπορεί η κάθετη συνιστώσα ταχύτητας να θεωρηθεί αμελητέα. Επιπλέον, η προσέγγιση Ghyben-Herzberg δεν επιτρέπει τον υπολογισμό της επιφάνειας από την οποία πραγματοποιείται έξοδος γλυκού νερού προς τη θάλασσα (Νάνου 1999).

Έχοντας ορίσει h_f το ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, h_s τη θέση της διεπαφής αλμυρού-γλυκού νερού κάτω από αυτήν και γ_s , γ_f τα ειδικά βάρη γλυκού και αλμυρού νερού, αντίστοιχα, ισχύει ισορροπία υδροστατικών πιέσεων σε δύο σημεία του θεωρητικού εμβόλου U, ίδιου επιπέδου:

$$P_s = P_f \quad (2.19)$$

$$h_s \gamma_s = (h_f + h_s) \gamma_f \quad (2.20)$$

$$h_s g \rho_s = (h_f + h_s) g \rho_f \quad (2.21)$$

$$h_s = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad (2.22)$$

$$h_s = 40 h_f \quad (2.23)$$

Οι Badon Ghyben και A. Herzberg ανεξάρτητα κατέληξαν στην εξίσωση (2.23), το 1888 και το 1901, αντίστοιχα, από μελέτες που ξεκίνησαν από τον Du Commun (1828). Η σχέση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της θέσης της διεπαφής μόνο από τη στάθμη του γλυκού νερού στα φρέατα παρατήρησης. Αν ο υδροφόρος ορίζοντας, σε ένα σημείο, εντοπίζεται 1m πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, η υφάλμυρη ζώνη διεπαφής εντοπίζεται 40m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Μέσω αυτής της εξίσωσης μπορεί, συνεπώς να υπολογιστεί το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο της υφαλμύρισης. Ως μέτωπο ορίζεται το σημείο στο οποίο σταματάει η εισχώρηση θαλάσσιου όγκου στον υδροφορέα. Χαρακτηρίζεται και ως σφήνα ή πόδι της υφαλμύρισης. Το μέτωπο βρίσκεται σε βάθος ίσο με το βάθος του υδροφορέα από την επιφάνεια της θάλασσας.

2.2.4. Συντελεστής διόρθωσης Ghyben-Herzberg

Το φαινόμενο της αντικατάστασης του γλυκού από το αλμυρό νερό σε έναν υδροφορέα, είναι πολύπλοκο να μελετηθεί, διότι στην πραγματικότητα, τα δύο ρευστά είναι αναμίξιμα, λόγω υδροδυναμικής διασποράς, και η μεταβατική ζώνη που σχηματίζεται ανάμεσά τους έχει πεπερασμένο πάχος που μεταβάλλεται χωρικά και χρονικά. Ως εκ τούτου, στη μελέτη ροής ενός τέτοιου συστήματος, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη ο παράγοντας της υδροδυναμικής διασποράς (Dagan & Bear, 1968; Kashef, 1970; Reddell & Sunada, 1970).

Η θεώρηση απότομης διεπαφής που χρησιμοποιείται για τη μελέτη της υφαλμύρισης, υπερεκτιμά τη διείσδυση του υφάλμυρου μετώπου, καθώς αγνοεί την ανάμιξη των δύο ρευστών και το πάχος της μεταβατικής ζώνης. Γεννάται, συνεπώς η ανάγκη, να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση Ghyben-Herzberg (απότομη διεπαφή), λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα της υδροδυναμικής διασποράς, που θα διορθώνει την εκτίμηση της θέσης της διεπαφής.

Οι (Pool & Carrera 2011), προτείνουν έναν εμπειρικό παράγοντα διόρθωσης που ορίζεται ως

$$\varepsilon^* = \varepsilon \left[1 - \left(\frac{\alpha_T}{b} \right)^{1/6} \right] \quad (2.24)$$

Όπου,

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_s} = 0.02439 \quad (2.25)$$

α_T : η σταθερά εγκάρσιας υδροδυναμικής διασποράς [L]

$$\alpha_T = 0,1 \alpha_L \quad (2.26)$$

α_L : η σταθερά διαμήκους υδροδυναμικής διασποράς [L] ,υπολογίζεται από την εμπειρική εξίσωση (Xu & Eckstein 1995)

$$\alpha_L = 0,83(\log_{10} L)^{2,414} \quad (2.27)$$

L: η απόσταση του σημείου μέτρησης από την πηγή ρύπανσης [L] και

b: το πάχος του υδροφορέα [L].

Με βάση αυτή τη διόρθωση, το νέο ύψος ανάμεσα στη στάθμη της θάλασσας και της διεπαφής, h_f ορίζεται ως

$$h_s = \frac{h'_f}{\varepsilon^*} \quad (2.28)$$

Ο εμπειρικός παράγοντας διόρθωσης ε^* , βάσει των (Pool & Carrera 2011), μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους:

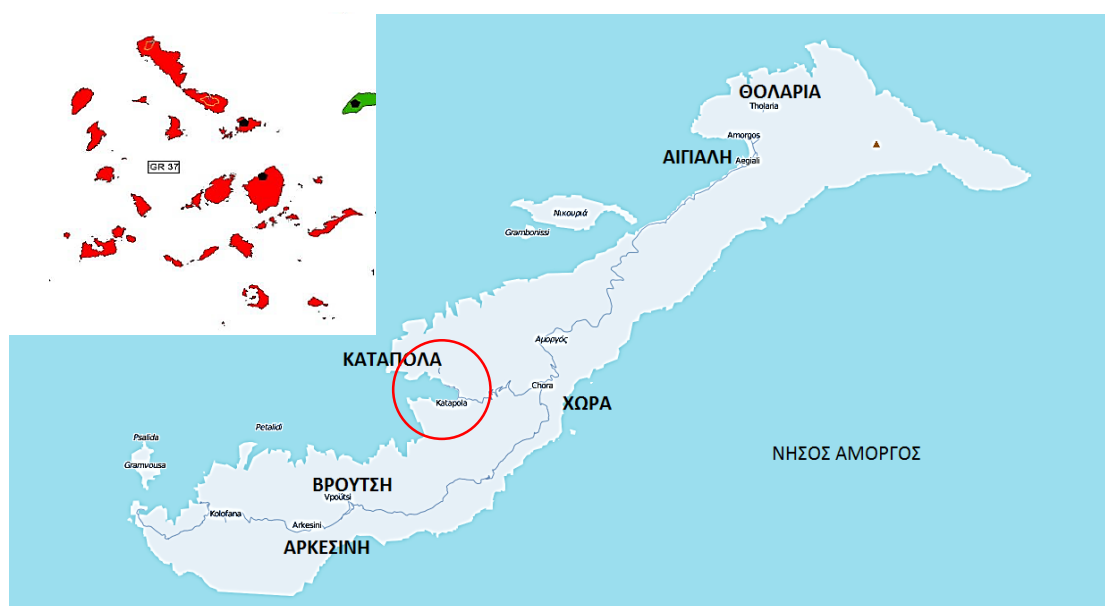
- Μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό της έκτασης της υπαλμύρισης σε έναν παράκτιο υδροφορέα. Με αυτό τον τρόπο, μπορεί να σκιαγραφηθεί πιο ρεαλιστικά και πιο αποδοτικά ένα βιώσιμο σχέδιο διαχείρισης των παράκτιων υπόγειων συστημάτων.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη τεχνικών βελτιστοποίησης ρυθμού άντλησης, με στόχο τη βιώσιμη διαχείριση των υπόγειων υδάτινων αποθεμάτων.

3. Κεφάλαιο 3^ο: Περιοχή Μελέτης

3.1. Θέση και Διοικητική Υπαγωγή

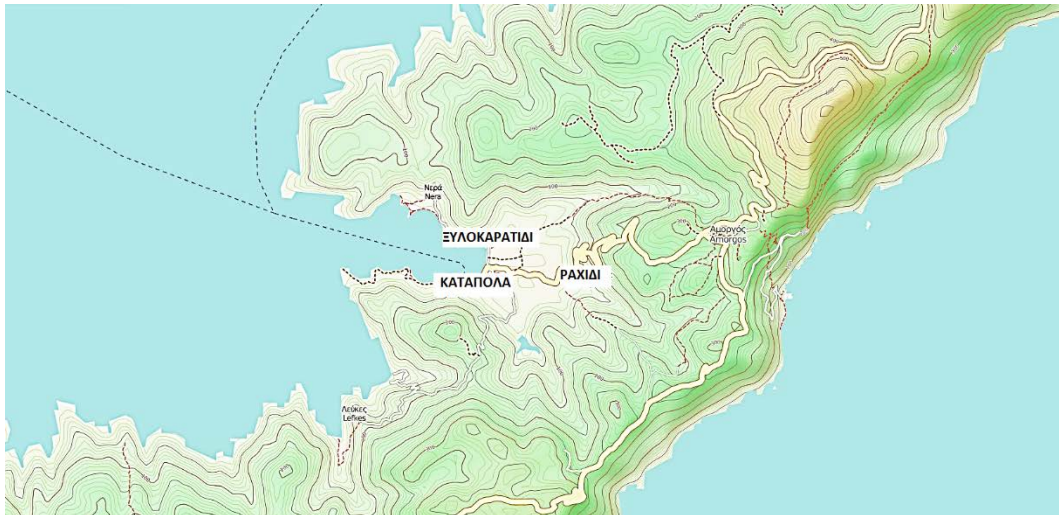
Το Υδατικό Διαμέρισμα Νήσων Αιγαίου (GR 14) περιλαμβάνει τις Λεκάνες Απορροής Ανατολικού Αιγαίου (GR 36), Κυκλάδων (GR 37) και Δωδεκανήσων (GR 38), όπως προσδιορίστηκαν κατά την εφαρμογή του Άρθρου 3 της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ. Το Υδατικό Διαμέρισμα περιλαμβάνει τα νησιωτικά συγκροτήματα των Νομών Κυκλάδων, Δωδεκανήσου, Λέσβου, Σάμου και Χίου. Απαρτίζεται δηλαδή από όλα τα νησιά των Περιφερειών Βόρειου και Νότιου Αιγαίου, εκτός από τη Μακρόνησο και τα Κύθηρα.

Η νήσος της Αμοργού ανήκει στην περιφερειακή Ενότητα της Νάξου της περιφέρειας του Ν. Αιγαίου. Είναι το ανατολικότερο νησί της περιφέρειας κι έχει συνολική έκταση 121km² (το 7^ο σε μέγεθος νησί των Κυκλάδων) και μήκος ακτών 112km. Το σχήμα του είναι ιδιαίτερα επίμηκες, με μήκος περίπου 32km και προσανατολισμό ΒΑ-ΝΔ. Μια γενικότερη απεικόνιση του νησιού, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.1 που ακολουθεί.



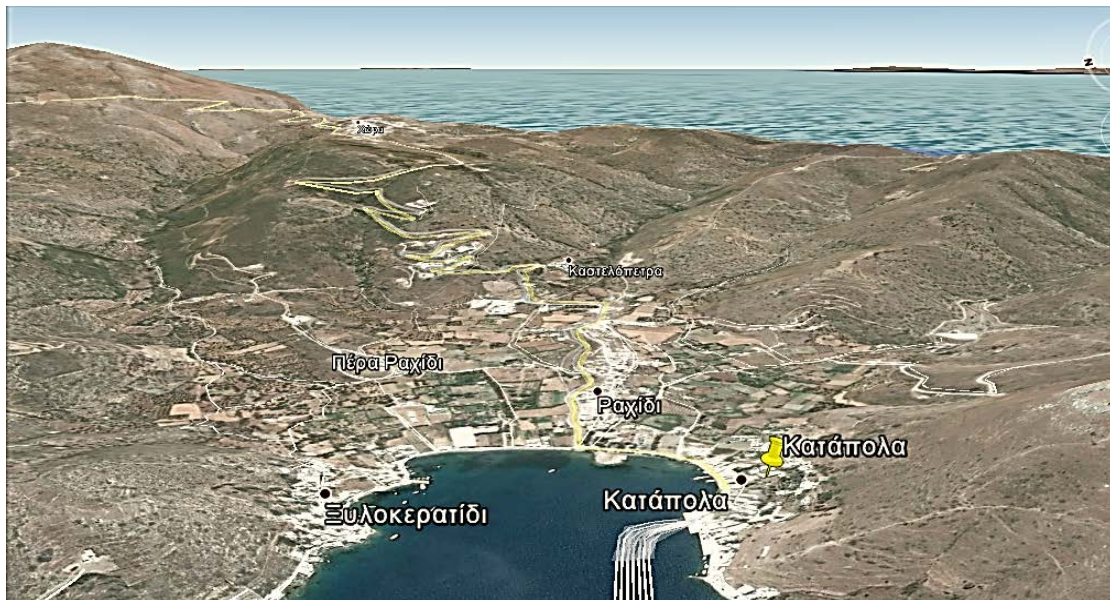
Εικόνα 3.1 Η νήσος της Αμοργού. Ο κύκλος οριοθετεί την περιοχή μελέτης. πηγή: <http://geodata.gov.gr/>

Ο Δήμος Αμοργού απαρτίζεται από τις Τοπικές Κοινότητες: Αιγιάλης, Χώρας Αμοργού, που είναι και η έδρα του Δήμου, Αρκεσίνης, Βρούτση, Θολαρίων και Καταπόλων. Ως περιοχή μελέτης επιλέχτηκαν τα Κατάπολα, που βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα του νησιού, στο βάθος ενός κλειστού κόλπου. Ο κόλπος σχηματίζει ένα φυσικό λιμάνι, το οποίο είναι και το κεντρικό λιμάνι της Αμοργού. Τα Κατάπολα βρίσκονται στη νότια μεριά του κόλπου, ενώ στα βόρεια βρίσκεται το Ξυλοκερατίδι και ανάμεσά τους το Ραχίδι. Μαζί και οι τρεις οικισμοί αποτελούν την Τοπική Κοινότητα των Καταπόλων. Στις εικόνες 3.2 και 3.3, φαίνεται ο κόλπος των Καταπόλων με τους τρεις προαναφερθέντες οικισμούς.



Εικόνα 3.2 Τοπική Κοινότητα Καταπόλων, Πηγή: <http://www.openstreetmap.org/>

3.2. Δημογραφικά Στοιχεία



Εικόνα 3.3 3d-Απεικόνιση του κόλπου των Καταπόλων, όπως φαίνεται κατά την είσοδο στο λιμάνι. Πηγή: Google Earth Pro

3.2.1. Πληθυσμιακά Στοιχεία

Ο συνολικός πληθυσμός της Αμοργού σήμερα δεν υπερβαίνει τους 2000 κατοίκους, σαν αποτέλεσμα της δημογραφικής συρρίκνωσης, ιδιαίτερα της τελευταίας πεντηκονταετίας. Από τους 3.500 κατοίκους στις αρχές του 20ού αιώνα, το 1951 ο πληθυσμός του νησιού έφτασε να αριθμεί 2.500. Σύμφωνα με τα στοιχεία της τελευταίας απογραφής του 2011, ο μόνιμος πληθυσμός της Αμοργού ανέρχεται σε 1973 κατοίκους, σημειώνοντας άνοδο 5,7% σε σχέση με τον πληθυσμό της προηγούμενης απογραφής του 2001, που ήταν 1866 κάτοικοι. Ο κύριος οικισμός του νησιού είναι η πρωτεύουσα της Αμοργού, η Χώρα, με 409 κατοίκους. Οι τρεις γειτονικοί μεταξύ τους οικισμοί, τα Κατάπολα, το Ραχίδι και το Ξυλοκερατίδι συγκεντρώνουν συνολικά 595 κατοίκους σημειώνοντας αντίστοιχα άνοδο 21,7% από το 2001. Γενικά, από την απογραφή του 1981 και μετά, παρατηρείται σημαντική αύξηση τόσο του μόνιμου πληθυσμού της Αμοργού και των επιμέρους Κοινοτήτων, όσο και του τουρισμού και

των παραθεριστών. Η αναλυτική κατανομή του πληθυσμού του νησιού ανάμεσα στις Κοινότητες της Χώρας και των Καταπόλων, βάσει των στοιχείων απογραφής από το 1981-2011, καθώς και τα στοιχεία του πληθυσμού κατά την τουριστική περίοδο καταγράφονται στους Πίνακες 3.1 και 3.2. Όπως, προκύπτει από τα δεδομένα της ΕΛ.ΣΤΑΤ, ο τουρισμός το 2011 σημείωσε έντονη αύξηση 66,7% από το 2001 και αναμένεται να αυξηθεί τις επόμενες δεκαετίες.

Πίνακας 3.1 Πληθυσμιακά στοιχεία από 1981-2011 από ΕΛ.ΣΤΑΤ

	ΜΟΝΙΜΟΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ				ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ [%]		
	1981	1991	2001	2011	1981-1991	1991-2001	2001-2011
ΧΩΡΑ	330	330	417	409	0	26,4	1,9
ΚΑΤΑΠΟΛΑ	160	377	489	595	135,6	29,7	21,7
ΧΩΡΑ & ΚΑΤΑΠΟΛΑ	490	707	906	1004	44,3	28,1	10,8
ΑΜΟΡΓΟΣ	1378	1632	1866	1973	18,4	14,3	5,7

Πίνακας 3.2 Πληθυσμιακά στοιχεία τουρισμού από 1981-2001 από ΕΛ.ΣΤΑΤ

	ΤΟΥΡΙΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ			ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ [%]	
	1981	2001	2011	1981-2001	2001-2011
ΧΩΡΑ	900	1000	1500	11,1	50,0
ΚΑΤΑΠΟΛΑ	1500	2400	4000	60,0	66,7
ΧΩΡΑ & ΚΑΤΑΠΟΛΑ	2400	3400	5500	41,7	61,8
ΑΜΟΡΓΟΣ	6520	1866	10400	4,3	66,7

3.2.2. Χρήσεις Γης

Στο Προσχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής του Υδατικού Διαμερίσματος Νήσων Αιγαίου (2014) αναγράφονται τα πιο πρόσφατα στοιχεία για το σύνολο των καλλιεργούμενων εκτάσεων, αρδευόμενων και μη αρδευόμενων και των βοσκοτόπων ανά Δήμο και Δημοτική Ενότητα, καθώς και οι κατηγορίες αυτών. Για το Δήμο Αμοργού, γενικά, αναφέρεται ότι επί του συνόλου των καλλιεργούμενων εκτάσεων των 4.017,8 στρεμμάτων, τα 61,5 στρέμματα αρδεύονται, ποσοστό περίπου 2%. Αντίστοιχα, αναφέρονται 35.579,8 στρέμματα βοσκοτόπων και 3.206,6 στρέμματα αρδευόμενων εκτάσεων. Συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι η Κοινότητα των Καταπόλων μετράει μόλις 849 αιγοπρόβατα, 4 βοοειδή και 6 ίππους. Είναι, επομένως φανερό ότι τα Κατάπολα δεν έχουν σημαντικό ζωικό κεφάλαιο συγκριτικά με το σύνολο του νησιού.

Ως προς τις κατηγορίες των καλλιεργούμενων εκτάσεων, οι Αροτραίες κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό, περίπου 70%, ακολουθούν οι Ελαιώνες (26%), και οι Αμπελώνες (3%),

ενώ τα Κηπευτικά και οι Δενδρώδεις εκτάσεις κατέχουν ποσοστό μικρότερο του 1%. Η παραδοσιακή καλλιέργεια αποτελείται από μικρής κλίμακας δημητριακά, όσπρια και άνυδρα κηπευτικά, καθώς και ελαιώνες και οπωρώνες, όπως αναφέρονται παραπάνω, που ευδοκούν στην κοιλάδα των Καταπόλων. Σύμφωνα με το Corine 2000, στην ευρύτερη κοιλάδα απαντώνται τέσσερις τύποι χρήσεων Γης, όπως απεικονίζεται καθαρά στην Εικόνα 3.4. Ο πρώτος τύπος καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης και περιλαμβάνει αγροτικές περιοχές, ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις και συμπλέγματα καλλιεργειών. Ο δεύτερος τύπος στα ανατολικά του κόλπου περιλαμβάνει αγροτικές περιοχές, ετερογενείς αγροτικές εκτάσεις και αγροτικές εκτάσεις με σημαντικό ποσοστό φυσικής βλάστησης. Οι δύο τελευταίοι τύποι που απλώνονται στην ευρύτερη περιοχή της κοινότητας, καθώς και στο νότιο τμήμα αυτής, περιλαμβάνουν φυσικές περιοχές με θάμνους, χορτολίβαδα, ποολίβαδα και σκληρόφυλλη βλάστηση.

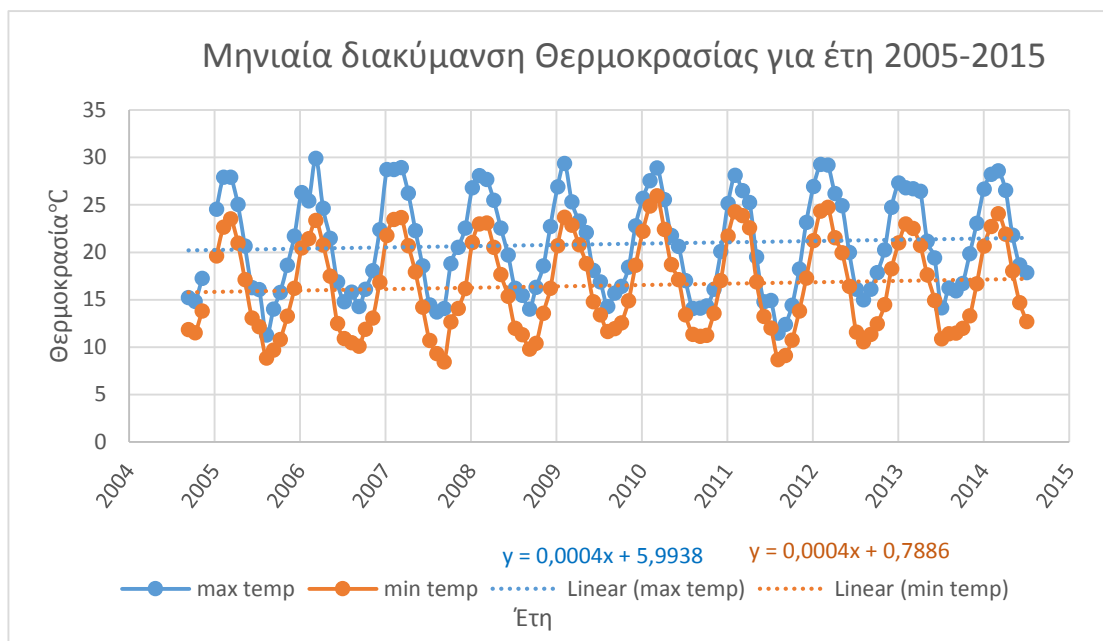


Εικόνα 3.4 Χρήσεις Γης, Τοπική Κοινότητα Καταπόλων Πηγή: <http://geodata.gov.gr/>

3.3. Κλιματολογικά και Μετεωρολογικά Χαρακτηριστικά

Η Αμοργός κατατάσσεται στον εύκρατο τύπο του χερσαίου Μεσογειακού κλίματος. Δεδομένου ότι στο νησί δεν υπήρχε μέχρι πρόσφατα μετεωρολογικός σταθμός, αναφέρονται τα μετεωρολογικά στοιχεία του σταθμού της Νάξου (κωδικός Σταθμού 16732, γεωγραφικό πλάτος, βόρειο, 37,1 βαθμοί, γεωγραφικό μήκος, ανατολικό, 25,37 βαθμοί και υψόμετρο 11μ.), που είναι ο πλησιέστερος σταθμός.

Από τα στοιχεία της Ε.Μ.Υ. φαίνεται ότι οι ψυχρότεροι μήνες είναι ο Ιανουάριος και ο Φεβρουάριος με μέση ετήσια θερμοκρασία 12,1 °C και 12,2 °C αντίστοιχα, ενώ οι θερμότεροι ο Ιούλιος και ο Αύγουστος με 25,5 °C και 27 °C αντίστοιχα. Ως θερμή περίοδος χαρακτηρίζεται εκείνη του Απριλίου-Μαΐου έως Σεπτεμβρίου-Οκτωβρίου με μέση θερμοκρασία άνω των 18°C, η οποία ξεπερνά τους 20°C κατά την περίοδο Ιουνίου-Σεπτεμβρίου (Εικόνα 3.5). Στην παρούσα εργασία, ως θερμή περίοδος θεωρήθηκε εκείνη του Μαΐου έως το Σεπτέμβρη (πεντάμηνη θερινή περίοδος).



Εικόνα 3.5 Μηνιαία διακύμανση της θερμοκρασίας για τα έτη 2005-2015. (Πηγή: EMY)

Οι υδρολογικές συνθήκες της Αμοργού και γενικότερα των ανατολικών Κυκλάδων, είναι οι δυσμενέστερες του Ελλαδικού χώρου, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στις ετήσιες βροχοπτώσεις που δεν ξεπερνούν τα 400mm. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κατά την περίοδο 1997-2015, κυμαίνεται γύρω στα 370 mm, ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι το μέσο ύψος βροχής κατά την περίοδο Μαΐου- Σεπτεμβρίου είναι 7,8 mm, όπως δείχνει ο Πίνακας 3.3. Ειδικότερα έχει μετρηθεί ότι ο Αύγουστος είναι ο ξηρότερος μήνας με 1,7mm. βροχής, ενώ ο Δεκέμβριος ο υγρότερος με 66,9 mm. Οι βροχοπτώσεις τείνουν να έχουν ακραία συμπεριφορά, καθώς είναι λίγες αλλά καταρρακτώδεις. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σ' ένα πρώτο συμπέρασμα πως οι μέθοδοι διαχείρισης υδάτινων πόρων, ενδεχομένως να πρέπει να προσανατολιστούν και στη διαχείριση πλημμυρικού νερού. Γι' αυτό το λόγο, εξάλλου, το 2001 κατασκευάστηκε από την Ν.Α Κυκλάδων το φράγμα εμπλουτισμού των Καταπόλων με χωρητικότητα 120.000m³ και προϋπολογισμό 1,5εκ. ευρώ. Σύμφωνα με τον Προϊστάμενο Διεύθυνσης Υδάτων της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου, κο Νόκα Ηλία, το έργο αυτό συντελεί στην προσωρινή αποθήκευση της πλημμυρικής απορροής που χάνεται στη θάλασσα, πολλές φορές μάλιστα

Πίνακας 3.3 Δεδομένα μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης [mm] για τα έτη 1997-2015, από το σταθμό 16732 της Νάξου, Πηγή: EMY

ΕΤΟΣ	ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ	ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ	ΜΑΡΤΙΟΣ	ΑΠΡΙΛΙΟΣ	ΜΑΙΟΣ	ΙΟΥΝΙΟΣ	ΙΟΥΛΙΟΣ	ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ	ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ	ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ	ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ	ΟΛΙΚΟ
1997	48,20	98,50	61,50	19,50	3,30	0,00		0,50		18,80	62,10	41,10	353,50
1998	60,70	2,00	101,70	27,00	17,40				27,10	7,00	89,60	96,40	428,90
1999	115,20	66,60	67,50	8,30					35,00	22,00	23,20	42,60	380,40
2000	16,60	18,50	43,10	2,30	0,90					46,60	46,50	45,90	220,40
2001	43,70	30,10	0,20	13,50	7,40						68,00	118,00	280,90
2002	70,60	24,20	66,30	9,90	21,10		1,10		39,90	39,20	98,40	93,70	464,40
2003	78,90	148,00	99,80	76,70	16,80				0,40	16,80	37,80	95,20	570,40
2004	151,40	30,60	3,00	14,80	9,30	0,40				25,07	60,80	76,13	371,50
2005	73,16	52,31	21,10	21,50	19,80		22,70	5,60	40,20	10,40	134,70	29,20	430,68
2006	70,60	39,10	45,90	10,90	0,30	0,60				216,10	30,80	8,70	423,00
2007	5,50	43,60	33,80	0,30	48,10					58,00	70,10	50,20	309,60
2008	62,90	173,20	36,70	48,90	4,50				21,50	3,60	14,00	53,30	418,60
2009	65,80	105,40	67,00	22,30	25,40				23,70	46,00	65,80	132,20	553,60
2010	85,60	85,80	4,50	1,30	0,30	15,10			0,60	81,80	19,00	74,90	368,90
2011	39,20	54,00	7,60	23,20	45,20	0,20	0,00	3,60	0,00	57,20	1,40	49,80	281,40
2012	27,40	62,00	11,00	17,00	13,80	0,00	0,00	0,20	0,00	22,40	26,40	38,40	218,60
2013	67,60	67,20	36,20	5,60	5,20	2,00	0,00	0,00	0,00	14,60	117,80	24,40	340,60
2014	62,00	28,80	30,60	32,20	9,80	0,20	0,00	0,00	11,20	31,00	26,00	134,80	366,60
2015	72,00	74,00	113,00	6,00									259,00
Average	64,1	63,4	44,8	19,0	14,6	2,3	4,0	1,7	16,6	42,2	55,1	66,9	370,6

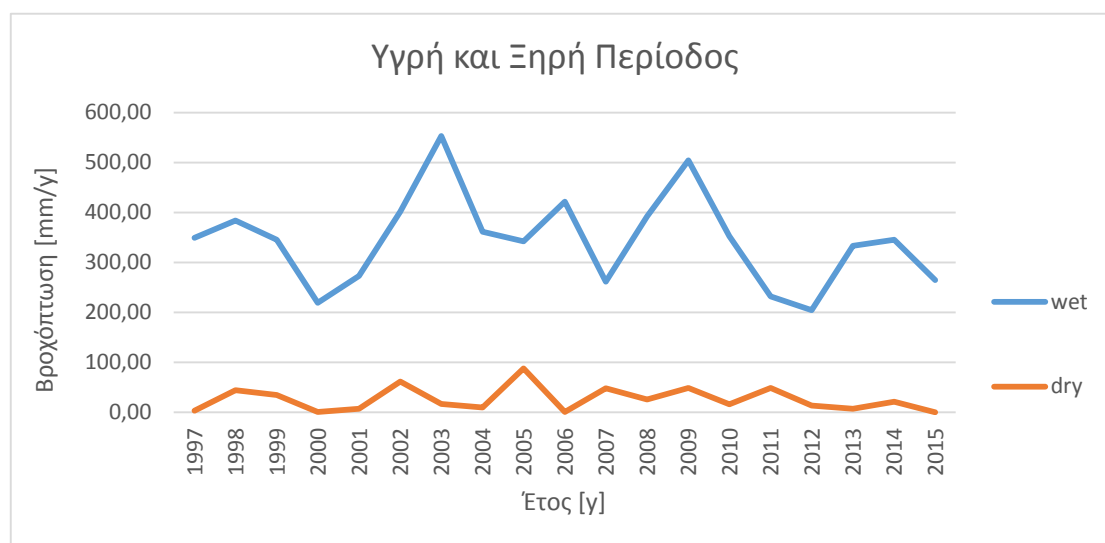
με τη δημιουργία καταστροφών στο πεδινό τμήμα της κοιλάδας. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία, είναι φανερό ότι κατά τους καλοκαιρινούς, κυρίως, μήνες με τις υψηλές θερμοκρασίες, η περιοχή είναι ελλειμματική σε εδαφικό νερό και οι ανάγκες των καλλιεργειών πρέπει να καλύπτονται με συνεχείς αρδεύσεις.

Η επιλογή διαχωρισμού του έτους σε ξηρή και υγρή περίοδο έγινε με βασικό κριτήριο τη συνολική μέση μηνιαία βροχόπτωση για τα έτη 1997-2015. Μεταξύ Μαΐου και Σεπτεμβρίου οι βροχοπτώσεις δεν ξεπερνούν τα 16,6mm, ενώ για την υγρή περίοδο μεταξύ Ιανουαρίου και Δεκέμβρη, η βροχόπτωση κυμαίνεται από 19-66,9mm. Στο διάγραμμα της Εικόνας 3.6, φαίνεται καθαρά η διαφορά μεταξύ ξηρής και υγρής περιόδου.

Από το διάγραμμα της Εικόνας 3.7, που παρουσιάζει την ολική βροχόπτωση ανά περίοδο, παρατηρούνται περιστασιακά κάποια ακραία φαινόμενα για τις υγρές περιόδους 3,11,21,25 και 35, για τις οποίες σημειώνονται βροχοπτώσεις από 0,31-0,47mm/d. Αυτές παρουσιάζονται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.7 με κίτρινο χρώμα. Με πράσινο χρώμα, δηλώνονται οι μέσες τιμές βροχόπτωσης που κυμαίνονται από 0,22-0,27mm/d, ενώ με κόκκινο είναι οι υγροί περίοδοι 5,7,29 και 31 με τις χαμηλότερες τιμές βροχόπτωσης από 0,12-0,19mm/d. Με κυανό δηλώνονται όλες οι ξηρές περίοδοι που ως επί το πλείστον εμφάνισαν σχεδόν μηδενικές τιμές, που δεν υπερβαίνουν τα 0,06mm/d. Γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί για την κατάσταση των βροχοπτώσεων στην Αμοργό είναι ότι αυτές παρουσιάζουν:

- Χαμηλό ετήσιο ύψος βροχής
- Ανισοκατανομή στη διάρκεια του χρόνου, ενώ λείπουν τους θερινούς μήνες

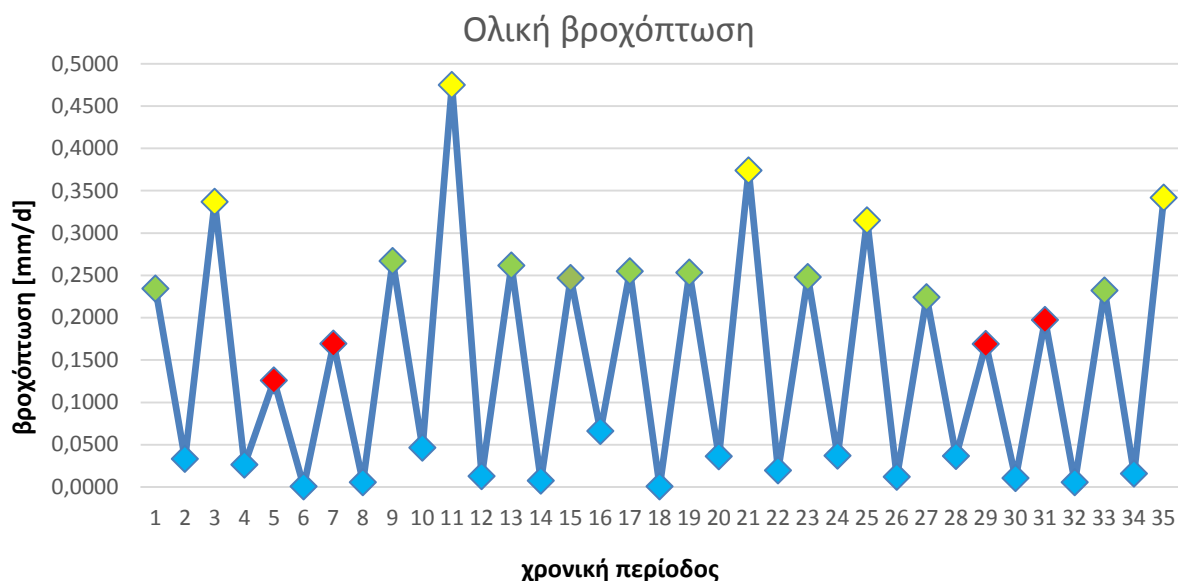
Επεισοδιακό χαρακτήρα (συνήθως) (N.E.Kourmoulis, 1983)



Εικόνα 3.6 Μεταβολή βροχοπτώσεων ανά περίοδο για τα έτη 1997-2015. Πηγή:ΕΜΥ

Όσον αφορά τους ανέμους, το μεγαλύτερο ποσοστό των ετήσιων ανέμων εντάσσεται στην κλίμακα Beaufort 1-5. Τους χειμερινούς μήνες (υγρή περίοδος) μειώνεται αισθητά η παρουσία των νότιων ανέμων, αλλά η παρουσία βόρειων ανέμων παραμένει σταθερή, ενώ αυξάνεται παντού η παρουσία βορειοανατολικών και δυτικών ανέμων. Το ποσοστό νηνεμίας είναι πολύ μικρό, αλλά δικαιολογείται από τα μελέτσια που χαρακτηρίζουν όλα τα νησιά του

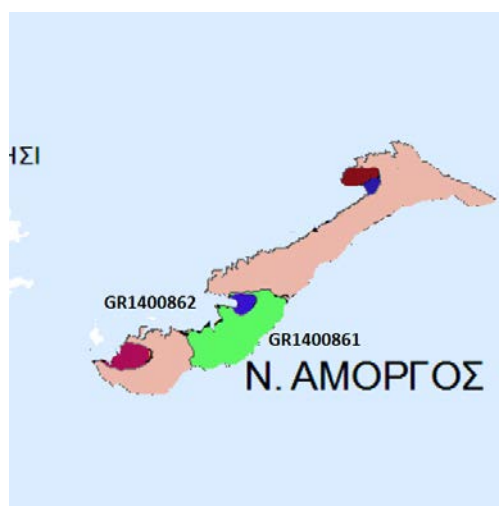
Αιγαίου τους καλοκαιρινούς μήνες. Άλλα ακραία μετεωρολογικά φαινόμενα, όπως χιόνι, χαλάζι, παγετοί ή ομίχλη σπανίως παρατηρούνται.



Εικόνα 3.7 Ολική βροχόπτωση [mm/d], ανά περίοδο (stress period) για τα έτη 1997-2015, πηγή: EMY

3.4. Γεωλογία

Με βάση το προσχέδιο διαχείρισης λεκανών απορροής του υδατικού διαμερίσματος GR14 του 2014, στην Αμοργό διακρίνονται 6 υπόγεια υδατικά συστήματα, τα οποία διακρίθηκαν με βάση τη συγγένεια υδρολιθολογικών σχηματισμών, τις πιέσεις (ποσοτικές και ποιοτικές) που έχουν δεχθεί, και της γεωλογικής και υδρογεωλογικής δομής. Όπως, φαίνεται στην Εικόνα 3.8, η περιοχή μελέτης ανήκει στο Σύστημα Καταπόλων (B), Ν. Αμοργού με κωδικό GR1400862 και έκταση 2,2km². Το σύστημα αυτό, είναι μέρος του μεγαλύτερου συστήματος Καταπόλων (A) με κωδικό GR1400861 και έκταση 24,3km².



