

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΒΕΝΕΤΣΑΝΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΑ
ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
ΡΟΗΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΔΗΜΟΥ ΘΕΡΜΑΪΚΟΥ»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
Στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών Γεωλογίας
«Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία»

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2014

ΒΕΝΕΤΣΑΝΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΑ
ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
ΡΟΗΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΔΗΜΟΥ ΘΕΡΜΑΪΚΟΥ»

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του
Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών
στη Γεωλογία και Γεωπεριβάλλον με ειδίκευση στην
«Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία»
Τομέας Γεωλογίας

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Επίκ. Καθηγητής, Βουδούρης Κωνσταντίνος, Επιβλέπων
Επίκ. Καθηγήτρια, Αναγνωστοπούλου Χριστίνα, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής
Επιτροπής
Αναπλ. Καθηγήτρια, Κολοκυθά Ελπίδα, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

© Βενετσάνου Παναγιώτα, 2014

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All right reserved

«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΩΝ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ ΣΤΑ
ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΚΛΙΜΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΩΝ
ΡΟΗΣ: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΔΗΜΟΥ ΘΕΡΜΑΪΚΟΥ»

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν την συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Πρόλογος

Η συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διατριβή εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, με ειδίκευση στην «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία». Επιβλέπων της μεταπτυχιακής διατριβής ήταν ο Επίκουρος Καθηγητής κ. Βουδούρης Κωνσταντίνος. Τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής ήταν η Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Αναγνωστοπούλου Χριστίνα και η Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Κολοκυθά Ελπίδα.

Για την ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής ειδίκευσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Βουδούρη Κωνσταντίνο για την αμέριστη υποστήριξη, τις πολύτιμες συμβουλές, καθώς και για την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης της διατριβής ειδίκευσης. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κ. Αναγνωστοπούλου Χριστίνα. Η καθοδήγηση και οι συμβουλές της ήταν πολύτιμες για τη διεκπεραίωση της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Κολοκυθά Ελπίδα για τα σχόλια και τις επισημάνσεις της στο κείμενο της διατριβής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Διδάκτορα Υδρογεωλογίας κ. Καζάκη Νεραντζή για την απεριόριστη υποστήριξη και εμπιστοσύνη. Η συμβολή, και η βοήθεια του, καθώς και τα στοιχεία που μου παρείχε ήταν καθοριστικά για την υλοποίηση της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τον υποψήφιο Διδάκτορα Υδρογεωλογίας κ. Παύλου Αθανάσιο, για τα στοιχεία που μου παρείχε, από τη διδακτορική του διατριβή, τα οποία συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της διατριβής. Επιπλέον, ευχαριστώ τη Διδάκτορα Γεωθερμίας κ. Παπαχρήστου Μαρία για τις πολύτιμες συμβουλές της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες επιθυμώ να εκφράσω στους γονείς μου και την αδερφή μου, για την ανιδιοτελή αγάπη τους, τη συμπαράστασή τους, καθώς και για τον αγώνα τους, ώστε κάθε μου όνειρο να γίνεται πραγματικότητα. Παράλληλα, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους ανθρώπους που όλα αυτά τα χρόνια είναι δίπλα μου. Τέλος, αφιερώνοντας τη μεταπτυχιακή μου διατριβή στους πολυαγαπημένους μου γονείς και στην αδερφή μου, θέλω να εκφράσω, έτσι, την απέραντη αγάπη και ευγνωμοσύνη μου προς τα πρόσωπά τους.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	8
1.1	Γενικά	8
1.2	Αντικείμενο και σκοπός.....	8
1.3	Εργασίες που πραγματοποιήθηκαν	8
2	Κλιματικές αλλαγές	10
2.1	Γενικά	10
2.2	Αβεβαιότητες στις εκτιμώμενες αλλαγές στον υδρολογικό κύκλο	13
2.3	Αίτια κλιματικών αλλαγών	13
2.4	Κλιματικά μοντέλα	16
2.4.1	Γενικά	16
2.4.2	Μοντέλα γενικής κυκλοφορίας	17
2.5	Σενάρια εκπομπών	19
2.6	Μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας.....	21
2.6.1	Εμπειρικές – Στατιστικές μέθοδοι.....	22
2.6.2	Δυναμικός υποβιβασμός κλίμακας.....	23
2.7	Προβλέψεις κλιματικών μοντέλων	24
2.7.1	Προβλέψεις κλιματικών μοντέλων για την Ελλάδα	26
2.8	Αξιοπιστία κλιματικών μοντέλων.....	27
3	Μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής.....	28
3.1	Γενικά	28
3.2	Ιστορική αναδρομή	29
3.3	Ο κώδικας MODFLOW	32
3.3.1	Μέθοδοι επίλυσης του κώδικα MODFLOW.....	34
3.3.2	Βασικά υποπρογράμματα του κώδικα MODFLOW	37
3.3.3	Φάσεις της προσομοίωσης	40
3.3.4	Πλεονεκτήματα του κώδικα MODFLOW.....	41
4	Ανάλυση περιοχής έρευνας	42
4.1	Γεωγραφική θέση.....	42
4.2	Πληθυσμιακά στοιχεία.....	43
4.3	Μορφολογία.....	43
4.4	Κλίμα	47
4.5	Χρήσεις Γης.....	48
4.6	Υδρολογικό Ισοζύγιο	49
4.7	Παλαιογεωγραφική και γεωτεκτονική θέση της περιοχής έρευνας.....	51

4.8	Γεωλογία της περιοχής μελέτης.....	52
4.9	Τεκτονική.....	55
5	Υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας.....	57
5.1	Υδρογεωλογία.....	57
5.2	Υδραυλικά χαρακτηριστικά.....	59
5.3	Πιεζομετρία.....	61
5.4	Υδατικές ανάγκες.....	62
6	Εφαρμογή κλιματικού μοντέλου RegCM3 στην περιοχή έρευνας	65
7	Εφαρμογή του κώδικα MODFLOW στην περιοχή έρευνας	76
7.1	Εννοιολογικό Μοντέλο	76
7.2	Εισαγωγή δεδομένων	77
7.3	Αποτελέσματα εφαρμογής κώδικα MODFLOW	85
7.4	Εφαρμογή Κλιματικού Μοντέλου RegCM3 στο MODFLOW	91
8	Συμπεράσματα-Προτάσεις	96
8.1	Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής έρευνας	96
8.2	Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου RegCM3.....	97
8.3	Αποτελέσματα εφαρμογής κώδικα MODFLOW	98
8.4	Αποτελέσματα εφαρμογής κλιματικού μοντέλου RegCM3 στον κώδικα MODFLOW	99
8.5	Προτάσεις ορθολογικής διαχείρισης.....	99
9	Βιβλιογραφία	101