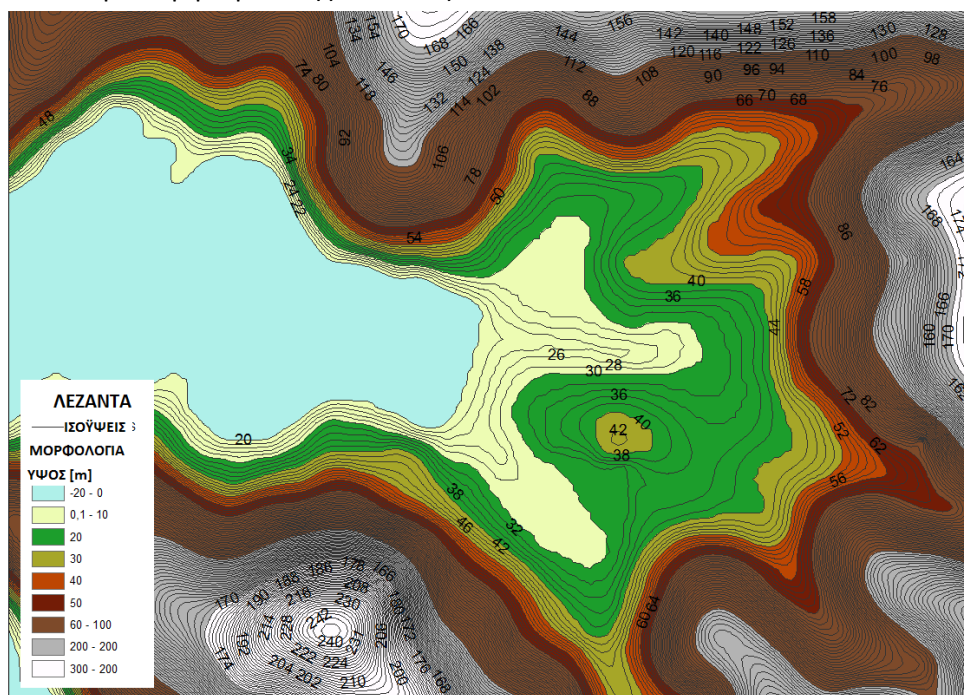
Εικόνα 3.8 Οριοθέτηση των υπόγειων υδατικών συστημάτων του ΥΔ Αιγαίου-Κυκλάδες (ΥΠΕΚΑ 2014)

3.4.1. Μορφολογία

Η γεωμορφολογία του νησιού είναι ημιορεινή. Ένας ορογραφικός άξονας, ο οποίος ταυτίζεται με τον επιμήκη άξονα του νησιού, απολήγει ανατολικά στο όρος Κρίκελο ύψους

821m, που είναι και το υψηλότερο τμήμα του νησιού. Γενικά η μορφολογία της Αμοργού παρουσιάζει δύο όψεις, με τη βόρεια πλευρά της να έχει σχετικά ήπια πρηνή, όχι πολύ απότομες ακτές και με τη νότια πλευρά της να έχει πολύ απότομα πρηνή και ακτές. Το ανάγλυφό της παρατηρείται να είναι ήπιο στα τμήματα του νησιού που αποτελούνται από φλύσχη και να γίνεται εντονότερο στα τμήματα που συνίστανται από ανθρακικά πετρώματα και καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος του.

Η μορφολογία της περιοχής μελέτης που φαίνεται στην Εικόνα 3.9, είναι πεδινή. Στην περιοχή του Ραχιδίου παρατηρείται ένα ύψωμα, που όμως δεν υπερβαίνει τα 22m. Η κλίση αυξάνει απότομα περιμετρικά της κοιλάδας.



Εικόνα 3.9 Αναπαράσταση της μορφολογίας της λεκάνης των Καταπόλων και των ισοϋψών καμπυλών, στο GIS.

3.4.2. Στρωματογραφία

Την πρώτη απόπειρα γεωλογικής χαρτογράφησης της Αμοργού την έκανε ο Γερμανός γεωλόγος Stephen Durr από το 1965 έως το 1978. Σε αυτή τη μελέτη στηρίχθηκαν όλες οι μετέπειτα εργασίες για τη γεωλογία και το υπόγειο νερό του νησιού. Βάσει, λοιπόν, του S.Durr, στη γεωλογική δομή της Αμοργού συνέρχονται ιζήματα και λίγα ηφαιστειακά χαμηλής μεταμόρφωσης που διακρίνονται σε τρεις κυρίως σειρές.

- Κατώτερη σειρά σχιστόλιθων και κροκαλοπαγών-Τριαδικό.

Στη σειρά αυτή επικρατούν αργιλικοί και μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι, οι οποίοι άλλοτε περιέχουν στρώσεις απολιθωματοφόρων κρυσταλλικών ασβεστόλιθων και άλλοτε εναλλάσσονται σε φακούς πολύμικτων κροκαλοπαγών. Αυτός είναι ο αρχαιότερος σχηματισμός, έχει πάχος μερικές δεκάδες μέτρα και εμφανίζεται κυρίως στο κεντρικό και το νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού.

- Ανθρακική Σειρά-Τριαδικό, Ιουρασικό, Ηώκαινο.

Στη σειρά αυτή επικρατούν εναλλαγές κρυσταλλικών ασβεστολίθων και δολομιτών σε μαργαϊκούς σχιστόλιθους, στο κατώτερο μέρος της. Στο ανώτερο μέρος της, για τη μεν κεντρική και βορειοανατολική πλευρά επικρατούν στρωματώδεις έως συμπαγείς

κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, τεφροκύανοι με κονδύλους ή στρώσεις πυριτολίθων και βωξιτικούς φακούς, ενώ για τη νοτιοδυτική, πλακώδεις ασβεστόλιθοι και δολομίτες με κονδύλους πυριτολίθων καθώς και παρεμβολές μαργαϊκών σχιστόλιθων. Είναι πιθανόν το πάχος αυτής της σειράς να υπερβαίνει τα 1000m.

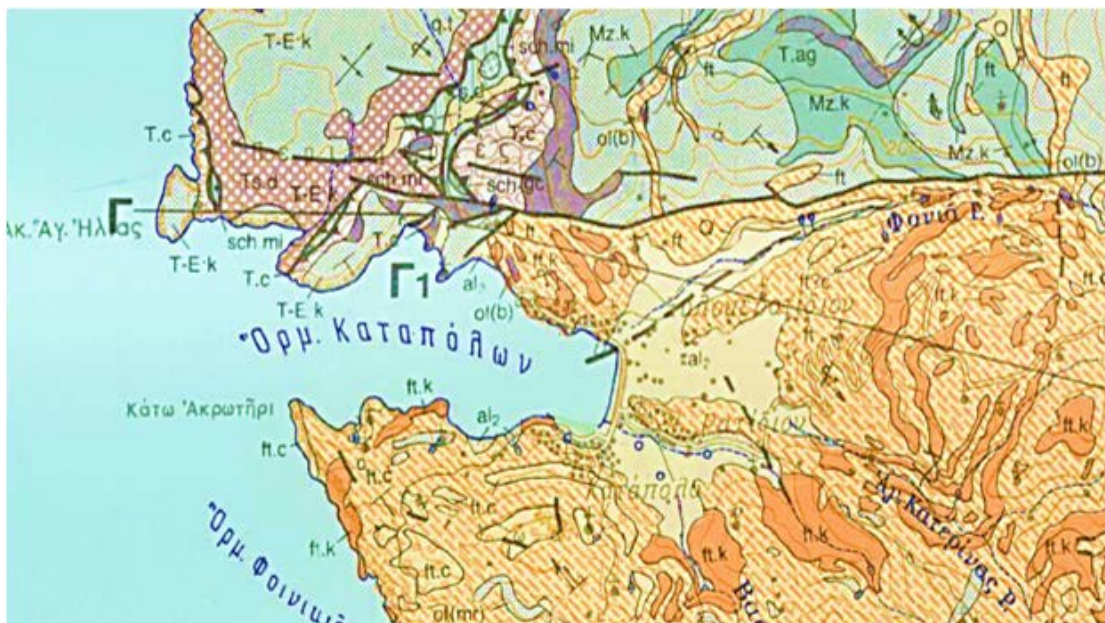
- Ανώτερη Σχιστολιθική Σειρά, φλύσχη-Παλαιογενές

Η ενότητα αυτή αποτελείται από στεγανά ή ημιπερατά πετρώματα, δηλαδή από εναλλαγές ψαμμιτών, αργιλικών σχιστόλιθων, κροκαλοπαγών και ασβεστόλιθων. Το πάχος αυτής της σειράς είναι περίπου μερικές εκατοντάδες μέτρα και εξαπλώνεται κυρίως στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού.

- Τεταρτογενείς αποθέσεις

Η σειρά αυτή δεν παρουσιάζει μεγάλη ανάπτυξη, όπως οι προαναφερθείσες, αλλά περιλαμβάνει ποικίλλου τύπου και προέλευσης σχηματισμούς, όπως αλλουβιακές προσχώσεις, πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων, συνεκτικά λατυποπαγή κλιτύων, κίσσηρη κ.α.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις, πιο συγκεκριμένα, έχουν προσχωματικό χαρακτήρα και αναπτύσσονται σε μικρές λεκάνες, σχεδόν αποκλειστικά του φλύσχη. Έτσι, τα υλικά που επικρατούν σε αυτές τις λεκάνες προέρχονται από την αποσάθρωση του φλύσχη, όπως άμμοι, πηλοί και άργιλοι. Απαντούν, όμως, και ασβεστολιθικής προέλευσης υλικά. Οι αλλουβιακές αποθέσεις εμφανίζονται στην έξοδο των λεκανών απορροής προς τη θάλασσα, στην ευρύτερη περιοχή Καταπόλων Ραχιδίου Ξυλοκερατιδίου, καταλαμβάνοντας συνολική έκταση 0,7km² (Εικόνα 3.10) (Ν.Παπαδόπουλος, 1997). Είναι αυτές οι αποθέσεις που σχηματίζουν τους πλέον αξιόλογους υδροφόρους σχηματισμούς του νησιού, κυρίως λόγω της σημαντικής επιφανειακής τροφοδοσίας που δέχονται από τους ανάντι ευρισκόμενους σχηματισμούς του φλύσχη. Το πάχος των αποθέσεων εκτιμάται ότι μεταβάλλεται από θέση σε θέση (Ν.Παπαδόπουλος, 1997). Από εκσκαφές προκύπτει 20m σε βασικό υδροσημείο της περιοχής μελέτης Έτσι, και στην παρούσα εργασία, το πάχος των αλλουβιακών αποθέσεων τόσο πλησίον της ακτής, όσο και στα ενδότερα του νησιού θεωρείται σταθερό και ίσο με 20m.



Εικόνα 3.10, Γεωλογικός Χάρτης του κόλπου των Καταπόλων. (Πηγή: ΙΓΜΕ). Διακρίνονται κυρίως οι σχηματισμοί: *ai₂* - Αλλουβιακές αποθέσεις. Ογκόλιθοι, χαλίκια, άμμος, υλός και πηλός συχνά λεπτομερώς ανακατωμένα.

ft - Αργιλικόι σχιστόλιθοι/Σχιστόλιθοι.

ft.k - Κλαστικοί (τουρβιδιτικοί) ασβεστόλιθοι

Q – Χαλίκια – κροκαλοπαγή, ογκόλιθοι, πλευρικά κορήματα και αποθέσεις ολισθηρών κατωφερειών. Κυρίως ασύνδετοι ογκόλιθοι και μεγάλες πέτρες εντρωμένα μέσα σε λεπτότερα κλαστικά υλικά.

Η περιοχή πάνω από το ρήγμα, παρότι παρουσιάζει ενδιαφέρον στους της γεωλογικούς σχηματισμούς, βρίσκεται εκτός της περιοχής μελέτης και δε θα αναλυθεί.

3.4.3. Υδρογεωλογία

Όπως προαναφέρθηκε μόνο οι αλλουβιακές αποθέσεις παρουσιάζουν υδρογεωλογικό ενδιαφέρον. Η υδραυλική αγωγιμότητα αυτού του στρώματος μπορεί να κυμαίνεται από 5-50m/d (ΕιδικήΓραμματείαΥδάτων, 2014). Η σειρά του φλύσχη είναι πρακτικά αδιαπέρατη καθώς αποτελείται ως επί το πλείστον από αργιλικούς σχιστόλιθους. Δύναται να παρουσιάζει κατά τόπους μία μικρή υδροφορία που αναπτύσσεται στα ημιπερατά μέρη της ενότητας που μπορεί να είναι ασβεστολιθικοί φακοί, κροκαλοπαγείς πάγκοι ή ψαμμίτες. Παρόλα αυτά, η υδροφορία του παραμένει πολύ περιορισμένη κι αν εκδηλωθεί, θα εκδηλωθεί με πηγές παροχής 50m³ το 24ωρο (N.E.Kourmoulis, 1983). Επίσης, η ανθρακική σειρά έχει μειωμένο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον, με περιορισμένες δυνατότητες εκμετάλλευσης διότι οι καρστικοί υδροφόροι που σχηματίζονται σε αυτή είναι ασθενείς (μικρού πάχους) και άμεσα επηρεασμένοι από τη διείσδυση της θάλασσας. Στην περιοχή μελέτης, σχηματίζονται 3 υπολεκάνες με διαφορετικό υδρογεωλογικό ενδιαφέρον.

Η υπολεκάνη του Ξυλοκερατιδίου, έχει σχεδόν ανύπαρκτο υδρογεωλογικό ενδιαφέρον, δεδομένου του γεγονότος ότι το μεγαλύτερο μέρος της ανάντι λεκάνης τροφοδοσίας των αλλουβίων της αποτελείται από ασβεστολιθικούς σχηματισμούς, οι οποίοι δεν ευνοούν την επιφανειακή απορροή αλλά αντίθετα την κατείσδυση. Η υπολεκάνη, έχει επίσης, υποστεί την επίδραση της θάλασσας (N.Παπαδόπουλος, 1997).

Η υπολεκάνη του Ραχιδίου έχει έκταση περίπου 0,4km² και υφίσταται εντατική εκμετάλλευση, κυρίως από την κοινότητα των Καταπόλων. Η υπολεκάνη αυτή εκτός από την απευθείας κατείσδυση που δέχεται από τις χειμερινές βροχές, τροφοδοτείται επίσης και από τις απορροές της ανάντι υδρολογικής λεκάνης με έκταση 2,17km². Μειονεκτεί στο ότι έχει χαμηλό συντελεστή αποθηκευτικότητας νερού.

Η υπολεκάνη των Καταπόλων καταλαμβάνει έκταση 0,2km² και από υδρογεωλογική άποψη θεωρείται σημαντική. Από αυτή την υπολεκάνη δεν υδροδοτούνται μόνο τα Κατάπολα, αλλά και η Χώρα Αμοργού. Εκτός από την απευθείας κατείσδυση δέχεται τροφοδοσία από την επιφανειακή απορροή από 2 υδρολογικές υπολεκάνες με έκταση 2,39 και 0,9km² αντίστοιχα. Στην πρώτη, υπολεκάνη του Βαλσαμίτη, έχει κατασκευαστεί από το 2001, το φράγμα εμπλουτισμού των Καταπόλων με χωρητικότητα 120.000m³ και προϋπολογισμό 1,5εκ. ευρώ (Εικόνα 3.11). Σύμφωνα με τον Προϊστάμενο Διεύθυνσης Υδάτων της Περιφέρειας Νοτίου Αιγαίου, κο Νόκα Ηλία, το έργο αυτό συντελεί στην προσωρινή αποθήκευση της πλημμυρικής απορροής που χάνεται στη θάλασσα, πολλές φορές μάλιστα με τη δημιουργία καταστροφών στο πεδινό τμήμα της κοιλάδας. Το έργο, όπως έχει ειπωθεί, χρειάζεται ορισμένες βελτιώσεις ώστε να μειωθεί η απώλεια νερού από το σώμα του φράγματος, με τελικό στόχο ο τεχνικός εμπλουτισμός να είναι απόλυτα ελεγχόμενος τη θερινή περίοδο.



Εικόνα 3.11 Ο οικισμός των Καταπόλων, στη νότια πλευρά του κόλπου. 2: Η θέση του φράγματος στην υπολεκάνη του Βαλσαμίτη

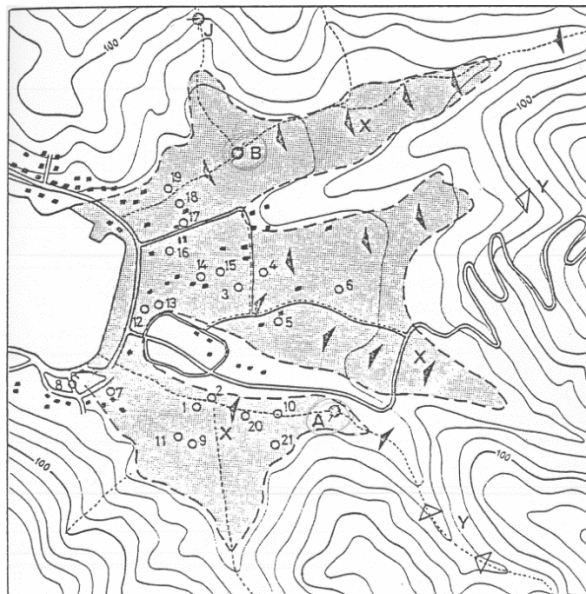
3.4.4. Σεισμικότητα

Η σεισμικότητα του νησιού είναι όση και της ευρύτερης περιοχής του Αιγαίου, αφού ανήκει στο τέμαχος Δωδεκανήσου – Κυκλάδων και είναι μεγαλύτερη από αυτήν των άλλων Μεσογειακών χωρών που βρίσκονται επίσης κοντά στα όρια μεταξύ της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας. Σύμφωνα με τις τελευταίες εργασίες των σεισμολόγων των σχετικών επιστημονικών φορέων στην Ελλάδα, έχει προταθεί ο χωρισμός του Ελληνικού χώρου σε 4 κατηγορίες ζωνών σεισμικής επικινδυνότητας. Με βάση αυτό τον χωρισμό, η Αμοργός κατατάσσεται στις σεισμόπληκτες περιοχές μέτριας σεισμικής επικινδυνότητας (Κατηγορία II) (Μάργαρης, 2008). Ο σεισμός της Αμοργού την 9^η Ιουλίου 1956 ήταν ο πιο καταστρεπτικός σεισμός που είχε συμβεί στην περιοχή του Αιγαίου τα τελευταία έτη, διότι προκάλεσε τσουνάμι, πλήττοντας τις ακτές του κεντρικού και νότιου Αιγαίου, ενώ προκάλεσε 53 θύματα, 100 τραυματίες και μεγάλες βλάβες σε περισσότερα από 3500 κτίρια.

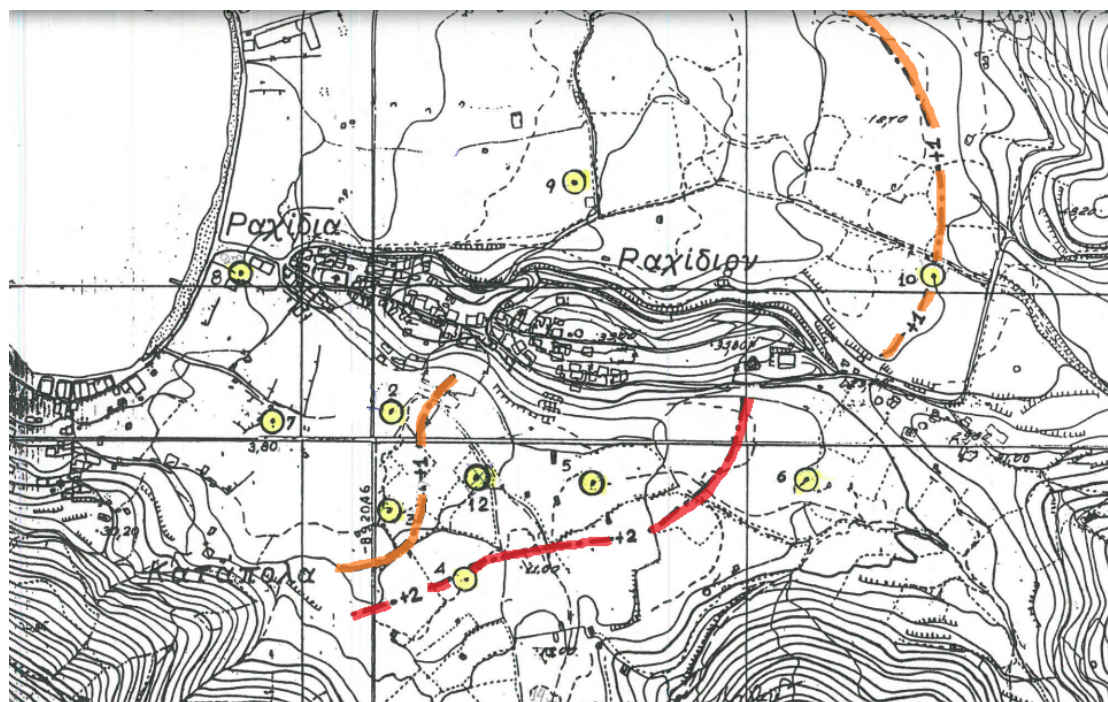
3.5. Τροφοδοσία Λεκάνης

Λίγα είναι γνωστά τόσο για τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η τροφοδοσία της πεδιάδας των Καταπόλων, όσο και για τις ποσότητες νερού που δέχεται μέσα στο υδρολογικό έτος. Βάσει της μελέτης του (Ν. Παπαδόπουλος, 1997), η πεδιάδα τροφοδοτείται κυρίως από τη λεκάνη των Καταπόλων και του Ραχιδίου. Η ημικρατική εταιρεία Gersar, που το 1984

πραγματοποίησε για λογαριασμό της Νομαρχίας Κυκλάδων αναγνωριστική μελέτη για το νερό στην Αμοργό, παρουσίασε ένα χάρτη των Καταπόλων με τη ροή του νερού στην πεδιάδα και προτεινόμενα έργα διευθέτησης πηγαδιών (Εικόνα 3.12). Επίσης, σε παρόμοια μελέτη του 1997 (Ν.Παπαδόπουλος, 1997) παρουσιάζεται ο χάρτης της πεδιάδας των Καταπόλων με ισοπιεζομετρικές καμπύλες του φρεάτιου υδροφορέα (Εικόνα 3.13).



Εικόνα 3.12 Τα βέλη δείχνουν τη ροή του υπόγειου νερού βάσει αναγνωριστικής μελέτης του 1984.



Εικόνα 3.13 Με κόκκινη γραμμή: Ισοπιεζομετρική των +2m Με πορτοκαλί γραμμή: Ισοπιεζομετρική των +1m. Με κίτρινο χρώμα δηλώνονται τα καταγεγραμμένα υδροσημεία της υδρογεωλογικής μελέτης του 1997(Ν. Παπαδόπουλος 1997).

Η μεγαλύτερη ποσότητα του νερού φαίνεται να εισέρχεται από το νότιο και νοτιοανατολικό τμήμα της πεδιάδας. Είναι, ήδη γνωστό ότι το βόρειο τμήμα της λεκάνης του Ξυλοκερατιδίου, τροφοδοτεί με πολύ μικρές ποσότητες νερού την πεδιάδα και δεν ευνοεί την επιφανειακή

απορροή. Όσον αφορά τα στοιχεία υδατικού ισοζυγίου, για τις Κυκλάδες αναφέρονται ενδεικτικά τα εξής ποσοστά (Πίνακας 3.4)

Πίνακας 3.4 Σχετικά ποσοστά στοιχείων υδατικού ισοζυγίου Κυκλάδων

	Απορροή	Κατείσδυση	Εξάτμιση
Κυκλάδες	18,5%	15,7%	65,7%

Τα στοιχεία του πίνακα προέρχονται από τα αποτελέσματα μαθηματικών ομοιωμάτων που εφαρμόστηκαν στη μελέτη του Υπουργείου Ανάπτυξης (ΥΠΑΝ, 2003-2008) και τα οποία καταρτίστηκαν σε επίπεδο λεκάνης απορροής, ομαδοποιημένα στους νομούς στους οποίους ανήκουν. Τα δεδομένα βροχόπτωσης που χρησιμοποιήθηκαν αφορούν υδρολογικά έτη από το 1986-2001, μια περίοδο που γενικά χαρακτηρίζεται ξηρή. Η εξάτμιση, όπως αναμένεται έχει υψηλή τιμή, λόγω της μειωμένης φυτοκάλυψης, της υψηλής μέσης θερμοκρασίας, ηλιοφάνειας και ταχύτητας των ανέμων που παρουσιάζει το νησί.

Συνεπώς, δημιουργείται η ανάγκη εύρεσης των λεκανών που τροφοδοτούν την περιοχή μελέτης κι επιπλέον να γίνει μια προσέγγιση των στοιχείων του υδατικού ισοζυγίου ειδικά για το νησί της Αμοργού. Ως εκ τούτου έγινε χρήση του μοντέλου SWAT, το οποίο ενσωματώνει όλες τις σχετικές υδρολογικές διεργασίες συμπεριλαμβανομένης της απορροής, της ανάπτυξης της βλάστησης, των χρήσεων γης καθώς και της διαχείρισης των υδατικών πόρων σε επίπεδο λεκάνης.

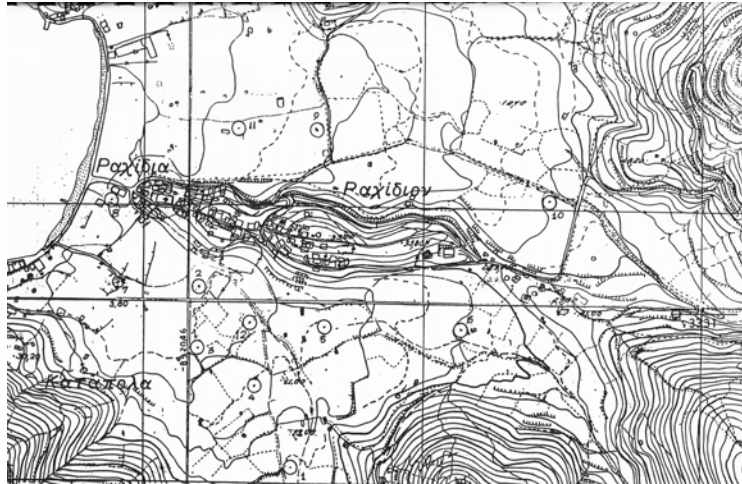
3.6. Υδρευτική Κατάσταση

Η Αμοργός υδρεύεται ως επί το πλείστον από υπόγεια νερά, μέσω γεωτρήσεων και με μεταφορά νερού μέσω πλοίων από το Λαύριο. Το πρόγραμμα υδροδότησης του Δήμου εντάσσεται σε ευρύτερο πρόγραμμα του ΥΠΕΚΑ για την υδροδότηση μικρών νησιών. Βάσει της τεχνικής υπηρεσίας του Δήμου Αμοργού, μεταφέρονται 10.000m³ νερό κάθε χρόνο στο λιμάνι των Καταπόλων. Σύμφωνα με στοιχεία της αρμόδιας για τη μεταφορά του νερού Γενικής Γραμματείας Αιγαίου, το 2014 η Πολιτεία έστειλε νερό με υδροφόρες σε επτά νησιά των Κυκλάδων και πέντε των Δωδεκανήσων. Η Αμοργός ήταν μέσα στα τέσσερα νησιά που έλαβαν τις μεγαλύτερες ποσότητες νερού. Συγκεκριμένα, αναφέρονται η Πάτμος (68.654 κυβικά), η Κίμωλος (55.340 κυβικά νερού), το Κουφονήσι (51.117 κυβικά) και η Αμοργός (33.936 κυβικά), ενώ μικρότερες ποσότητες νερού μεταφέρθηκαν στο Καστελόριζο, τη Σύμη, τη Σχοινούσα, την Ηρακλειά, τη Δονούσα, τους Λειψούς, το Αγαθονήσι, τη Λέρο και τη Φολέγανδρο. Όσον αφορά στο κόστος, από το 2006 ως το 2014 διατέθηκαν για τη μεταφορά νερού στα άνυδρα νησιά 71,3 εκατ. ευρώ. Όσον αφορά την αφαλάτωση, η Κοινότητα των Καταπόλων δεν διαθέτει. Μία μονάδα έχει αγοραστεί στην Αιγιάλη, ωστόσο δεν έχει, ακόμη εγκατασταθεί καθώς εκκρεμεί η εκτέλεση των συνοδών έργων. Όσον αφορά την υδροληψία στο νησί γίνεται κατά βάση από τη λεκάνη των Καταπόλων από όπου υδρεύονται η κοινότητα των Καταπόλων και της Χώρας. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η κατάσταση του υδρευτικού δικτύου δεν είναι καλή, καθώς αυτό παρουσιάζει απώλειες νερού σε όλο το μήκος του μέχρι και 15%. Στην πεδιάδα των Καταπόλων έχουν καταγραφεί βάσει στοιχείων της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων συνολικά 35 πηγάδια, δύο εκ των οποίων είναι γεωτρήσεις και χρησιμοποιούνται για την ύδρευση της κοινότητας και ένα ακόμη που χρησιμοποιείται για την ύδρευση της Χώρας. Τα περισσότερα πηγάδια είναι ιδιωτικά και χρησιμοποιούνται για άρδευση καλλιεργειών ή κηπευτικών. Ο Πίνακας 3.6 δείχνει αναλυτικά ό,τι στοιχεία συλλέχτηκαν για τις θέσεις, τις παροχές και τις χρήσεις αυτών των πηγαδιών.

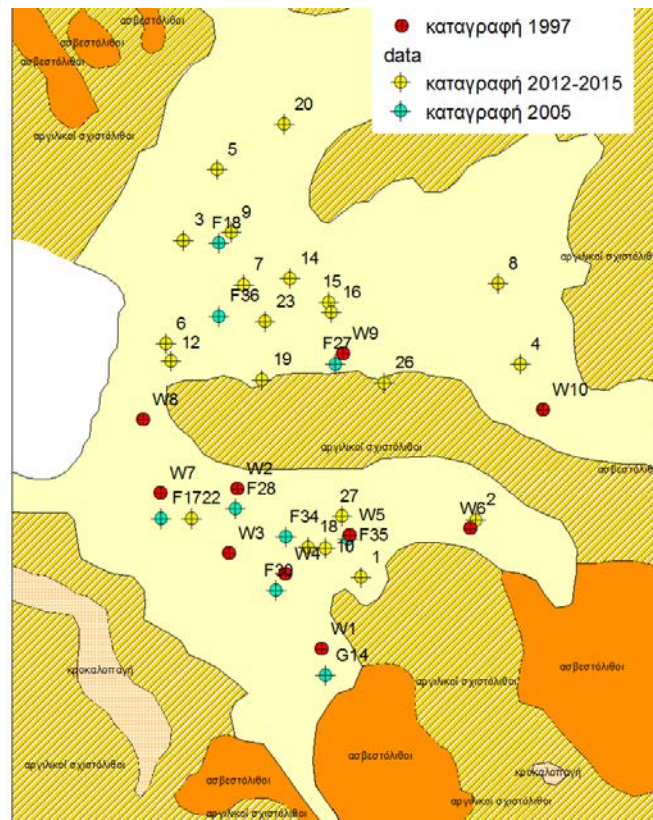
Πίνακας 3.5 Καταγραφή υδροσημείων στα Κατάπολα. Τα υδροσημεία με κωδικό «W» έχουν απογραφή σε υδρογεωλογική μελέτη του 1997. Τα υδροσημεία με κωδικό «F» έχουν απογραφεί από μελέτη του ΙΓΜΕ το 2005 και τα υδροσημεία με κωδικό «Π» έχουν απογραφεί από την Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου την περίοδο 2012-2015.

ΟΝΟΜΑΣΙΑ/ ΚΩΔΙΚΟΣ	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ			ΙΔΙΟΚΤΗΣΙΑ	ΧΡΗΣΗ	ΒΑΘΟΣ [m]	ΠΑΡΟΧΗ [m ³ /d]
	Χ	Υ	Ζ				
Π5	666427	4077590	10	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	-	4
F18	666430	4077448	9	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	4	0,4
Π14	666567	4077380	10	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	6	1,3
Π7	666478	4077368	7,7	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	6	3
F36	666431	4077308	6	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	7	100
Π23	666520	4077299	6	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	4	5
Π16	666647	4077315	9,5	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	6	4
Π12	666338	4077222	4,2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	-	0,4
Π19	666514	4077186	8	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	-	7
W9	666815	4077525	5	ΔΗΜΟΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	6,8	100
Π26	666749	4077179	8	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	-	4
Π4	667010	4077215	12	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	-	13
W10	667200	4077417	14	ΔΗΜΟΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	20	0
W8	666430	4077397	5,5	ΔΗΜΟΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	3	0,6
W7	66468	4077258	8	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	5	0,3
W2	66610	4077265	14,7	ΔΗΜΟΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	5	60
F28	666426	4076937	14	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	-	0
Π22	666378	4076919	9	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	5	0,3
F17	666282	4077016	6	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	5	60
F34 ΡΑΦΤΗ	666560	4076883	11	ΔΗΜΟΤΙΚΗ	ΥΔΡΕΥΣΗ	15	150
W5	666830	4077175	14	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	10	22
Π18	666603	4076863	13,5	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	-	2,3
W3	666695	4077135	10,5	ΔΗΜΟΤΙΚΗ	ΥΔΡΕΥΣΗ	6	100
W4	666700	4077100	11,2	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	10	14
F30	666541	4076780	10	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	10	20
G14 ΣΑΚΚΑ	66635	4076616	10	ΔΗΜΟΤΙΚΗ	ΥΔΡΕΥΣΗ	20	350
W6	667060	4077178	16	ΙΔΙΩΤΙΚΗ	ΑΡΔΕΥΣΗ	15,5	3

Η Γενική Εικόνα της συνολικής καταγραφής είναι ότι οι περισσότερες ιδιωτικές γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται για άρδευση και αντλούν πολύ μικρές ποσότητες νερού καθημερινά, με εξαίρεση την F36, που είναι φυτώριο βιολογικής καλλιέργειας. Η γεώτρηση G14 είναι η βασική γεώτρηση που υδροδοτεί την Κοινότητα των Καταπόλων και αντλεί 350-400m³ ημερησίως. Η F34 αποτελεί επίσης δημοτική γεώτρηση που χρησιμοποιείται για ύδρευση του οικισμού. Η W3 αντλεί περίπου 100m³ ημερησίως και υδροδοτεί τη Χώρα. Με βάση την υδρογεωλογική μελέτη του 1997 η W3 αντλείται από το 1982 μόνο τη θερινή περίοδο. Το πηγάδι W9 έχει καταγραφεί ως αγροκήπιο και αντλεί 100m³/d. Για το W10 δεν έχει καταγραφεί κάποια άντληση από το 1997. Η Εικόνα 3.18, αναπαριστά το χάρτη με την καταγραφή μόλις 10 υδροσημείων (με τον κωδικό «W») από τη μελέτη του 1997. Για τα σημεία δεν ήταν διαθέσιμες συντεταγμένες, έτσι χρειάστηκε να γίνει γεωαναφορά του χάρτη στο GIS, ώστε να γίνει ακριβής τοποθέτηση των σημείων στην περιοχή μελέτης. Η Εικόνα 3.19, δείχνει όλα τα υδροσημεία που έχουν καταγραφεί από τρεις διαφορετικές χρονικά μελέτες.



Εικόνα 3.14 Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης (Ν. Παπαδόπουλος 1997), όπου φαίνονται με κύκλο τα υδροσημεία που είχαν καταγραφεί.



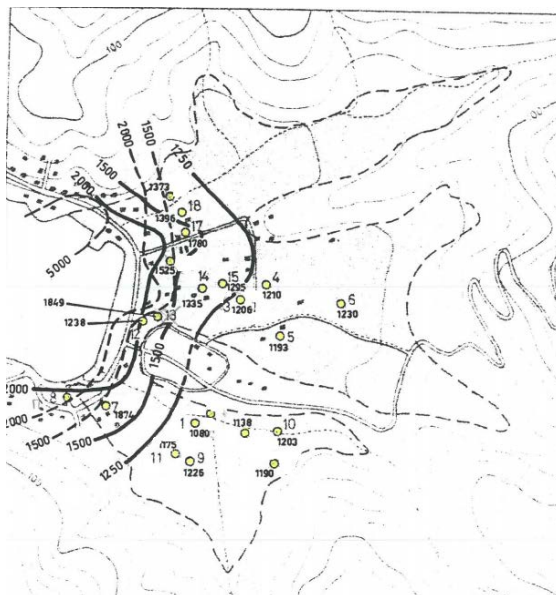
Εικόνα 3.15 Γεωαναφερμένος γεωλογικός χάρτης της περιοχής μελέτης.

Όπως, παρατηρείται από την Εικόνα 3.19, όλα τα υδροσημεία βρίσκονται στο γεωλογικό σχηματισμό των αλλουβιακών αποθέσεων. Χαρακτηριστικό της περιοχής μελέτης είναι η αιχμηρή παρέμβαση του φλύσχη μέσα στο αλλουβιακό στρώμα, στο κέντρο της πεδιάδας, στην περιοχή ακριβώς που βρίσκεται και ο οικισμός του Ραχιδίου. Μάλιστα, σε αυτή την περιοχή παρατηρείται και τοπική ανύψωση του αναγλύφου μέχρι τα 22m.

Το πρόβλημα της υφαλμύρισης στην Αμοργό αναφέρεται από την υδρογεωλογική έρευνα του 1983, βάσει της οποίας η ποιοτική κατάσταση των νερών στα Κατάπολα μετριάζεται,

καθώς τα Cl^- δεν υπερβαίνουν σε συγκέντρωση τα 550mg/L (N.E.Kourmoulis, 1983). Μάλιστα στη μελέτη είχε προταθεί η διάνοιξη πηγαδιού στη θέση Σακκάς (πιθανότατα να αναφέρεται στη γεώτρηση G14) για να δοθεί λύση στο πρόβλημα ποσοτικής επάρκειας, δεδομένου του γεγονότος ότι σε αυτή τη θέση ποιοτικά το νερό θα είναι ικανοποιητικής ποσिमότητας με συγκέντρωση χλωριόντων χαμηλότερη από 200mg/L.

Στη μελέτη του 1997, τονίζεται το πρόβλημα της υφαλμύρισης κατά την περίοδο του θέρους και παρουσιάζεται χάρτης με ισοαγώγιμες καμπύλες της κοινότητας των Καταπόλων (Εικόνα 3.20).



Εικόνα 3.16 Χάρτης ισοαγώγιμων καμπυλών για την περιοχή των Καταπόλων από μελέτη του 1997 (N. Παπαδόπουλος 1997)

Ως προτάσεις για την καλύτερη αξιοποίηση του υδατικού δυναμικού της περιοχής αναφέρονται:

- Η κατασκευή φράγματος (που ολοκληρώθηκε το 2001) για την αποθήκευση των πλημμυρικών απορροών και τον τεχνητό-ελεγχόμενο εμπλουτισμό του προσχωματικού υδροφορέα.
- Η τακτική παρακολούθηση της ποιότητας του νερού με συχνές δειγματοληψίες.
- Η κατασκευή αποχετευτικού δικτύου
- Την κατασκευή έργου ανάσχεσης της ροής του επιφανειακού νερού στην έξοδο του μικροχειμάρρου, στην υπολεκάνη των Καταπόλων, για την αύξηση του ποσοστού κατείσδυσης σε περιόδους ραγδαίων βροχοπτώσεων, και
- Τη διάνοιξη μιας σειράς από γεωτρήσεις στο σχηματισμό του φλύσχη για να χρησιμοποιούνται ως εφεδρεία, σε περιόδους εξαιρετικής ανομβρίας.

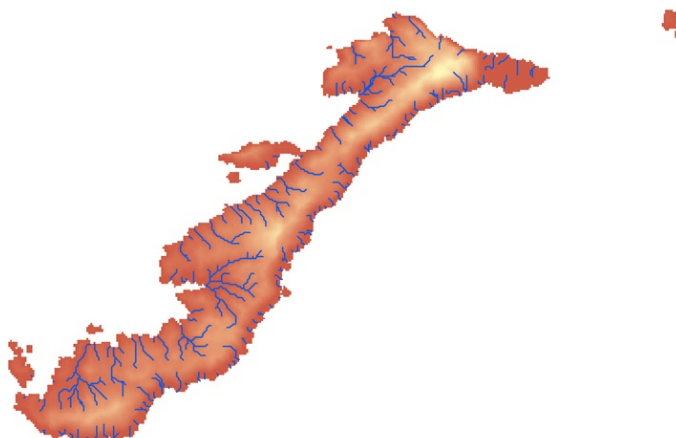
Αν και δεν υπάρχει πιο πρόσφατη υδρογεωλογική μελέτη για την υφαλμύριση στην Αμοργό, το πρόβλημα εξακολουθεί να υφίσταται και οξύνεται από την αύξηση του τουρισμού τις θερινές περιόδους, αλλά και τη σταδιακή αύξηση του μόνιμου πληθυσμού.