Περίληψη

Σκοπός της εργασίας είναι η εκτίμηση των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής στο ισοζύγιο των υπόγειων νερών με τη χρήση κλιματικών μοντέλων και μοντέλων υπόγειας ροής. Για την επίτευξη του στόχου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα κλιματικών μοντέλων σε συνδυασμό με μοντέλα υπόγειας ροής. Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε είναι η περιοχή του δήμου Θερμαϊκού, που αναπτύσσεται στην παράκτια ζώνη του Ανατολικού Θερμαϊκού κόλπου. Κύρια πηγή κάλυψης των υδατικών αναγκών αποτελεί το υπόγειο νερό. Συνεπώς, η συνεχής αυξανόμενη ζήτηση για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της περιοχής έρευνας, έχει ως αποτέλεσμα την υπερεκμετάλλευση των μόνιμων αποθεμάτων του υπόγειου νερού. Για την προσομοίωση της υπόγειας ροής χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας MODFLOW. Για την εφαρμογή του μοντέλου επιλέχθηκε ο ελεύθερος υδροφορέας που αναπτύσσεται στην περιοχή έρευνας. Ο ελεύθερος υδροφορέας αναπτύσσεται στη ψαμμιτομαργαϊκή σειρά, καταλαμβάνει έκταση 137 Km^2 και έχει μέσο πάχος 80 m. Για την εκτίμηση της κλιματικής αλλαγής στην περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε το κλιματικό μοντέλο RegCM3, το οποίο ακολουθεί το σενάριο εκπομπών A1B. Σύμφωνα, με το κλιματικό μοντέλο RegCM3, εκτιμάται ότι κατά την τριακονταετία 2021-2050 η βροχόπτωση θα μειωθεί κατά 4,12%. Η μείωση της βροχόπτωσης αναμένεται να είναι μεγαλύτερη κατά την τριακονταετία 2071-2100 και ανέρχεται στο 22,1%. Η μείωση της βροχόπτωσης που εκτιμάται από το κλιματικό μοντέλο RegCM3, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του εμπλουτισμού του υδροφορέα στην περιοχή έρευνας. Παράλληλα, το ισοζύγιο του υπόγειου νερού είναι ελλειμματικό και παρατηρείται διείσδυση θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα και κατ' επέκταση περαιτέρω ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου τμήματος της περιοχής έρευνας. Συγκεκριμένα, η μείωση της βροχόπτωσης κατά 4,12%, κατά την τριακονταετία 2021-2050, θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εισροών από τη θάλασσα κατά 5,9 % και την αύξηση κατά 2,5% των εισροών από τα Ανατολικά και ΒΑ/κά. Για την τριακονταετία 2071-2100 η μείωση της βροχόπτωσης εκτιμάται 22,1 %, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εισροών από τη θάλασσα κατά 42,7% και κατά 13,3% των εισροών από τα Ανατολικά και ΒΑ/κά.

Abstract

The aim of this study, is the combination of hydrological and climate models in order to assess the hydrodynamic condition of the aquifers in the future. First of all, it was necessary to choose an area of the municipality of Thermaikos, which is extended in the coastal zone of the eastern Theramaikos Gulf. In this study area, the continuous population increase in combination with the intensive cultivation in the region, have resulted in an increase of water demand. The main source of water demand of the study area is the underground water. Therefore, the continuous growing demand to cover the water needs of the study area, has resulted in the overexploitation of the permanent reserves of underground water. The computer program MODFLOW was used, in order to simulate the groundwater flow. It was chosen the unconfined aquifer of the area, for the implementation of the program. The unconfined aquifer is covering an area of 137 Km² and has an average thickness of 80 m. The aquifer is developed within the sandstone – marl series. The model RegCM3, was used for the assessment of climate changes in the research area, which follows the A1B emissions scenario. In accordance with the climate model RegCM3, is estimated that during the period 2021-2050 precipitation will be reduced by 4,12 %. The reduction of precipitation is expected to be greater during the period 2071-2100 and amounts to 22,1%. The decrease of precipitation, which is estimated from the climate model RegCM3, has the effect of reducing the recharge of aquifers in the research area. In the meanwhile, the balance of groundwater is deficient and is observed seawater intrusion into the land and thus further quality degradation of the coastal portion of the study area. Specifically, the reduction of precipitation by 4,12 % during the future period 2021-2050, will result in increase of inflows from the sea by 5,9%, and 2,5% increase in inflows from East and Northeast. For the future period 2071-2100 the reduction of precipitation is estimated at 22,1% having the result of increasing the inflows from the sea by 42,7%, and 13,3 % of inflows from East and Northeast.

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Η παρούσα Διατριβή Ειδίκευσης εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών Εφαρμοσμένης και Περιβαλλοντικής Γεωλογίας, στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

1.2 Αντικείμενο και σκοπός

Από τον 20^ο αιώνα παρατηρούνται κλιματικές αλλαγές, οι οποίες επιφέρουν επιπτώσεις στον υδρολογικό κύκλο. Οι μεταβολές στον υδρολογικό κύκλο, σε συνδυασμό με τη συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση σε νερό για την κάλυψη τόσο των υδρευτικών όσο και των αρδευτικών αναγκών, οδηγούν στην ανάγκη της καλύτερης κατανόησης του μηχανισμού ροής του υπόγειου νερού. Το υπόγειο νερό, είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες του υδρολογικού κύκλου, καθώς αποτελεί την κύρια πηγή κάλυψης των υδατικών αναγκών σε πολλές περιοχές.

Για την εκτίμηση των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών στο υπόγειο νερό επιλέχθηκε η περιοχή του δήμου Θερμαϊκού, του νομού Θεσσαλονίκης. Στην περιοχή έρευνας παρατηρείται συνεχής αύξηση του μόνιμου πληθυσμού, που σε συνδυασμό με την εντατική καλλιέργεια της περιοχής, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των υδατικών αναγκών. Άμεση συνέπεια της συνεχούς αυξανόμενης ζήτησης για την κάλυψη των υδατικών αναγκών του δήμου, είναι η υπερεκμετάλλευση των μόνιμων αποθεμάτων του υπόγειου νερού. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, κρίνεται σκόπιμη η μελέτη των επιπτώσεων των κλιματικών αλλαγών στην περιοχή.

1.3 Εργασίες που πραγματοποιήθηκαν

Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας πραγματοποιήθηκαν οι ακόλουθες εργασίες:

- ✓ Αποδελτίωση προγενέστερων μελετών, εργασιών και επιστημονικών εργασιών σχετικά με την περιοχή έρευνας και το αντικείμενο μελέτης.
- ✓ Μετρήσεις στάθμης υπόγειου νερού

- ✓ Απογραφή υδρογεωτρήσεων
- ✓ Ψηφιοποίηση χαρτών με τη χρήση Γ.Σ.Π. (GIS)
- ✓ Επεξεργασία κλιματικών δεδομένων
- ✓ Επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων του κλιματικού μοντέλου RegCM3 για τη βροχόπτωση.
- ✓ Προσομοίωση της υπόγειας ροής του υδροφορέα με τον κώδικα MODFLOW και εφαρμογή των δεδομένων του κλιματικού μοντέλου RegCM3 στο μοντέλο προσομοίωσης της υπόγειας ροής.

Για τις ανάγκες της εργασίας αξιοποιήθηκαν υδρογεωλογικά-κλιματολογικά-γεωλογικά δεδομένα και στοιχεία από το ερευνητικό πρόγραμμα: «Έρευνα υδατικού δυναμικού του Δήμου Θερμαϊκού, Νομού Θεσσαλονίκης», με επιστημονικό υπεύθυνο τον κ. Βουδούρη Κ., καθώς η συγγραφέας συμμετείχε στην ερευνητική ομάδα. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν και δεδομένα από τη διδακτορική διατριβή του κ. Καζάκη Ν., «Εκτίμηση της διακινδύνευσης του υπόγειου νερού στην εξωτερική ρύπανση: Εφαρμογή στη λεκάνη του Ανθεμούντα».