4. Κεφάλαιο 4^ο: Εισαγωγή Δεδομένων στο μοντέλο Argus One

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων (input) στο μοντέλο του PTC και ο καθορισμός των απαραίτητων παραμέτρων για να τρέξει το πρόγραμμα. Προκειμένου να γίνει όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα, ακολουθείται συγκεκριμένη σειρά στην εισαγωγή και επεξεργασία των δεδομένων, ενώ απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην κατασκευή του πλέγματος (mesh), αλλά και στη δημιουργία των οριακών συνθηκών (boundary conditions).

4.1. Εκτίμηση Υδρολογικού ισοζυγίου με το SWAT

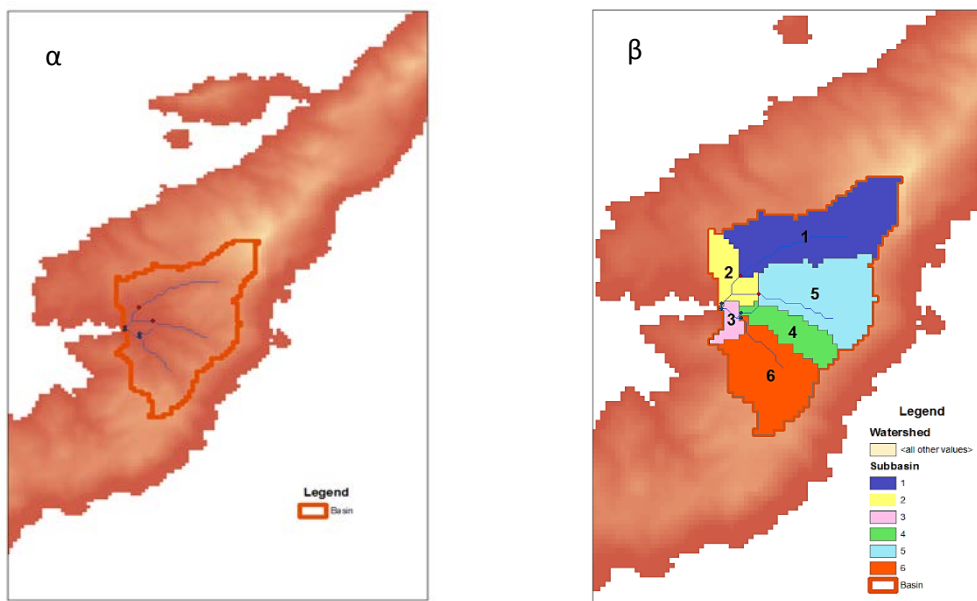
Το πρώτο βήμα μοντελοποίησης με το SWAT περιλαμβάνει τη σχηματοποίηση της λεκάνης απορροής που θα ορίσει το βασικό χαρακτηριστικό της κλίσης εδάφους στα διάφορα τμήματα της λεκάνης. Αυτό πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS (ESRI ArcMap), στο οποίο ενσωματώθηκε η εργαλειοθήκη της εφαρμογής του μοντέλου SWAT2012 με γραφικό περιβάλλον εργασίας το ArcSWAT, ενσωματωμένο στο GIS ArcMap10.1. Η σχηματοποίηση της λεκάνης γίνεται με την εισαγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (Digital Elevation Model-DEM), που αποτελεί το υπόβαθρο με βάση το οποίο το GIS θα σχεδιάσει το υδρογραφικό δίκτυο. Το τοπογραφικό ανάγλυφο με το υδρογραφικό δίκτυο φαίνονται στην Εικόνα 3.14.



Εικόνα 4.1 Υδρογραφικό δίκτυο Αμοργού, όπως παρουσιάζεται στο GIS ArcMap10.1.

Αυτόματα, δημιουργείται η υδρολογική λεκάνη που τροφοδοτεί συνολικά την περιοχή μελέτης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.15 (α).

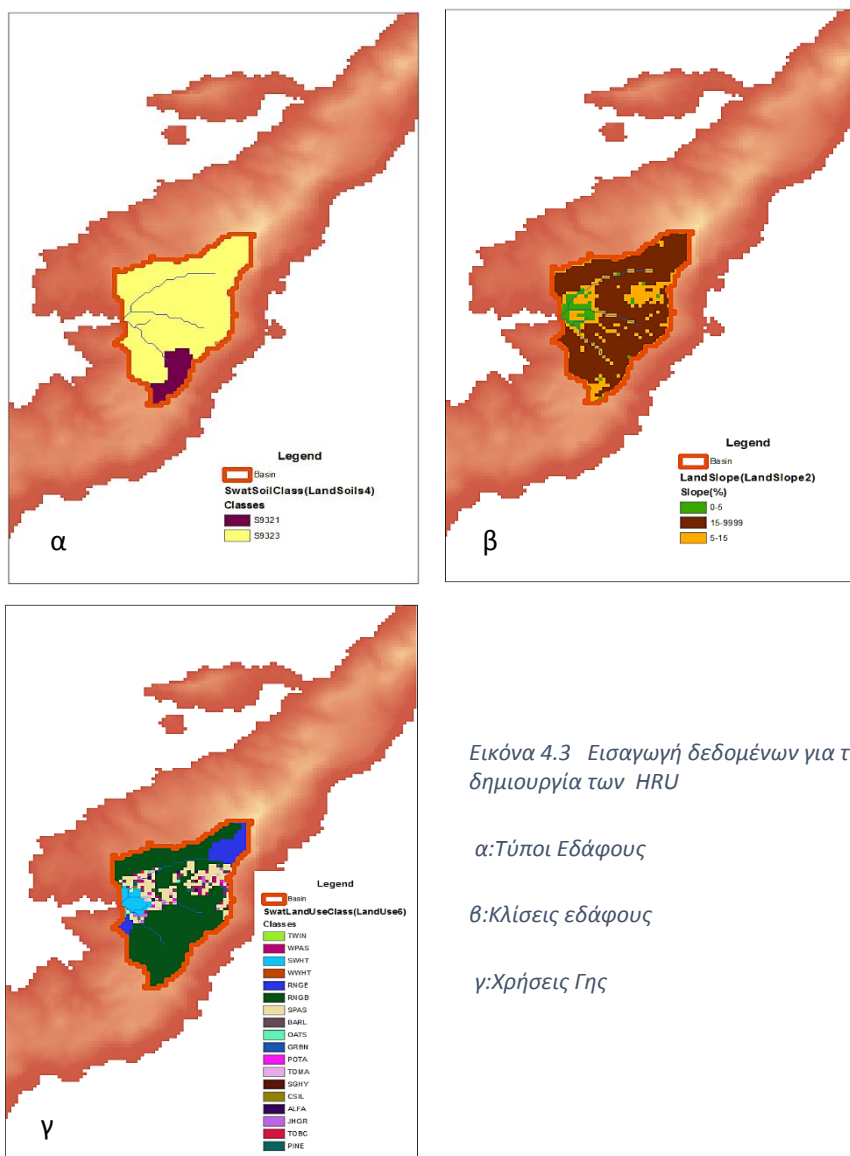
Η λεκάνη (basin) υποδιαιρείται σε υπολεκάνες με στόχο να μελετηθεί το κάθε υδατόρευμα ξεχωριστά. Ο αριθμός των υπολεκανών ορίστηκε να είναι ο ελάχιστος δυνατός (Εικόνα 3.15,



Εικόνα 4.2 α: Υδρολογική Λεκάνη τροφοδοσίας των Καταπόλων, όπως προκύπτει από το SWAT, β: Διαχωρισμός της λεκάνης απορροής σε υπολεκάνες με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και το υδρογραφικό δίκτυο

β). Από την ίδια εικόνα παρατηρείται ότι οι υπολεκάνες 1,2 και 5 καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση στη βόρεια πλευρά της λεκάνης, καταλαμβάνουν 7,95km². Εντούτοις, όπως προαναφέρθηκε είναι γνωστό ότι δεν υπάρχει σημαντική υδροφορία σε αυτό το τμήμα. Αυτό, επίσης, μπορεί να οφείλεται στην ύπαρξη ρήγματος που εκτείνεται σχεδόν σε όλη την έκταση των υπολεκανών 1,2 και 5. Το ρήγμα βρίσκεται πλησίον του οικισμού του Ξυλοκερατιδίου (Εικόνα 3.10). Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι η τροφοδοσία σε αυτό το κομμάτι είναι ελάχιστη ως μηδαμινή κι ότι οι υπολεκάνες που ουσιαστικά τροφοδοτούν την περιοχή μελέτης είναι οι 3,4 και 6, με συνολική έκταση τα 4,29km².

Για την απεικόνιση των διάφορων χρήσεων γης της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων Corine Land Cover 2000 (Εικόνα 3.16(γ)) και για το έδαφος τα δεδομένα προέκυψαν από τους εδαφολογικούς χάρτες (Soilmap) που προέρχονται από το Joint Research Center (JRC) (Εικόνα 3.16(α)). Επίσης, με βάση το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) το SWAT δημιούργησε αυτόματα τις κλίσεις του εδάφους για τη λεκάνη απορροής. Βάσει των τριών προαναφερθέντων δεδομένων, δηλαδή, των χρήσεων γης, των κλίσεων εδάφους και του τύπου εδάφους, κάθε υπολεκάνη χωρίζεται σε Μονάδες Υδρολογικής Απόκρισης (Hydraulic Response Units-HRUs). Τα HRUs (Εικόνα 3.16) είναι τα τμήματα της λεκάνης που έχουν κοινά υδρολογικά χαρακτηριστικά. Το SWAT μοντελοποιεί τις διεργασίες του υδρολογικού κύκλου σε κάθε HRU ξεχωριστά και από το άθροισμά τους προκύπτει το συνολικό υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης.



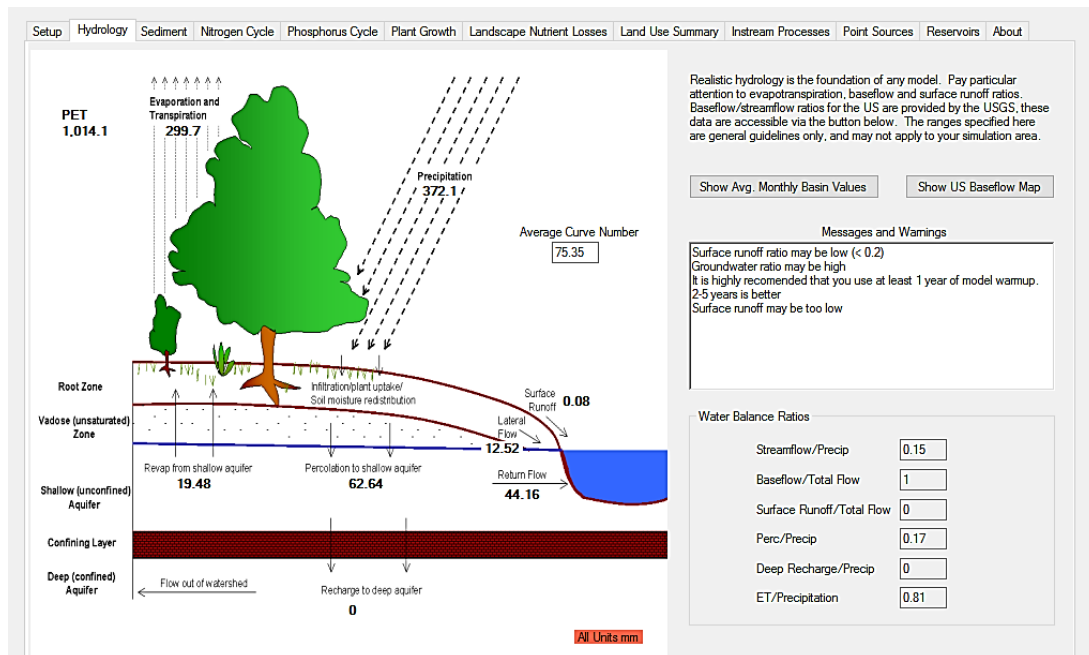
Εικόνα 4.3 Εισαγωγή δεδομένων για τη δημιουργία των HRU

α:Τύποι Εδάφους

β:Κλίσεις εδάφους

γ:Χρήσεις Γης

Στη συνέχεια, εισήχθησαν δεδομένα υετού και θερμοκρασίας, όπως περιεγράφηκαν στην παράγραφο 3.3. Το υδατικό ισοζύγιο, όπως προέκυψε από το SWAT φαίνεται καθαρά στην Εικόνα 3.17.



Εικόνα 4.4 Υδρολογικό ισοζύγιο, όπως προέκυψε από το SWAT.

Κατείδυση = Διήθηση στον αβαθή υδροφορέα – Ανάκτηση από αβαθή Υδροφορέα

$$\text{Κατείδυση} = 62.64 - 19.48 = 43.16 \text{ mm}$$

Συνολικά Απορροή = Ροή Επιστροφής + Πλευρική Ροή + Επιφανειακή απορροή

$$\text{Συνολικά Απορροή} = 44,16 + 12,52 + 0,08 = 56,76 \text{ mm}$$

Πίνακας 3.1 Σχετικά ποσοστά στοιχείων υδατικού ισοζυγίου Αμοργού.

Υετός	Κατείδυση	Εξάτμιση	Συνολική Απορροή
372,1 mm/y	43,16 mm/y	299,7 mm/y	56,76 mm/y
100%	11,60%	80,54%	15,25%

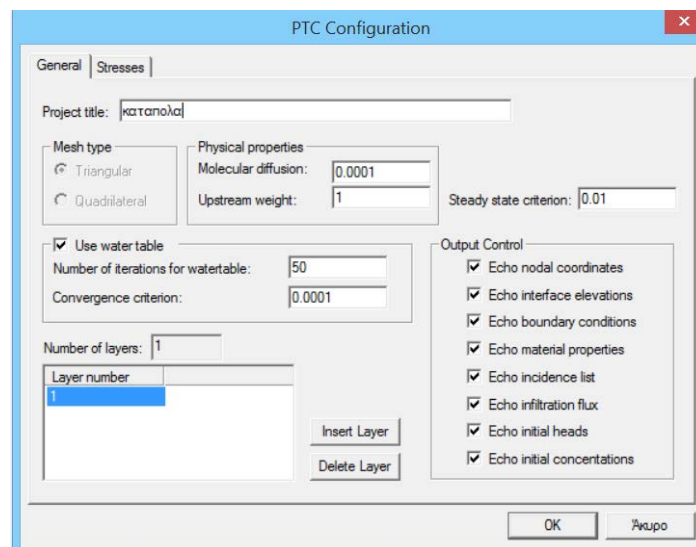
Λόγω έλλειψης δεδομένων, δεν ήταν εφικτό να γίνει ακριβής βαθμονόμηση για τις διεργασίες του ισοζυγίου, συνεπώς είναι αβέβαιο κατά πόσο τα ποσοστά που προκύπτουν από το SWAT, μπορούν να προτιμηθούν έναντι των αντίστοιχων ποσοστών που δίνονται για το σύνολο του Κυκλαδικού χώρου (Πίνακας 3.4). Εντούτοις, τα δεδομένα υετού και θερμοκρασίας σε κάθε περίπτωση αφορούν σε διαφορετικά έτη. Για το λόγο αυτό, στο πρόγραμμα Argus One χρησιμοποιήθηκαν δοκιμαστικά οι τιμές και των δύο αποτελεσμάτων (Πίνακας 3.4 & Πίνακας 3.5), καθώς και τιμές μέσα στο εύρος αυτών.

4.2. Εισαγωγή γενικών Παραμέτρων

4.2.1. Διαμόρφωση Βασικών Πληροφοριών

Η διαδικασία της προσομοίωσης ξεκινάει με την εισαγωγή βασικών δεδομένων για τη λειτουργία του προγράμματος. Με τη δημιουργία ενός νέου φύλλου εργασίας PTC (New PTC Project), από το PTEs Menu του Argus One, ζητείται από το χρήστη να διαμορφώσει πρώτα (PRC Configuration) τις γενικές πληροφορίες του προγράμματος (Εικόνα 4.1). Εδώ εισάγονται:

- Ο τίτλος της εργασίας. Στο παρόν φύλλο εργασίας εισάγεται ο τίτλος «Κατάπολα», το όνομα της περιοχής μελέτης.
- Ο τύπος του πλέγματος. Επιλέχθηκε να κατασκευαστεί τριγωνικό πλέγμα(triangular)
- Το κριτήριο για σταθερή κατάσταση(steady state criterion) ίσο με 0,1. Βάσει αυτού, η διαφορά μεταξύ των διαδοχικών χρονικών βημάτων ροής θα είναι ίση ή μικρότερη από 0,1 με στόχο να επιτευχθεί σταθερή ροή.
- Η χρήση του υδροφόρου ορίζοντα(use of water table). Επιλέχθηκε ελεύθερος υδροφορέας.
- Ο αριθμός των εδαφικών στρωμάτων (Number of layers). Καθώς η υπό μελέτη περιοχή διαθέτει έναν αβαθή προσχωματικό υδροφορέα (20m βάθος) που καταλήγει σε στρώση φλύσχη (bedrock) που είναι πρακτικά αδιαπέρατος, επιλέχθηκε ένα μόνο εδαφικό στρώμα, αυτό των αλλουβιακών αποθέσεων.



Εικόνα 4.5 Παράθυρο διαμόρφωσης βασικών πληροφοριών, στο PTC

Ακόμη, ζητείται από το χρήστη να διαμορφώσει τις περιόδους πιέσεων (stresses). Στην παρούσα μελέτη κρίθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός του έτους σε δύο περιόδους. Η θερινή ή ξηρή περίοδος (Dry period) καλύπτει το πεντάμηνο από Μάιο έως Σεπτέμβριο (155d), ενώ η χειμερινή ή υγρή περίοδος (Wet period) καλύπτει το επτάμηνο από Ιανουάριο έως Απρίλιο, και από Οκτώβριο έως Δεκέμβριο (210d).

Εδώ πρέπει να τονιστεί, ότι όλες οι τιμές που εισήχθησαν στο μοντέλο είναι από προεπιλογή στις ίδιες μονάδες μέτρησης, οι οποίες είναι σε μέτρα [m] για μήκος και ημέρες [d] για χρόνο. Οποιαδήποτε τιμή που δίνεται σε διαφορετική μονάδα μέτρησης, έχει μετατραπεί στις προαναφερθείσες μονάδες.

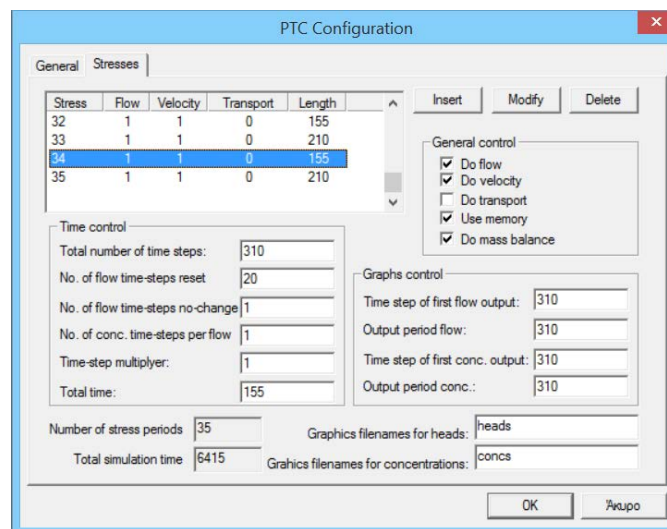
Αρχικά, ορίστηκε η χρονική περίοδος που πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση. Αυτή ξεκινάει το Σεπτέμβριο του 1997, δηλαδή στα μισά της πρώτης χειμερινής περιόδου για την οποία υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα και τελειώνει τον Απρίλιο του 2015, δηλαδή στα μισά της τελευταίας χειμερινής περιόδου για την οποία υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα. Με αυτό το σκεπτικό, δημιουργούνται συνολικά 35 stresses (χρονικές περίοδοι) για 18 έτη. Οι εργασίες που επιλέχθηκαν να πραγματοποιηθούν κατά την εκτέλεση του μοντέλου είναι οι εξής:

- Do flow-πραγματοποίηση των εξισώσεων ροής
- Do velocity-υπολογισμός ταχυτήτων ροής

- Use memory-χρησιμοποίηση της εικονικής μνήμης
- Do mass balance-πραγματοποίηση των εξισώσεων του ισοζυγίου μάζας.

Η επιλογή Do Transport, που αφορά στον υπολογισμό μεταφοράς ρύπου, δεν έγινε, καθώς η ρύπανση της υφαλμύρισης προσομοιώθηκε μέσω των υδραυλικών υψών και όχι της μεταφοράς μάζης.

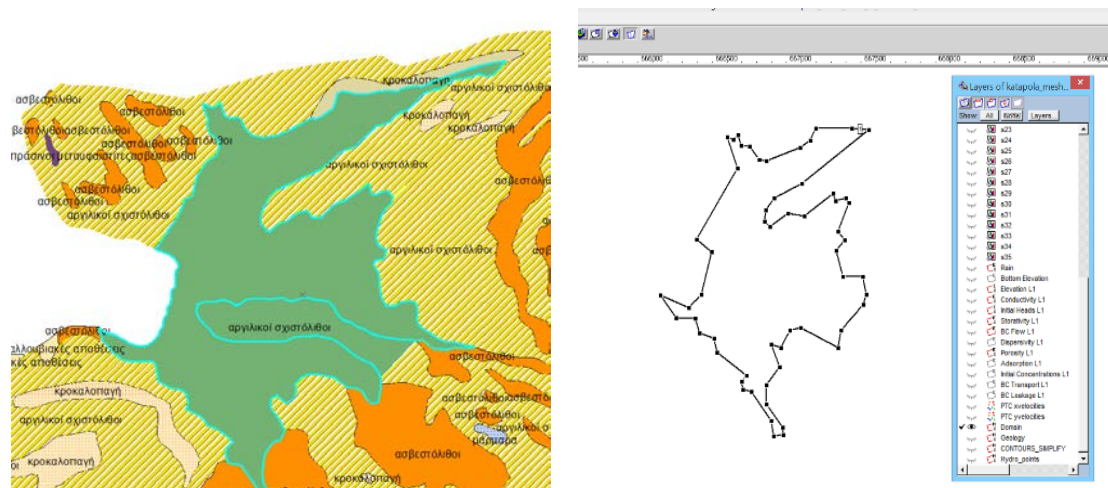
Επίσης, στην καρτέλα Έλεγχος του χρόνου (Time Control) ορίστηκε να εκτελούνται 2 φορές τη μέρα, για κάθε μέρα περιόδου, οι υπολογισμοί των προαναφερθέντων εργασιών. Ως εκ τούτου, για κάθε θερινή περίοδο που αποτελείται από 155d (Εικόνα 4.2), ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων (Total number of time steps) είναι 310. Αντίστοιχα, για κάθε χειμερινή περίοδο που αποτελείται από 210d, ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων είναι 420. Συνεπώς, για το σύνολο των ετών από το 1997 έως το 2015 ο συνολικός αριθμός των χρονικών βημάτων είναι 12830 για 6415d (Total simulation time).



Εικόνα 4.6 Εισαγωγή χρονικών περιόδων και χρονικού βήματος.

4.2.2. Ορισμός του περιγράμματος της περιοχής μελέτης

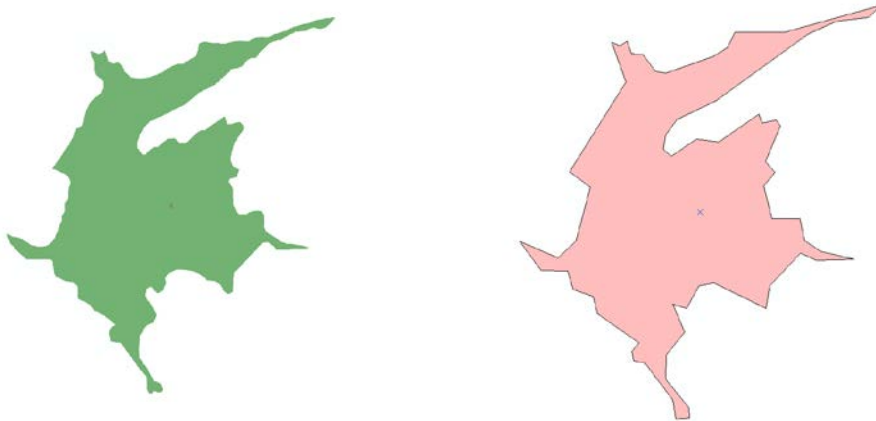
Ως περιοχή μελέτης χρησιμοποιήθηκε μόνο το προσχωματικό κομμάτι της λεκάνης των Καταπόλων για να αποφευχθεί η πληθώρα δεδομένων που δε χρήζουν ιδιαίτερης σημασίας. Εντούτοις, το κομμάτι που επιλέχθηκε, περιέχει ένα μέρος του φλύσχη, το οποίο δεν ήταν



Εικόνα 4.7 Εισαγωγή του περιγράμματος της περιοχής μελέτης από το ArcMap στο PTC.

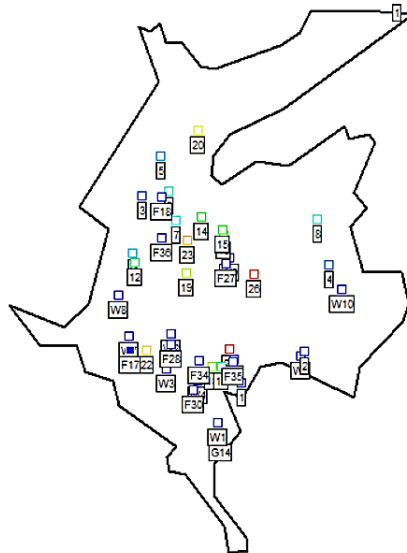
δυνατόν να αφαιρεθεί, διότι θα αλλοίωνε σε μεγάλο βαθμό το σχήμα και κατ' επέκταση την προσομοίωση της λεκάνης. Ως εκ τούτου, εισήχθη στο πρόγραμμα το περίγραμμα της περιοχής ως shapefile από το GIS (Εικόνα 4.3). Αυτή η περιοχή, περιέχει όλα τα στοιχεία που χρήζουν μελέτης και επηρεάζουν την ευρύτερη περιοχή.

Γίνεται αντιληπτό ότι το κομμάτι του προσχωματικού υδροφορέα είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο ως προς το σχήμα του, ειδικά όπως αυτό είχε προκύψει από την ψηφιοποίησή του στο GIS. Για το λόγο αυτό, το περίγραμμα της περιοχής απλουστεύτηκε πριν εισαχθεί στο PTC, ώστε να διευκολύνει, μετέπειτα, και την εισαγωγή των οριακών συνθηκών (Εικόνα 4.4). Η περιοχή έχει επιφάνεια περίπου 1,2km² και συλλέχτηκαν δεδομένα για 29 γεωτρήσεις σε διάφορα σημεία της, 2 από τις οποίες δεν χρησιμοποιούνται από καιρό, οπότε ουσιαστικά 27 γεωτρήσεις έχουν καταγραφεί.



Εικόνα 4.8 Το περίγραμμα της περιοχής μελέτης απλουστεύεται για διευκόλυνση του χρήστη.

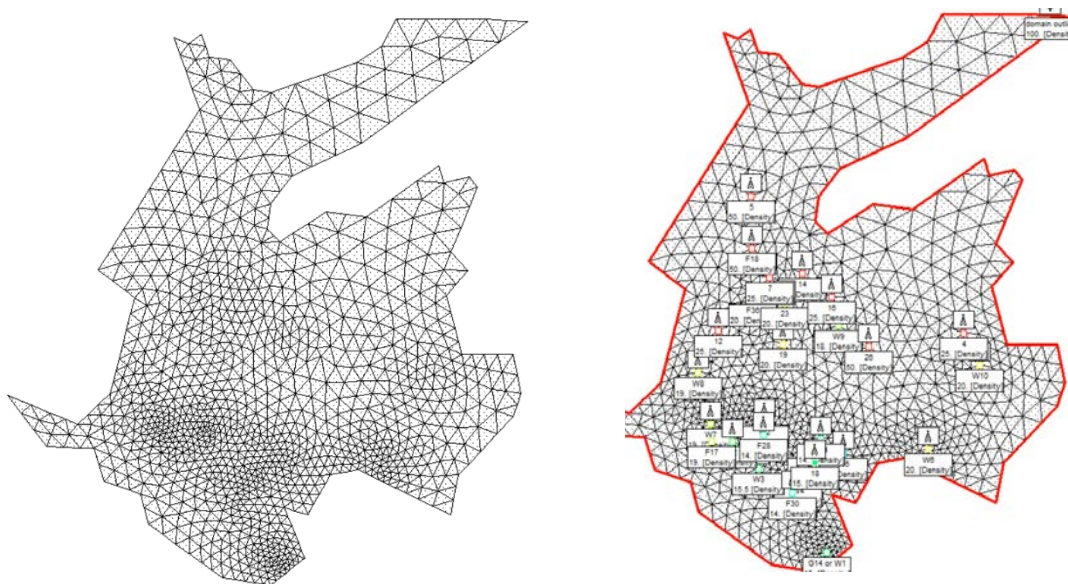
Τα υδροσημεία εισήχθησαν στο domain outline ως shapefile από το GIS (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.9 Εισαγωγή των υδροσημείων στην περιοχή μελέτης.

4.2.3. Κατασκευή Πλέγματος

Η κατασκευή του τριγωνικού πλέγματος (PTC Mesh), δηλαδή η διαδικασία της διακριτοποίησης, αποτέλεσε μια σχετικά χρονοβόρα διαδικασία. Το ArgusOne student version επιτρέπει στο χρήστη τη δημιουργία μέχρι 2000 τριγωνικών στοιχείων (elements) (Εικόνα 4.6). Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των στοιχείων, τόσο μεγαλύτερος θα είναι και ο αριθμός των κόμβων του πλέγματος (nodes). Δεδομένου ότι πάνω στους κόμβους γίνεται η επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου, το πλήθος και η θέση τους, επηρεάζει άμεσα και την ακρίβεια της προσομοίωσης. Πυκνότερο δίκτυο κόμβων, σημαίνει ακριβέστερη επίλυση των εξισώσεων και κατ' επέκταση ακριβέστερη προσομοίωση του υδροφορέα. Για το λόγο αυτό, έγινε η προσπάθεια να κατασκευαστεί το πλέγμα με στοιχεία που να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο σε αριθμό τα 2000, και παράλληλα να εμφανίζει περιοχές αυξημένης πυκνότητας (Mesh Density) πλησίον των γεωτρήσεων. Έτσι, κατασκευάστηκε πλέγμα 1999 στοιχείων και 1078 κόμβων, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.6. Στα πιο πυκνά σημεία βρίσκονται οι γεωτρήσεις.

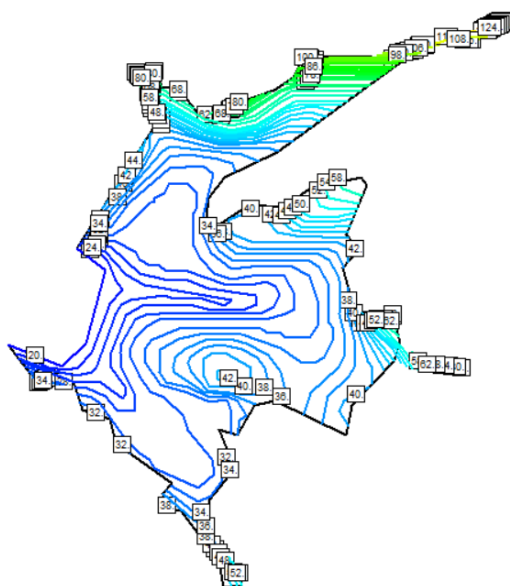


Πίνακας 4.2 Τιμές πυκνότητας πλέγματος (mesh density) για κάθε υδροσημείο, όπως ορίστηκαν για την περιοχή μελέτης.

Υδροσημείο	Πυκνότητα Πλέγματος	Υδροσημείο	Πυκνότητα Πλέγματος
Π5	50	Π12	25
F18	50	W9	18
Π14	25	Π26	50
F36	20	Π4	25
Π23	20	W10	20
Π16	25	W8	19
Π19	20	W7	19
F17	19	W5	13
Π22	16	W6	20
W2	15	F28	14
W3	15,5	F30	14
W4	14	F34	14
G14	15	Π7	25
W7	19		
Π22	16		
Π18	15		

4.2.4. Υψόμετρα

Ως προς τη διαβάθμιση του υψομέτρου (elevation) στην περιοχή μελέτης, είναι ομαλό στην πεδιάδα, με ανώτερο ύψος τα 22m. Εντονότερο γίνεται ξεκάθαρα στο βόρειο και ανατολικό τμήμα της περιοχής με ανώτερη τιμή τα 100m. Ακριβώς επειδή στο πεδινό τμήμα οι τοπικές μεταβολές του υψομέτρου ήταν μικρές, έγινε εισαγωγή ισοϋψών καμπυλών ανά 2m, στο PTC. Οι ισοϋψείς ψηφιοποιήθηκαν στο GIS και εισήχθησαν με τη μορφή αρχείου shapefile στο μοντέλο. Στην Εικόνα 4.7, φαίνεται καθαρά η διαβάθμιση του υψομέτρου στη λεκάνη. Στην πράξη οι ισοϋψείς υπολογίζονται αναφορικά με την επιφάνεια της θάλασσας, η οποία ορίζεται στα 0m. Εντούτοις, στην περίπτωση αυτή, τα υψόμετρα υπολογίζονται σε σχέση με τον πυθμένα (Bottom Elevation) του υδροφορέα που μελετάται, ο οποίος βάσει παραδοχής και σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα πεδίου, βρίσκεται στα 20m βάθος από την επιφάνεια της θάλασσας. Λαμβάνοντας, λοιπόν, τον πυθμένα (bedrock) ως επίπεδο αναφοράς (0m), ορίζεται το επίπεδο της θάλασσας στα 20m. Έτσι, σε κάθε τιμή ύψους προστίθενται 20m κατά την εισαγωγή τους στο μοντέλο. Αυτή η αλλαγή πρέπει να γίνει διότι ο πυθμένας του υδροφορέα δεν ταυτίζεται με την επιφάνεια της θάλασσας. Αφού έχουν εισαχθεί οι ισοϋψείς, ακολουθεί η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου παρεμβολής (Interpolation method), έτσι ώστε να αντιστοιχεί συγκεκριμένη πλέον τιμή ακόμη και σε περιοχές των οποίων το υψόμετρο δεν είναι γνωστό από χάρτες ή άλλες πηγές.



Εικόνα 4.11 Εισαγωγή των Ισοϋψών καμπυλών ανά 2 m, όπως κατασκευάστηκαν από το GIS για την περιοχή μελέτης.

4.2.5. Εδαφικά Στρώματα και Υδραυλική Αγωγιμότητα

Η γεωλογία της περιοχής μελέτης εισήχθη στο μοντέλο ως shapefile από το GIS, όπου είχε γίνει η ψηφιοποίησή της (Εικόνα 4.8). Από το σύνολο της γεωλογίας χρησιμοποιήθηκαν μόνο 2 γεωλογικοί σχηματισμοί, των αλλουβιακών αποθέσεων και του φλύσχη. Για το σχηματισμό των αλλουβίων, η υδραυλική αγωγιμότητα λαμβάνει τιμές από 5 έως 50m/d, βάσει του



Εικόνα 4.12 Εισαγωγή της γεωλογίας. Το έντονο περίγραμμα οριοθετεί το προσχωματικό σχηματισμό των αλλουβιακών αποθέσεων.

προσχέδιου διαχείρισης λεκανών απορροής του υδατικού διαμερίσματος νήσων Αιγαίου (2014). Ως αρχική τιμή ορίστηκαν τα 25m/d, ενώ για το σχηματισμό του φλύσχη ορίστηκε η τιμή των $5 \cdot 10^{-6}$ m/d (Πίνακας 4.2). Η υδραυλική αγωγιμότητα είναι διανυσματικό μέγεθος, και οι τιμές που έχουν οριστεί για αυτήν, αναφέρονται στα διανύσματα των διευθύνσεων ροής x και y . Η συνιστώσα της ροής στον άξονα z εκτιμάται ότι είναι 10 φορές μικρότερη.

Πίνακας 4.3 Εισαγωγή δεδομένων υδραυλικής αγωγιμότητας για κάθε γεωλογικό σχηματισμό.

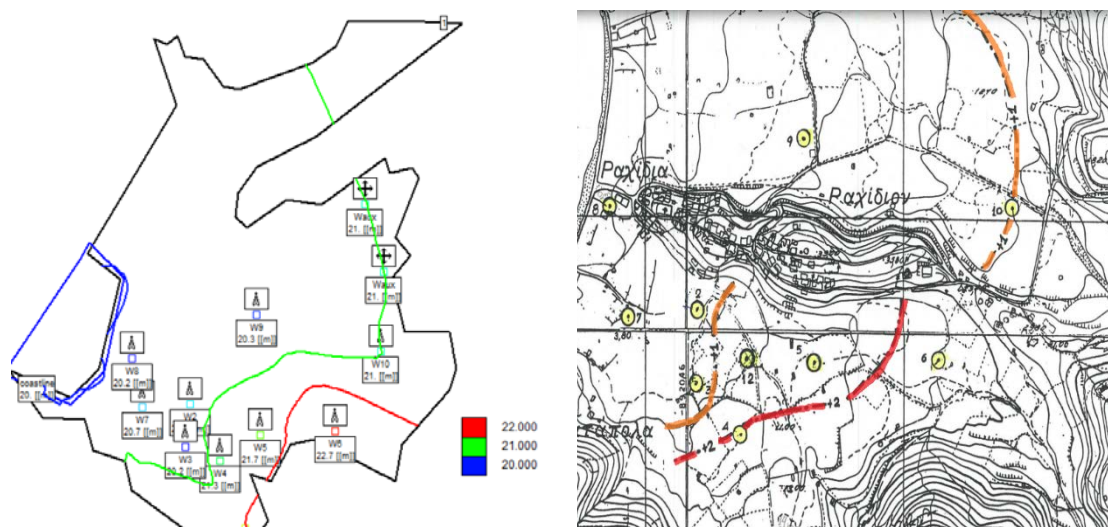
	Αλλουβιακό στρώμα	Στρώμα Φλύσχη
x, y	25m/d	$5 \cdot 10^{-6}$ m/d
z	2,5m/d	$5 \cdot 10^{-7}$ m/d

4.2.6. Αρχικά Υδραυλικά Ύψη

Η επίλυση των εξισώσεων του μοντέλου για την περίοδο των 18 ετών, απαιτεί την εισαγωγή αρχικών συνθηκών (initial conditions). Για τη ροή του υπόγειου νερού, το υδραυλικό ύψος των καταγεγραμμένων υδροσημείων είναι η μεταβλητή για την οποία θα οριστούν αρχικές τιμές. Τα υδροσημεία, για τα οποία υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα υδραυλικού ύψους, είναι οι γεωτρήσεις που είχαν καταγραφεί στη γεωλογική και υδρογεωλογική μελέτη του 1997 (με κωδικό «W») για τα Κατάπολα Αμοργού (Πίνακας 4.3). Συγκεκριμένα, στη μελέτη συμπεριλαμβάνονται τιμές υψόμετρου του υδροσημείου και το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού σε κατάσταση ηρεμίας (μη άντλησης). Το υδραυλικό ύψος υπολογίστηκε από την αφαίρεση του βάθους της στάθμης ηρεμίας με το υψόμετρο στο οποίο βρίσκεται η γεώτρηση και προστέθηκε η τιμή των 20m, από την αλλαγή του επιπέδου αναφοράς. Όπως, παρατηρείται από τον Πίνακα 4.3, το αρχικό υδραυλικό ύψος, βάσει της μελέτης, μεταβάλλεται ελάχιστα από τα 0m (ή 20m με επίπεδο αναφοράς τον πυθμένα του υδροφορέα) έως τα 2m (ή 22m). Στο διάγραμμα εισήχθησαν, επίσης, δύο πηγάνδια Wauxiliary, ως βοηθητικά, λόγω έλλειψης δεδομένων για το βορειοανατολικό κομμάτι της περιοχής μελέτης, με σκοπό την καλύτερη αναπαράσταση της μεταβολής του υδραυλικού ύψους, αναφορικά πάντα με τον αντίστοιχο χάρτη ισοπιεζομετρικών καμπυλών της μελέτης του 1997 (Εικόνα 4.9).

Πίνακας 4.4 Τιμές των αρχικών υδραυλικών υψών [m]

Υδραυλικά ύψη [m] Ε.Α. υπόβαθρο σχιστόλιθου											
W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	ακτή	Wi
22	20.8	20.2	21.3	21.7	22.7	20.7	20.2	20.3	21	20	21



Εικόνα 4.13 Εισαγωγή των αρχικών υδραυλικών υψών στο PTC και σύγκριση με τις αντίστοιχη γραμμική παρεμβολή της μελέτης του 1997 (N. Παπαδόπουλος 1997)

Αφού έχουν εισαχθεί τα αρχικά υδραυλικά ύψη, ακολουθεί η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου παρεμβολής (624 Interpolation, no zxy), έτσι ώστε να αντιστοιχεί συγκεκριμένη πλέον τιμή ακόμη και σε περιοχές των οποίων το υδραυλικό ύψος δεν είναι γνωστό.

4.2.7.Βροχομετρικά Δεδομένα

Τα βροχομετρικά δεδομένα αντλήθηκαν από μετρήσεις σταθμού της Νάξου για την περίοδο 1997-2015, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 3.3. Ως παράμετρος βροχόπτωσης εισάγεται στο μοντέλο το ποσοστό νερού που κατεισδύει στον υδροφόρα. Το ποσοστό αυτό ορίστηκε 15,7% για κάθε χρονική περίοδο, βάσει μελέτης του ΥΠΕΚΑ (2003-2008). Οι τιμές που προκύπτουν, θεωρείται από το μοντέλο ότι επηρεάζουν μόνο το ανώτερο γεωλογικό στρώμα. Εντούτοις, στην περιοχή έχει οριστεί μόνο το στρώμα των αλλουβιακών αποθέσεων. Ενεργοποιώντας το φύλλο εργασίας «Rainfall», εισήχθησαν οι τιμές σε [m/d] για κάθε περίοδο(Πίνακας 4.4).

Πίνακας 4.5 εισαγωγή τιμών βροχόπτωσης που κατεισδύει στον υδροφόρα σε [m/d]

STRESS PERIOD	RAIN [m/d]	STRESS PERIOD	RAIN [m/d]
1	0,000234	19	0,000253
2	0,000033	20	0,000036
3	0,000337	21	0,000374
4	0,000026	22	0,000019
5	0,000126	23	0,000248
6	0,000001	24	0,000037
7	0,000169	25	0,000315
8	0,000006	26	0,000012
9	0,000267	27	0,000224
10	0,000046	28	0,000037
11	0,000475	29	0,000169
12	0,000013	30	0,000010
13	0,000261	31	0,000197
14	0,000007	32	0,000005
15	0,000247	33	0,000232
16	0,000066	34	0,000016
17	0,000255	35	0,000342

Σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι οι τιμές της βροχόπτωσης που κατεισδύει είναι μία με δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη για κάθε υγρή περίοδο.

4.2.8.Αποθηκευτικότητα και Πορώδες

Όσον αφορά τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, εκτός από την υδραυλική αγωγιμότητα, ζητείται από το χρήστη η εισαγωγή δεδομένων αποθηκευτικότητας και πορώδους μέσου.

Η ικανότητα αποθήκευσης νερού στο υπέδαφος (storativity) σε έναν ελεύθερο υδροφόρα, οφείλεται σε τρεις μηχανισμούς. Στη συμπίεστικότητα του ύδατος, στη συμπίεστικότητα του υλικού (έδαφος) και κυρίως στην πλήρωση ή την εκκένωση των πόρων. Για την περιοχή

μελέτης συγκεκριμένα η αποθηκευτικότητα λαμβάνει τιμές από 0,03-0,08[-]. Ως αρχική τιμή στο μοντέλο επιλέχθηκε ένα μέσο ποσοστό 5%.

Το πορώδες των αλλουβιακών αποθέσεων λαμβάνει τιμές από 0,4-0,45, ενώ ο αργιλικός σχιστόλιθος(φλύσχης) από 0,01-0,1. Ως αρχικές τιμές λήφθηκαν 0,4 και 0,05 για κάθε γεωολογικό σχηματισμό αντίστοιχα.

4.3. Εισαγωγή Χωρικά Μεταβαλλόμενων Τιμών

Για την επίλυση των εξισώσεων κίνησης του υπόγειου νερού στην περιοχή μελέτης είναι απαραίτητο να ορισθούν από το χρήστη οι κατάλληλες οριακές ή συνοριακές συνθήκες (Boundary Conditions, BC Flow). Υπάρχουν τρία είδη οριακών συνθηκών. Ο χρήστης μπορεί να επιλέξει συνθήκη πρώτου είδους, για την περίπτωση όπου το υδραυλικό ύψος διατηρείται χρονικά σταθερό, δεύτερου είδους εάν πρόκειται για σταθερό ρυθμό άντλησης ή τροφοδότησης ύδατος, και τρίτου είδους σε περίπτωση γνώσης υδρογεωλογικών πληροφοριών έξω από τα σύνορα του μοντέλου.

4.3.1.Οριακές Συνθήκες 1^{ου} Τύπου

Ως οριακή συνθήκη 1^{ου} τύπου στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίζεται η ισοϋψής καμπύλη της ακτογραμμής. Η ακτογραμμή θεωρείται ότι έχει σταθερό υδραυλικό ύψος στα 0m αν το επίπεδο αναφοράς είναι η μέση στάθμη της θάλασσας και 20m, αν το επίπεδο αναφοράς είναι το υπόβαθρο του υδροφόρου στρώματος. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, όλα τα υδραυλικά ύψη στο μοντέλο έχουν ως επίπεδο αναφοράς το υπόβαθρο του υδροφορέα.

4.3.2.Οριακές Συνθήκες 2^{ου} Τύπου

Η εισαγωγή και επεξεργασία των οριακών συνθηκών 2^{ου} είδους αποτέλεσε ένα από τα πιο δύσκολα κομμάτια της παρούσας μελέτης. Ως 2^{ου} είδους οριακές συνθήκες θεωρούνται όλα τα πηγάδια, με την παραδοχή ότι αυτά αντλούν με σταθερό ρυθμό ημερησίως, μία συγκεκριμένη ποσότητα νερού, και ο όγκος του νερού που τροφοδοτείται στην πεδιάδα των Καταπόλων από τις ανάντι υπολεκάνες. Λαμβάνοντας ως όγκο ελέγχου το σύστημα του υπόγειου υδροφορέα των Καταπόλων, οι τιμές άντλησης από κάθε πηγάδι εισήχθησαν με αρνητικό πρόσημο και οι τιμές τροφοδοσίας της λεκάνης με θετικό πρόσημο. Το πρόσημο εκφράζει την αφαίρεση ή αντίστοιχα την προσθήκη νερού στον όγκο ελέγχου.

Αρχικά, έγινε εισαγωγή των τιμών άντλησης για κάθε ένα πηγάδι ή γεώτρηση που δραστηριοποιείται στην περιοχή. Τιμές εισήχθησαν για κάθε χρονική περίοδο και ένεκα έλλειψης δεδομένων έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Για κάθε ιδιωτικό ή δημοτικό πηγάδι, που από μελέτη είναι γνωστό ότι χρησιμοποιείται για άρδευση καλλιεργειών ή κηπευτικών, ορίστηκε ότι θα αντλεί μόνο τη θερινή (ξηρή) περίοδο κάθε έτους.
- Για τα πηγάδια της παλαιότερης μελέτης του 1997, (Ν. Παπαδόπουλος 1997) έγινε η παραδοχή ότι εξακολούθησαν να αντλούν με το ίδιο ρυθμό, μέχρι το 2015, καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα για παύση λειτουργίας κάποιου πηγαδιού ή για τη διάνοιξη νέου πηγαδιού στη θέση κάποιου άλλου.
- Κάθε γεώτρηση που χρησιμοποιείται για ύδρευση, θεωρείται ότι αντλεί κάθε χειμερινή (υγρή) περίοδο με το μέσο ρυθμό άντλησης και κάθε θερινή (ξηρή) περίοδο με το μέγιστο ρυθμό άντλησης, εκτός από τη γεώτρηση W3 για την οποία αναφέρεται στη μελέτη του 1997, ότι αντλεί μόνο κάθε ξηρή περίοδο.
- Για πολλά πηγάδια άρδευσης, ήταν γνωστή μόνο η μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα άντλησης το χρόνο, που έχει επιβληθεί από το δήμο. Σε αυτή την περίπτωση, έγινε

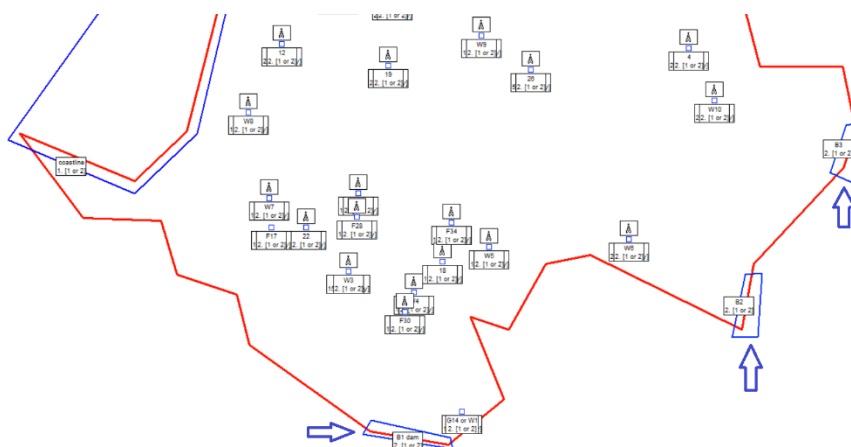
αναγωγή της μέγιστης ποσότητας νερού σε ημερήσιο ρυθμό άντλησης, μόνο για τις ξηρές περιόδους.

Συγκεντρωτικά οι ρυθμοί άντλησης σε $[m^3/d]$ φαίνονται στον Πίνακα 4.5 που ακολουθεί.

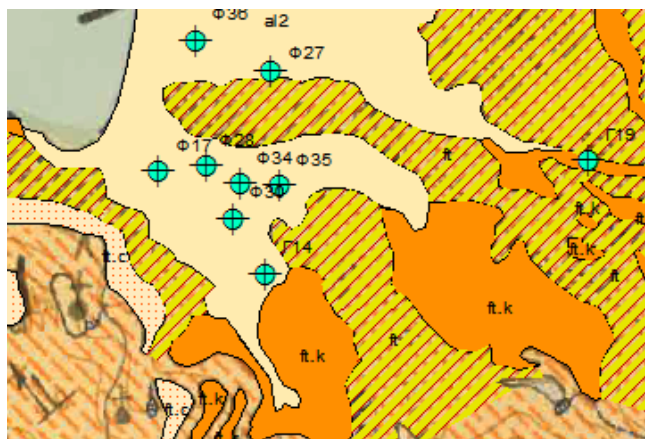
Πίνακας 4.6 Εισαγωγή στο PTC ρυθμών άντλησης $[m^3/d]$ για κάθε πηγάδι/γεώτρηση της περιοχής μελέτης.

ΟΝΟΜΑΣΙΑ/ ΚΩΔΙΚΟΣ	ΧΡΗΣΗ	ΠΑΡΟΧΗ $[m^3/d]$	ΟΝΟΜΑΣΙΑ/ ΚΩΔΙΚΟΣ	ΧΡΗΣΗ	ΠΑΡΟΧΗ $[m^3/d]$
Π5	ΑΡΔΕΥΣΗ	4	W2	ΑΡΔΕΥΣΗ	60
F18	ΑΡΔΕΥΣΗ	0,4	F28	ΑΡΔΕΥΣΗ	0
Π14	ΑΡΔΕΥΣΗ	1,3	Π22	ΑΡΔΕΥΣΗ	0,3
Π7	ΑΡΔΕΥΣΗ	3	F17	ΑΡΔΕΥΣΗ	60
F36	ΑΡΔΕΥΣΗ	100	F34 ΡΑΦΤΗ	ΥΔΡΕΥΣΗ	150
Π23	ΑΡΔΕΥΣΗ	5	W5	ΑΡΔΕΥΣΗ	22
Π16	ΑΡΔΕΥΣΗ	4	Π18	ΑΡΔΕΥΣΗ	2,3
Π12	ΑΡΔΕΥΣΗ	0,4	W3	ΥΔΡΕΥΣΗ	100
Π19	ΑΡΔΕΥΣΗ	7	W4	ΑΡΔΕΥΣΗ	14
W9	ΑΡΔΕΥΣΗ	100	F30	ΑΡΔΕΥΣΗ	20
Π26	ΑΡΔΕΥΣΗ	4	G14 ΣΑΚΚΑ	ΥΔΡΕΥΣΗ	300-400
Π4	ΑΡΔΕΥΣΗ	13	W6	ΑΡΔΕΥΣΗ	3
W10	ΑΡΔΕΥΣΗ	0			
W8	ΑΡΔΕΥΣΗ	0,6			
W7	ΑΡΔΕΥΣΗ	0,3			

Ακολούθως, καθορίστηκαν τα σημεία τροφοδοσίας της πεδιάδας πάνω στο χάρτη της περιοχής μελέτης, βάσει του γεωλογικού υπόβαθρου. Όπως προαναφέρθηκε στην Παράγραφο 3.4, περιμετρικά του αλλουβιακού σχηματισμού κυριαρχούν αργιλοί σχιστόλιθοι που θεωρούνται ότι διαθέτουν μηδενική έως ελάχιστη υδροφορία σε ημιπερατά μέρη της ενότητας με φακούς ασβεστόλιθων ή ψαμμιτών. Οι κλαστικοί ασβεστόλιθοι που παρουσιάζονται στα νότια και ανατολικά όρια της περιοχής μελέτης έχουν περισσότερες πιθανότητες να έχουν υδροφορία. Για το λόγο αυτό, και μετά από δοκιμές, τοποθετήθηκαν τρεις οριακές συνθήκες 2^{ου} τύπου τροφοδοσίας B1 (Boundary 1), B2 & B3 στο νότιο και ανατολικό κομμάτι της περιοχής μελέτης βάσει της θέσης των κλαστικών ασβεστόλιθων (Εικόνα 4.10)

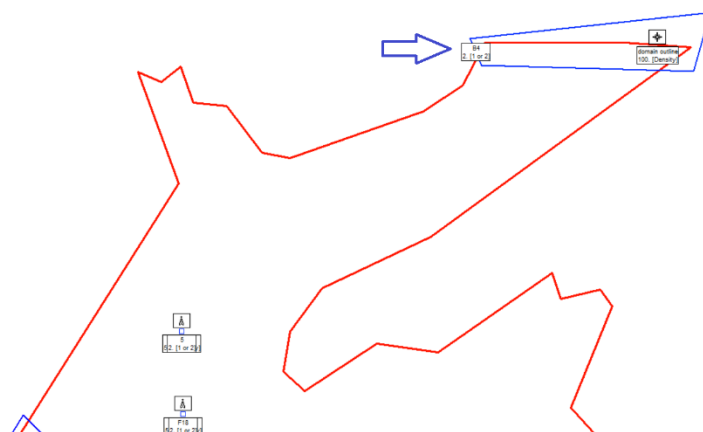


Εικόνα 4.14 Εισαγωγή τριών οριακών συνθηκών (B1, B2, B3) 2^{ου} τύπου (σταθερής ροής) στο νότιο και νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης.



Εικόνα 4.15 Γεωλογικός χάρτης του N-NA τμήματος της περιοχής μελέτης. ft: κλαστικοί ασβεστόλιθοι, ft.k: σχιστόλιθοι.

Στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης απαντάται μία ενότητα χαλικιών – κροκαλοπαγή και ογκόλιθοι, που βρίσκεται κατάντι του ρήγματος. Αν και είναι γνωστό από παλαιότερες υδρογεωλογικές μελέτες ότι η υπολεκάνη του Ξυλοκερατιδίου δεν προσφέρει σημαντική υδροφορία στην περιοχή, εντούτοις ορίστηκε μία οριακή συνθήκη τροφοδοσίας B4 στο βόρειο κομμάτι (Εικόνα 4.12).

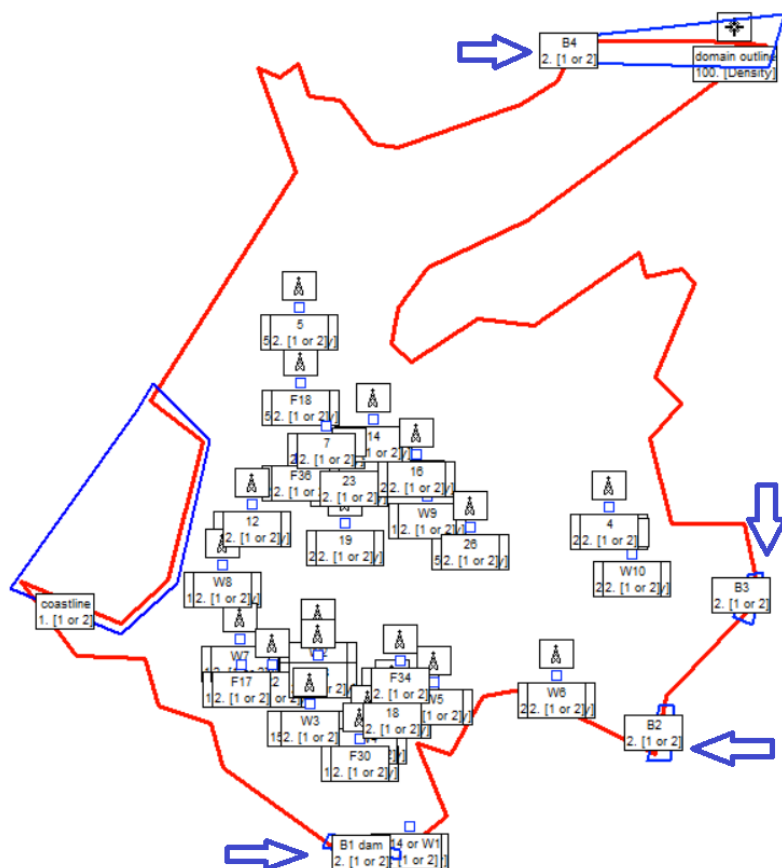


Εικόνα 4.16 εισαγωγή μίας οριακής συνθήκης (B4) 2^{ου} τύπου (σταθερής ροής) στο βόρειο τμήμα



Εικόνα 4.17 Γεωλογικός χάρτης του Βόρειου τμήματος της περιοχής μελέτης. Q: χαλίκια – κροκαλοπαγή και ογκόλιθοι, al2: αλλουβιακές αποθέσεις

Στην εικόνα 4.13 φαίνεται το βόρειο κομμάτι του γεωλογικού χάρτη της περιοχής των Καταπόλων. Συγκεκριμένα φαίνεται το στρώμα των χαλικιών-κροκαλοπαγών και η συμπαγής γραμμή που συμβολίζει το ρήγμα. Το ρήγμα, μπορεί να είναι η αιτία που η λεκάνη δε δέχεται σημαντικές ποσότητες υπόγειου νερού από αυτό το κομμάτι. Στην Εικόνα 4.14 απεικονίζεται συνολικά η περιοχή μελέτης με όλες τις οριακές συνθήκες 1^{ου} και 2^{ου} τύπου. Η B1 πιάνει 6 κόμβους, η B2 2 μόλις κόμβους, η B3 3 κόμβους και η B4 5 κόμβους.



Εικόνα 4.18 Συνολική απεικόνιση των οριακών συνθηκών 1^{ου} και 2^{ου} τύπου στην περιοχή μελέτης.

Αφού έχουν ορισθεί χωρικά οι οριακές συνθήκες τροφοδοσίας, έπεται ο υπολογισμός του όγκου του υπόγειου νερού που ρέει καθημερινά προς στην περιοχή μελέτης, προερχόμενο από τις επιμέρους υπολεκάνες της ευρύτερης περιοχής. Ο όγκος αυτός ορίζεται ως το γινόμενο των [mm] βροχόπτωσης που διηθούνται στο υπέδαφος κάθε χρονική περίοδο επί την έκταση της λεκάνης [m²] που τροφοδοτεί συνολικά την περιοχή μελέτης. Όσον αφορά στην έκταση, αυτή ορίζεται να είναι 4,29km². Η έκταση αυτή περιλαμβάνει τις υπολεκάνες που υπολογίστηκαν από το SWAT (Παράγραφος 3.5). Όσον αφορά την ποσότητα της βροχόπτωσης που διηθείται στο υπέδαφος, αυτή δύναται να μεταβάλλεται από την ξηρή στην υγρή περίοδο και από έτος σε έτος, ανάλογα με την ένταση της βροχόπτωσης. Σε περιόδους με χαμηλές βροχοπτώσεις δύναται η διήθηση να είναι μεγαλύτερη από περιόδους με ισχυρές βροχοπτώσεις ένεκα δημιουργίας μεγαλύτερης επιφανειακής απορροής. Επίσης, η διήθηση μπορεί να μεταβάλλεται χωρικά ανάλογα με τον τύπο βλάστησης και το έδαφος κάθε υποπεριοχής στην ευρύτερη λεκάνη τροφοδοσίας. Ακόμη, ο συντελεστής κατείσδυσης που προέκυψε από το SWAT [11,51%] διαφέρει από τον αντίστοιχο συντελεστή που έχει υπολογιστεί γενικά για το χώρο των Κυκλάδων [15,7%]. Για τους παραπάνω λόγους, προτιμήθηκε να οριστεί ενδεικτικά ένας αρχικός συντελεστής κατείσδυσης για κάθε περίοδο

ξεχωριστά. Στον Πίνακα 4.6, αναγράφονται σε τρεις στήλες, η ποσότητα της συνολικής βροχόπτωσης για κάθε χρονική περίοδο σε [m/period], το ποσοστό κατείσδυσης που έχει οριστεί αρχικά για την αντίστοιχη περίοδο και ο συνολικός όγκος διηθούμενου στο υπέδαφος νερού που προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό των μέτρων βροχής με την επιφάνεια της λεκάνης, τα 4,29km². Ως αρχική τιμή του συντελεστή κατείσδυσης επιλέχτηκε ένα 15% ενδεικτικά για κάθε χρονική περίοδο.

Πίνακας 4.7 Ο συνολικός όγκος του νερού που κατεισδύει στο υπέδαφος, κάθε χρονική περίοδο. Με γαλάζιο: %ποσοστό νερού βροχόπτωσης που κατεισδύει στο υπέδαφος και εισέρχεται στο σύστημα του υδροφορέα.

% κατείσδυση	m ³ /περίοδο που έχουν κατεισδύσει	Χρονική Περίοδος	Βροχόπτωση [m/περίοδο]	% κατείσδυση	m ³ /περίοδο που έχουν κατεισδύσει	Χρονική Περίοδος	Βροχόπτωση [m/περίοδο]
15	201.673	1	0,313	15	30.952	20	0,048
15	28.636	2	0,045	15	321.750	21	0,500
15	289.961	3	0,451	15	16.731	22	0,026
15	22.523	4	0,035	15	213.256	23	0,331
15	108.301	5	0,168	15	31.596	24	0,049
15	579	6	0,001	15	271.042	25	0,421
15	145.753	7	0,227	15	10.296	26	0,016
15	4.762	8	0,007	15	192.857	27	0,300
15	229.730	9	0,357	15	31.532	28	0,049
15	39.961	10	0,062	15	145.302	29	0,226
15	408.429	11	0,635	15	9.009	30	0,014
15	11.068	12	0,017	15	169.755	31	0,264
15	224.968	13	0,350	15	4.633	32	0,007
15	6.242	14	0,010	15	199.742	33	0,310
15	212.400	15	0,330	15	13.642	34	0,021
15	56.821	16	0,088	15	293.951	35	0,46
15	219.305	17	0,341				
15	579	18	0,001				
15	218.018	19	0,339				

Η ποσότητα του νερού τροφοδοσίας, όπως προκύπτει για κάθε περίοδο, αφού μετατραπεί σε [m/d], πρέπει πλέον να κατανεμηθεί σωστά ανάμεσα στις τέσσερις οριακές συνθήκες, ανάλογα με την υδροφορία που χαρακτηρίζει την καθεμία. Στην περίπτωση που ο συνολικός όγκος νερού κατανεμόταν ισόποσα στις τέσσερις οριακές συνθήκες, κάθε συνθήκη θα είχε συντελεστή τροφοδοσίας 0,25. Αναφορικά, όμως με την υδρογεωλογική μελέτη του 1997 για τα Κατάπολα Αμοργού (Ν. Παπαδόπουλος 1997), η υπολεκάνη του Ξυλοκερατιδίου που βρίσκεται στο βόρειο τμήμα της περιοχής μελέτης, τροφοδοτεί ελάχιστα την πεδιάδα των Καταπόλων. Συνεπώς, ο συντελεστής τροφοδοσίας στην αντίστοιχη οριακή συνθήκη **B4** πρέπει να είναι μειωμένος. Αντίθετα, κρίνοντας από το χάρτη των ισοπιεζομετρικών καμπυλών (Εικόνα 4.9) φαίνεται πως τα υδραυλικά ύψη παρουσιάζουν αυξημένες τιμές στο νοτιοανατολικό κομμάτι της περιοχής μελέτης, στο σημείο όπου έχει τοποθετηθεί η οριακή συνθήκη **B2**. Οπότε, ο συντελεστής τροφοδοσίας της B2 θα αυξηθεί. Η **B1** συνθήκη θεωρήθηκε ότι πρέπει, επίσης, να αυξήσει τον συντελεστή τροφοδοσίας της καθώς, όπως αναφέρεται στην υδρογεωλογική μελέτη του 1997, η υπολεκάνη των Καταπόλων συνεισφέρει σημαντικά στην τροφοδοσία του υδροφορέα. Στον Πίνακα 4.7, παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή τροφοδοσίας για κάθε οριακή συνθήκη, στην περίπτωση που η

τροφοδοσία γινόταν ισόποσα και στην περίπτωση που ακολουθείται το παραπάνω σκεπτικό, της άνισης κατανομής υπόγειου νερού. Ως αρχικά δεδομένα τροφοδοσίας, λήφθηκαν οι τιμές της 2^{ης} γραμμής του Πίνακα.

Πίνακας 4.8 Τιμές του συντελεστή τροφοδοσίας για κάθε οριακή συνθήκη, στην περίπτωση που η τροφοδοσία γινόταν ισόποσα και στην περίπτωση που θεωρείται άνιση κατανομή υπόγειου νερού.

Οριακή Συνθήκη [BC]	B1	B2	B3	B4
Ισόποση Κατανομή τροφοδοσίας	0,25	0,25	0,25	0,25
Άνιση Κατανομή τροφοδοσίας	0,2	0,5	0,2	0,1

Έτσι, ο όγκος νερού που τροφοδοτείται για κάθε χρονική περίοδο, i , από μία οριακή συνθήκη, j , υπολογίζεται από τον τύπο:

$$Τροφ_{i,j} \left[\frac{m^3}{d} \right] = Τροφ_i \left[\frac{m^3}{περ.} \right] \cdot \frac{1}{30 \left[\frac{d}{περ.} \right]} \cdot (Συντ. Τροφοδοσίας)_j \cdot \left(\frac{1}{αρ. κόμβων} \right)_j \quad (4.1)$$

Όπου,

$Τροφ_i \left[\frac{m^3}{περ.} \right]$: ο όγκος υπόγειου νερού που τροφοδοτείται συνολικά στη λεκάνη, ανά περίοδο

$(Συντ. Τροφοδοσίας)_j$: Η τιμή του συντελεστή τροφοδοσίας για κάθε οριακή συνθήκη τροφοδοσίας j , όπως ορίστηκε στον Πίνακα 4.7

4.4. Εκτέλεση Αλγορίθμου

Αφού εφαρμοστεί προσεκτικά η εισαγωγή όλων των απαραίτητων στο πρόγραμμα δεδομένων, ακολουθεί η εκτέλεση του αλγορίθμου PTC, από την εντολή «PIEs-Run PTC». Οι αλγεβρικές εξισώσεις επιλύονται και προκύπτουν τα πρώτα αποτελέσματα της υπόγειας ροής. Υπενθυμίζεται, ότι στην παρούσα εργασία δεν επιλύονται οι εξισώσεις για μεταφορά μάζας.

Το πλεονέκτημα του PTC είναι η ικανότητα αναπαράστασης των αποτελεσμάτων σε γραφήματα, γεγονός που διευκολύνει πολύ στην κατανόηση της κίνησης του υπόγειου νερού και πιθανών προβλημάτων που προκύπτουν πριν την επαναξιολόγηση του μοντέλου. Δεύτερο μεγάλο πλεονέκτημα του προγράμματος, είναι η ταχύτητα της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Η προσομοίωση στη συγκεκριμένη περίπτωση πραγματοποιήθηκε ταχύτατα, αλλά αυτό το θετικό χαρακτηριστικό ισχύει και κατά τη διάρκεια προσομοίωσης μεγαλύτερων και πιο περίπλοκων συστημάτων.

Από τις πρώτες εκτελέσεις του αλγορίθμου, έγινε αμέσως αντιληπτό ότι τα αποτελέσματα υδραυλικών υψών ήταν αντικρουόμενα με αντίστοιχες παρατηρήσεις που είχαν κατά καιρούς πραγματοποιηθεί στο πεδίο της περιοχής μελέτης. Ως εκ τούτου, έγινε βαθμονόμηση των εισαχθέντων δεδομένων προκειμένου να γίνει σωστή ταύτιση των τιμών του μοντέλου με τις τιμές του πεδίου.

5. Κεφάλαιο 5^ο: Βαθμονόμηση Μοντέλου και Αποτελέσματα

5.1. Βαθμονόμηση Υδραυλικού Ύψους

Η διαδικασία της βαθμονόμησης του μοντέλου περιλαμβάνει την αλλαγή των παραμέτρων, οριακών συνθηκών και των λειτουργιών του μοντέλου με τέτοιο τρόπο ώστε να διασφαλιστεί η σωστή αναπαράσταση των παρατηρούμενων τιμών υδραυλικών υψών στο πεδίο. Η διαδικασία που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή της δοκιμής και σφάλματος (trial and error) και αποτέλεσε την πιο δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία της μοντελοποίησης του υπόγειου υδροφορέα. Πραγματοποιήθηκε ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων μέχρι να επιτευχθεί ικανοποιητική συμφωνία ανάμεσα στις τιμές του πεδίου και στις τιμές του μοντέλου. Η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε για το χρονικό διάστημα από το Σεπτέμβριο του 1997 μέχρι το Μάιο του 2015. Οι μεταβλητές που επανεξετάστηκαν ήταν:

- Η υδραυλική αγωγιμότητα
- Οι ημερήσιες αντλήσεις από τα πηγάδια και
- Οι ημερήσιες τροφοδοσίες νερού προς τη λεκάνη

Όσον αφορά την παράμετρο της υδραυλικής αγωγιμότητας, πραγματοποιήθηκε πλήθος επαναλήψεων συνδυαστικά με άλλες παραμέτρους, μέχρι να επιτευχθεί συσχέτιση με τις τιμές πεδίου. Συγκεκριμένα, για την υδραυλική αγωγιμότητα έγιναν δοκιμές φακού σχιστόλιθου και ιλύος στην περιοχή νότια του Ραχιδίου, όπου εμφανίζονταν ασυνήθιστα αυξημένα υδραυτικά ύψη. Παρόλα αυτά, η τεχνική δεν δούλεψε επιτυχώς και ο φακός αφαιρέθηκε, χωρίς όμως να αποκλειστεί και η πιθανότητά του.

Όσον αφορά τις αντλήσεις από τα πηγάδια, η βαθμονόμηση έδειξε υπερβολικά αυξημένες τιμές ημερήσιας άντλησης ανά περίοδο, σε 2 γεωτρήσεις. Η πρώτη γεώτρηση είναι η G14 από την οποία υδρεύεται η Κοινότητα των Καταπόλων. Η δεύτερη γεώτρηση, η W9, είναι δημοτική και χρησιμοποιείται για άρδευση στο κομμάτι βόρεια του φλύσχη. Και οι δύο γεωτρήσεις παρουσίασαν τιμές ημερήσιας άντλησης 900-1000m³/d, τιμές υπερβολικά υψηλές για τα πληθυσμιακά δεδομένα της Κοινότητας. Προέκυψαν δύο τρόποι εξήγησης του φαινομένου. Ο πρώτος, προτείνει τη δραστηριοποίηση, πλησίον των δύο γεωτρήσεων, άλλων πηγαδιών που δεν έχουν καταγραφεί στη μελέτη. Ο δεύτερος, συνδυαστικά με τον πρώτο, προτείνει ως εξήγηση, την υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού και τη μη καταγραφή της από την Κοινότητα. Δεδομένου του γεγονότος ότι από τα 35 καταγεγραμμένα υδροσημεία, έχουν μελετηθεί τα 27, έγινε η θεώρηση ότι 4 από αυτά βρίσκονται πλησίον της G14 και τα υπόλοιπα 4, βρίσκονται πλησίον της W9. Ακόμη, λόγω έλλειψης δεδομένων, θεωρήθηκε ότι η άντληση ισοκατανέμεται μεταξύ αυτών.

Τέλος, αναφορικά με τη βαθμονόμηση της τροφοδοσίας της λεκάνης, προέκυψε η ανάγκη δημιουργίας ενός επιπλέον συντελεστή, χωρίς φυσική σημασία, για να ελέγχεται ακριβέστερα ο όγκος νερού που καταλήγει στη λεκάνη κάθε χρονική περίοδο (ξηρή ή υγρή). Υπενθυμίζεται ότι η εισροή νερού για την περιοδική τροφοδοσία της λεκάνης, έχει οριστεί να γίνεται από 4 οριακές συνθήκες 2^{ου} τύπου, που έχουν τοποθετηθεί σε συγκεκριμένες θέσεις, περιμετρικά της περιοχής μελέτης. Η τιμή του όγκου νερού που εισέρχεται στη λεκάνη, από κάθε οριακή συνθήκη, είναι συνάρτηση:

1. Της βροχόπτωσης που δέχεται η λεκάνη
2. Του συντελεστή κατείσδυσης
3. Της επιφάνειας της λεκάνης τροφοδοσίας (4,29km²)
4. Του ποσοστού τροφοδοσίας (Παράγραφος 4.3.2)

Οι τρεις πρώτοι παράγοντες καθορίζουν το συνολικό όγκο νερού που δέχεται η λεκάνη, ανά περίοδο, ενώ ο τέταρτος παράγοντας καθορίζει το όγκο νερού που εισρέει από κάθε οριακή συνθήκη ξεχωριστά. Ο νέος συντελεστής, χρησιμοποιείται βοηθητικά για τον τέταρτο παράγοντα. Δηλαδή, εισάγει τη θεώρηση ότι το ποσοστό νερού που εισρέει από μία οριακή συνθήκη την περίοδο i , δεν είναι απαραίτητα ίδιο με το ποσοστό νερού που εισρέει, από την ίδια οριακή συνθήκη την περίοδο $i-1$ ή την περίοδο $i+1$.

Τα αποτελέσματα της 1^{ης} βαθμονόμησης, για τα υδραυλικά ύψη, παρουσιάζονται στην επόμενη παράγραφο.

5.2. Αποτελέσματα Βαθμονόμησης

Τα αποτελέσματα για τα υδραυλικά ύψη και τις ταχύτητες ροής του υπόγειου ύδατος από την 1^η βαθμονόμηση, παρουσιάζονται στους πίνακες και τα διαγράμματα που ακολουθούν. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 5.1, παρουσιάζονται αναλυτικά για τις χρονικές περιόδους των ετών 2005, 2007, 2013 και 2015, όπου υπήρχαν διαθέσιμα δεδομένα υδραυλικών υψών, οι τιμές πεδίου και οι προκύπτουσες τιμές του μοντέλου αντίστοιχα. Υπενθυμίζεται ότι στο μοντέλο τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται σε [m] με επίπεδο αναφοράς το κατώτερο τμήμα του υδροφορέα, που στην προκειμένη περίπτωση είναι τα -20m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Οπότε, όλες οι τιμές υδραυλικών υψών είναι προσαυξημένες με την τιμή των +20m.

Πίνακας 5.1 Παρουσίαση των τιμών υδραυλικού ύψους σε (m), για 4 διαφορετικά πηγάδια, όπως προέκυψαν από την εκτέλεση του κώδικα PTC, μετά από βαθμονόμηση και σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές πεδίου.

Περίοδος	Πηγάδι	Πεδίο (Ε.Α. υπόβαθρο υδροφ.) [m]	Πεδίο (Ε.Α Μ.Σ.Θ) [m]	Μοντέλο (Ε.Α υπόβαθρο υδρ.) [m]	Μοντέλο (Ε.Α. Μ.Σ.Θ) [m]	Διαφορά Υδρ. Υψών Μοντέλου-Πεδίου [m]
6/2005	G14	17,12	-2,88	18,87	-1,13	1,75
	F30	21,31	+1,31	21,71	+1,71	0,40
	F34	24,19	+4,19	23,25	+3,25	0,94
	W9	16,89	-3,11	16,91	-3,09	0,02
9/2007	G14	17,47	-2,53	19,02	-0,98	1,55
	W9	16,56	-3,44	17,98	-2,02	1,42
4/2013	G14	17,69	-2,31	18,63	-1,37	0,94
7/2013	G14	18,77	-1,23	18,77	-1,23	0,00
4/2015	G14	22,30	+2,3	22,56	+2,56	0,26
	F34	27,50	+7,5	26,57	+6,57	0,93

Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 5.1, περισσότερες πληροφορίες υπάρχουν για τη γεώτρηση G14 που είναι και η βασική γεώτρηση υδροδότησης των Καταπόλων, και για τη F34, η οποία επίσης υδροδοτεί με μικρότερες ποσότητες νερού την περιοχή. Η F30 χρησιμοποιείται για καλλιέργειες από ιδιώτη, ενώ η W9 έχει καταγραφεί ως δημοτική και χρησιμοποιείται για άρδευση. Από τα δεδομένα πεδίου, παρατηρείται μια δραματική σχεδόν μείωση της στάθμης νερού για τις G14 και W9, καθώς το υδραυλικό ύψος πέφτει και για τις δύο μέχρι και -3m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Αυτές οι τιμές παρατηρούνται κυρίως για τις θερινές περιόδους. Αντίθετα, η στάθμη της F34 φαίνεται να είναι υψηλή, τόσο τις θερινές, όσο και τις χειμερινές περιόδους. Το καλοκαίρι του 2005, σύμφωνα με την τιμή του πεδίου, το υδραυλικό ύψος παρουσιάζεται στα +4m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας, ενώ στα τέλη Απριλίου του 2015, το υδραυλικό ύψος βρίσκεται στα +7,5m! Η τιμή αυτή παρουσιάζει πολύ μεγάλη απόκλιση από την αντίστοιχη τιμή υδραυλικού ύψους του 1997, βάσει της υδρογεωλογικής μελέτης, κατά την οποία το υδραυλικό ύψος αυξανόταν μέχρι

μόλις +2m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας. Συνολικά, βαθμονομήθηκαν 10 τιμές υδραυλικού ύψους, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.1.