2 Κλιματικές αλλαγές

2.1 Γενικά

Το τελευταίο χρονικό διάστημα όλο και περισσότερα κράτη βρίσκονται υπό καθεστώς πιέσεων, όσον αφορά τους επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους. Οι πιέσεις οφείλονται στην αστικοποίηση, στην άνοδο του βιοτικού επιπέδου, στην επέκταση των αρδευόμενων εκτάσεων, στην καταστροφή των δασών, στην εντατική χρήση των λιπασμάτων στη γεωργία και στη ρύπανση από τις βιομηχανίες (Kolokytha et al, 2002). Η κλιματική αλλαγή έρχεται να προστεθεί στους παράγοντες που εντείνουν τις πιέσεις που ασκούνται στις διάφορες χώρες.

Από το σύνολο των κοινωνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών επιδράσεων της κλιματικής αλλαγής, οι επιπτώσεις στην ποιότητα και στην ποσότητα των υδατικών πόρων, αποτελούν κρίσιμο σημείο για τον άνθρωπο και την κοινωνία. Τα θέματα που αφορούν το νερό επιδρούν άμεσα σε διάφορους κοινωνικοοικονομικούς και περιβαλλοντικούς τομείς όπως στη δημόσια υγεία, στη γεωργία, στη βιομηχανία.

Ο υδρολογικός κύκλος περιλαμβάνει μια σειρά διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί μεταξύ υδρόσφαιρας, ατμόσφαιρας και ξηράς (Σχήμα 2.1). Σε αυτήν τη φυσική αλυσίδα το νερό εμφανίζεται με όλες τις μορφές: υγρή, στερεή (χιόνι, χαλάζι), αέρια (υδρατμοί). Το σύνολο της ενέργειας που κατευθύνει το νερό προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από τον ήλιο. Επομένως, αλλαγές στην ατμοσφαιρική θερμοκρασία και στο ενεργειακό ισοζύγιο επιφέρουν αλλαγές στον υδρολογικό κύκλο. Η κλιματική θέρμανση, δηλαδή, συνδέεται με μεταβολές στις διαδικασίες του υδρολογικού κύκλου.



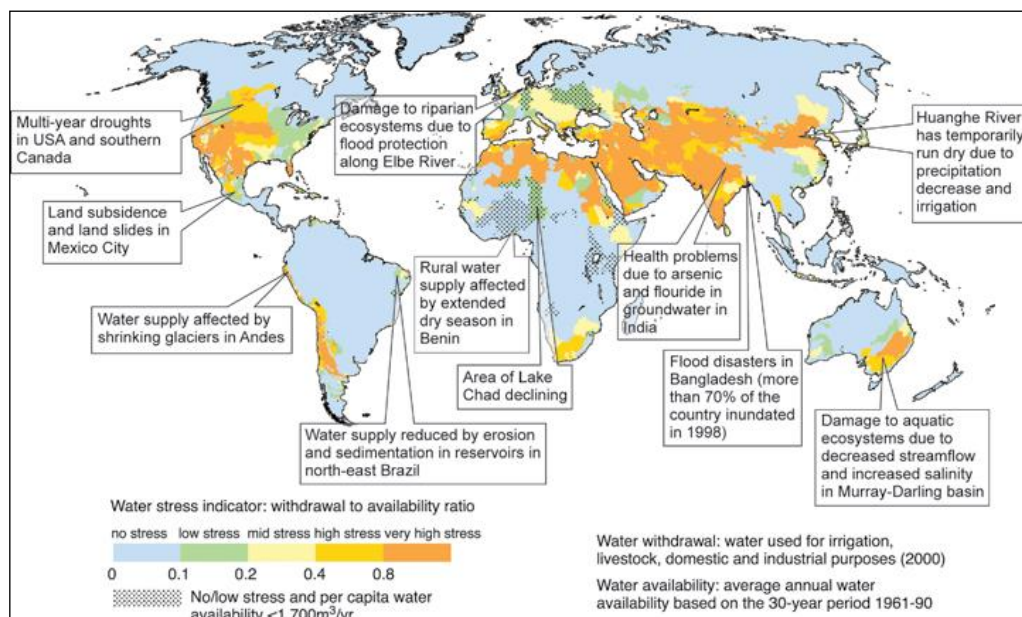
Σχήμα 2.1: Υδρολογικός κύκλος (www.usgs.gov).

Η σχέση της κλιματικής αλλαγής με το νερό είναι πολυδιάστατη και οι μηχανισμοί που τη διέπουν πολύπλοκοι. Οι σημαντικότερες επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στον υδρολογικό κύκλο είναι: μεταβολές στο καθεστώς των βροχοπτώσεων, ενίσχυση της συχνότητας και της έντασης πλημμυρικών φαινομένων και φαινομένων ξηρασίας, αύξηση της εξάτμισης, λιώσιμο πάγων, καθώς και μεταβολές της εδαφικής υγρασίας και της απορροής.

Η αλλαγή του κλίματος οδηγεί σε μεταβολές της έντασης, της συχνότητας και της ποσότητας του νερού. Ένα από τα αποτελέσματα της παγκόσμιας θέρμανσης είναι η αύξηση της εξάτμισης σε περιοχές με επιφανειακά ύδατα. Η αύξηση της εξάτμισης συνεπάγεται την αύξηση της υγρασίας του αέρα. Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα παρατηρήθηκε αύξηση της ποσότητας του νερού στον ατμοσφαιρικό αέρα κατά 5% σε περιοχές πάνω από τη θάλασσα. Η αύξηση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας, της εξάτμισης και της υγρασίας του αέρα έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης των βροχοπτώσεων και τη συχνότερη εκδήλωση ακραίων φαινομένων. Επομένως, ο κίνδυνος εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων είναι μεγαλύτερος (Μπάης και Καρακώστας, 2010).

Από την άλλη πλευρά, σε ξηρότερες περιοχές, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε απώλεια της υγρασίας, επιδεινώνοντας τα φαινόμενα ξηρασίας σε πολλές ευαίσθητες περιοχές, όπως είναι η Νότια και η Βόρεια Αφρική, η Κεντρική Αμερική και η Κεντρική Ασία (Smith, 2006). Ο πληθυσμός που κατοικεί σε περιοχές που αντιμετωπίζουν προβλήματα λειψυδρίας εκτιμάται ότι κυμαίνεται μεταξύ 1.4 και 2.1 δισεκατομμυρίων κατοίκων (IPCC, 2008). Στο Σχήμα 2.2 παρατίθενται οι περιοχές που μαστιίζονται από το πρόβλημα της λειψυδρίας.

Υπό το καθεστώς μεγάλων πιέσεων, βρίσκεται και το υπόγειο νερό. Το υπόγειο νερό αποτελεί έναν πολύ σπουδαίο παράγοντα του υδρολογικού κύκλου, αφού σε πολλές περιοχές αποτελεί την κύρια πηγή κάλυψης των υδατικών αναγκών. Η κυριότερη προέλευση του υπόγειου νερού είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (μετεωρικά νερά). Ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη βροχόπτωση. Εξαιτίας της κλιματικής αλλαγής παρατηρείται μείωση του εμπλουτισμού των υπόγειων νερών (Ekhardt and Ulbrich, 2003).



Σχήμα 2.2: Περιοχές με προβλήματα λειψυδρίας (IPCC, 2008).

Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής παρατηρούνται και στο ύψος της μέσης στάθμης της θάλασσας, η οποία κατά τον 20^ο αιώνα αυξήθηκε. Κατά μήκος των ευρωπαϊκών ακτών, η μέση στάθμη της θάλασσας αυξήθηκε από 80mm έως 300 mm κατά τη χρονική περίοδο 1896 και 1996 (Liebsch et al. 2002). Σύμφωνα με το IPCC 2007, κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα η μέση στάθμη της θάλασσας αναμένεται να αυξηθεί από 0.2 m έως 0.6 m. Μεγαλύτερη αύξηση αναμένεται να σημειωθεί στην Αρκτική. Η αύξηση της μέσης στάθμης της θάλασσας οδηγεί στην ενίσχυση εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων σε παράκτιες και σε πεδινές περιοχές, στην αύξηση της αλμυρότητας των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, καθώς και στην αύξηση της παράκτιας διάβρωσης.

Το ενδιαφέρον των επιστημόνων εστιάζεται στην περιοχή της Αρκτικής. Αυτό συμβαίνει επειδή, στην εν λόγω περιοχή οι επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής είναι εντονότερες σε σχέση με τις άλλες περιοχές του πλανήτη. Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα παρατηρήθηκε αύξηση των Αρκτικών θερμοκρασιών κατά 5°C (10 φορές μεγαλύτερη από τη μέση παγκόσμια θερμοκρασία). Από το 1960 παρατηρήθηκε ελάττωση της παγοκάλυψης στα μεσαία και υψηλά γεωγραφικά πλάτη του Βόρειου Ημισφαιρίου. Οι αλλαγές που λαμβάνουν χώρα στην Αρκτική, επηρεάζουν ολόκληρο τον πλανήτη. Το λιώσιμο των πάγων συμβάλλει στην αύξηση της μέσης θάλασσας.

2.2 Αβεβαιότητες στις εκτιμώμενες αλλαγές στον υδρολογικό κύκλο

Πληθώρα στοιχείων αποδεικνύουν την τρωτότητα των υδατικών πόρων στις κλιματικές αλλαγές. Ωστόσο, υπάρχουν αβεβαιότητες που αφορούν την πλήρη κατανόηση και εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών στον υδρολογικό κύκλο. Οι αβεβαιότητες αυτές συνοψίζονται ως εξής:

- Οι σχέσεις ανάμεσα στον μελλοντικό πληθυσμό, στην κοινωνικοοικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη και στις εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων δεν μπορούν να καθοριστούν πλήρως.
- Οι δυσκολίες που παρατηρούνται στις καταγραφές της βροχόπτωσης. Ειδικότερα, η καταγραφή της βροχόπτωσης από τους δορυφόρους στους ωκεανούς βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης. Αναγκαία κρίνονται, λοιπόν, η διασφάλιση της συστηματικής παρακολούθησης των δορυφόρων και η ανάπτυξη αξιόπιστων στατιστικών στοιχείων για την επαλήθευση των μετρήσεων της βροχόπτωσης (IPCC, 2008).
- Πολλοί υδρομετεωρολογικοί παράγοντες, όπως η απορροή, η εδαφική υγρασία και η πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζονται από εμπειρικές σχέσεις. Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται από παραμέτρους όπως η σχετική υγρασία, η ταχύτητα του ανέμου και η ηλιακή ακτινοβολία. Πολλές από αυτές τις παραμέτρους είτε καταγράφονται για μικρό χρονικό διάστημα, είτε υπάρχει δυνατότητα καταγραφής σε ορισμένες μόνο περιοχές. Το γεγονός αυτό δυσχεραίνει τις εκτιμώμενες αλλαγές στην περίπτωση της ξηρασίας (IPCC, 2008).
- Η έλλειψη δικτύου παρακολούθησης της ροής των ποταμών σε πολλές περιοχές (IPCC, 2008).
- Η μη συστηματική παρακολούθηση της υδροδυναμικής κατάστασης των υπόγειων υδροφορέων σε πολλές περιοχές (IPCC, 2008).

2.3 Αίτια κλιματικών αλλαγών

Η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) ιδρύθηκε το 1988 από τον Παγκόσμιο Μετεωρολογικό Οργανισμό (World Meteorological Organization – WMO) και το Πρόγραμμα Περιβάλλοντος των Ηνωμένων Εθνών (United Nations Environment

Programme – UNEP). Κύριοι στόχοι της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος είναι η μελέτη της υπάρχουσας επιστημονικής γνώσης για την κλιματική αλλαγή και η αξιολόγηση των επιπτώσεων των μεταβολών, οι οποίες προέρχονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Παράλληλα μελετώνται οι πολιτικές που θα ακολουθηθούν για την αντιμετώπιση των ενδεχόμενων κινδύνων.

Το 2007 η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) δημοσίευσε την Τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC – Fourth Assessment Report - 4AR). Το 2014 η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC) θα δημοσιεύσει την Πέμπτη Έκθεση Αξιολόγησης για την Αλλαγή Κλίματος (IPCC – Fifth Assessment Report – 5AR).

Σύμφωνα με το IPCC 2007 ως κλιματική αλλαγή ορίζεται η αλλαγή της παρούσας κατάστασης του κλίματος που μπορεί να προσδιοριστεί (χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους) με αλλαγές στις μέσες καταστάσεις ή και με αλλαγές στη μεταβλητότητα κλιματικών παραμέτρων και οι οποίες παραμένουν για μια εκτεταμένη χρονική περίοδο (δεκαετίες ή περισσότερο). Αναφέρεται σε αλλαγές του κλίματος που οφείλονται στη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος είτε σε ανθρωπογενείς επιδράσεις.

Το κλίμα του πλανήτη παρουσιάζει μεταβλητότητα κατά τη διάρκεια των αιώνων. Πολλοί φυσικοί παράγοντες συνέβαλλαν στις αλλαγές του κλίματος με αποτέλεσμα να παρατηρούνται άλλοτε ψυχρότερες περίοδοι και άλλοτε πιο θερμές (Τολικά, 2009).

Η γεωγραφική θέση των περιοχών σε συνδυασμό με την ορεογραφία, το ανάγλυφο και την ύπαρξη ωκεανού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των κλιματικών τους χαρακτηριστικών. Οι κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών έχουν μεγάλη επίδραση σε μακροχρόνιες αλλαγές του κλίματος στις διάφορες περιοχές.