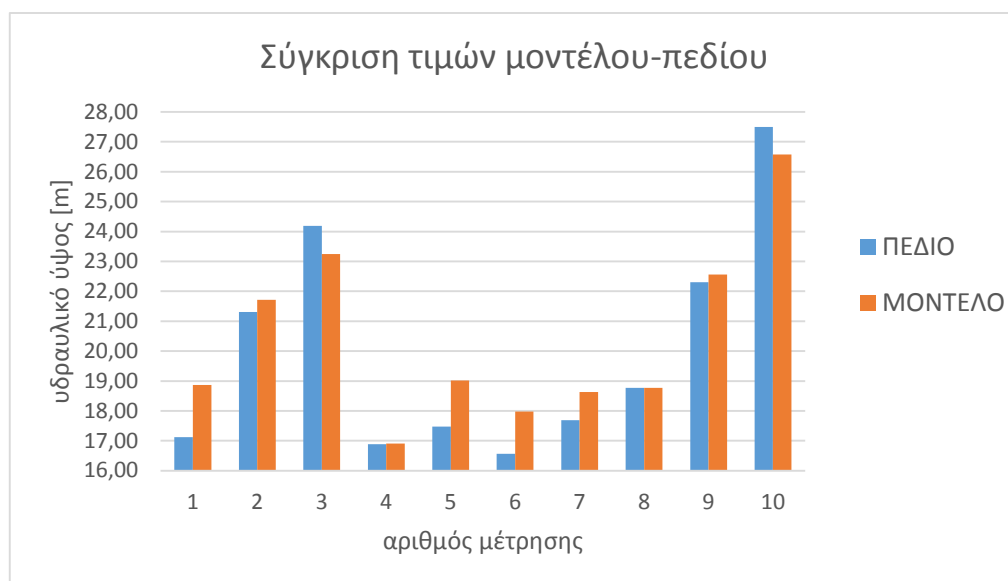
Η βαθμονόμηση αξιολογήθηκε με τη χρήση εφτά δεικτών που υπολογίστηκαν για κάθε χρονική περίοδο ξεχωριστά, αλλά και για όλες συνολικά. Στον Πίνακα 5.2, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών των εφτά δεικτών για τη συσχέτιση των υδραυλικών υψών του μοντέλου με τα υδραυλικά ύψη του πεδίου, για το σύνολο των γεωτρήσεων.

Πίνακας 5.2 Δείκτες αξιολόγησης του μοντέλου, για την ποσοτικοποίηση της ακρίβειας προσομοίωσης σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

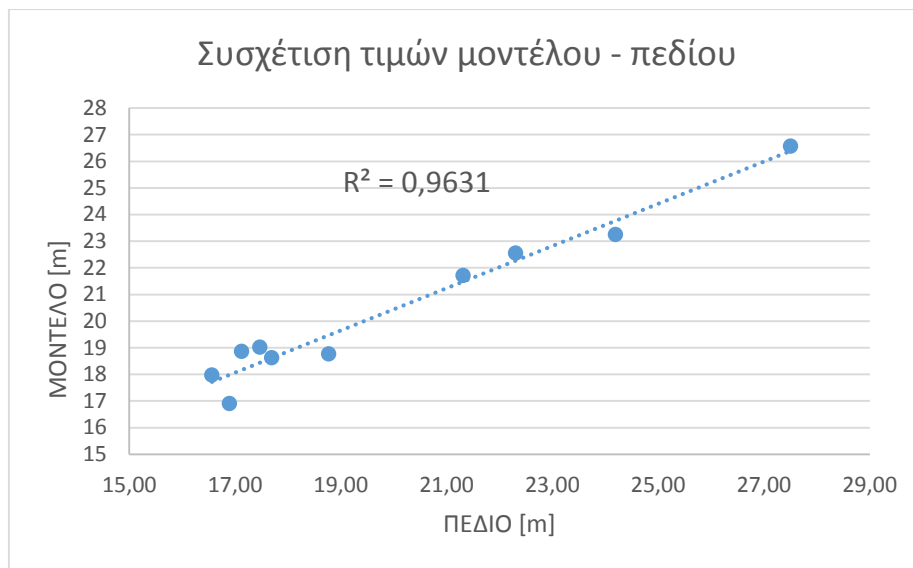
RMSE [m]	1,016
NRMSE [-]	0,0508
NSE [-]	0,916
R [-]	0,981
R ² [-]	0,963
PBIAS [-]	-2,237

Ο δείκτης του RMSE υποδηλώνει ότι η τιμή υδραυλικού ύψους που υπολογίζεται από τις εξισώσεις του μοντέλου αποκλίνει το πολύ 1m από τις παρατηρούμενες τιμές του πεδίου. Η απόκλιση $\pm 1\text{m}$ θεωρείται αποδεκτή.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.2, παρουσιάζονται οι διαφορές στις τιμές υδραυλικού ύψους όπως προέκυψαν από το μοντέλο και όπως παρατηρήθηκαν στο πεδίο. Όπως παρατηρείται, οι μεγαλύτερες αποκλίσεις προκύπτουν στους αριθμούς 1, 5 και 6 που αναφέρονται στις γεωτρήσεις G14 και W9 για τις χρονικές περιόδους του Ιουνίου 2005 και Σεπτεμβρίου 2007. Ο λόγος της διαφοράς έγκειται στο γεγονός ότι το παρατηρούμενο υδραυλικό ύψος για τις συγκεκριμένες γεωτρήσεις ήταν πολύ χαμηλό (σχεδόν -3m). Όταν το υδραυλικό ύψος οποιασδήποτε γεώτρησης προέκυπτε χαμηλότερο των -3m, επηρέαζε πολύ τις τιμές των υπόλοιπων πηγαδιών, τα οποία παρουσίαζαν πολύ διαφορετικά υδραυλικά ύψη. Κατ'επέκταση, ήταν αναγκαίο να εξισορροπηθεί η διαφορά των υδραυλικών υψών με δοκιμές, μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη διαφορά που θα έδινε το ελάχιστο σφάλμα συσχέτισης. Το ελάχιστο σφάλμα προκύπτει, λοιπόν, για τις τιμές υδραυλικού ύψους, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1 και στα διαγράμματα των Εικόνων 5.1 και 5.2.



Εικόνα 5.1 Συγκριτική απεικόνιση των τιμών υδραυλικού ύψους σε (m) μοντέλου-πεδίου.



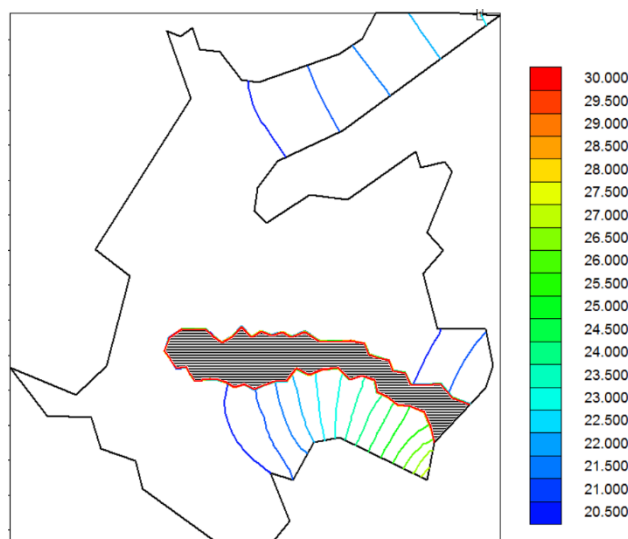
Εικόνα 5.2 Συσχέτιση των τιμών υδραυλικού ύψους σε (m) μοντέλου-πεδίου.

Αναφορικά με τα υδραυλικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, έγιναν πολλές αλλαγές κυρίως στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας που επηρέαζε σε μεγάλο βαθμό τη μεταβολή της ροής και των υδραυλικών υψών. Η υδραυλική αγωγιμότητα ορίστηκε τελικά στα 25 m/d για το στρώμα των αλλουβιακών αποθέσεων και $5 \cdot 10^{-6}$ m/d για το στρώμα του σχιστόλιθου. Η αποθηκευτικότητα και το πορώδες ορίστηκαν στα 0,03 και 0,45 για το στρώμα των αλλουβιακών αποθέσεων και 0,06 και 0,08 για το στρώμα του σχιστόλιθου αντίστοιχα. Όλες οι παραπάνω ορισμένες μεταβλητές έλαβαν τιμές εντός των ορίων που καθορίζονται από τις αντίστοιχες υδρογεωλογικές μελέτες (Κεφάλαιο 4).

Οι προκύπτουσες τιμές των συνθηκών άντλησης και τροφοδοσίας της λεκάνης παρουσιάζονται στα αντίστοιχα διαγράμματα στο Παράρτημα. Για τις γεωτρήσεις G14 και W9, που όπως προαναφέρθηκε, θεωρήθηκε η παρουσία 4 επιπλέον πηγαδιών πλησίον καθεμιάς για να δικαιολογηθούν οι αυξημένες τιμές ημερήσιων αντλήσεων, έγινε υπολογισμός άντλησης κάθε πηγαδιού ξεχωριστά. Για τη G14, η οποία είναι γνωστό ότι αντλεί 400m³/d κάθε θερινή περίοδο, προέκυψε από τη βαθμονόμηση η τιμή άντλησης των 1000m³/d. Οπότε 600m³/d ισοκατανέμονται ανάμεσα στα υπόλοιπα 4 πηγάδια, άρα το καθένα θεωρείται ότι αντλεί 150 m³/d για άρδευση. Έτσι, κάθε πηγάδι αντλεί περίπου 37,5% της ποσότητας της G14. Αντίστοιχα για το W9 το οποίο αντλεί μέγιστη ποσότητα των 100 m³/d, η άντληση βαθμονόμησης προέκυψε 900 m³/d, οπότε κάθε ένα από τα 4 πηγάδια, αντλούν περίπου 225 m³/d.

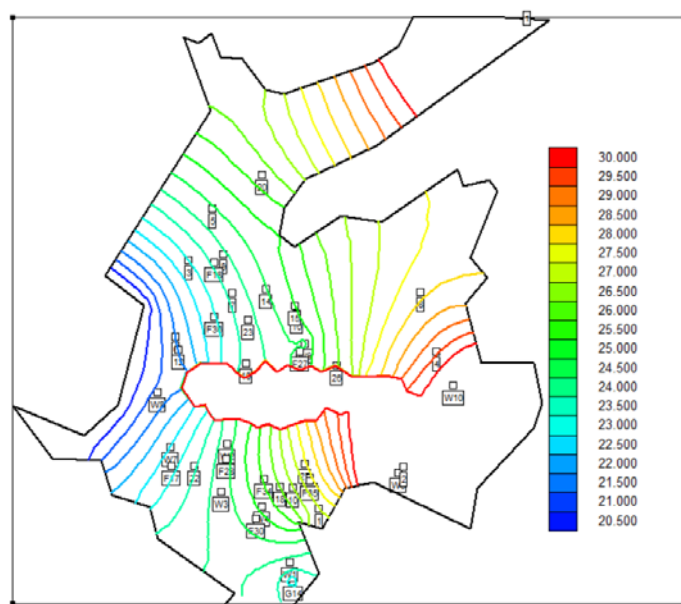
Στα γραφήματα ροής που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα υδραυτικά ύψη και οι ταχύτητες του υπόγειου νερού για τη θερινή περίοδο του 2014 (stress 34) (Μάιος 2014-Σεπτέμβρης 2014) και για το πρώτο μισό της χειμερινής περιόδου του 2015 (stress 35) (Οκτώβριος 2014-Απρίλιος 2015). Όπως, προκύπτει από τα διαγράμματα ροής στις Εικόνες 5.3 και 5.4, το υδραυλικό ύψος παρουσιάζει μία σχετικά μη ομαλή μείωση με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης και τις ελάχιστες τιμές στο βόρειο τμήμα της. Η κίνηση αυτή προέκυψε από τον τρόπο τοποθέτησης των οριακών συνθηκών 2^{ου} τύπου για τη τροφοδοσία της περιοχής. Στο βόρειο τμήμα που βρίσκεται ο οικισμός του Ξυλοκερατιδίου, έχει ήδη αναφερθεί από παλιότερες υδρογεωλογικές μελέτες (Kourmoulis 1983), (Ν. Παπαδόπουλος 1997) ότι η υπολεκάνη αυτού του τμήματος δεν υδροδοτεί σημαντικά την πεδιάδα, κι ότι το πρόβλημα της υφαλμύρισης είναι οξύμενο. Η

δυσκολία βαθμονόμησης της συγκεκριμένης περιοχής, οφειλόταν, ακόμη, στην παρουσία του σχιστόλιθου και στον τρόπο με τον οποίο αυτή η γεωλογική στρώση παρεμβαίνει μέσα στο στρώμα των αλλουβίων. Ως συνέπεια της μεγάλης διαφοράς στις υδραυλικές αγωγιμότητες των δύο στρωμάτων, φαίνεται σαν να διακόπτεται η ισοϋψής του υδραυλικού ύψους στο νότιο τμήμα του σχιστόλιθου. Θεωρείται, λοιπόν, πως το τμήμα βόρεια του σχιστόλιθου δεν επικοινωνεί με το νότιο, ένεκα αυτής της διαφοράς. Αυτό το φαινόμενο παρατηρείται κυρίως στις θερινές περιόδους, όπου τα υδραυλικά ύψη μειώνονται σε μεγάλο βαθμό. Συγκεκριμένα στην Εικόνα 5.3, φαίνεται πως ο υδροφορέας στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης, βρίσκεται στο ίδιο ύψος με το επίπεδο της θάλασσας.



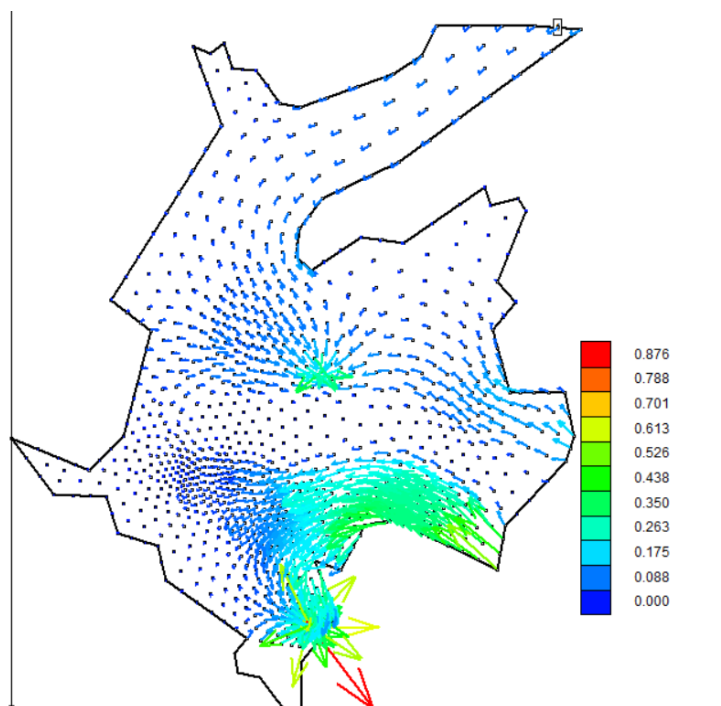
Εικόνα 5.3 Ισοϋψείς υδραυλικών υψών του υπόγειου νερού σε (m) με επίπεδο αναφοράς τη βάση των αλλουβιακών αποθέσεων (-20m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας), για τη θερινή περίοδο 2014.

Αντίθετα, τις περισσότερες χειμερινές περιόδους παρατηρήθηκε ότι το υδραυλικό ύψος μεταβαλλόταν πιο απότομα, λαμβάνοντας πολύ μεγαλύτερες τιμές στο ανατολικό και νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Εδώ πρέπει να σημειωθεί, ότι το πρώτο μισό της χειμερινής περιόδου του 2015, παρουσίασε πολύ αυξημένη βροχόπτωση με αποτέλεσμα την αύξηση του υδραυλικού ύψους της περιοχής, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.4. Πρέπει να τονιστεί ότι οι οριακές συνθήκες 2^{ου} τύπου ήταν ο βασικός παράγοντας επιρροής και διαμόρφωσης του υδραυλικού ύψους της λεκάνης, οι οποίες, βάσει παραδοχών, κατασκευάστηκαν έτσι, ώστε να επηρεάζονται άμεσα από την βροχόπτωση ανά χρονική περίοδο. Η διαφορά της ροής ανάμεσα στις δύο χρονικές περιόδους παρουσιάζει μεγάλη διαφορά, που προκάλεσε αρκετό προβληματισμό για την περιοχή μελέτης και την αξιοπιστία των δεδομένων εισόδου.



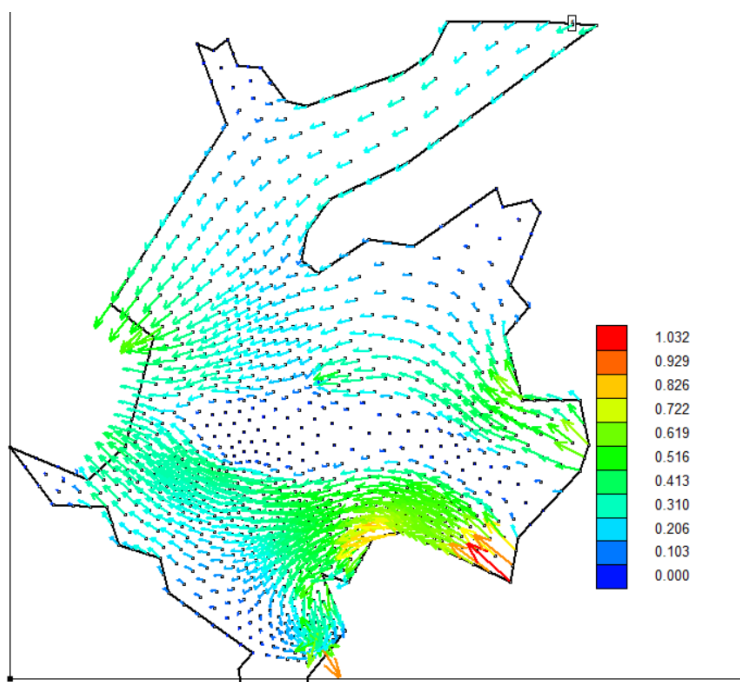
Εικόνα 5.4 Ισοϋψείς υδραυλικών υψών του υπόγειου νερού σε (m) με επίπεδο αναφοράς τη βάση των αλλουβιακών αποθέσεων (-20m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας), για τη χειμερινή περίοδο 2015.

Τα διαγράμματα ταχυτήτων ροής δημιουργήθηκαν με την εισαγωγή στο πρόγραμμα του αρχείου PTC Mesh x_{vel} και y_{vel} , που περιέχει τις συνιστώσες V_x και V_y της ταχύτητας. Στο τμήμα περιμετρικά του σχιστόλιθου, οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές, καθώς η ταχύτητα είναι ανάλογη της υδραυλικής αγωγιμότητας κι επηρεάζεται άμεσα από αυτήν (Εικόνα 5.5). Γενικά οι ταχύτητες παρουσιάζονται αυξημένες στην αρχή των οριακών συνθηκών B2 και B3, καθώς και γύρω από τα πηγάδια άντλησης. Τόσο από το διάγραμμα ταχυτήτων της θερινής όσο και χειμερινής περιόδου, φαίνεται καθαρά η επιρροή των πηγαδιών G14 και W9 στην υπόγεια ροή. Συγκεκριμένα τη θερινή περίοδο οι ταχύτητες γύρω από τα δύο πηγάδια κυμαίνονται από 0,4-0,87m/d. Το μέγεθος της επιρροής δύναται να οφείλεται εν μέρει στον αβαθή υδροφόρα, στη μικρή έκταση της περιοχής μελέτης καθώς και στις μικρές αποστάσεις από την ακτογραμμή.



Εικόνα 5.5 Απεικόνιση των ταχυτήτων ροής σε (m/d) για τη θερινή περίοδο του 2014.

Ένεκα της αυξημένης μεταβολής του υδραυλικού ύψους κατά τις χειμερινές περιόδους, τα μέτρα των ταχυτήτων ροής εμφανίζονται μεγαλύτερα σε όλη την έκταση του υδροφορέα, όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 5.6.



Εικόνα 5.6 Απεικόνιση των ταχυτήτων ροής σε (m/d) για τη χειμερινή περίοδο του 2015.

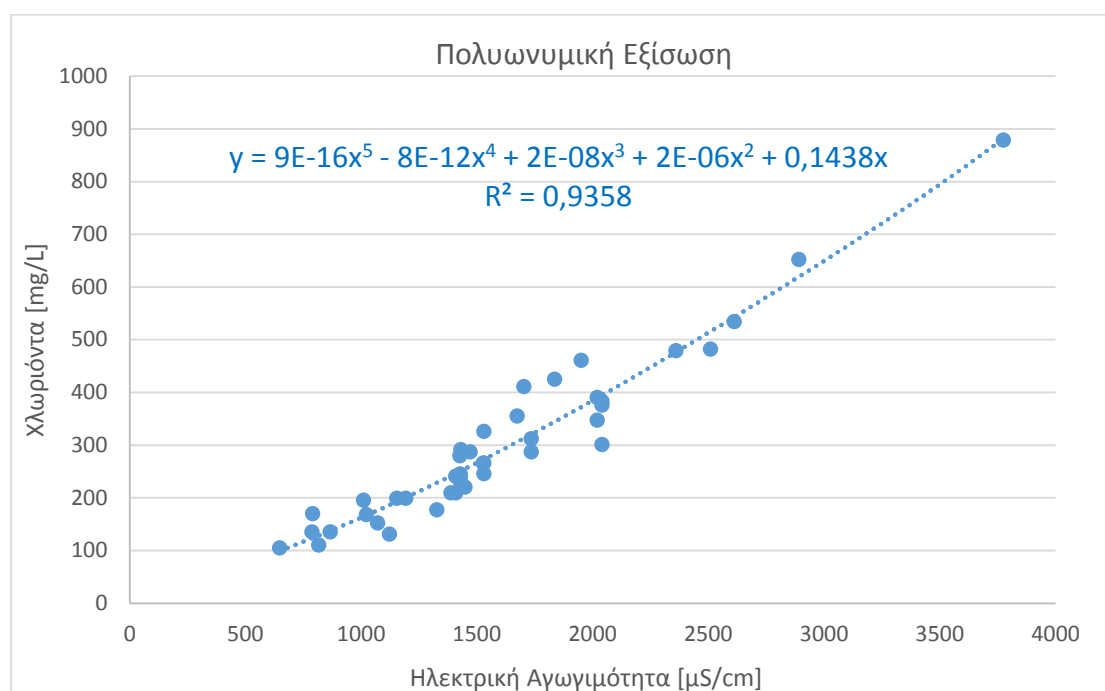
5.3. Έλεγχος Συμφωνίας- Χλωριόντα

Το δεύτερο σκέλος της αξιολόγησης του μοντέλου, περιλαμβάνει το έλεγχο των υδραυλικών υψών κάθε χρονικής περιόδου, ώστε να είναι σε συμφωνία με τις συγκεντρώσεις χλωριόντων που έχουν μετρηθεί για κάθε υδροσημείο. Αυτός ο έλεγχος πραγματοποιήθηκε με χρήση της

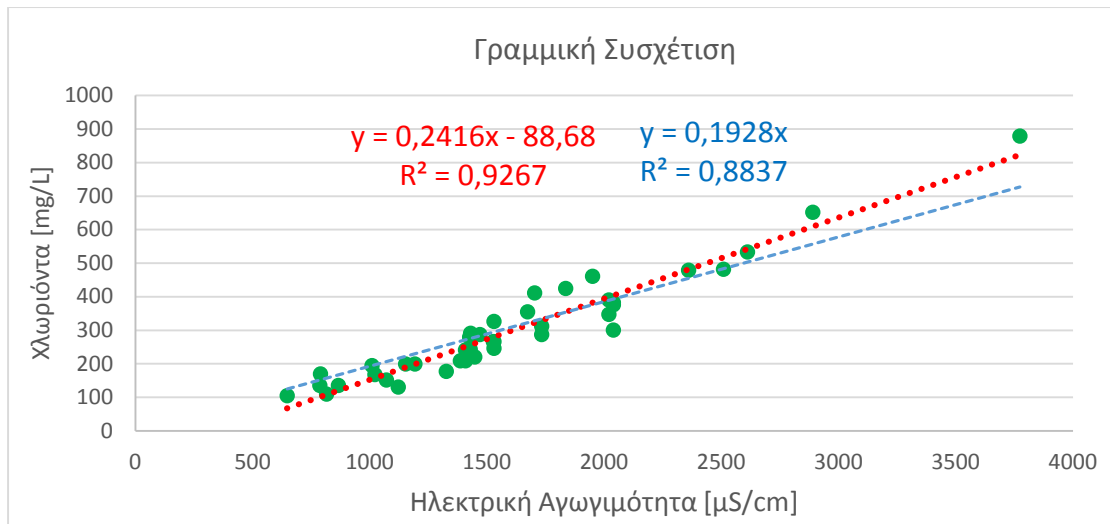
εξίσωσης Ghyben-Herzberg. Αρχικά υπολογίστηκε το υδραυλικό ύψος από το επίπεδο της θάλασσας, μέχρι το οποίο διεισδύει το μέτωπο της υφάλμυρης ζώνης. Έπειτα, έγινε αντιστοίχιση της ποιοτικής κατάστασης κάθε γεώτρησης με το υδραυλικό ύψος του υδροφορέα στη θέση της καθεμιάς. Υπογραμμίζεται ότι από τα δεδομένα, ήταν διαθέσιμες περισσότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας [$\mu\text{S}/\text{cm}$] παρά χλωριόντων [mg/L], για τον ποιοτικό χαρακτηρισμό του νερού κάθε γεώτρησης. Για το λόγο αυτό, έγινε μετατροπή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συγκέντρωση χλωριόντων, η οποία αναλύεται παρακάτω. Η διαδικασία ελέγχου επαναλήφθηκε για τα ίδια υδραυλικά ύψη, με τη χρήση του συντελεστή διόρθωσης της εξίσωσης Ghyben-Herzberg και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Η προσπάθεια μετατροπής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δειγμάτων νερού σε συγκέντρωση χλωριόντων, προέκυψε από την ανάγκη αξιοποίησης όσο το δυνατό μεγαλύτερου αριθμού δεδομένων για την ποιότητα του νερού της περιοχής μελέτης. Η εύρεση μίας απλουστευμένης εξίσωσης μετατροπής κρίθηκε απαραίτητη, καθώς δεν ήταν εφικτό να εφαρμοστεί η αντίστοιχη εξίσωση μετατροπής που δίδεται από τη βιβλιογραφία (Κεφάλαιο 2) (**Wooster, 1969**), λόγω έλλειψης δεδομένων πεδίου. Οι γεωτρήσεις για τις οποίες είχαν μετρηθεί συγκεντρώσεις χλωριόντων, χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο αξιοπιστίας της εξίσωσης που κατασκευάστηκε.

Αρχικά, συλλέχθηκαν όλες οι τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας και χλωριόντων που είχαν καταγραφεί από 48 πηγές της Αμοργού, το έτος του 2005 και έγινε προσπάθεια γραμμικής και πολυωνυμικής συσχέτισης των δύο μεταβλητών στο πρόγραμμα του excel. Από τα γραφήματα προέκυψαν τρεις πιθανές εξισώσεις οι οποίες παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.7 και 5.8.



Εικόνα 5.7 Μέθοδος παλινδρόμησης για τη συσχέτιση χλωριόντων (mg/L)-ηλεκτρικής αγωγιμότητας ($\text{EC } \mu\text{S}/\text{cm}$) με πολυωνυμική εξίσωση.



Εικόνα 5.8 Μέθοδος παλινδρόμησης για τη συσχέτιση χλωριόντων (mg/L)-ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC μS/cm) με γραμμική εξίσωση

Στον Πίνακα 5.3, επίσης, παρουσιάζονται οι τιμές χλωριόντων όπως προκύπτουν από τις τρεις εξισώσεις και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές παρατήρησης από πηγάδια της περιοχής μελέτης. Βάσει, των υπολογισμών, προτιμήθηκε η πρώτη εξίσωση πολυωνυμικής μορφής που παρουσίασε το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης ($R^2=0,9267$).

$$y = 9 \cdot 10^{-16}x^5 - 8 \cdot 10^{-12}x^4 + 2 \cdot 10^{-8}x^3 + 2 \cdot 10^{-6}x^2 + 0,1438x \quad (5.1)$$

Πίνακας 5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων της συγκέντρωσης χλωριόντων των εξισώσεων με τις τιμές παρατήρησης

πηγάδι	Ηλ.Αγ [μS/cm] δείγματος παρατήρησης	χλωριόντα [mg/L] δείγματος παρατήρησης	Χλωριόντα [mg/L] πολυωνυμική εξίσωση	Χλωριόντα [mg/L] γραμμική 1	Χλωριόντα [mg/L] γραμμική 2
F27	1530	246	260,0	281,0	295,0
F30	1428	232	239,7	256,3	275,3
F34	1734	287	301,4	330,3	334,3
F35	1408	241	235,8	251,5	271,5
F36	2020	347	360,6	399,4	389,5

Γενικά, η μετατροπή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συγκέντρωση χλωριόντων μέσω της επιλεχθείσας εξίσωσης, δεν θεωρείται πολύ ασφαλής, καθώς η ηλεκτρική αγωγιμότητα δίνει πληροφορία για τη συγκέντρωση του συνόλου των ιόντων ενός υδατικού δείγματος. Όμως, το υπόγειο νερό χαρακτηρίζεται από πληθώρα ιόντων κύρια από τα οποία είναι τα Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , και NO_3^- . Κατ' επέκταση, είναι δύσκολο να γίνει ακριβής συσχέτιση της αγωγιμότητας με τα χλωριόντα.

Η Εξίσωση 5.1, εφαρμόστηκε για τις τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας 16 πηγαιών της περιοχής μελέτης για 8 διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Πίνακας 5.4 Τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας δειγμάτων υπόγειου νερού από την περιοχή μελέτης, για διάφορα πηγάδια/γεωτρήσεις παρατήρησης

Γεώτρηση	EC[μS/cm] 11/1997	EC[μS/cm] 25/7/2000	EC[μS/cm] 6/2005	EC[μS/cm] 25/4/2007	EC[μS/cm] 22/7/2013	EC[μS/cm] 21/11/2013	EC[μS/cm] 2014	EC[μS/cm] 27/4/2015

F18			2091					
F36			2020					
W9	1600							
W10	1600							
W8	3110							
W7	1760							
W2	1515							
F17				4200				
F34			1380					1300
W5	1470							
Π18							1304	
W3	2140							
W4	1470							
F30			1470			1179		
G14	1520	1560	1402	2500	3030	1583		1150
W6	1460							

Πίνακας 5.5 Μετατροπή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συγκέντρωση χλωριόντων με χρήση της εξίσωσης (2). Τα κελιά με κόκκινο χρώμα, δείχνουν τις τιμές που υπερβαίνουν το όριο της νομοθεσίας για τη συγκέντρωση των χλωριόντων στο πόσιμο νερό.

Γεώτρηση	[Cl ⁻] [mg/L] 11/1997	[Cl ⁻] [mg/L] 25/7/2000	[Cl ⁻] [mg/L] 6/2005	[Cl ⁻] [mg/L] 25/4/2007	[Cl ⁻] [mg/L] 22/7/2013	[Cl ⁻] [mg/L] 21/11/2013	[Cl ⁻] [mg/L] 2014	[Cl ⁻] [mg/L] 27/4/2015
F18			375					
F36			361					
W9	274							
W10	274							
W8	582							
W7	307							
W2	257							
F17				808				
F34			230					215
W5	248							
18							216	
W3	386							
W4	248							
F30			248			192		
G14	258	266	312	460	566	271		186
W6	246							

Ο Πίνακας 5.5 παρουσιάζει τα πηγάδια παρατήρησης που υπερβαίνουν τα νομοθετικά όρια ποιότητας για το πόσιμο νερό. Το επόμενο βήμα ήταν η εύρεση του υδραυλικού ύψους το οποίο αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης. Αυτό το υδραυλικό ύψος ορίζει το ανώτερο κατώφλι κάτω από το οποίο συναντάται η υφάλμυρη ζώνη.

Από την εξίσωση των (Ghyben 1889)(Herzberg 1901) η εξίσωση (2.19)

$$h_s = 40h_f$$

Όπου, $h_s = 20m$, υπολογίστηκε το ύψος του υδροφορέα που αντιστοιχεί στο πόδι της υφάλμυρης ζώνης.

$$h_f = 0,5m$$

Θέτοντας, ως επίπεδο αναφοράς το υπόβαθρο του υδροφορέα στα 20m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας,

$$h_f = 20,5m$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, κάθε γεώτρηση/πηγάδι του οποίου το υδραυλικό ύψος παρουσιάζει τιμή μικρότερη του 20,5 m, οποιαδήποτε χρονική περίοδο, θεωρείται ότι βρίσκεται εντός της υφάλμυρης ζώνης και ελέγχεται αν η συγκέντρωση χλωριόντων υπερβαίνει το νομοθετικό όριο των 250 mg/L, για το πόσιμο νερό.

Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε, λαμβάνοντας υπόψιν το συντελεστή διόρθωσης ε^* (Κεφάλαιο 2). Ο παράγων ε^* υπολογίστηκε συναρτήσει της σταθεράς υδροδυναμικής διασποράς α_T και του πάχους του υδροφορέα $b=20$ m, με χρήση των εξισώσεων (2.20), (2.21), (2.22), και (2.23).

Ως α_L ορίζεται η σταθερά υδροδυναμικής διασποράς που μετριέται σε [m] και ελλείψει δεδομένων τεστ ιχνηθέτισης, υπολογίζεται από την εξίσωση (2.23)

$$\alpha_L = 0,83(\log_{10} L)^{2,414}$$

Ως L [m] μετρήθηκε η κάθετη απόσταση κάθε πηγαδιού από την ακτή του κόλπου στο GIS (Πίνακας 5.6).

Πίνακας 5.6 Μετρηθείσες τιμές μήκους κάθε υδροσημείου από την ακτή της περιοχής μελέτης.

Πηγάδι	L [m]	Πηγάδι	L [m]
5	295	W7	170
F18	208	W2	300
14	322	F28	313
7	232	22	247
F36	183	F17	201
23	274	F34	430
16	393	W5	534
12	108	18	473
19	287	W3	343
W9	434	W4	455
26	531	F30	460
4	770	G14	635
W10	832	W6	753
W8	86		
W7	170		
Μέσος όρος		380	

Για τη μέση τιμή απόστασης των 380 m, υπολογίστηκαν

$$\stackrel{(2.23)}{\implies} \alpha_L = 8,18m$$

$$\stackrel{(2.22)}{\implies} \alpha_T = 0,818m$$

$$\stackrel{(2.20),(2.21)}{\implies} \varepsilon^* = 0.010126743$$

Έτσι, υπολογίστηκε το h'_f ,

$$\stackrel{(2.24)}{\Longrightarrow} h_s = 98,75h'_f$$

$$h'_f = 0,2m \text{ ή } 20,2m$$

$$h'_f = 0,2 < h_f = 0,5$$

Ομοίως, κάθε γεώτρηση/πηγάδι του οποίου το υδραυλικό ύψος παρουσιάζει τιμή μικρότερη του 20,2 m, οποιαδήποτε χρονική περίοδο, βρίσκεται εντός της υφάλμυρης ζώνης και ελέγχεται αν η συγκέντρωση χλωριόντων υπερβαίνει το νομοθετικό όριο των 250 mg/L, για πόσιμο νερό.

5.4. Αποτελέσματα Ελέγχου

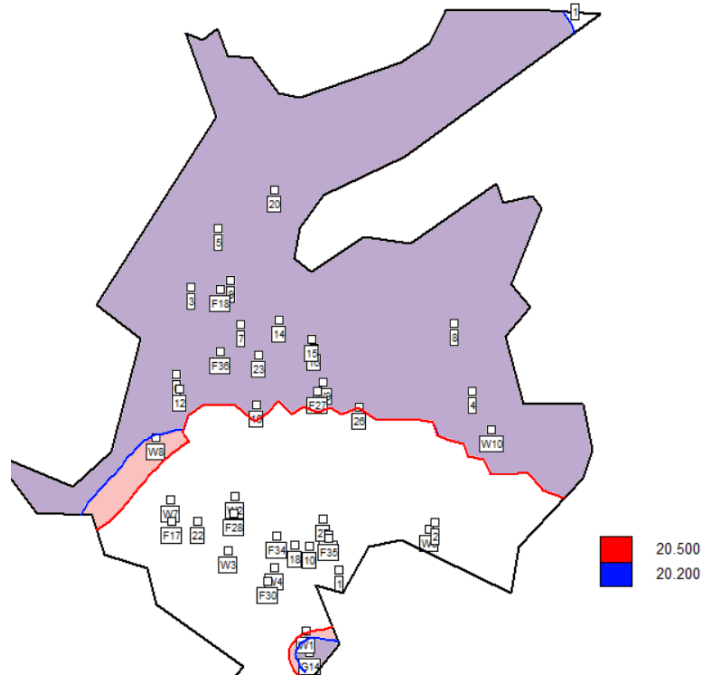
Στον Πίνακα 5.7, παρουσιάζονται οι τιμές υδραυλικών υψών για κάθε πηγάδι και χρονική περίοδο αντίστοιχα με τον Πίνακα 5.5. Παρατηρείται ότι από το μοντέλο γίνεται σωστή αντιστοίχιση μεταξύ της συγκέντρωσης των χλωριόντων και των υδραυλικών υψών. Εξαιρέση αποτελούν οι τιμές των πηγαδιών W10 και W7, που όπως αναφέρεται στην υδρογεωλογική μελέτη του 1997, παρουσιάζουν υδραυλικό ύψος μεγαλύτερο των 20,5 m, δηλαδή προκύπτουν έξω από το μέτωπο υφαλμύρισης. Βάσει πάλι της ίδιας μελέτης, παρουσιάζουν συγκέντρωση χλωριόντων περίπου 300 mg/L και αγωγιμότητα 1600 και 1760 $\mu\text{S}/\text{cm}$ αντίστοιχα, που υπερβαίνει τα νομοθετικά όρια. Δύο άλλα πηγάδια που παρουσιάζουν υδραυλικό ύψος μεγαλύτερο του κρίσιμου, αλλά ταυτόχρονα αυξημένες τιμές συγκέντρωσης χλωριόντων είναι τα W2 και G14 για το 1997.

Πίνακας 5.7

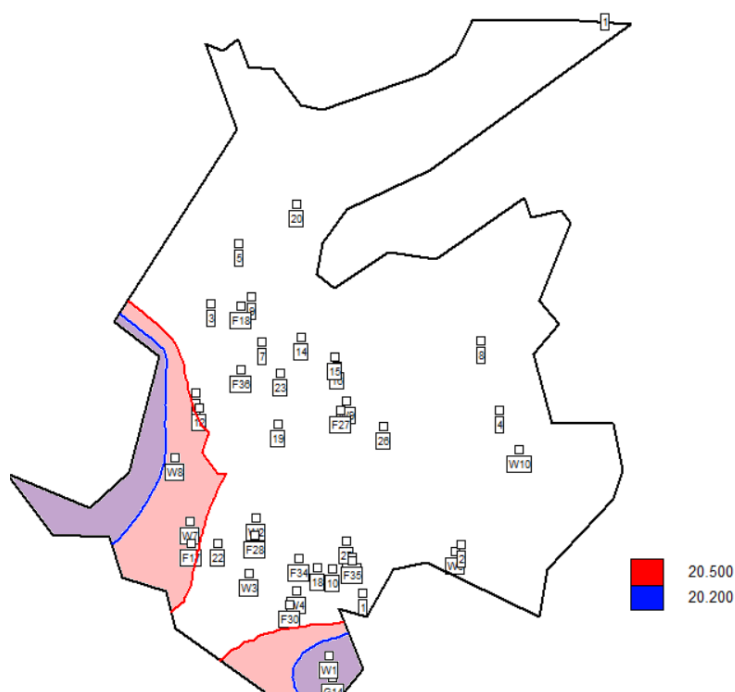
Ημερομηνία	Πηγάδι/Γεώτρηση	Υδραυλικό ύψος [m]	Συγκέντρωση Χλωριόντων [mg/L]
11/1997	W9	20,3	274
	W10	21	274
	W8	20,2	582
	W7	20,7	307
	W2	20,8	257
	W5	21,7	248
	W3	20,2	386
	W4	21,3	248
	G14	22	258
	W6	22,7	246
25/7/2000	G14	18,26	266
6/2005	F18	19,33	375
	F36	19,16	361
	F34	23,25	230
	F30	21,71	248
	G14	18,87	312
25/4/2007	F17	20,5	808
	G14	18,96	460
22/7/2013	G14	18,67	566
21/11/2013	F30	20,7	192
	G14	18,85	271
2014	Π18	20,63	216
27/4/2015	F34	26,57	215
	G14	22,56	186

Τα διαγράμματα που ακολουθούν δείχνουν τη μεταβολή της θέσης της υφάλμυρης ζώνης για διάφορες χρονικές περιόδους. Με κόκκινη γραμμή ορίζεται η θέση της ζώνης, όπως

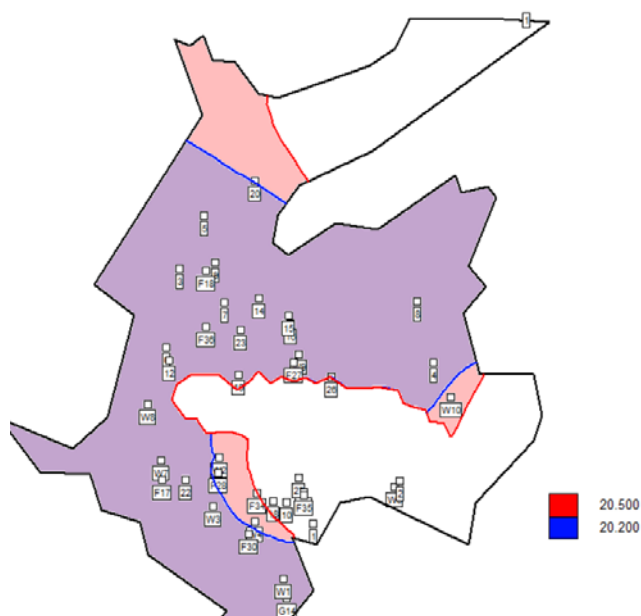
προκύπτει από την εξίσωση Ghyben-Herzberg και με κυανή γραμμή ορίζεται η θέση της ζώνης υφαλμύρισης, όπως προκύπτει από τη διόρθωση Ghyben-Herzberg. Οι γραφικές αναπαραστάσεις έχουν σχεδιαστεί με ανάλογη κλίμακα, ώστε σε κάθε προσομοίωση να είναι εμφανής η θέση του μετώπου.



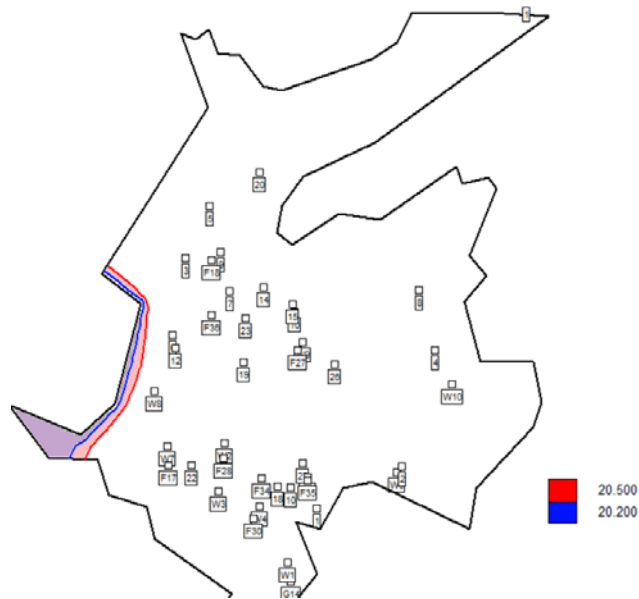
όπως προκύπτει από τη διορθωμένη εξίσωση Ghyben-Herzberg. Κάθε κόκκινη ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, όπως προκύπτει από τη γνωστή εξίσωση Ghyben-Herzberg.



Εικόνα 5.11 Απεικόνιση της μεταβολής του υδραυλικού ύψους που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, για τη χειμερινή περίοδο 2013. Κάθε κυανή ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο, όπως προκύπτει από τη διορθωμένη εξίσωση Ghyben-Herzberg. Κάθε κόκκινη ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, όπως προκύπτει από τη γνωστή εξίσωση Ghyben-Herzberg.



Εικόνα 5.12 Απεικόνιση της μεταβολής του υδραυλικού ύψους που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, για τη θερινή περίοδο 2014. Κάθε κυανή ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο, όπως προκύπτει από τη διορθωμένη εξίσωση Ghyben-Herzberg. Κάθε κόκκινη ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, όπως προκύπτει από τη γνωστή εξίσωση Ghyben-Herzberg.



Εικόνα 5.13 Απεικόνιση της μεταβολής του υδραυλικού ύψους που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, για τη χειμερινή περίοδο 2015. Κάθε κυανή ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο, όπως προκύπτει από τη διορθωμένη εξίσωση Ghyben-Herzberg. Κάθε κόκκινη ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, όπως προκύπτει από τη γνωστή εξίσωση Ghyben-Herzberg.

Παρατηρείται ότι στις υγρές περιόδους (11/2013, 4/2015 & 4/2007), ανάλογα με τη βροχόπτωση, η ζώνη της υφαλμύρισης περιορίζεται κοντά στην ακτογραμμή, ή εξαπλώνεται μόνο προς το βόρειο τμήμα της περιοχής. Τις ξηρές περιόδους (6/2005, 2014) η θέση της ζώνης μεταφέρεται αρκετά προς το εσωτερικό της περιοχής μελέτης και σε ακραίες περιπτώσεις ξηρασίας (Ιούνιος 2005) φαίνεται να φτάνει στα όρια της περιοχής μελέτης. Αυτή η ακραία συμπεριφορά μπορεί να οφείλεται:

- Στη μεγάλη εξάρτηση της θέσης της υφάλμυρης ζώνης από τη βροχόπτωση
- Στην υπεράντληση του υδροφορέα τις θερινές περιόδους
- Στη μικρή έκταση της περιοχής μελέτης
- Στην έλλειψη δεδομένων για το τμήμα βόρεια του σχηματισμού του σχιστόλιθου.

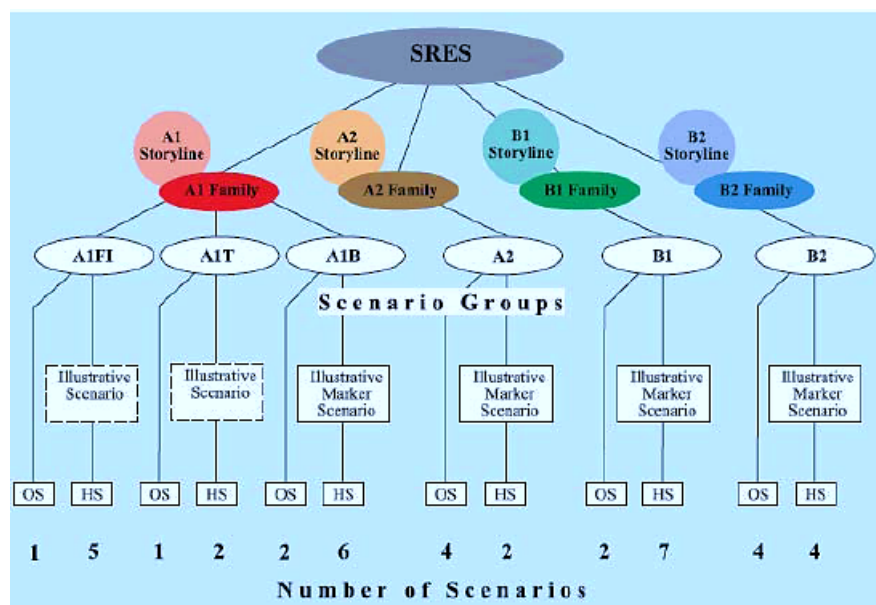
Γενικά, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το κύριο πρόβλημα εμφανίζεται κατά τις θερινές περιόδους, όπου αυξάνεται κατακόρυφα η ζήτηση σε νερό, ενώ παράλληλα μειώνεται η τροφοδοσία της λεκάνης. Εντούτοις, δεδομένης της εξάρτησης από τη βροχόπτωση, το φαινόμενο της υφαλμύρισης μπορεί να οξυνθεί και κατά τη διάρκεια μιας χειμερινής περιόδου, αν παρατηρηθεί αρκετά μειωμένη βροχόπτωση.

6. Κεφάλαιο 6^ο: Σενάρια Κλιματικής Αλλαγής

Τα μικρά νησιά είναι από τα πιο ευάλωτα συστήματα στην επιρροή της κλιματικής αλλαγής. Το υπόγειο νερό αποτελεί τη μοναδική πηγή γλυκού νερού δεδομένης της γρήγορης κατείσδυσης του επιφανειακού νερού, όταν αυτό σχηματίζεται. Αυτή η εξάρτηση από τη βροχόπτωση αυξάνει σημαντικά την ευαισθησία των μικρών νησιών στις μελλοντικές κλιματικές μεταβολές. Επίσης, η αναμενόμενη αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας σε συνδυασμό με την αυξανόμενη ζήτηση σε νερό, είναι παράγοντες που αναμένεται να ασκήσουν επιπλέον πιέσεις στους ήδη υπάρχοντες υδάτινους πόρους.

Συνεπώς ο στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να εξεταστεί και να αξιολογηθεί η συμπεριφορά της προσχωματικής λεκάνης των Καταπόλων με την εφαρμογή, στο ήδη κατασκευασμένο μοντέλο, 5 σεναρίων κλιματικής αλλαγής. Σε κάθε σενάριο εξετάζεται διαφορετικός συνδυασμός πιθανών πιέσεων, όπως η μείωση της τροφοδοσίας της λεκάνης, η μεταβολή στις αρδεύσεις και στις υδρεύσεις και η μεταβολή στην βροχόπτωση.

Τα σενάρια που δημιουργήθηκαν στο παρόν κεφάλαιο, βασίστηκαν στις αναφορές της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή (International Panel for Climate Change, IPCC) του 2007. Από το 1990, η IPCC ανέπτυξε μακροπρόθεσμα σενάρια που έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην ανάλυση της πιθανής αλλαγής κλίματος. Συγκεκριμένα, το 1992 έγινε η δημοσίευση 6 σεναρίων (IS92) που παρουσίαζαν εναλλακτικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίων για τα έτη 1990-2100. Μετά από επαναξιολόγηση των πρώτων σεναρίων, αναπτύχθηκε το 1996 ένα νέο σύνολο σεναρίων, που δημοσιεύτηκαν το 2000 από την IPCC. Το σύνολο των σεναρίων της ομάδας SRES (Special Report on Emissions Scenarios), όπως αποκαλείται, καλύπτει ένα ευρύ φάσμα των κύριων αιτιών κλιματικής αλλαγής, από δημογραφικές μεταβολές, μέχρι τεχνολογικές και οικονομικές εξελίξεις. Στο διάγραμμα της Εικόνας 6.1, παρουσιάζονται 4 πλοκές, A1, A2, B1 και B2, που παράγουν 4 σύνολα σεναρίων (οικογένειες σεναρίων). Για κάθε οικογένεια έχει αναπτυχθεί ένα ή περισσότερα μοντέλα πρόβλεψης, ενώ συνολικά έχουν αναπτυχθεί 40 σενάρια SRES και από τις 6 ομάδες μοντέλων.



Εικόνα 6.1 Σχηματική απεικόνιση των σεναρίων SRES (IPCC, 2000)

6.1. Σενάριο 1

Στο 1^ο σενάριο μελετήθηκε μόνο η επίδραση της μεταβολής της βροχόπτωσης στο φαινόμενο της υφαλμύρισης, με την παραδοχή ότι ο ρυθμός αντλήσεων παραμένει σταθερός. Βάσει αναφοράς της (IPCC, 2007b) την περίοδο του 2020 αναμένεται μείωση της ετήσιας απορροής και δη της θερινής ροής στη Νότια Ευρώπη μέχρι 23%, ενώ για την περίοδο του 2050 αναμένεται μείωση της ετήσιας απορροής έως και 20-30% στη νοτιοανατολική Ευρώπη. Αναφορικά με την Ελλάδα, εκτιμάται επίσης μείωση των μελλοντικών ποσοτήτων βροχόπτωσης, ενώ πιθανή εκτιμάται και η αύξηση πλημμυρικών φαινομένων κατά τους χειμερινούς μήνες, (Tolika K., Anagnostopoulou C., Maheras P. 2008). Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται οι μέσες τιμές προβλεπόμενης βροχόπτωσης για τον Ελλαδικό χώρο, από την εφαρμογή διαφόρων μοντέλων, για τη χρονική περίοδο 2021-2050. Τα αποτελέσματα προέκυψαν από τη μελέτη των (Tolika & Zanis, 2010) για το σενάριο A1B της οικογένειας A1 (Εικόνα 6.1). Η A1 περιγράφει ένα μελλοντικό κόσμο πολύ γρήγορης οικονομικής ανάπτυξης, με παγκόσμιο πληθυσμό, που κορυφώνεται στα μέσα του αιώνα και παρουσιάζει μείωση έκτοτε, και με ταχεία εισαγωγή νέων και αποδοτικότερων τεχνολογιών. Η ομάδα A1B, επίσης, χαρακτηρίζεται από μία ισορροπία στην εκμετάλλευση των πηγών ενέργειας.

Πίνακας 6.1 Μέση πρόβλεψη βροχόπτωσης στον Ελλαδικό χώρο, από την εφαρμογή 8 διαφορετικών μοντέλων, για τη χρονική περίοδο 2021-2050

Επιλεγμένα Μοντέλα	Χειμώνας		Καλοκαίρι	
	Μέση Βροχόπτωση [mm]	Ποσοστιαία Μεταβολή[%]	Μέση Βροχόπτωση [mm]	Ποσοστιαία Μεταβολή[%]
CLM	288,2	-6,9	15	-26,7
HadRM3	241,8	-9,3	32,8	-10,1
HIRHAM	307,2	-2,3	18,7	-20,
RACMO2	197,4	-3,9	8,1	-34,4
RCA	197,8	2	18,7	-25,4
RCA3	164,1	-10,5	19,7	-17,5
RegCM3	227,9	2,1	37,2	2,4
REMO	217,3	-1,3	23,6	-20,7
Μέση Τιμή	230,2	-3,7	21,7	-19
Ελάχιστη Τιμή	164,1	-10,5	8,1	-34,3
Μέγιστη Τιμή	2,1	+2,1	37,2	+2,4

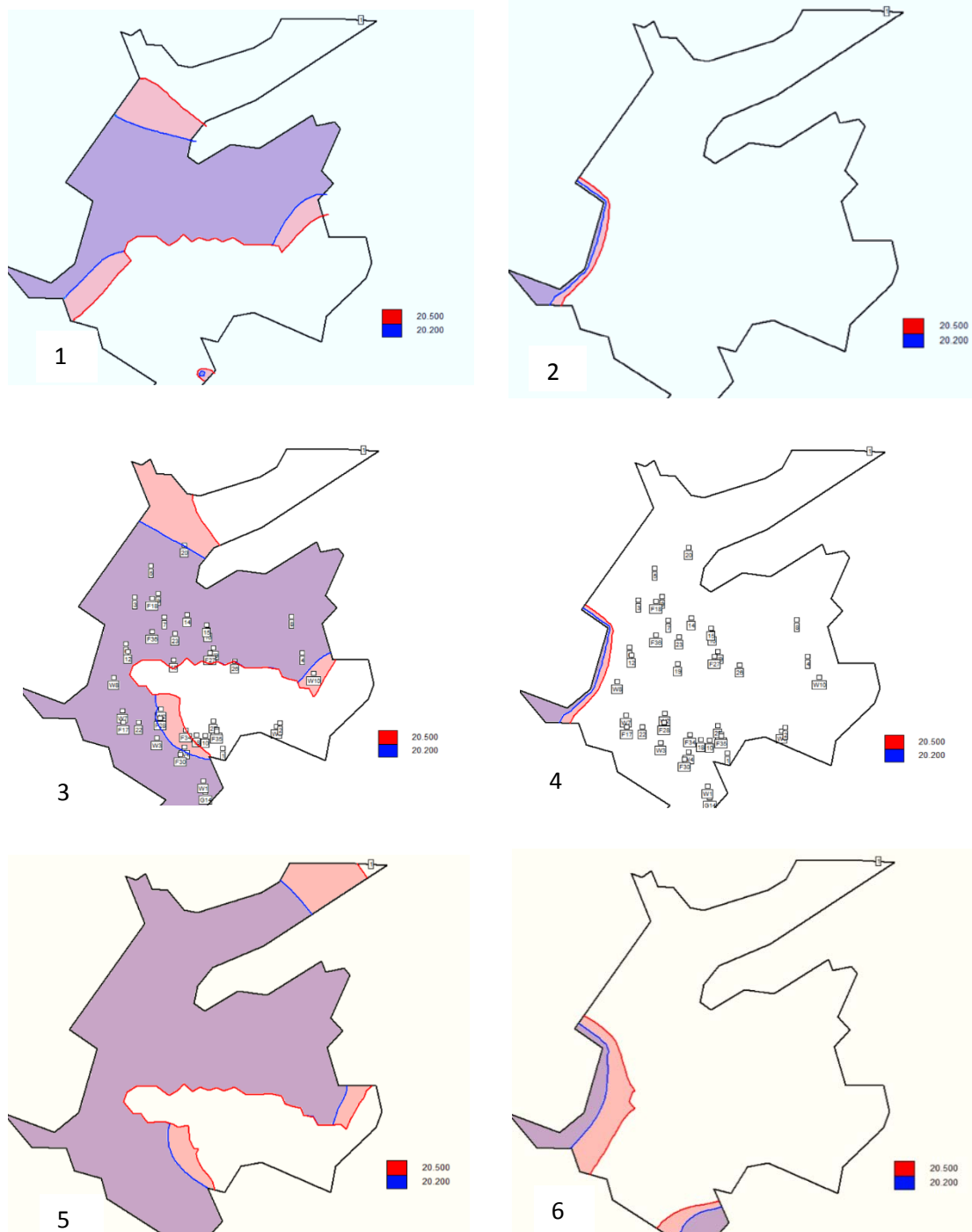
Όπως αναμένεται, κάθε μοντέλο παράγει διαφορετικές τιμές αποτελεσμάτων, που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μοντέλα στον Πίνακα 6.1, που δίνουν θετική μεταβολή της βροχόπτωσης για τα επόμενα έτη. Ως εκ τούτου, το Σενάριο 1 χωρίστηκε σε δύο υποσενάρια.

Το πρώτο υποσενάριο συμπεριλαμβάνει αυτή τη θετική μεταβολή για τα πρώτα 10 χρόνια πρόβλεψης (2015-2026), ενώ για τα επόμενα χρόνια συμπεριλαμβάνει αρνητικές μεταβολές βροχόπτωσης, χρησιμοποιώντας τις μέσες και ελάχιστες τιμές του Πίνακα 6.2. Το δεύτερο υποσενάριο επιλέχθηκε να μην περιλαμβάνει τις θετικές μεταβολές βροχόπτωσης, οπότε για τα 10 πρώτα χρόνια πρόβλεψης, σε αυτή την περίπτωση, λήφθηκαν οι αμέσως μικρότερες τιμές αρνητικής μεταβολής, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.2.

Πίνακας 6.2 Διάρθρωση υποσεναρίων για την πρόβλεψη μεταβολής της βροχόπτωσης μέχρι το 2050.

Χρονική περίοδος	1 ^ο Υποσενάριο		2 ^ο Υποσενάριο	
	θερινή	χειμερινή	θερινή	χειμερινή
2015-2026	+2%	+2%	-10,1%	-1,3%
2027-2037	-19%	-4%	-19%	-4%
2038-2050	-34%	-10,5%	-34%	-10,5%

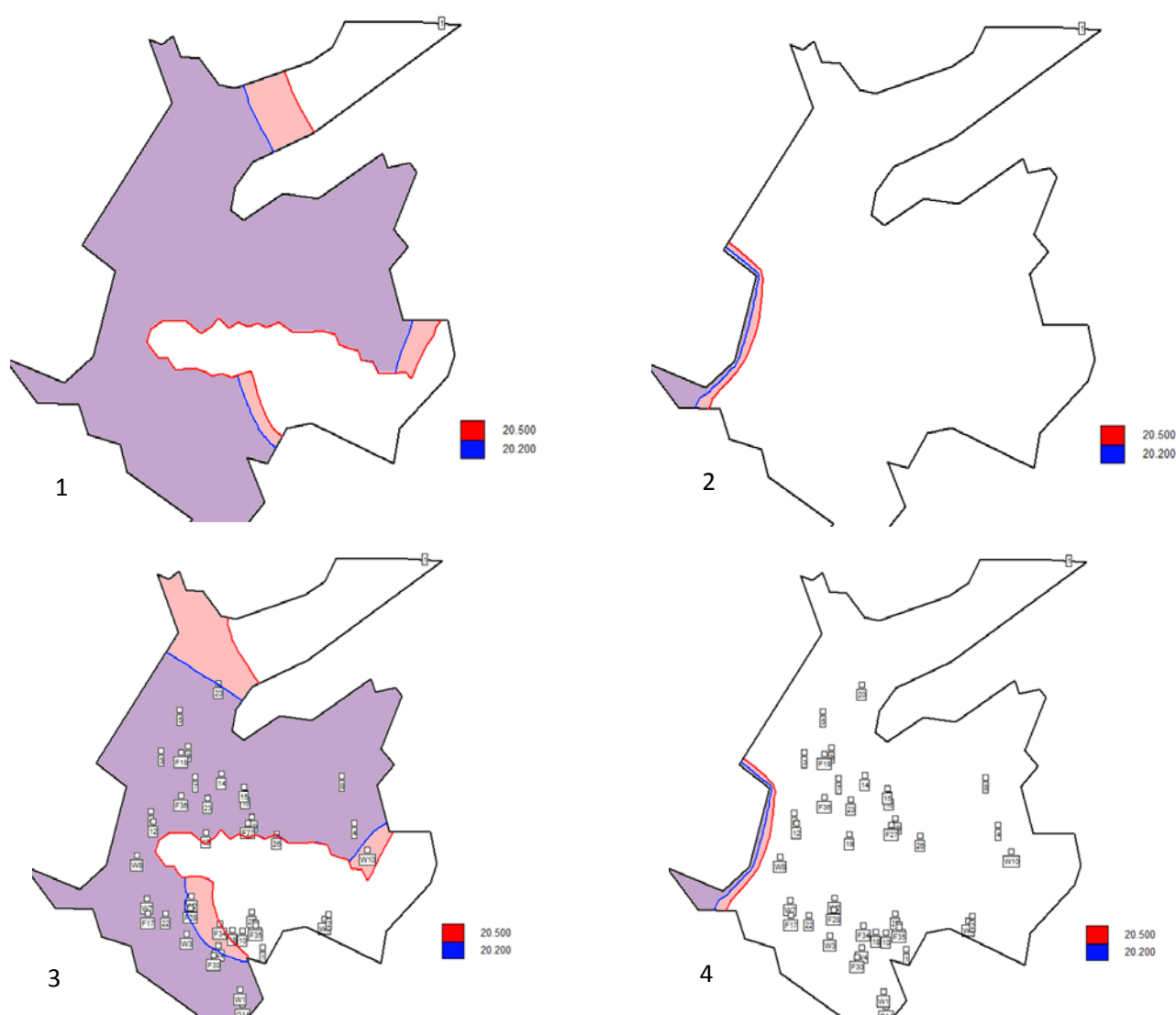
Στην Εικόνα 6.2, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υδραυλικών υψών, που αντιστοιχούν στο μέτωπο της υφαλμύρισης, για το υποσενάριο 1, όπως προέκυψαν από το PTC.



Εικόνα 6.2 Απεικόνιση της μεταβολής του υδραυλικού ύψους που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης. Κάθε κυανή ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο, όπως προκύπτει από τη διορθωμένη εξίσωση Ghyben-Herzberg. Κάθε κόκκινη ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, όπως προκύπτει από τη γνωστή εξίσωση Ghyben-Herzberg. Στις εικόνες 1 & 2, απεικονίζονται τα υδραυλικά ύψη για την ξηρή και υγρή περίοδο του 2026, για το υποσενάριο 1 (+2% αύξηση βροχόπτωσης). Στις εικόνες 5 & 6, απεικονίζονται τα υδραυλικά ύψη για την ξηρή και υγρή περίοδο του 2049, επίσης για το υποσενάριο 1. Οι εικόνες 3 & 4, αναπαριστούν τα υδραυλικά ύψη για την παρούσα κατάσταση (ξηρή και υγρή περίοδος του 2015).

Συγκρίνοντας τις ξηρές περιόδους μεταξύ των ετών 2015-2026-2049, παρατηρείται ότι, αναλογικά με τη μεταβολή της βροχόπτωσης, μεταβάλλεται και το υδραυλικό ύψος του υπόγειου νερού. Όσον αφορά στις υγρές περιόδους, γίνεται εμφανής η μείωση του υδραυλικού ύψους έως το 2050, ενώ έως το 2026, δεν παρατηρείται μεγάλη μεταβολή.

Στην Εικόνα 6.3, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υδραυλικών υψών, που αντιστοιχούν στο μέτωπο της υφαλμύρισης, για το υποσενάριο 2, όπως προέκυψαν από το PTC.



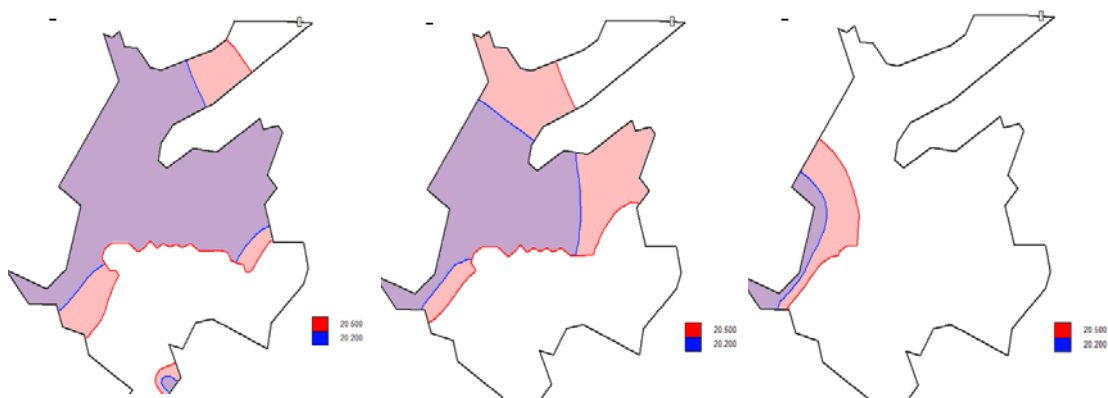
Εικόνα 6.3 Απεικόνιση της μεταβολής του υδραυλικού ύψους που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης. Κάθε κυανή ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο, όπως προκύπτει από τη διορθωμένη εξίσωση Ghyben-Herzberg. Κάθε κόκκινη ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, όπως προκύπτει από τη γνωστή εξίσωση Ghyben-Herzberg. Στις εικόνες 1 & 2, απεικονίζονται τα υδραυλικά ύψη για την ξηρή και υγρή περίοδο του 2026, για το υποσενάριο 2 (-10,1% & -1,3% μεταβολή βροχόπτωσης). Οι εικόνες 3 & 4, αναπαριστούν τα υδραυλικά ύψη για την παρούσα κατάσταση (ξηρή και υγρή περίοδος του 2015). Στις εικόνες 1,2 εμφανίζονται, επίσης, οι οριακές συνθήκες της ακτογραμμής (1^{ου} τύπου) και περιμετρικά της λεκάνης (2^{ου} τύπου).

Συγκρίνοντας τις ξηρές περιόδους μεταξύ των ετών 2015-2026, παρατηρείται ότι, αναλογικά με τη μείωση της βροχόπτωσης, μειώνεται και το υδραυλικό ύψος του υπόγειου νερού. Όσον αφορά στις υγρές περιόδους, έως το 2026, δεν παρατηρείται μεγάλη μεταβολή. Γενικά, γίνεται αντιληπτό ότι η αλλαγή μόνο του συντελεστή βροχόπτωσης, επηρεάζει κυρίως την τιμή του υδραυλικού ύψους στις ξηρές περιόδους.

Στα σενάρια που ακολουθούν επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί μόνο το υποσενάριο **2**. Δηλαδή, επιλέγεται να εφαρμοστεί το μεγαλύτερης πίεσης σενάριο, βάσει του οποίου παρατηρείται μία σταδιακή μείωση των βροχοπτώσεων από το 2015 έως το 2050.

6.2. Σενάριο 2

Στο 2^ο σενάριο μελετήθηκε η επίδραση της μείωσης του ρυθμού άντλησης στη ζώνη υφαλμύρισης. Η άντληση αναφέρεται τόσο στην ύδρευση όσο και στην άρδευση της λεκάνης των Καταπόλων. Η μείωση αυτή, δεδομένης της αναμενόμενης αύξησης του τοπικού πληθυσμού, είναι ρεαλιστική μόνο υπό την προϋπόθεση εφαρμογής εναλλακτικών λύσεων, για την αναπλήρωση της απαιτούμενης ποσότητας νερού. Τρία υποσενάρια μελετήθηκαν σε αυτή την περίπτωση, όπου ο ρυθμός άντλησης μειωνόταν στο 25%, 50% και 90% του αρχικού ρυθμού, αντίστοιχα. Όπως έχει ήδη διαπιστωθεί, το πρόβλημα της υφαλμύρισης γίνεται εντονότερο τις θερινές περιόδους και εξαρτάται άμεσα από τη βροχόπτωση. Για το λόγο αυτό, στην Εικόνα 6.4, αναπαρίστανται τα υποσενάρια θερινής περιόδου για το 2049.



Εικόνα 6.4 Αναπαράσταση των τριών υποσεναρίων σταδιακής μείωσης του ρυθμού άντλησης για ύδρευση και άρδευση σε ποσοστά 25%, 50% και 90% αντίστοιχα.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η μείωση του ρυθμού άντλησης εφαρμόστηκε μόνο στις γεωτρήσεις που επηρέαζαν σημαντικά τη στάθμη του υδροφορέα. Ιδιωτικά πηγάδια που αντλούν μικρές ποσότητες νερού καθημερινώς, για άρδευση κηπευτικών, δεν μεταβλήθηκαν. Τα πηγάδια που επηρεάζουν την κατάσταση του υδροφορέα, και η μείωση άντλησης που τους επιβλήθηκε, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3. Υπενθυμίζεται ότι με Πι και Πj, συμβολίζεται κάθε πηγάδι που βρίσκεται πλησίον των G14 και W9, αντίστοιχα και δεν έχουν καταγραφεί από το μοντέλο, αλλά εισήχθησαν βάσει της θεώρησης που έγινε στο Κεφ 5.

Πίνακας 6.3 Ρυθμοί αντλήσεων σε m^3/d , όπως προκύπτουν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου για το 2015, και όπως μειώθηκαν στα τρία υποσενάρια για το θέρος του 2049

Άντληση [m^3/d]	2015	2049		
	0%	-25%	-50%	-90%
G14 (ύδρευση)	400	300	200	40
Πi (άρδευση)	150	112,5	75	15
W3 (ύδρευση)	100	75	50	10
F34 (ύδρευση)	150	112,5	75	15
W9 (άρδευση)	100	75	50	10
Πj(άρδευση)	225	169	112,5	22,5

6.3. Σενάριο 3

Το 3^ο σενάριο μελετάει την απόκριση του συστήματος στην πληθυσμιακή αύξηση και κατ' επέκταση στην αύξηση του ρυθμού των αντλήσεων, στην περίπτωση που δεν εφαρμοστεί άλλο μέτρο προμήθειας της Κοινότητας με νερό για ύδρευση ή άρδευση, όπως για παράδειγμα κατασκευή μονάδας αφαλάτωσης, εμπλουτισμός του υδροφορέα, ή προμήθειες νερού με καράβι.

Βάσει των πληθυσμιακών στοιχείων της ΕΛ.ΣΤΑΤ και μελετών από το ΙΓΜΕ (Ν. Παπαδόπουλος 1997), (Κουρμούλης 1983) για τα έτη 1981-2011, έγινε αρχικά πρόβλεψη του μόνιμου πληθυσμού, καθώς και του τουρισμού για κάθε δεκαετία μέχρι το 2051, όπως φαίνεται στους Πίνακες 6.5, 6.6. Στον πίνακα παρουσιάζονται για σύγκριση και οι μεταβολές πληθυσμού για το σύνολο του νησιού, καθώς και για την Κοινότητα της Χώρας η οποία υδρεύεται από μία γεώτρηση που βρίσκεται στην περιοχή των Καταπόλων.

Πίνακας 6.4 Πρόβλεψη μόνιμου πληθυσμού ανά δεκαετία μέχρι το 2051, για τις τοπικές κοινότητες των Καταπόλων, της Χώρας και του συνόλου της Αμοργού.

	Μόνιμος Πληθυσμός				Πρόβλεψη			
	1981	1991	2001	2011	2021	2031	2041	2051
Χώρα	330	330	417	409	453	485	517	550
Κατάπολα	160	377	489	595	760	901	1043	1185
Χώρα & Κατάπολα	490	707	906	1004	1212	1386	1560	1734
Σύνολο Αμοργού	1378	1632	1866	1973	2217	2419	2621	2823

Πίνακας 6.5 Πρόβλεψη τουρισμού ανά δεκαετία μέχρι το 2051, για τις τοπικές κοινότητες των Καταπόλων, της Χώρας και του συνόλου της Αμοργού.

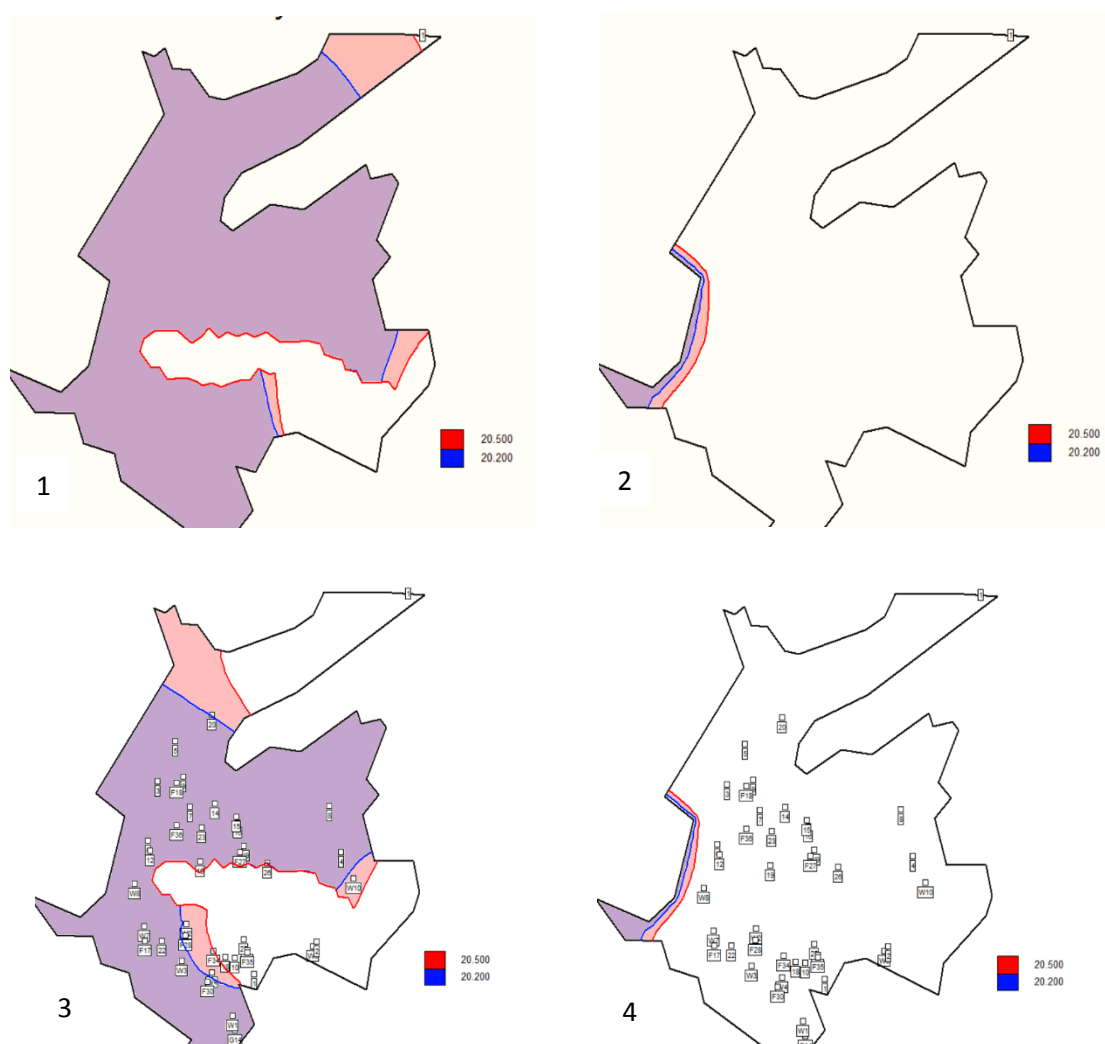
	Τουρισμός			Πρόβλεψη			
	1981	2001	2011	2021	2031	2041	2051
Χώρα	900	1000	1500	1550	1729	1907	2086
Κατάπολα	1500	2400	4000	4450	5229	6007	6786
Χώρα & Κατάπολα	2400	3400	5500	6000	6957	7914	8871
Σύνολο Αμοργού	6520	6240	10400	10266	11355	12443	13532

Ακολουθώντας, στον Πίνακα 6.6, έγινε πρόβλεψη της ημερήσιας ζήτησης σε νερό ύδρευσης, για κάθε υγρή και ξηρή περίοδο, συνολικά για τις δύο Κοινότητες.