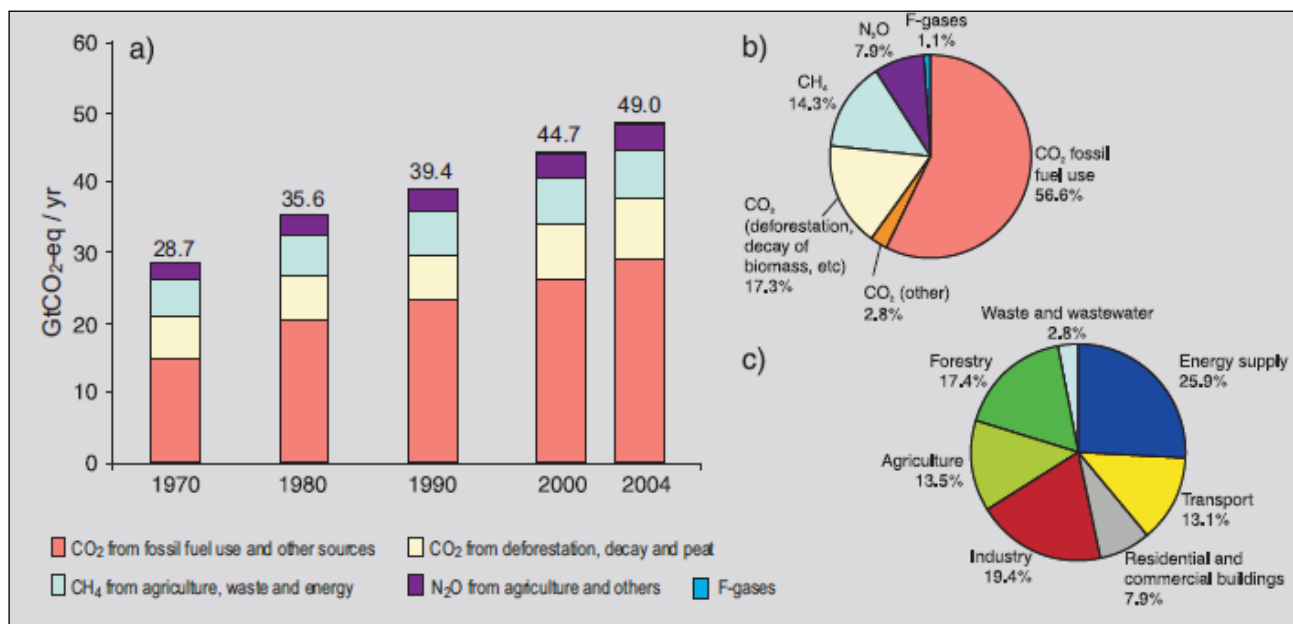
Οι ηφαιστειακές εκρήξεις αποτελούν έναν ακόμα παράγοντα των φυσικών κλιματικών αλλαγών. Πληθώρα ερευνών απέδειξαν τη συσχέτιση μεταξύ μεγάλων ηφαιστειακών εκρήξεων και μικρού χρονικού διαστήματος κλιματικών αλλαγών. Η εκπομπή σημαντικών ποσοτήτων διοξειδίου του θείου κατά τις ηφαιστειακές εκρήξεις ευθύνεται για τη μείωση της θερμοκρασίας. Το διοξείδιο του θείου αντιδρά με τους υδρατμούς και δημιουργεί στην ατμόσφαιρα ένα στρώμα πυκνής φωτεινής

ομίχλης, εμποδίζοντας έτσι ένα μεγάλο κομμάτι της ηλιακής ακτινοβολίας να φθάσει στη γη.

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τη θεωρία του Milutin Milankovitch, καθώς η γη κινείται γύρω από τον ήλιο, περιοδικές μεταβολές στην εκκεντρότητα, στην γωνία της εκλειπτικής και στην περιστροφή του άξονα της γης είναι ικανές να προκαλέσουν μεταβολές στο ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που φθάνει στη γη.

Εκτός των φυσικών παραγόντων που συμβάλλουν στην αλλαγή του κλίματος, σπουδαίο ρόλο διαδραματίζουν και οι ανθρωπογενείς επιδράσεις. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου αποτελεί την κυρίαρχη αιτία της αλλαγής του κλίματος. Το ατμοσφαιρικό θερμοκήπιο (δηλαδή, η απορρόφηση τμήματος της γήινης ακτινοβολίας από τα θερμοκηπικά αέρια και από τα νέφη και η επανεκπομπή προς τη γη) αποτελεί φυσικό φαινόμενο και είναι απαραίτητο για τη διατήρηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης σε τέτοια επίπεδα, ώστε να επιτρέπεται η ζωή των έμβιων όντων πάνω στον πλανήτη. Χωρίς αυτό η θερμοκρασία στην επιφάνεια της γης θα ήταν μικρότερη κατά 30 °C. Τα κυριότερα θερμοκηπικά αέρια είναι οι υδρατμοί, το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο, τα οξείδια του αζώτου και το όζον.

Διάφορες συνιστώσες του κλιματικού συστήματος, όπως οι ωκεανοί και οι έμβιοι οργανισμοί επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων στην ατμόσφαιρα. Παράλληλα, η αύξηση των ανθρωπινων δραστηριοτήτων, η καύση ορυκτών καυσίμων, η καταστροφή των δασών και η προσθήκη αερολυμάτων στην ατμόσφαιρα έχουν ως αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της συγκέντρωσης των θερμοκηπικών αερίων. Η ενίσχυση και η ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου συνεπάγεται την αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης. Αξιοσημείωτο είναι να αναφερθεί ότι κατά τη χρονική περίοδο 1970-2004 το διοξείδιο του άνθρακα αυξήθηκε κατά 70% (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 2.3: Παγκόσμια κατανομή των θερμοκηπικών αερίων (IPCC,2007).

Η αύξηση των θερμοκηπικών αερίων και των αερολυμάτων, οι αλλαγές στην ηλιακή ακτινοβολία και την κάλυψη του εδάφους είναι παράγοντες που επιδρούν στο κλίμα, αφού μεταβάλλουν την ενέργεια ισορροπίας του κλιματικού συστήματος. Σύμφωνα με τους επιστήμονες, παρόλο που διάφοροι παράγοντες επιδρούν στο κλίμα, οι ανθρώπινες δραστηριότητες είναι υπαίτιες για τη θέρμανση που παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια των τελευταίων 50 ετών (IPCC, 2007).

2.4 Κλιματικά μοντέλα

2.4.1 Γενικά

Τα κλιματικά μοντέλα συνιστούν ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία για την εκτίμηση της κλιματικής αλλαγής. Τα κλιματικά μοντέλα αποτελούν μαθηματικές αναπαραστάσεις του φυσικού κλίματος, είναι γραμμένα υπό μορφή προγραμμάτων και εκτελούνται από ισχυρούς υπολογιστές. Τα προγράμματα στηρίζονται σε νόμους της φυσικής, όπως είναι η διατήρηση της μάζας, της ενέργειας, της ορμής, της ποσότητας των υδρατμών, καθώς και σε πειραματικές μετρήσεις και εμπειρικές παρατηρήσεις. Η εξέλιξη των κλιματικών μοντέλων είναι ραγδαία κατά τις τελευταίες δεκαετίες και οφείλεται στην ταχύτατη εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων. Η εξέλιξη των υπολογιστών συντέλεσε στη δημιουργία πιο πολύπλοκων αριθμητικών κλιματικών μοντέλων με μεγαλύτερη χωρική ανάλυση

και με περισσότερες παραμέτρους και διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στο κλιματικό σύστημα. Έτσι, σε συνδυασμό με τα ατμοσφαιρικά κλιματικά μοντέλα, αναπτύχθηκαν τα ωκεάνια και τα χημικά (IPCC, 2007).

Η αξιοπιστία των κλιματικών μοντέλων έγκειται στο φυσικό τους υπόβαθρο και στην αναπαράσταση των παρατηρούμενων κλιματικών αλλαγών του παρελθόντος και του παρόντος. Η αξιοπιστία τους είναι μεγαλύτερη για κάποιες μεταβλητές και (π.χ. θερμοκρασία) και μικρότερη για κάποιες άλλες (π.χ. βροχόπτωση).