Πίνακας 6.6 Πρόβλεψη ημερήσιας ζήτησης σε νερό ύδρευσης, για κάθε χειμερινή περίοδο

Χώρα & Κατάπολα	Ημερήσια Ζήτηση σε Νερό Ύδρευσης [m ³ /d]			Πρόβλεψη [m ³ /d]			
	1991	2001	2011	2021	2031	2041	2051
Χειμερινή Περίοδος	100	400	550	799,5	1024,5	1249,5	1474,5
Τουριστική Περίοδος	300	500	650	833,5	1008,5	1183,5	1358,5

Τα αντίστοιχα διαγράμματα πρόβλεψης πληθυσμού και ζήτησης νερού, καθώς και οι προκύπτουσες γραμμικές εξισώσεις, παρουσιάζονται στο Παράρτημα. Με βάση τις καινούριες τιμές άντλησης, παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.5, η μεταβολή των υδραυλικών υψών που αντιστοιχούν στο μέτωπο υφαλμύρισης.

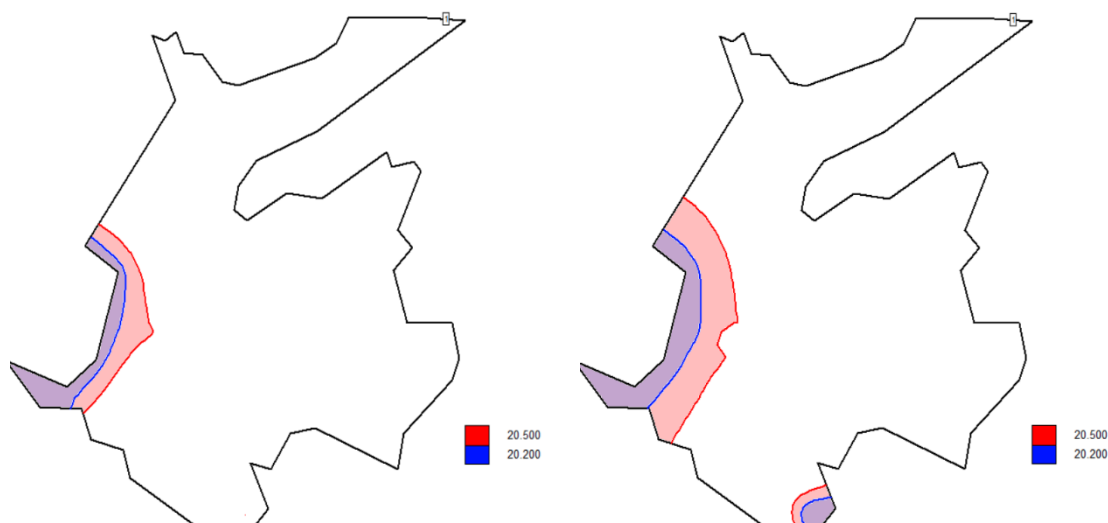


Εικόνα 6.5 Απεικόνιση της μεταβολής του υδραυλικού ύψους που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης. Κάθε κυανή ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος, όπως προκύπτει από τη διορθωμένη εξίσωση Ghyben-Herzberg. Κάθε κόκκινη ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, όπως προκύπτει από τη γνωστή εξίσωση Ghyben-Herzberg. Στις Εικόνες 1 & 2, απεικονίζονται τα υδραυτικά ύψη για την ξηρή και υγρή περίοδο 2049-2050. Οι Εικόνες 3 & 4, αναπαριστούν τα υδραυτικά ύψη για την παρούσα κατάσταση (ξηρή και υγρή περίοδος του 2015).

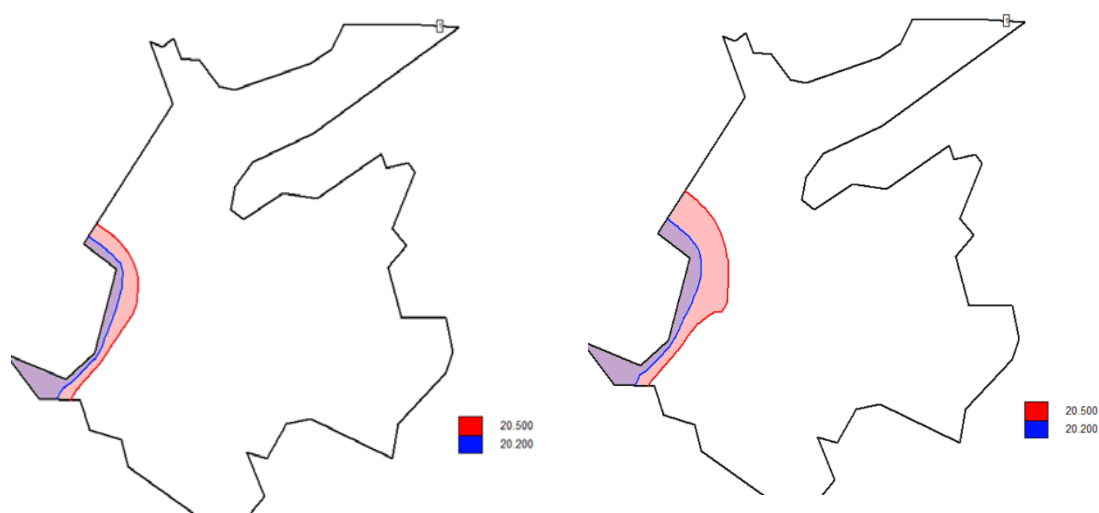
Συγκρίνοντας τις ξηρές περιόδους μεταξύ των ετών 2015-2049, γίνεται φανερή η διαφορά μεταβολής του υδραυλικού ύψους του υπόγειου νερού, και η εξάπλωση της υφάλμυρης ζώνης προς το εσωτερικό της λεκάνης (Εικόνες 1,3). Συγκρίνοντας τις υγρές περιόδους, παρατηρείται πολύ μικρή μεταβολή, που δε φαίνεται να επηρεάζει παρά μόνο οριακά το πηγάδι W8 που βρίσκεται πλησιέστερα της ακτογραμμής.

6.4. Σενάριο 4

Στο 4^ο σενάριο εξετάζονται δύο περιπτώσεις μηδενισμού των αντλήσεων. Αρχικά, μελετάται το σενάριο μηδενισμού όλων των αντλήσεων που χρησιμοποιούνται για άρδευση, καθώς και όλων των γεωτρήσεων πλην της βασικής G14. Έπειτα, μελετάται το σενάριο μηδενισμού όλων των αντλήσεων στη λεκάνη, για όλες τις περιόδους. Με αυτόν τον τρόπο θα γίνει εμφανής και η φυσική επίδραση της θάλασσας στον κόλπο. Οι τιμές της βροχόπτωσης και της τροφοδοσίας παραμένουν ίδιες με των προηγούμενων σεναρίων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου για το πρώτο υποσενάριο, παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.6.



Εικόνα 6.6 Απεικόνιση της μεταβολής του υδραυλικού ύψους που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης. Κάθε κυανή ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος, όπως προκύπτει από τη διορθωμένη εξίσωση Ghyben-Herzberg. Κάθε κόκκινη ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, όπως προκύπτει από τη γνωστή εξίσωση Ghyben-Herzberg. Στην εικόνα αριστερά, απεικονίζονται τα υδραυτικά ύψη για την ξηρή περίοδο 2040, ενώ δεξιά, απεικονίζονται τα υδραυτικά ύψη την ξηρή περίοδο 2049.



Εικόνα 6.7 Απεικόνιση της μεταβολής του υδραυλικού ύψους που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης. Κάθε κυανή ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος, όπως προκύπτει από τη διορθωμένη εξίσωση Ghyben-Herzberg. Κάθε κόκκινη ζώνη αντιπροσωπεύει το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης, όπως προκύπτει από τη γνωστή εξίσωση Ghyben-Herzberg. Στην εικόνα αριστερά, απεικονίζονται τα υδραυτικά ύψη για την ξηρή περίοδο 2040, ενώ δεξιά, απεικονίζονται τα υδραυτικά ύψη την ξηρή περίοδο 2049.

Συγκρίνοντας τις Εικόνες 6.6 & 6.7, φαίνεται καθαρά ότι ο μηδενισμός του ρυθμού άντλησης της βασικής γεώτρησης G14, επηρεάζει τη θέση της υφάλμυρης ζώνης στο νότιο παράκτιο τμήμα της λεκάνης. Αυτό εξηγείται από την παρουσία του γεωλογικού σχηματισμού του σχιστόλιθου, που απομονώνει πρακτικά το νότιο από το βόρειο τμήμα του υδροφορέα της λεκάνης. Συνολικά, συμπεραίνεται ότι ο μηδενισμός των αντλήσεων περιορίζει σε μεγάλο βαθμό το πρόβλημα της υφαλμύρισης, όμως πηγάδια που δραστηριοποιούνται πλησίον της παράκτιας ζώνης, έστω και περιστασιακά, βρίσκονται σχεδόν πάντα μέσα στην υφάλμυρη ζώνη.

6.5. Σενάριο 5

Στο σενάριο 5 εξετάζει θεωρητικά τη μεταβολή της θέσης του μετώπου υφαλμύρισης για διαφορετικά σενάρια αύξησης της μέσης στάθμης της θάλασσας.

Η αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας (Sea Level Rise, SLR) μπορεί να αναφέρεται σε παγκόσμιο επίπεδο (Global Mean Sea Level Rise, GMSLR), σε μία συγκεκριμένου εύρους περιοχή (Regional Sea Level, RSL) ή σε τοπικό επίπεδο (Local Sea Level, LSL). Η παγκόσμια μέση στάθμη της θάλασσας έχει αυξηθεί με μέσο ρυθμό 1,7 (1,5-1,9) mm/yr από το 1900 έως το 2010, και με ρυθμό 3,2 (2,8-3,6) mm/yr από το 1993 έως το 2010 (IPCC 2014). Η θερμική διαστολή των ωκεανών και το λιώσιμο των πάγων, είναι παράγοντες που συνεισφέρουν περισσότερο από 80% σε αυτή την αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας. Εντούτοις, η αύξηση σε μία συγκεκριμένη περιοχή, μπορεί να οφείλεται σε διαφορετικούς φυσικούς ή ανθρωπογενείς παράγοντες που λαμβάνουν χώρα τοπικά και επηρεάζουν σε μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό, αναλόγως το σύστημα. Στη μελέτη του (IPCC 2014) αναφέρεται μεταξύ άλλων ανθρωπογενών παραγόντων και η υπεράντληση των υπογείων υδάτων.

Στον Πίνακα 6.7, παρουσιάζονται τέσσερις διαφορετικές προβλέψεις για την παγκόσμια αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας, για την περίοδο 2046-2065 καθώς και για το 2100, οι οποίες βασίζονται:

- Στη θερμική διαστολή των ωκεανών, όπως έχουν υπολογιστεί από κλιματικά μοντέλα,
- Στις συνεισφορές από το λιώσιμο των πάγων,
- Σε μετρήσεις ισοζυγίων μάζας επιφάνειας στην Ανταρκτική και τη Γροιλανδία,
- Στη συνεισφορά των εδαφών στη στάθμη της θάλασσας.

Για κάθε πρόβλεψη, έχει εφαρμοστεί διαφορετικό σενάριο εκπομπών.

Πίνακας 6.7 προβλέψεις για την παγκόσμια αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας, για την περίοδο 2046-2065 και για το 2100. Πηγή: WGI AR5 Summary for Policymakers and Sections 12.4.1, 13.5.1, & 13.5.4.

Σενάριο εκπομπών	Αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας [m]	
	2046-2065	2100
Χαμηλές συγκεντρώσεις (421ppm CO ₂)	0,24 [0,17-0,32]	0,44 [0,28-0,61]
Μετρίως Χαμηλές συγκεντρώσεις (538ppm CO ₂)	0,26 [0,19-0,33]	0,53 [0,36-0,71]
Μετρίως Υψηλές συγκεντρώσεις (670ppm CO ₂)	0,25 [0,18-0,32]	0,55 [0,38-0,73]
Υψηλές συγκεντρώσεις (936ppm CO ₂)	0,29 [0,22-0,38]	0,74 [0,52-0,98]

Λαμβάνοντας υπόψιν κάθε μέση τιμή του Πίνακα 6.7, κατασκευάζεται ο Πίνακας 6.8, όπου έχουν υπολογιστεί τα υδραυλικά ύψη που αντιστοιχούν στο μέτωπο υφαλμύρισης.

Πίνακας 6.8 Διαμόρφωση του υδραυλικού ύψους του υδροφορέα με βάση τη μεταβολή στη μέση στάθμη θάλασσας, για τα έτη 2046-2065 και 2100, και για δύο διαφορετικές εκφράσεις της εξίσωσης Ghyben-Herzberg.

Σενάριο εκπομπών	Υδραυλικό ύψος [m]			
	Ghyben-Herzberg		Διόρθωση Ghyben-Herzberg	
	2046-2065	2100	2046-2065	2100
Χαμηλές συγκεντρώσεις (421ppm CO ₂)	<u>0,5060</u>	0,5110	<u>0,2049</u>	0,2069
Μετρίως Χαμηλές συγκεντρώσεις (538ppm CO ₂)	0,5065	0,5132	0,2052	0,2079
Μετρίως Υψηλές συγκεντρώσεις (670ppm CO ₂)	0,5062	0,5137	0,2051	0,2081
Υψηλές συγκεντρώσεις (936ppm CO ₂)	0,5072	<u>0,5185</u>	0,2055	<u>0,2100</u>

Σημειώνεται, ότι το υδραυλικό ύψος που αντιστοιχεί στο μέτωπο υφαλμύρισης για μέση στάθμη θάλασσας στα 0m, είναι 0,50m ενώ με τη διόρθωση Ghyben-Herzberg προκύπτει 0,20m. Συνεπώς, διαπιστώνεται ότι η μελλοντική άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας, δεν θα επηρεάσει σημαντικά τη θέση της υφάλμυρης ζώνης.

7. Κεφάλαιο 7^ο: Συμπεράσματα και Προτάσεις

Στην παρούσα εργασία μελετάται ο προσχωματικός υδροφορέας της Κοινότητας των Καταπόλων, με στόχο την αναγνώριση της παρούσας και μελλοντικής έκτασης του φαινομένου υφαλμύρισης, καθώς και τη διαμόρφωση εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης, για τη μετρίαση του προβλήματος ρύπανσης. Τα αποτελέσματα μοντελοποίησης της υπόγειας ροής, με κώδικα PTC, δείχνουν ότι υπό τις τρέχουσες συνθήκες άντλησης, η διείσδυση υφάλμυρου νερού θα συνεχίσει να κινείται προς τα ενδότερα της περιοχής μελέτης τους θερινούς μήνες, θέτοντας σοβαρό κίνδυνο για την ποιότητα του υπόγειου νερού που χρησιμοποιείται για ύδρευση και άρδευση. Ως εκ τούτου, κατασκευάστηκαν πέντε σενάρια πρόβλεψης και διαχείρισης του υπόγειου νερού. Ακολουθώντας παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση της υπόγειας ροής, από τη βαθμονόμηση του υδραυλικού ύψους και της συγκέντρωσης των χλωριόντων, και από την εκτέλεση των σεναρίων κλιματικής αλλαγής και διαχείρισης. Στο τέλος του κεφαλαίου, αναφέρονται επιγραμματικά προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

7.1. Συμπεράσματα από την προσομοίωση ροής και της συγκέντρωσης χλωριόντων

- Η προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού στο προσχωματικό κομμάτι των Καταπόλων, έκτασης $1,2\text{km}^2$, ήταν αρκετά ακριβής, για τα υπάρχοντα δεδομένα υδραυλικού ύψους, με συνολική απόκλιση 1m , που θεωρείται αποδεκτή. Μεμονωμένα, οι γεωτρήσεις G14 (βασική γεώτρηση υδροδότησης με πόσιμο νερό) και W9 (γεώτρηση που υπεραντλεί για άρδευση) θεωρείται ότι περιστοιχίζεται από άλλες 4 γεωτρήσεις που δεν έχουν καταγραφεί) φανέρωναν τις μεγαλύτερες αποκλίσεις τιμών πεδίου-μοντέλου, καθώς παρουσίαζαν πολύ χαμηλά υδραυλικά ύψη στο πεδίο, -3m . Ο κώδικας PTC, έδειξε ότι οι γεωτρήσεις που υπεραντλούν, επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό τη διακύμανση του υδραυλικού ύψους, όχι μόνο σε γειτονικές γεωτρήσεις, αλλά σχεδόν σε όλη την έκταση της λεκάνης. Αυτό αποδεικνύει το πόσο ευαίσθητο είναι το σύστημα στους αυξημένους ρυθμούς άντλησης, κυρίως τις θερινές περιόδους. Συγκριτικά με την υδρογεωλογική μελέτη του 1997, αναφέρεται για τη G14 ότι το θέρους παρουσιάζει στάθμη $+2\text{m}$, που δείχνει τη διαφορά στο ρυθμό άντλησης από τότε, που συνάδει με την τουριστική ανάπτυξη του νησιού την τελευταία δεκαετία.
- Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσίασε η απότομη μεταβολή του υδραυλικού ύψους που παρατηρείται ανάμεσα στις γεωτρήσεις G14 και F34. Οι δύο γεωτρήσεις βρίσκονται σε απόσταση 277m . Αξιολογώντας αυτή τη διαφορά, μπορεί να υποτεθεί ότι οφείλεται:
 - Στην ανομοιομορφία του υδροφορέα. Στο μοντέλο που κατασκευάστηκε, έχει γίνει η παραδοχή ομοιόμορφου υδροφορέα αλλουβιακών αποθέσεων με υδραυλική αγωγιμότητα 25m/d , και $5 \cdot 10^{-6}\text{m/d}$ για το στρώμα του σχιστόλιθου. Είναι πιθανή η ύπαρξη φακού υποστρώματος μικρότερης αγωγιμότητας στην περιοχή νότια του σχιστόλιθου, που να συγκρατεί περισσότερο το υπόγειο νερό. Στη μελέτη του 1997, (N. Παπαδόπουλος 1997), αναφέρεται ότι έχουν παρατηρηθεί σε συγκεκριμένα σημεία, ανώτερα τμήματα του σχηματισμού αλλουβίων, με μικρότερη περατότητα απ' ό,τι τα βαθύτερα στρώματα.
 - Σε μη ακριβή μέτρηση του υψομέτρου στο πεδίο. Οι τιμές υδραυλικού ύψους προέκυψαν από την αφαίρεση του υψομέτρου κάθε υδροσημείου

(μετρούμενο από το επίπεδο της θάλασσας) με το βάθος στάθμης του υπόγειου νερού. Μία λανθασμένη μέτρηση, είτε αυτή οφείλεται σε ανακρίβεια του οργάνου, είτε σε σφάλμα του παρατηρητή, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης.

- Συμπεραίνεται, επίσης, ότι η μεγάλη εξάρτηση που παρουσιάζει το σύστημα από το ρυθμό αντλήσεων και την ποσότητα της βροχόπτωσης κάθε χρονική περίοδο, οφείλεται:
 - ο Στη μικρή έκταση της λεκάνης ($1,2\text{km}^2$). Από αυτή την έκταση, οι αλλουβιακές αποθέσεις καταλαμβάνουν μόνο $0,7-0,8\text{km}^2$. Οι γεωτρήσεις και τα πηγάδια άντλησης είναι τοποθετημένα σε κοντινές αποστάσεις μέσα στη λεκάνη, ενώ παράλληλα έχουν καταμετρηθεί 35 πηγάδια.
 - ο Στον αβαθή υδροφορέα. Το πάχος 20m είναι θεώρηση που έγινε για διευκόλυνση στη μοντελοποίηση. Βάσει της υδρογεωλογικής μελέτης του 1997, το πάχος των αποθέσεων εκτιμάται ότι μπορεί να φθάνει και τα 25m κοντά στην ακτή, ελαφρώς μεταβαλλόμενο από θέση σε θέση (Ν. Παπαδόπουλος 1997).
 - ο Στο μικρό συντελεστή αποθηκευτικότητας του υδροφορέα και το μεγάλο ενεργό πορώδες. Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας προέκυψε 3% για το στρώμα των αλλουβιακών αποθέσεων, που υποδεικνύει ότι ο υδροφορέας δεν μπορεί να συγκρατήσει αξιόλογες ποσότητες νερού, σε περιόδους ισχυρών βροχοπτώσεων με αποτέλεσμα, αυτές να χάνονται προς τη θάλασσα. Αντίστοιχα, το ενεργό πορώδες προέκυψε 0,45 από το μοντέλο. Ως συνέπεια, η ποσότητα νερού που κατεισδύει στον υδροφορέα, ρέει με μέση ταχύτητα $0,4\text{m/d}$ το θέρος και $0,5\text{m/d}$ το χειμώνα. Το πρόβλημα της μικρής αποθηκευτικότητας νερού, και της ταχύτατης ροής του, έχει γίνει ήδη εμφανές στο φράγμα εμπλουτισμού των Καταπόλων, χωρητικότητας 120.000m^3 , το οποίο δυσλειτουργεί, καθώς αδυνατεί να εμπλουτίσει τον υδροφορέα από το τέλος της άνοιξης και μετά, λόγω της μεγάλης απώλειας νερού που υφίσταται από τη βάση του (Νόκας 2009).
 - ο Στον ελλιπή σχηματισμό επιφανειακών υδάτων τις θερινές περιόδους. Σύμφωνα με τον (Ν. Παπαδόπουλος 1997), επιφανειακή απορροή αρχίζει να εκδηλώνεται (ανάλογα με το μέγεθος και την ένταση των βροχοπτώσεων του φθινοπώρου) στις αρχές του χειμώνα και εξακολουθεί να υπάρχει συνήθως μέχρι το τέλος Απριλίου με αρχές Μάϊου. Το τμήμα, αυτό της επιφανειακής απορροής είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας τροφοδοσίας της λεκάνης, καθώς κατεισδύει απευθείας στο σύστημα των υπογείων υδάτων με εξαίρεση τις περιπτώσεις ισχυρών βροχοπτώσεων, όπου σημαντικές ποσότητες νερού καταλήγουν στη θάλασσα. Αυτό δικαιολογεί και το μειωμένο συντελεστή κατείσδυσης, που προκύπτει από το μοντέλο, για κάθε χειμερινή περίοδο που παρουσιάζει αυξημένες βροχοπτώσεις. Συνεπώς, η λεκάνη στηρίζεται αποκλειστικά στα αποθέματα υπόγειου νερού, κάθε θερινή περίοδο.
- Η δυσκολία της βαθμονόμησης οφείλεται σε πληθώρα προβλημάτων, τα περισσότερα από τα οποία προέκυψαν από την έλλειψη ή την αναξιοπιστία δεδομένων. Συγκεκριμένα:
 - ο Ως επί το πλείστον, τα πηγάδια της περιοχής είναι ιδιωτικά, γεγονός που καθιστά τη γνώση ακριβούς ημερήσιας άντλησης, στο χρονικό διάστημα 1997-2015, δύσκολη.

- Η έλλειψη δεδομένων για τον ακριβή όγκο συνολικού νερού που τροφοδοτεί την λεκάνη, οδήγησε σε ένα πλήθος από παραδοχές και θεωρήσεις, για τις οποίες είναι δύσκολο να αξιολογηθεί αν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.
- Το γεωλογικό στρώμα των αλλουβιακών αποθέσεων δύναται να παρουσιάζει κατά τόπους μικρούς φακούς από ιλυώδη ή πηλώδη υλικά ή ακόμη και σχιστόλιθου. Αυτό αυξάνει την πιθανότητα σφάλματος στη μοντελοποίηση, καθώς έχει γίνει η παραδοχή ομοιογενούς υδροφορέα με μία τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας σε όλη του την έκταση.
- Στην περιοχή δραστηριοποιούνται περισσότερα πηγάδια από όσα έχουν καταγραφεί. Συνολικά, βάσει μελέτης του ΥΠΕΚΑ (2014) έχουν καταγραφεί στα Κατάπολα 35 πηγάδια ενεργά. Στη μελέτη, έγινε συλλογή και επεξεργασία δεδομένων για 27 πηγάδια και παραμένει άγνωστος ο πραγματικός αριθμός πηγαδιών που δραστηριοποιούνται στην πεδιάδα της τοπικής κοινότητας.
- Η διαρροή του δικτύου ύδρευσης δε λήφθηκε υπόψη στη μοντελοποίηση, διαφορετικά θα λειτουργούσε ως συνθήκη 2^{ου} ή 3^{ου} τύπου. Οι απώλειες που παρουσιάζονται σε όλο το μήκος του δικτύου αγγίζουν το 15%, ποσοστό που θα μπορούσε να θεωρηθεί μετρήσιμο αν ληφθεί υπόψη η σχετικά χαμηλή άντληση νερού για ύδρευση.
- Τέλος, για τη διαδικασία της μοντελοποίησης δεν υπήρχαν δεδομένα για τη χρονική μεταβολή της μέσης στάθμης της θάλασσας, ένας πολύ σημαντικός παράγοντας για τη μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρισης.
- Η προσομοίωση της συγκέντρωσης των χλωριόντων έδειξε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα σε αντιστοιχία με τα υδραυλικά ύψη που αντιστοιχούν στο μέτωπο υφαλμύρισης. Από αυτό συμπεραίνεται ότι η επιλογή της πολυωνυμικής εξίσωσης για την έκφραση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε χλωρίοντα, ήταν επαρκής. Εντούτοις, η συγκεκριμένη εξίσωση είναι πολύ απλουστευμένη και υπενθυμίζεται ότι χρησιμοποιήθηκε λόγω έλλειψης ικανοποιητικού αριθμού δεδομένων συγκέντρωσης χλωριόντων. Δε συνίσταται να χρησιμοποιείται γενικά, για την μετατροπή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε συγκέντρωση χλωριόντων, καθώς η ηλεκτρική αγωγιμότητα δίνει πληροφορία για το σύνολο των ιόντων ενός υδατικού δείγματος (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , και NO_3^-).
- Η εύρεση του μετώπου υφαλμύρισης μέσω του υπολογισμού του υδραυλικού ύψους, είναι ένας έμμεσος τρόπος αναπαράστασης του φαινομένου. Ο κώδικας PTC, εμφανίζει τη θέση του μετώπου, βάσει της εξίσωσης Ghyben-Herzberg, και οριοθετεί την περιοχή που βρίσκεται εντός της υφάλμυρης ζώνης. Όμως, δε λαμβάνει υπόψη το μέτρο της συγκέντρωσης των χλωριόντων σε κάθε σημείο. Η εύρεση του μετώπου, μέσω των παρατηρούμενων συγκεντρώσεων, είναι ένας πιο άμεσος τρόπος αναπαράστασης του φαινομένου, και πιθανότατα πιο ακριβής.
- Ο εμπειρικός συντελεστής διόρθωσης της εξίσωσης Ghyben-Herzberg, αλλάζει τη θέση του μετώπου υφαλμύρισης με διαφορά που γίνεται πιο έντονα παρατηρήσιμη τις θερινές περιόδους και γενικότερα τις περιόδους όπου η βροχόπτωση είναι μειωμένη. Στην παρούσα εργασία, ο συνυπολογισμός του αποδείχτηκε χρήσιμος, στην ακριβέστερη πρόβλεψη της θαλάσσιας διείσδυσης και κατ' επέκταση, στη ρεαλιστικότερη και αποδοτικότερη προσομοίωση και διαχείριση του υδροφορέα.
- Στις υγρές περιόδους, ανάλογα με τη βροχόπτωση, η ζώνη της υφαλμύρισης περιορίζεται κοντά στην ακτογραμμή, ή εξαπλώνεται μόνο προς το βόρειο τμήμα της

περιοχής. Τις ξηρές περιόδους, η θέση της ζώνης μεταφέρεται αρκετά προς το εσωτερικό της περιοχής μελέτης και σε ακραίες περιπτώσεις ξηρασίας φαίνεται να φτάνει στα όρια της περιοχής μελέτης. Αυτή η ακραία συμπεριφορά δύναται να οφείλεται:

- ο Στη μεγάλη εξάρτηση της θέσης της υφάλμυρης ζώνης από τη βροχόπτωση. Στην παρούσα εργασία, η θέση της υφαλμύρισης έχει υπολογιστεί βάσει του υδραυλικού ύψους και το υδραυλικό ύψος, όπως προαναφέρθηκε, αποδεικνύεται ότι επηρεάζεται άμεσα από την ετήσια βροχόπτωση.
- ο Στην υπεράντληση του υδροφορέα τις θερινές περιόδους.
- ο Στη μικρή έκταση της περιοχής μελέτης.
- ο Στην έλλειψη δεδομένων για το τμήμα βόρεια του σχηματισμού του σχιστόλιθου. Η έλλειψη δεδομένων υδραυλικών υψών για το τμήμα περιοχής, βόρεια του σχιστόλιθου, οδήγησε το πρόγραμμα στο να υπολογίσει τα υδραυλικά ύψη, με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής. Κι ενώ είναι γνωστή η έλλειψη υδροφορίας αυτού του κομματιού από την υδρολογική μελέτη του 1997 (Ν. Παπαδόπουλος 1997), εντούτοις, απαιτείται η συλλογή περισσότερης γνώσης, για να διαπιστωθεί ότι το πρόβλημα, γίνεται όντως τόσο οξύ, στο συγκεκριμένο κομμάτι.
- Συνολικά, η μοντελοποίηση του φαινομένου της υφαλμύρισης αποτελεί μία περίπλοκη διαδικασία, καθώς είναι δύσκολο να έχουμε πλήρη και ακριβή εικόνα του υπόγειου υδροφορέα. Τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν είναι:
 - ο Η παρουσία μικρής κλίμακας ετερογενειών στις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα, που είναι πολύ μικρές για να ληφθούν υπόψη από το μοντέλο, αλλά που είναι, επίσης, πιθανό να επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη θαλάσσια διείσδυση.
 - ο Η αλλαγή των υδραυλικών ιδιοτήτων του εδάφους από τη θαλάσσια διείσδυση, που προκαλείται από ανταλλαγή κατιόντων μέσω διάχυσης.
 - ο Το γεγονός ότι το σύστημα μελέτης της ζώνης υφαλμύρισης δε βρίσκεται κάτω από συνθήκες ισορροπίας, το καθιστά δυσκολότερο στη μοντελοποίηση.
 - ο Η κλιματική αλλαγή είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια πώς πραγματικά θα εξελιχθεί στο μέλλον. Ένα μοντέλο, σαν το PTC, που στηρίζει τις προβλέψεις του σε δεδομένα ρυθμών ανατροφοδосίας, και βροχοπτώσεων, είναι δύσκολο να παράγει ακριβείς και μακροπρόθεσμες προβλέψεις της κατάστασης του συστήματος.

7.2. Συμπεράσματα από τα σενάρια πρόβλεψης

- Δεδομένου του ολοένα και αυξανόμενου τουριστικού πληθυσμού, κρίνεται αναγκαία η εφαρμογή ενός πλήρως ελεγχόμενου ρυθμού άντλησης για τις μελλοντικές θερινές περιόδους. Συγκεκριμένα ελέγχθηκε η μείωση του ρυθμού άντλησης για ύδρευση και άρδευση σε ποσοστά 25%, 50% και 90%. Μόνο στο τρίτο σενάριο παρουσιάζεται ικανοποιητική άμβλυνση του προβλήματος, στο νότιο τμήμα της ακτογραμμής, ενώ στο βόρειο τμήμα, αρκετά πηγάδια εξακολουθούν να απειλούνται με υφαλμύριση.
- Στο σενάριο πληθυσμιακής αύξησης, με παράλληλη αδράνεια εφαρμογής εναλλακτικών μέτρων ύδρευσης, προέκυψε έντονη όξυνση του φαινομένου της υφαλμύρισης μέχρι το 2050. Συμπερασματικά, προβλέπεται ότι για τις μελλοντικές περιόδους μειωμένης βροχόπτωσης, όλη η λεκάνη κινδυνεύει από τη θαλάσσια

διείσδυση. Ως εκ τούτου, κρίνεται αναγκαία η μείωση του ρυθμού άντλησης, κυρίως των γεωτρήσεων G14, W9 και των πηγαδιών που βρίσκονται πλησίον αυτών και υπεραντλούν τη θερινή περίοδο.

- Το σενάριο μηδενικής άντλησης στο σύνολο της λεκάνης, για τις θερινές περιόδους, αποτελεί το πιο ελκυστικό από περιβαλλοντικής άποψης, καθώς η θέση της υφάλμυρης ζώνης περιορίζεται πλησίον της ακτογραμμής, και επηρεάζει μόνο ένα πηγάδι άντλησης. Αυτό το σενάριο, όμως δεν είναι ρεαλιστικό αν, τις επόμενες δεκαετίες δεν εφαρμοστούν εναλλακτικά έργα παροχής πόσιμου νερού στην Κοινότητα, με μεγάλη δυναμικότητα, ώστε να μπορούν να εξυπηρετούν τον ολοένα και αυξανόμενο πληθυσμό, κάθε θερινή περίοδο. Συγκεκριμένα, τα έργα αυτά θα πρέπει να μπορούν να τροφοδοτούν με νερό, πάνω από 6000 κατοίκους, μέχρι το θέρος του 2050.
- Σε κάθε περίπτωση, η θέση της υφάλμυρης ζώνης, προκύπτει ότι επηρεάζεται άμεσα από τη βροχόπτωση. Οι ετήσιες βροχοπτώσεις δεν ξεπερνούν τα 400mm. Ακόμη, η εξατμοδιαπνοή είναι σχετικά υψηλή, ενώ η επιφανειακή απορροή συντελείται γρήγορα λόγω της φύσης των γεωλογικών σχηματισμών (σε συμφωνία με τον (Kourmoulis 1983)). Συνεπώς, η επίδραση της κλιματικής αλλαγής στη ζώνη υφαλμύρισης, θα γίνει εμφανής στην περιοχή μελέτης, ακόμη και στο σενάριο μηδενισμού όλων των αντλήσεων, για κάθε περίοδο χαμηλής ή μηδενικής βροχόπτωσης.
- Στην πλειοψηφία τους, οι χειμερινές περίοδοι παρουσιάζουν τη θέση της υφάλμυρης ζώνης πλησίον της ακτογραμμής, αφήνοντας ανεπηρέαστες τις βασικές γεωτρήσεις και τα πηγάδια άντλησης για άρδευση. Κατ' επέκταση, οι χειμερινές περίοδοι αποτελούν ευκαιρία εκμετάλλευσης της αυξημένης τροφοδοσίας της λεκάνης σε νερό, και δημιουργίας υδάτινων αποθεμάτων για τις επόμενες θερινές περιόδους.

7.3. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

- Στην παρούσα εργασία έγινε χρήση του μοντέλου Argus One και του κώδικα PTC για την επίλυση του υδατικού ισοζυγίου και της υφαλμύρισης. Το μοντέλο αυτό υπολόγισε τη θέση της υφάλμυρης ζώνης μέσω του υδραυλικού ύψους, από την εξίσωση Ghyben-Herzberg, κάνοντας θεώρηση απότομης διεπαφής γλυκού-αλμυρού νερού. Αν και έγινε δοκιμή προσομοίωσης με το συντελεστή διόρθωσης που εισήγαγαν οι Pool & Carrera, εντούτοις, αξίζει να διερευνηθεί και η εκδοχή της χρήσης ενός μοντέλου μεταβαλλόμενης πυκνότητας, όπως είναι για παράδειγμα τα: FEFLOW (Diersh, 1998; Dokou & Karatzas, 2012) SEAWAT (Guo & Langevin, 2002), SUTRA (Voss and Souza, 1987), και MODCENS3D (Oude Essink, 1998) . Ακόμη, είναι ενδιαφέρον να εξεταστούν διφασικά μοντέλα, υπό την προϋπόθεση ότι το εύρος της υφάλμυρης ζώνης είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα, όπως είναι τα: SHARP (Essaid, 1990), INTRANS (Bonnet et al., 1974) και MARTHE (Thiery, 1990, 1993). Επιπλέον, θα μπορούσε να εξεταστεί σε σχέση με το PTC, που χρησιμοποιεί πεπερασμένα στοιχεία, ένας αριθμητικός προσομοιωτής που χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές, όπως είναι το Visual MODFLOW (Papadopolou et al. 2009). Η εφαρμογή ενός διαφορετικού μοντέλου προσομοίωσης και σύγκρισής του με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του κώδικα PTC, θα βοηθούσε στην ορθότερη εκτίμηση της καταλληλότητας του συγκεκριμένου μοντέλου, για την προσομοίωση της υφαλμύρισης στη λεκάνη των Καταπόλων. Ακόμη, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε δοκιμαστικά το SWAT για να εκτιμηθεί η κατείσδυση της εδαφικής υγρασίας στο υπέδαφος. Η προσομοίωση του υδατικού ισοζυγίου στην ακόρεστη

ζώνη μπορεί να υπολογιστεί και με πιο εξειδικευμένα προγράμματα, όπως το CLASS U3M-1D.

- Για την βέλτιστη κατανομή των αντλήσεων στη λεκάνη, στην παρούσα μελέτη δοκιμάστηκαν διάφορα σενάρια διαχείρισης σε συνδυασμό με την επιρροή της κλιματικής αλλαγής. Για περεταίρω διερεύνηση, προτείνεται η ανάπτυξη μίας βέλτιστης στρατηγικής διαχείρισης να γίνει με την επιλογή ενός μοντέλου βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με το μοντέλο προσομοίωσης. Τέτοια μοντέλα, έχουν εφαρμοστεί και χρησιμοποιούν γραμμικές μεθόδους, μη γραμμικές μεθόδους ή αλγόριθμους ευριστικής αναζήτησης (Karterakis et al. 2007). Η περίπτωση του μη περιορισμένου υδροφορέα των Καταπόλων είναι μη γραμμικό πρόβλημα. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να δοκιμαστεί κι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO) (Karatzas & Dokou 2015), (Tavoglou et al. 2013). Κάθε πρόταση διαχείρισης, πρέπει να ακολουθείται από μία ανάλυση ευαισθησίας.
- Για την ανίχνευση της ύπαρξης υφαλμύρισης στον παράκτιο υδροφορέα των Καταπόλων, χρησιμοποιήθηκε η έμμεση μέθοδος που λαμβάνει υπόψη τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Προτείνεται, να μελετηθεί η θέση της υφάλμυρης ζώνης με άμεσες μεθόδους, οι οποίες χρησιμοποιούν φυσικές και χημικές μετρήσεις του νερού και του εδάφους. Ως εκ τούτου, κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη ενός οργανωμένου σχεδίου παρακολούθησης των υπογείων υδάτων, μέσα από το οποίο θα εφαρμόζονται συχνότερες δειγματοληψίες και αναλύσεις ποιότητας, θα γίνεται συχνότερη καταγραφή των στοιχείων άντλησης όλων των ενεργών πηγαδιών και γεωτρήσεων της ευρύτερης περιοχής και θα εκπονηθούν νέες γεωλογικές μελέτες, με στόχο την ακριβέστερη εκτίμηση βασικών παραμέτρων, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, η ανομοιογένεια του υδροφορέα, η στρωματογραφία κλπ.

7.4. Προτάσεις διαχείρισης του υπόγειου νερού

- Μια σειρά μέτρων εξοικονόμησης και διαχείρισης πόσιμου νερού, έχουν ήδη προταθεί για την Κοινότητα των Καταπόλων από τις μελέτες των (Ν. Κουρμούλης 1990), (Ν. Κουρμούλης, Π. Παπαπέτρος, Φ. Χαρμανίδης 1992) και (Ν. Παπαδόπουλος 1997). Σε αυτά συμπεριλαμβάνεται:
 - Ο τεχνητός εμπλουτισμός του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού αποβλέπει στη δημιουργία υδάτινων αποθεμάτων για μελλοντική χρήση, στην αναπλήρωση εξαντλημένων υπόγειων υδροφόρων σχηματισμών ύστερα από χρήση τους, στη βελτίωση διαθέσιμων υδάτων υποβαθμισμένης ποιότητας ώστε να είναι δυνατή η χρησιμοποίησή τους, στην εποχιακή μεταβολή των όρων στο υδατικό ισοζύγιο των υδροφόρων σχηματισμών ώστε να είναι δυνατή η απόληψη μεγάλων υδάτινων όγκων τη θερινή περίοδο αιχμής και στην αντιμετώπιση της εισβολής θαλάσσιου νερού στον παράκτιο υπό εκμετάλλευση υδροφόρο σχηματισμό. Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί με την κατασκευή φραγμάτων ανάσχεσης ή με την ανόρυξη γεωτρήσεων και πηγαδιών ή τάφρων. Προτείνεται η βελτίωση του φράγματος εμπλουτισμού των Καταπόλων, χωρητικότητας 120.000m³, το οποίο παρουσιάζει προς το παρόν μεγάλες απώλειες και δεν εξυπηρετεί για την αποθήκευση νερού. Ο εμπλουτισμός με εκροή αστικών λυμάτων, που ανακτώνται από τη μονάδα βιολογικού

καθαρισμού της Κοινότητας δεν προτείνεται, για λόγους ασφαλείας, οικονομίας αλλά και για κοινωνικούς λόγους.

- Η κατασκευή στεγανών υπόγειων διαφραγμάτων αφ' ενός μεν για τη μείωση ή και το μηδενισμό της υπόγειας απορροής προς τη θάλασσα και αφ' ετέρου για την παρεμπόδιση της υφαλμύρισης από τη διείσδυση της θάλασσας. Για την υλοποίηση αυτής της ιδέας, πρέπει να ληφθεί υπόψη το μήκος της ακτογραμμής της λεκάνης των Καταπόλων, που είναι περίπου 730m.
- Η κατασκευή έργου ανάσχεσης μικρής κλίμακας, της ροής του επιφανειακού νερού στην έξοδο του μικροχειμάρρου, στη βόρεια υπολεκάνη Καταπόλων (Ξυλοκερατίδι) για την αύξηση του ποσοστού κατείσδυσης στην εξεταζόμενη υπολεκάνη, σε περιόδους ραγδαίων βροχοπτώσεων.
- Η διάνοιξη μιας σειράς από γεωτρήσεις στο σχηματισμό του φλύσχη, οι οποίες θα μπορούν να χρησιμοποιούνται ως εφεδρεία, σε περιόδους εξαιρετικής ανομβρίας.
- Η συλλογή ομβρίων υδάτων σε στέρνες. Προτείνεται ως μία παραδοσιακή, οικολογική και οικονομική λύση για την εξασφάλιση νερού για άρδευση. Ωστόσο, δεν μπορεί να σταθεί από μόνη της ως αποκλειστική λύση, λόγω της στοχαστικότητας των βροχοπτώσεων, καθώς μέρος των αναγκών που καλύπτεται το χειμώνα, δε δύναται να καλυφθεί το καλοκαίρι.
- Ανεξάρτητα από τις ήδη προτεινόμενες μεθόδους βελτίωσης της ποιότητας και της ποσότητας του υπόγειου νερού, μέσα από την παρούσα μελέτη προτείνεται μία ορθολογική διαχείριση του υπόγειου νερού, με περιοδική παύση των αντλήσεων για άρδευση και ύδρευση. Συγκεκριμένα, προτείνεται, για κάθε θερινή περίοδο, να μηδενίζονται οι αντλήσεις για άρδευση και να ελαχιστοποιούνται ή να μηδενίζονται εξίσου, οι αντλήσεις για ύδρευση. Η αναπλήρωση του νερού για άρδευση μπορεί να γίνεται με συνδυασμό των μεθόδων που προτάθηκαν παραπάνω. Η αναπλήρωση του νερού για ύδρευση κρίνεται αναγκαίο να γίνεται με αφαλάτωση.
- Ως η πλέον ελπιδοφόρα μέθοδος ανεξάντλητης παραγωγής πόσιμου νερού, που προτείνεται στην παρούσα μελέτη, είναι η αφαλάτωση του θαλασσινού ή του υφάλμυρου νερού. Ήδη από το 1992, έχουν κατασκευαστεί στις Κυκλάδες μονάδες αφαλάτωσης αντίστροφης ώσμωσης σε νησιά όπως η Σύρος, η Σχοινούσα, η Μύκονος, η Πάρος, η Τήνος, η Σαντορίνη και η Μήλος. Οι πιο σημαντικοί προβληματισμοί που αφορούν τη μονάδα αφαλάτωσης σε σχέση με το περιβάλλον, που θα πρέπει να μελετηθούν προσεκτικά σε μελλοντικές εργασίες είναι η χωροθέτηση της μονάδας, η διάθεση της άλμης, η ενεργειακή της αυτονομία και το κόστος (αρχικής επένδυσης, λειτουργίας & συντήρησης, παραγόμενου νερού). Η υλοποίηση της ιδέας της αφαλάτωσης εγγυάται και την ανεξαρτητοποίηση της Κοινότητας από το εμφιαλωμένο νερό, η τιμή του οποίου, από διεθνή εμπειρία, δείχνει ότι είναι 500-1000 φορές μεγαλύτερη από την τιμή του νερού του δικτύου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξένη Βιβλιογραφία

Anderson, M.P. & Woessner, W.W., 2002. *Applied Groundwater Modeling*, Elsevier. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080886947500092> [Accessed September 14, 2015].

Ackoff Russell L., 1962. *Scientific Method: optimizing applied research decisions*, Wiley: New York

Atekwana E. A., Rowe R. S., Werkema D.D, Legall F. D., 2004. The relationship of total dissolved solids measurements to bulk electrical conductivity in an aquifer contaminated with hydrocarbon. *Journal of Applied Geophysics*, pp. 281-294

Bear, J. & Cheng, A.H.-D., 2010. *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York

Bear, J. & Dagan, G., 1964. Some exact solutions of interface problems by means of the hodograph method. *Journal of Geophysical Research*, 69(8), pp.1563–1572. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/JZ069i008p01563> [Accessed September 16, 2015].

Bobba, A., 2002. Numerical modelling of salt-water intrusion due to human activities and sea-level change in the Godavari Delta, India. *Hydrological Sciences*, pp. 67-80.

Charmonman, S., 1965. A solution of the pattern of fresh-water flow in an unconfined coastal aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 70(12), pp.2813–2819. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/JZ070i012p02813> [Accessed September 16, 2015].

Chu, T.W. & Shirmohammadi, A., 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the Piedmont physiographic region of Maryland. *Transactions of the ASAE*, 47(4), pp.1057–1073. Available at: <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=16036529> [Accessed September 14, 2015].

Cox, R. A., Culcin F. & Riley J., 1967. The electrical conductivity/chlorinity relationship in natural seawater. *Deep Sea Research*, pp. 203-220.

Custodio, E., 1997. Groundwater quantity and quality changes related to land and water management around urban areas: blessings and misfortunes. *Groundwater in the Urban Environment Problems, Processes and Management*, pp. 11-22.

Dagan, G. & Bear, J., 1968. Solving The Problem Of Local Interface Upconing In A Coastal Aquifer By The Method Of Small Perturbations. *Journal of Hydraulic Research*, 6(1), pp.15–44. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00221686809500218> [Accessed September 15, 2015].

Dokou, Z. & Karatzas, G.P., 2012. Saltwater intrusion estimation in a karstified coastal system using density-dependent modelling and comparison with the sharp-interface approach. *Hydrological Sciences Journal*, 57(5), pp.985–999.

Du Commun J., 1828. On the cause of freshwater springs. *American Journal of Science*, 14, pp. 174-176

Essaid, H. I., 1990. The computer model SHARP, a quasi-three-dimensional finite-difference model to simulate freshwater and saltwater flow in layered coastal aquifer systems. U.S. Geological Survey ; Books and Open-File Reports Section, Water-Resources Investigations

Frank J. Millero, Feistel R., Wright D.G., McDougal T.J, 2008. The composition of Standard Seawater and the definition of the Reference-Composition Salinity Scale. *Deep Sea research*, pp. 50-72.

Frind, E.O., 1982. Simulation of long-term transient density-dependent transport in groundwater. *Advances in Water Resources*, 5(2), pp.73–88. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0309170882900495> [Accessed September 16, 2015].

Gantt, B. & Meskhidze, N., 2013. The physical and chemical characteristics of marine primary organic aerosol. *Atmospheric Chemistry and Physics* , p. 3979–3996.

Ghyben, W.B., 1889. Notes on the probable results of well drilling near Amsterdam (in Dutch). *Tijdschrift van het KoninkHjk*, 21.

Glover, R.E., 1959. The pattern of fresh-water flow in a coastal aquifer. *Journal of Geophysical Research*, 64(4), pp.457–459. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/JZ064i004p00457> [Accessed September 16, 2015].

Guo, Weixing, and Langevin, C.D. 2002. User's guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density ground-water flow: U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations Book 6, Chapter A7, 79 p.

Gupta, H.V., Sorooshian, S. & Yapo, P.O., 1999. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 4(2), pp.135–143. Available at: [http://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1999\)4%3A2\(135\)](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4%3A2(135)) [Accessed July 21, 2015].

Henry, H.R., 1959. Salt intrusion into fresh-water aquifers. *Journal of Geophysical Research*, 64(11), pp.1911–1919. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/JZ064i011p01911> [Accessed September 16, 2015].

Herzberg, B., 1901. Die WasserversQrgung einiger Nordseebader. *J. Gasbeleuchtung und Wasserversorgung*, 44, pp.815–819,842–844.

Hubbert, M.K., 1940. The Theory of Ground-Water Motion. *The Journal of Geology*, 48(8), pp.785–944. Available at: http://www.jstor.org/stable/30057101?seq=1#page_scan_tab_contents [Accessed September 16, 2015].

IPCC, 2014. *Climate Change 2014 Impacts, Adaptation, and Vulnerability Part A: Global and Sectoral Aspects, Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* V. R. B. Christopher B. Field, ed., New York, NY 10013-2473, USA: Cambridge University Press.

- Jakovovic, D., Werner, A.D. & Simmons, C.T., 2011. Numerical modelling of saltwater up-coning: Comparison with experimental laboratory observations. *Journal of Hydrology*, 402(3-4), pp.261–273. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.021>.
- J. Bear, A. Cheng A. H.-D., Sorek S., Ouazar D., Herrera I., 1999. *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers-Concepts, Methods and Practices*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Karatzas, G.P. & Dokou, Z., 2015. Optimal management of saltwater intrusion in the coastal aquifer of Malia, Crete (Greece), using particle swarm optimization. *Hydrogeology Journal*. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s10040-015-1286-6>.
- Karterakis, S.M. et al., 2007. Application of linear programming and differential evolutionary optimization methodologies for the solution of coastal subsurface water management problems subject to environmental criteria. *Journal of Hydrology*, 342(3-4), pp.270–282.
- Kashef, A.-A.I., 1970. Model studies of salt water intrusion. *Journal of the American Water Resources Association*, 6(6), pp.944–967. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1752-1688.1970.tb01653.x> [Accessed September 15, 2015].
- Knudsen, M., 1901. *Hydrographical tables*. G. E. C. Gad, Copenhagen: s.n.
- Kopsiaftis, G., Mantoglou, a. & Giannouloupoulos, P., 2009. Variable density coastal aquifer models with application to an aquifer on Thira Island. *Desalination*, 237(1-3), pp.65–80. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2007.12.023>.
- Kourmoulis, N.E., 1983. Υδρογεωλογική Έρευνα Κυκλάδων II Αμργός. *Υδρολογικές και υδρογεωλογικές έρευνες*, 35, pp.1–27.
- Lee, C.-H. & Cheng, R.T.-S., 1974. On seawater encroachment in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 10(5), pp.1039–1043. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/WR010i005p01039> [Accessed September 16, 2015].
- Lewis, E. & Schwartz, S., 2004. *Sea Salt Aerosol Production: Mechanisms, Methods, Measurements, and Models.*, Washington, DC: American Geophysical Union.
- Meehl G.A, Washington W. M., Collins W.D., Arblaster J. M., Buja L. E., Strand W. G., Teng H., 2005. How Much More Global Warming and Sea Level Rise?. *Science*, pp. 1769-1772.
- Meisler H., Leahy P. P., Knobel L.L, 1984. *Effect of eustatic sea-level changes on saltwater-freshwater in the Northern Atlantic Coastal Plain.* , Reston, Virginia: s.n.
- Millero, F. J., 1974. The Physical Chemistry of Seawater. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 2, p. 106.
- Mimura N, Nurse L., McLean R., Agard J., Briguglio L., Lefale P., Payet R., sem G. 2007. Small islands. Climate change 2007:.. *Cambridge University Press*, pp. 687-716.
- Moriasi, D. & Arnold, J., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ...*, 50(3), pp.885–900. Available at: <http://swat.tamu.edu/media/1312/moriasimodeleval.pdf>.

Mualem, Y., 1973. Interface refraction at the boundary between two porous media. *Water Resources Research*, 9(2), pp.409–414. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/WR009i002p00409> [Accessed September 16, 2015].

Mualem, Y. & Bear, J., 1974. The shape of the interface in steady flow in a stratified aquifer. *Water Resources Research*, 10(6), pp.1207–1215. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/WR010i006p01207> [Accessed September 16, 2015].

Nash, J.E. & Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), pp.282–290. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556> [Accessed July 22, 2014].

Oude Essink, G., 1999. Impact of sea level rise in the Netherlands. In *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers—Concepts, Methods, and Practices*. Στο: The Netherlands: Kluwer Academic Publishers., pp. 507-530.

Papadopoulou, M.P., Varouchakis, E. a. & Karatzas, G.P., 2009. Simulation of complex aquifer behavior using numerical and geostatistical methodologies. *Desalination*, 237(1-3), pp.42–53. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2007.12.021>.

Papadopoulou, M.P., Varouchakis, E. a. & Karatzas, G.P., 2010. Terrain Discontinuity Effects in the Regional Flow of a Complex Karstified Aquifer. *Environmental Modeling and Assessment*, 15(5), pp.319–328.

Pinder, G.F. Babu D.K., Niemi A., Ahlfeld D. P., Stothoff S.A., Page R. H., 1997. Chemical transport by three-dimensional groundwater flows. , (June).

Pinder, G.F., 2002. *Groundwater Modelling Using Geographical Information Systems*, Wiley, New York.

Pinder, G.F. & Cooper, H.H., 1970. A Numerical Technique for Calculating the Transient Position of the Saltwater Front. *Water Resources Research*, 6(3), pp.875–882. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/WR006i003p00875> [Accessed September 16, 2015].

Pool, M. & Carrera, J., 2011. A correction factor to account for mixing in Ghyben-Herzberg and critical pumping rate approximations of seawater intrusion in coastal aquifers. *Water Resources Research*, 47(5), pp.1–9.

Pope, G.A. and Nelson, R.C., 1978. A chemical flooding compositional simulator. *Soc. Petrol. Eng. J.*, 18(5), 339-354.

Ranjan S. P., Kazama S., Sagamoto M., 2006. Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers. *Journal of Environmental management*, pp. 25-35.

Reddell, D.L. & Sunada, D.K., 1970. Numerical simulation of dispersion in groundwater aquifers. , (June), p.79.

Rumer, R.R. & Shiau, J.C., 1968. Salt Water Interface in a Layered Coastal Aquifer. *Water Resources Research*, 4(6), pp.1235–1247. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/WR004i006p01235> [Accessed September 16, 2015].

Santhi, C., Arnold J. G., Williams J. R., Dugas A., Srinivasan R., Hauck L.M., 2001. Validation of the SWAT model on a large RWER basin with point and not-point sources. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), pp.1169–1188. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x> [Accessed August 27, 2015].

Segol, G. & Pinder, G.F., 1976. Transient simulation of saltwater intrusion in southeastern Florida. *Water Resources Research*, 12(1), pp.65–70. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/WR012i001p00065> [Accessed September 16, 2015].

Sherif, M. & Singh V. , 1999. Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers. *Hydrological Processes. Hydrological Processes*, pp. 1277-1287.

Singh, S.P. & Stammers, W.N., 1989. A potential theory-based finite element algorithm for freshwater recharge of saline aquifers: A sharp interface model. *Water Resources Research*, 25(7), pp.1685–1694. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1029/WR025i007p01685> [Accessed September 16, 2015].

Syzdek L. D., Blanchard D. C., 2012. Concentration of bacteria in jet drops from bursting bubbles. *Journal of Geophysical Research*, pp. 5087-5099.

Tapoglou, E., Trichakis I. C., Dokou Z., Nikolos I. K., Karatzas G.P., 2013. Groundwater level forecasting under climate change scenarios using an artificial neural network trained with particle swarm optimization. *Hydrological Sciences Journal*, 59(April 2014), pp.1225–1239. Available at: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02626667.2013.838005>.

Tolika C.K., P. Zanis, C.A., 2010. Regional Climate Change Scenarios for Greece: Future Temperature and precipitation projections from ensembles of RCMs. *Global NEST Journal*, 14, pp.407–421.

Tolika K., Anagnostopoulou C., Maheras P., V.M., 2008. Simulation of future changes in extreme rainfall and temperature conditions over the Greek area: a comparison of two statistical downscaling approaches. *Global and Planetary Change*, 63, pp.132–151.

Tolika K., Maheras P., Vafiadis M., Flocas Arseni A.-Papadimitriou, 2007. Simulation of seasonal precipitation and raindays over Greece: a statistical downscaling technique based on artificial neural networks (ANNs). *International Journal of Climatology*, 27, pp.861–881.

Unesco, 1981. Background Papers and Supporting Data on the Practical Salinity Scale. *Unesco Technical Papers in marine science*.

Unsal, B., Yagbasan, O. & Yazicigil, H., 2014. Assessing the impacts of climate change on sustainable management of coastal aquifers. *Environmental Earth Sciences*, 72(6), pp.2183–2193. Available at: <http://link.springer.com/10.1007/s12665-014-3130-z>.

Van Liew, Veith T. L., Bosch D. D., Arnold J. G., 2007. Suitability of SWAT for the Conservation Effects Assessment Project: Comparison on USDA Agricultural Research Service Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(2), pp.173–189. Available at: [http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:2\(173\)](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(173)) [Accessed September 14, 2015].

Vazquez-Amáñile G. G. & Engel B. A., 2005. Use of Swat To Compute Groundwater Table Depth and Streamflow in the Muscatatuck River Watershed. *Transactions of the ASAE*, 48(3), pp.991–1003. Available at: <http://elibrary.asabe.org/abstract.asp??JID=3&AID=18511&CID=t2005&v=48&i=3&T=1>.

Voss, C. I., W. R. Souza, 1987. Variable density flow and solute transport simulation of regional aquifers containing a narrow freshwater-saltwater transition zone, *Water Resour. Res.*, 23, 1851-1866.

Werner A. D. & Simmons C.T., 2009. Impact of sea level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Groundwater*, pp. 197-204.

Wooster W. S., Lee A. J., Dietrich G., 1969. Redefinition of salinity. *Limnology and Oceanography* 14, p.437-438..

Xu, M. & Eckstein, Y., 1995. Use of Weighted Least-Squares Method in Evaluation of the Relationship Between Dispersivity and Field Scale. *Ground Water*, 33(6), pp.905–908. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1745-6584.1995.tb00035.x> [Accessed September 19, 2015].

Ελληνική Βιβλιογραφία

Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2014. *Προσχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού διαμερίσματος Νήσων Αιγαίου GR14*. ΥΠΕΚΑ.

Κουρμούλης Ν., Χαρμανίδης Φ., 1990. *Αξιοποίηση και διαχείριση επιφανειακών και υπόγειων νερών στις Κυκλάδες*, Αθήνα.

Κουρμούλης Ν., Π. Παπαπέτρος, Φ. Χαρμανίδης, Α.Β., 1992. *Η συμβολή του ΙΓΜΕ στην επίλυση των υδρευτικών προβλημάτων των νησιών του Ν. Αιγαίου*, Αθήνα.

Μάργαρης, Κ., 2008. *Έρευνα για την αειφόρο ανάπτυξη στο νησί της Αμοργού*, s.l.: Δίκτυο Αειφόρων Νήσων.

Νάνου-Γιάνναρου Α., 1999. Μαθηματική προσομοίωση υπόγειων υδροφορέων: Δυνατότητα εφαρμογής των προδιαγραφών ASTM στον Ελληνικό χώρο. 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ελληνικής Επιτροπής για τη Διαχείριση των υδάτινων Πόρων (ΕΕΔΥΠ), Σύρος, 29-31 Μαΐου.

Νόκας, Η., 2009. *Υπόγειο και Επιφανειακό νερό στην Αμοργό. Αξιολόγηση των Παρεμβάσεων από το 1980 μέχρι σήμερα.*

Παπαδόπουλος Ν., Παρίσης Σ., 1997. *Μελέτη Φραγμάτων Ανάσχεσης σε νησιά των Κυκλάδων- Οριστική Γεωλογική-Υδρογεωλογική Μελέτη*, Αθήνα.

Ρουμελιώτης, Μ., 2001. Μοντελοποίηση και Προσομοίωση.

ΥΠΑΝ, Κ. Υ. Α., 2003-2008. *Μελέτη ανάπτυξης συστημάτων και εργαλείων για τη διαχείριση των υδατικών πόρων των νησιών του αιγαίου*.

Χ. Τσαγγάρης, Θ. Σπύρου, Ι.Δ., 2001. Προσομοίωση. , pp.1–20.

Διαδικτυακές Πηγές

<http://www.openstreetmap.org/>

<http://geodata.gov.gr/>

<http://www.ypeka.gr/>

<http://web.gys.gr/>

<http://www.ypai.gr/>

<http://www.fondriest.com/>

<https://en.wikipedia.org>

<http://climate.nasa.gov/>

<http://iwmi.dhigroup.com/>

<http://www.ipcc.ch/>

<http://www.amorgos.com/>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πίνακας 8.1 Ρυθμοί τροφοδοσίας της λεκάνης σε $[m^3/d]$ ανά περίοδο και για κάθε οριακή συνθήκη 2^{ου} τύπου Β, όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

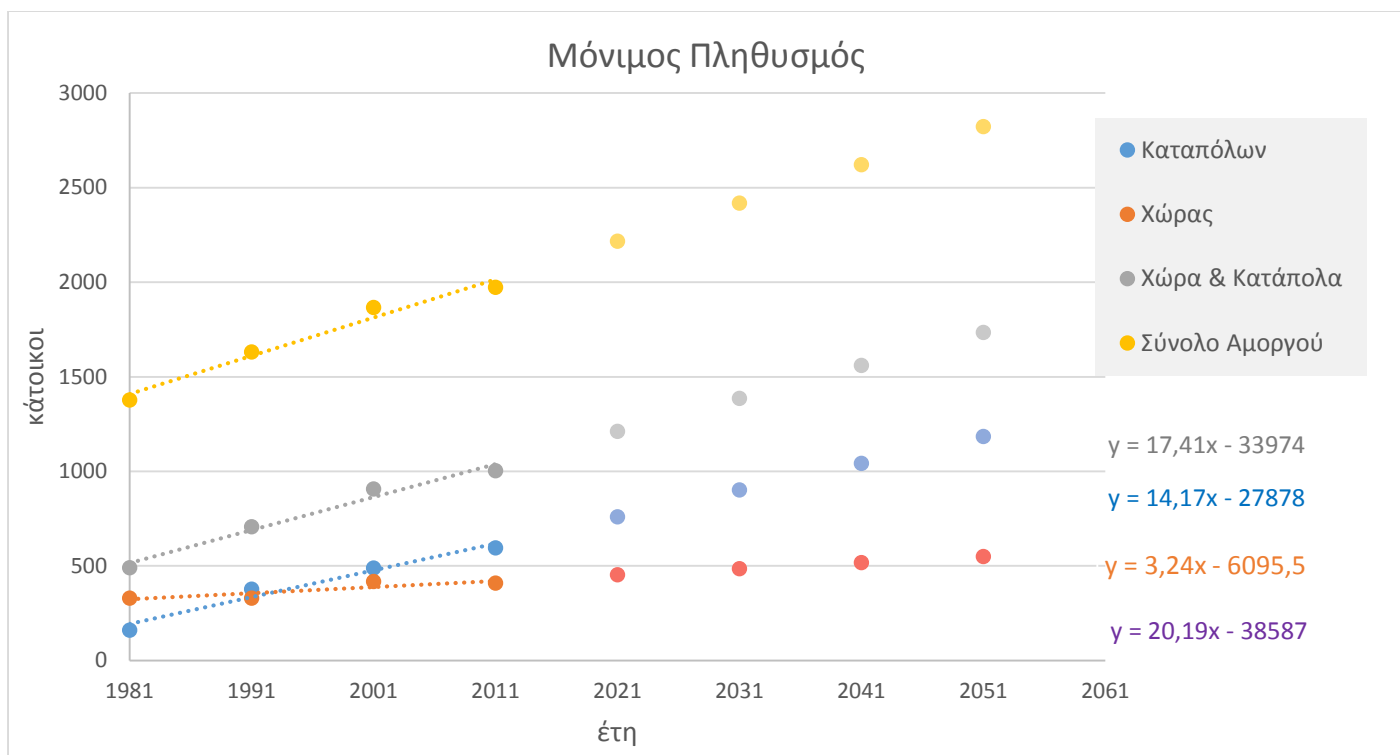
Περίοδος	B2 $[m^3/d]$	B4 $[m^3/d]$	B1 $[m^3/d]$	B3 $[m^3/d]$
1	448	149	149	448
2	369	25	99	148
3	644	215	215	644
4	363	19	77	145
5	241	80	160	241
6	299	20	70	120
7	324	108	216	324
8	338	33	49	123
9	447	170	170	511
10	516	69	138	113
11	794	303	303	908
12	286	29	57	114
13	437	167	167	500
14	302	27	64	113
15	590	157	157	472
16	672	13	90	67
17	609	162	162	487
18	336	29,9	40	120
19	388	19	65	107
20	399	53	107	160
21	894	238	95	715
22	324	43	58	130
23	592	158	63	474
24	408	54	109	163
25	753	201	80	602
26	332	44	71	120
27	536	143	57	429
28	407	54	108	163
29	807	108	43	323
30	302	46	77	116
31	472	126	50	377
32	117	47	21	140
33	333	148	59	444
34	352	47	70	123
35	980	261	26	784

Πίνακας 8.2 Τιμές του συντελεστή κατείδυσης σε ποσοστό % για κάθε χρονική περίοδο από το 1997 ως το 2015, όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Κάθε μονός αριθμός περιόδου αντιστοιχεί σε υγρή, ενώ κάθε ζυγός αριθμός σε ξηρή περίοδο.

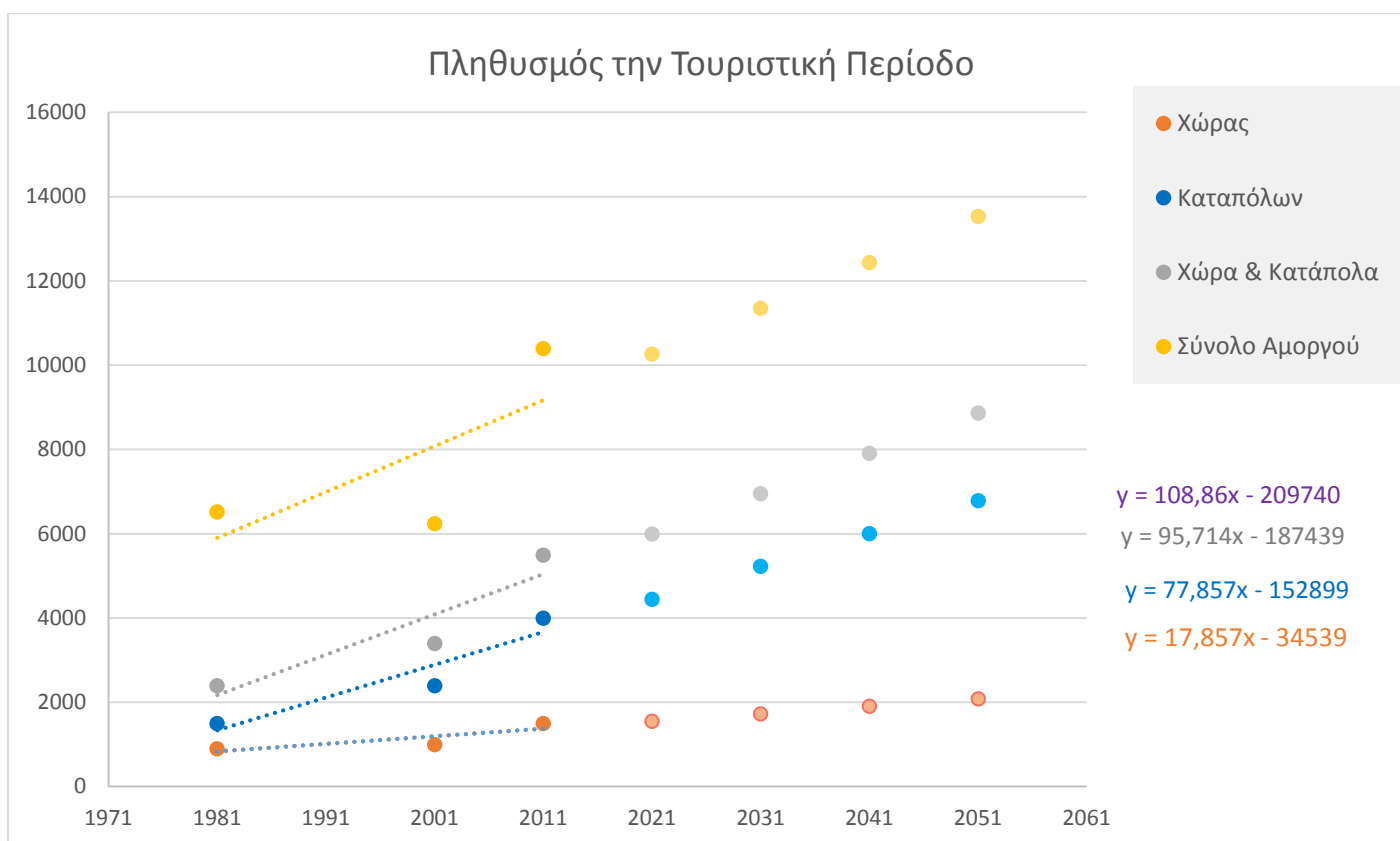
% κατείδυση	Έτη	Περίοδος
10,0	97-98	1
12,0	98	2
10,0	98-99	3
12,0	99	4
10,0	99-00	5
12,0	0	6
10,0	00-01	7
12,0	1	8
10,0	01-02	9
12,0	02	10
10,0	02-03	11
12,0	03	12
10,0	03-04	13
12,0	04	14
10,0	04-05	15
11,0	05	16
10,0	05-06	17
12,0	06	18
4,0	06-07	19
12,0	07	20
10,0	07-08	21
12,0	08	22
10,0	08-09	23
12,0	09	24
10,0	09-10	25
12,0	10	26
10,0	10-11	27
12,0	11	28
10,0	11-12	29
12,0	12	30
10,0	12-13	31
15,6	13	32
10,0	13-14	33
12,0	14	34
12,0	14-15	35

Πίνακας 8.3 Οι ημερήσιοι ρυθμοί άντλησης από κάθε γεώτρηση/πηγάδι, για κάθε περίοδο από το 1997 (περίοδος 1) ως το 2015 (περίοδος 35), όπως προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου.

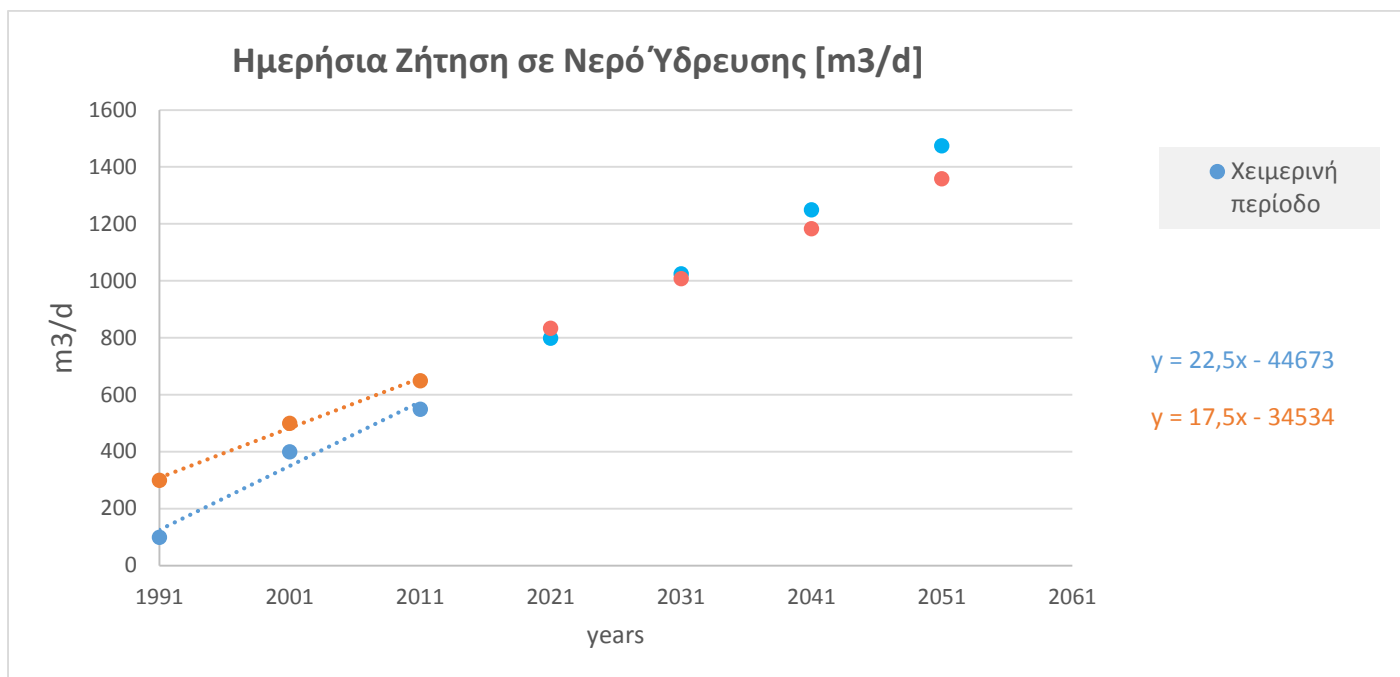
[m3/ d]	Χρονικές Περίοδοι																																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
Π5	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0
F18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Π14	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0	-1	0
Π7	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0	-3	0
F36	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0	-100	0
Π23	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0	-5	0
Π16	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0
Π12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Π19	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0	-7	0
W9	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-990	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900	-1000	-900
Π26	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0	-4	0
Π4	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0	-13	0
W10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



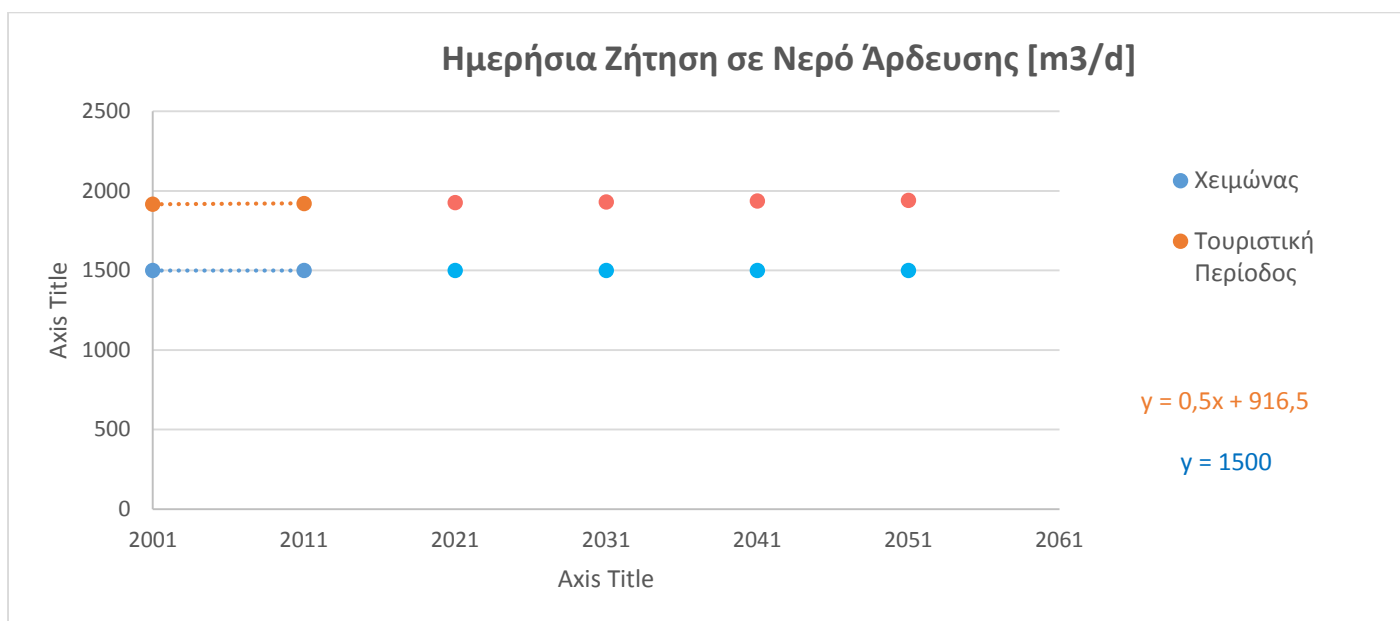
Εικόνα 8.0.1 Πρόβλεψη μόνιμου πληθυσμού μέχρι το 2050



Εικόνα 8.0.2 Πρόβλεψη πληθυσμού την τουριστική περίοδο μέχρι το 2050



Εικόνα 8.0.3 πρόβλεψη ημερήσιας ζήτησης σε νερό ύδρευσης για την Κοινότητα των Καταπόλων, μέχρι το 2050.



Εικόνα 8.0.4 πρόβλεψη ημερήσιας ζήτησης σε νερό άρδευσης, για την Κοινότητα των Καταπόλων, μέχρι το 2050.