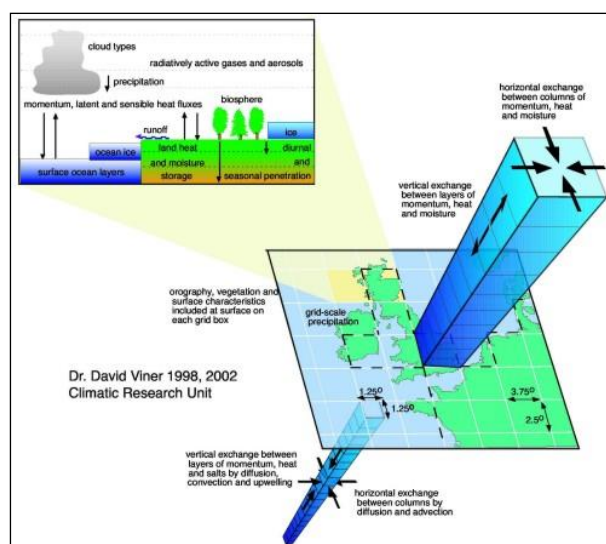
Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη εξέλιξη στην ακρίβεια των εκτιμήσεων και ταυτόχρονα αυξάνεται η δυνατότητα πιο λεπτομερούς πρόβλεψης της μέσης τιμής φαινομένων μεγάλης χρονικής κλίμακας. Τέτοια φαινόμενα είναι η κατανομή της παγκόσμιας θερμοκρασίας, των βροχοπτώσεων και των ανέμων, των ωκεάνιων ρευμάτων και της θαλάσσιας παγοκάλυψης. Τα σφάλματα που παρουσιάζονται αφορούν, κυρίως, στις προβλέψεις μικρής κλίμακας, χωρίς όμως να αποκλείονται και σφάλματα σε προβλέψεις μεγάλης κλίμακας. Για παράδειγμα, το φαινόμενο του El Niño και οι τροπικές βροχοπτώσεις έχουν προσομοιωθεί προσεγγιστικά. Τα περισσότερα από αυτά τα σφάλματα οφείλονται στην αδυναμία αναπαράστασης των κλιματικών διαδικασιών μικρής κλίμακας με ακρίβεια. Το γεγονός αυτό οφείλεται σε περιορισμούς της δυνατότητας των υπολογιστών και σε έλλειψη πειραματικών δεδομένων για κάποιες φυσικές διαδικασίες. Παρόλα αυτά, η αξιοπιστία των προσομοιώσεων μικρής κλίμακας αυξάνεται σταδιακά, καθώς τα μοντέλα βελτιώνονται και αυξάνεται η υπολογιστική ισχύς (IPCC, 2007).

2.4.2 Μοντέλα γενικής κυκλοφορίας

Τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας (General circulation models – GCMs) αποτελούν τα πιο σημαντικά εργαλεία για τη δημιουργία κλιματικών σεναρίων και συνεπώς, για την εκτίμηση της κλιματικής αλλαγής. Είναι αριθμητικά μοντέλα, τα οποία προσομοιώνουν τις φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στην ατμόσφαιρα, στην κρυόσφαιρα, στους ωκεανούς και στην επιφάνεια του εδάφους και στηρίζονται στους νόμους διατήρησης της ατμοσφαιρικής μάζας, της ορμής, της ολικής ενέργειας και της ποσότητας των υδρατμών.

Τα Μοντέλα Γενικής Κυκλοφορίας απεικονίζουν το κλίμα χρησιμοποιώντας ένα τρισδιάστατο πλέγμα σε ολόκληρη την υδρόγειο. Χαρακτηριστικά, έχουν μια οριζόντια ανάλυση μεταξύ 250km και 600km, 10 έως 20 κάθετα στρώματα στην ατμόσφαιρα και μερικές φορές έως και 30 στρώματα στους ωκεανούς (Σχήμα 3.2). Η ανάλυσή τους είναι αρκετά μεγάλη σχετικά με την κλίμακα και τα τοπικά χαρακτηριστικά των περιοχών έκθεσης στις περισσότερες μελέτες επιπτώσεων. Επιπρόσθετα, αρκετές από τις κύριες φυσικές διαδικασίες, όπως οι σχετικές με τα νέφη, τις βροχοπτώσεις και την εξάτμιση, που επιδρούν και ελέγχουν την κλιματική ευαισθησία ή τις απότομες κλιματικές αλλαγές είναι πολύ μικρής χωρικής κλίμακας και δεν μπορούν να προσομοιωθούν επαρκώς από τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, χρησιμοποιείται η τεχνική της παραμετροποίησης, ώστε οι γνωστές τους ιδιότητες να υπολογιστούν κατά μέσο όρο σε μεγαλύτερες κλίμακες (IPCC, 2007).

Ενώ οι διαφορές αυτές είναι συνήθως σύμφωνες με το εύρος της ευαισθησίας του κλίματος, υπάρχει μεγάλο εύρος αβεβαιότητας των τοπικών εκτιμήσεων. Αποτελεί γεγονός ότι ακόμα και όλα μαζί τα διαθέσιμα πειράματα των Μοντέλων Γενικής Κυκλοφορίας δε θα μπορούσαν να εγγραφούν ένα αντιπροσωπευτικό εύρος, ειδικά όσον αφορά τις εκτιμήσεις της μελλοντικής ατμοσφαιρικής σύνθεσης και εξαιτίας άλλων αβεβαιοτήτων που τα μοντέλα αυτά δεν εξετάζουν πλήρως.



Σχήμα 2.4: Σχηματική απεικόνιση των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (IPCC, 2007)

2.5 Σενάρια εκπομπών

Τα κλιματικά μοντέλα χρησιμοποιούν τα σενάρια εκπομπών για τη δημιουργία των μελλοντικών προβολών του κλίματος. Το σύνολο των σεναρίων της ομάδας SRES καλύπτει ένα ευρύ φάσμα των κύριων αιτιών των μελλοντικών εκπομπών από δημογραφικές αλλαγές μέχρι οικονομικές και τεχνολογικές εξελίξεις (Special Report on Emission Scenarios, IPCC, 2000, Nebojsa Nacisenovic and Rob Swart). Σύμφωνα με το IPCC 2007, τα σενάρια εκπομπών (Sres Emission Scenarios) αποτελούν αληθοφανείς αναπαραστάσεις των μελλοντικών εκπομπών που στηρίζονται σε αλληλοσυνδεόμενες υποθέσεις των αιτιών αυτών των εκπομπών. Τα σενάρια εκπομπών διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην αξιολόγηση της παγκόσμιας αλλαγής του κλίματος. Το σύνολο των σεναρίων περιλαμβάνει τις ανθρωπογενείς εκπομπές όλων των θερμοκηπικών αερίων: του διοξειδίου του θείου, του διοξειδίου του άνθρακα, των οξειδίων του αζώτου και των πτητικών οργανικών υδρογονανθράκων. Τα σενάρια εκπομπών διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες (σχήμα 2.5):

A1: Η A1 οικογένεια σεναρίων περιγράφουν έναν μελλοντικό κόσμο με ταχεία οικονομική ανάπτυξη. Ο παγκόσμιος πληθυσμός παρουσιάζει μέγιστο στα μέσα του αιώνα και στη συνέχεια φθίνει. Χρησιμοποιούνται με γοργούς ρυθμούς νέες τεχνολογίες. Οι περιοχές συγκλίνουν μεταξύ τους, λόγω των κοινωνικών και πολιτισμικών διανταλλαγών με αποτέλεσμα την εξάλειψη των διαφορών τους. Το A1 σενάριο, όσον αφορά το ενεργειακό σύστημα, αναπτύσσει τρεις ομάδες με διαφορετικές κατευθύνσεις. Το **A1F1** σενάριο όπου χρησιμοποιούνται τα φυσικά καύσιμα (πετρέλαιο), το **A1T** που χρησιμοποιεί εναλλακτικές πηγές ενέργειας και το **A1B** σενάριο με ισορροπία στη χρήση όλων των πηγών ενέργειας.

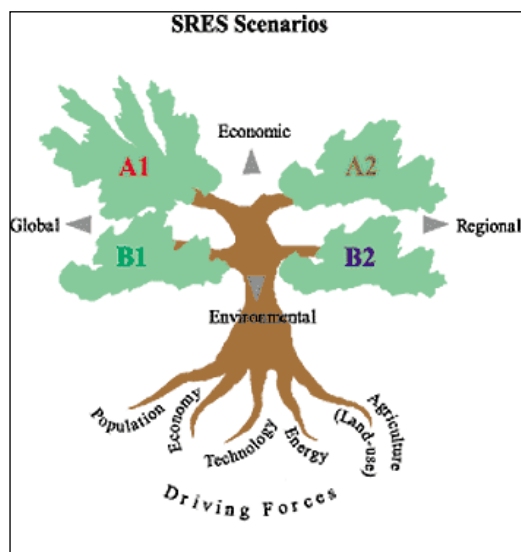
A2: Η A2 οικογένεια σεναρίων περιγράφουν έναν ετερογενή κόσμο. Η κάθε κοινωνία αναπτύσσεται ξεχωριστά διατηρώντας την ταυτότητά της και τα τοπικά χαρακτηριστικά της. Οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις αναπτύσσονται με αργό ρυθμό, ενώ ο πληθυσμός αυξάνει πολύ έντονα. Η οικονομική ανάπτυξη έχει τοπικό προσανατολισμό και οι τεχνολογικές αλλαγές συντελούνται πιο αργά σε σύγκριση με τα άλλα σενάρια.

B1: Στην B1 οικογένεια σεναρίων ο πληθυσμός παρουσιάζει την ίδια πορεία με αυτή του σεναρίου A1 και οι κοινωνίες συγκλίνουν. Νέες οικονομικές δομές

αναπτύσσονται με απώτερο σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος. Γενικά, αναπτύσσονται παγκόσμιες λύσεις για την κοινωνία, την οικονομία και την προστασία του περιβάλλοντος.

B2: Στην B2 οικογένεια σεναρίων η αντιμετώπιση των προβλημάτων στην κοινωνία, την οικονομία και το περιβάλλον έχει τοπικό χαρακτήρα και περιοχική κλίμακα. Ο πληθυσμός αυξάνει με μικρότερο ρυθμό από το A2 σενάριο και η οικονομική ανάπτυξη παρουσιάζει μια μέση εξέλιξη και οι τεχνολογικές αλλαγές είναι πιο βραδείες σε σχέση με τα σενάρια A1 και B1.

Τα σενάρια εκπομπών A2 και A1 αποτελούν απαισιόδοξα σενάρια, αφού προβλέπουν ότι μέχρι το τέλος του αιώνα, οι συγκεντρώσεις του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) θα αυξηθούν στα 815 ppm και η θερμοκρασία θα παρουσιάσει αύξηση από 2,5°C έως 4,5°C σε πλανητική κλίμακα. Αντίθετα, το σενάριο εκπομπών B2 μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα πιο αισιόδοξο σενάριο. Σύμφωνα με το σενάριο B2 η αύξηση της θερμοκρασίας σε πλανητική κλίμακα αναμένεται να είναι από 1,5°C έως 3,0°C (Nakicenovic et al., 2000)



Σχήμα 2.5 Σχηματική απεικόνιση των κλιματικών σεναρίων (SRES, 2000).

Κατά τη δημιουργία ενός κλιματικού σεναρίου υπάρχει μια αλληλουχία από αβεβαιότητες που είναι αναγκαίο να λαμβάνονται υπόψη κατά τη μελέτη και την εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών (IPCC, 2007). Οι κυριότερες αβεβαιότητες είναι οι ακόλουθες:

Αβεβαιότητα στις μελλοντικές εκπομπές: Οι σχέσεις ανάμεσα στον μελλοντικό πληθυσμό, στην κοινωνικοοικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη και στις εκπομπές των θερμοκηπικών αερίων δεν μπορούν να καθοριστούν πλήρως.

Αβεβαιότητα στις μελλοντικές συγκεντρώσεις των θερμοκηπικών αερίων: Η μη ολοκληρωμένη κατανόηση των διαδικασιών του κύκλου του άνθρακα και των χημικών αντιδράσεων, στην ατμόσφαιρα, δημιουργεί αβεβαιότητα στη μετάβαση και μετατροπή των εκπομπών των θερμοκηπικών αερίων σε συγκεντρώσεις τους στην ατμόσφαιρα.

Αβεβαιότητα στην αντίδραση του κλίματος: Η ελλιπής γνώση των μηχανισμών της ατμόσφαιρας δημιουργεί αβεβαιότητες για τις διαδικασίες και τις αντιδράσεις που θα λάβουν χώρα στο μελλοντικό κλίμα και οι οποίες δεν μπορούν να περιγραφούν πλήρως από ένα κλιματικό σενάριο. Αυτό γίνεται αντιληπτό και από το γεγονός ότι τα τωρινά κλιματικά μοντέλα, που περιέχουν διαφορετικές αναπαραστάσεις των κλιματικών συστημάτων, δίνουν και διαφορετική εικόνα των κλιματικών αλλαγών, αν και χρησιμοποιούν τα ίδια σενάρια συγκεντρώσεων για την ίδια μελλοντική περίοδο.

Αβεβαιότητα λόγω της φυσικής μεταβλητότητας: Οι φυσικές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στην ατμόσφαιρα, στους ωκεανούς και στην ξηρά, καθώς και η φυσική μεταβλητότητα του κλίματος θα συνεχιστούν και στο μέλλον. Δεν είναι, όμως, δυνατόν να ειπωθεί με βεβαιότητα αν θα δράσουν παράλληλα ή αντίθετα προς τις κλιματικές αλλαγές λόγω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων.

Αβεβαιότητα στη μετάβαση στο τοπικό κλίμα: Τα μοντέλα γενικής κυκλοφορίας λόγω της μικρής τους ανάλυσης δεν μπορούν να συμπεριλάβουν τα τοπικά χαρακτηριστικά, όπως το ανάγλυφο και την ορεογραφία, επομένως και τις επιδράσεις που θα έχουν τα χαρακτηριστικά αυτά σε μελλοντικές αλλαγές.

2.6 Μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας

Οι μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας (Downscaling Methods) αναπτύχθηκαν με σκοπό την επίλυση του προβλήματος των αδυναμιών των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας, καθώς και την ανάπτυξη πιο αξιόπιστων σεναρίων για το τοπικό κλίμα με υψηλή χρονική και χωρική ανάλυση. Οι μέθοδοι υποβιβασμού κλίμακας διακρίνονται, σε δύο κατηγορίες: στις Εμπειρικές – Στατιστικές (Empirical –

Statistical downscaling methods) και στα Μοντέλα περιοχικής – τοπικής κλίμακας ή Δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας (Model based downscaling methods, Dynamical downscaling).

2.6.1 Εμπειρικές – Στατιστικές μέθοδοι

Σκοπός της στατιστικής μεθόδου υποβιβασμού κλίματος είναι η δημιουργία ενός στατιστικού μοντέλου που θα «μεταφράζει τις ανωμαλίες της ροής μεγάλης κλίμακας σε ανωμαλίες ορισμένων μεταβλητών του τοπικού κλίματος, μέσω της χρήσης της σχέσης των ανεξάρτητων μεταβλητών (predictors) και των εξαρτημένων μεταβλητών (predicants). Οι ανεξάρτητες αφορούν μεταβλητές της μεγάλης κλίμακας κυκλοφορίας, ενώ οι εξαρτημένες αναφέρονται στο τοπικό κλίμα.

Βασικά πλεονεκτήματα των στατιστικών μεθόδων υποβιβασμού κλίμακας είναι ότι στηρίζονται σε πρότυπες και αποδεκτές στατιστικές διαδικασίες, μπορούν να παρέχουν σε τοπική κλίμακα κλιματικές μεταβλητές από τα αποτελέσματα των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας και εύκολα μπορούν να ενσωματωθούν περαιτέρω παρατηρήσεις (Wilby and Wigley, 1997).

Η απαίτηση μακροχρόνιων και αξιόπιστων δεδομένων αποτελεί ένα από τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου υποβιβασμού κλίματος. Επιπλέον, θα πρέπει η σχέση μεταξύ εξαρτημένων και ανεξάρτητων μεταβλητών να είναι ισχυρή, να παραμένει αμετάβλητη στο μελλοντικό χρόνο και να έχουν κατανοηθεί οι φυσικές διεργασίες που συνδέουν τις μεταβλητές.

Ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιούν τα στατιστικά μοντέλα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1) Οι γεννήτριες καιρού – μετεωρολογικών παραμέτρων (Weather Generator). Στηρίζονται σε στοχαστικές διαδικασίες και οι ευρέως χρησιμοποιούμενες είναι οι Αλυσίδες Markov (Markov chain approach) και οι Ακολουθίες (spell length approach).

2) Συνοπτική προσέγγιση – Τύποι Κυκλοφορίας (Weather typing). Χρησιμοποιούνται τύποι κυκλοφορίας ή συνοπτικές καταστάσεις για μια ορισμένη περιοχή και συνεπώς, οι αλλαγές του τοπικού κλίματος εκτιμούνται από τις αλλαγές στη συχνότητα των καταστάσεων αυτών.

3)Εμπειρικές Συναρτήσεις Μετάβασης (Transfer functions). Κύριος στόχος τους είναι η δημιουργία εμπειρικών σχέσεων που συνδέουν ποσοτικά τις ανεξάρτητες και τις εξαρτημένες μεταβλητές μέσω κατάλληλων στατιστικών μεθόδων, όπως είναι η γραμμική και πολλαπλή παλινδρόμηση, η Κανονική Σχετική Ανάλυση, η διαδικασία αποσύνδεσης και η τεχνολογία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

2.6.2 Δυναμικός υποβιβασμός κλίμακας

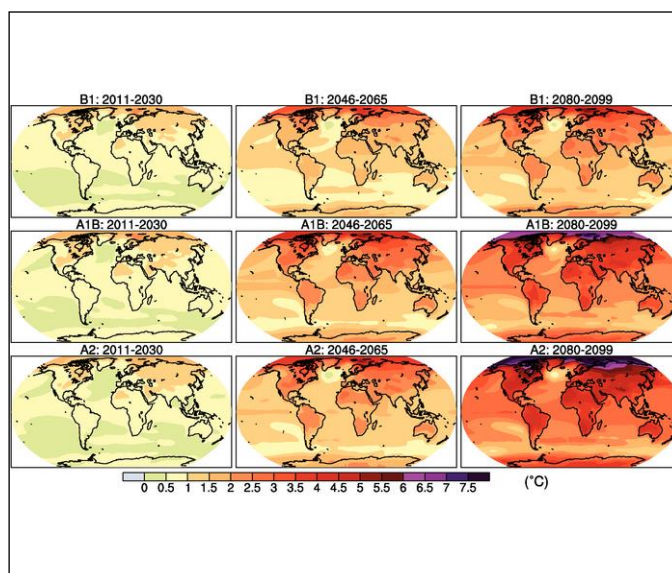
Βασική ιδέα του Δυναμικού υποβιβασμού κλίμακας αποτελεί η εμφύτευση μέσα σε ένα μοντέλο γενικής κυκλοφορίας, άλλων μοντέλων μικρότερης κλίμακας. Τα μοντέλα αυτά είναι γνωστά ως Limited-Area Models (LAMs) ή Regional Climate Models (RCMs).

Τα τοπικής κλίμακας μοντέλα είναι σύνθετα ατμοσφαιρικά ή ωκεάνια μοντέλα για μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή και έχουν ανάλυση 25X25 Km. Τα τοπικής κλίμακας μοντέλα αποτελούν φυσικά μοντέλα μέσα στα οποία περιλαμβάνονται συνιστώσες της ατμόσφαιρας και της επιφάνειας της γης, καθώς επίσης, και αναπαραστάσεις των πιο σημαντικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα μέσα στο κλιματικό σύστημα. Τέτοιες διαδικασίες αποτελούν η νέφωση, η ακτινοβολία, η βροχή, η υγρασία του εδάφους. Επειδή, οι διαδικασίες αυτές λαμβάνουν χώρα σε μικρότερη χωρική κλίμακα από αυτή του μοντέλου, δε μπορούν να αναλυθούν με ακρίβεια και συνεπώς, λαμβάνονται υπόψη με τη βοήθεια των παραμετροποιήσεων.

Τα μοντέλα περιοχικής κλίμακας εξελίσσονται, βελτιώνονται και αναπτύσσονται με γοργούς ρυθμούς και έτσι, αποτελούν το βασικότερο εργαλείο για τη δημιουργία κλιματικών σεναρίων. Παρόλα αυτά παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα. Τα σφάλματα που σημειώνονται, οφείλονται είτε στις παραμετροποιήσεις που πραγματοποιούνται κατά τις διαδικασίες μικρής κλίμακας, είτε σε λάθη εξαιτίας της τραχείας ανάλυσης των μοντέλων γενικής κυκλοφορίας (GCMs). Τέλος, το μεγάλο υπολογιστικό κόστος των μοντέλων περιοχικής κλίμακας και ο αυξημένος υπολογιστικός τους χρόνος προστίθενται στα μειονεκτήματα.

2.7 Προβλέψεις κλιματικών μοντέλων

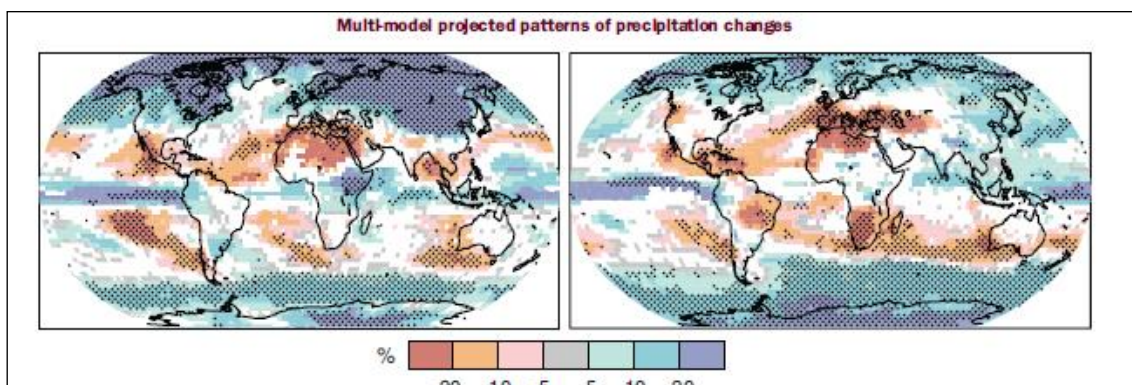
Σύμφωνα με την Τέταρτη Έκθεση Αξιολόγησης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του κλίματος, αύξηση της μέσης πλανητικής θερμοκρασίας του αέρα αναμένεται να σημειωθεί κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη αύξηση προβλέπεται στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη και πάνω από την ξηρά. Ειδικότερα, για την Ευρώπη οι μέσες θερμοκρασίες εκτιμάται ότι θα αυξηθούν με γοργότερο ρυθμό από τη μέση πλανητική θερμοκρασία. Στη Βόρεια Ευρώπη μεγαλύτερη θέρμανση παρατηρείται κυρίως το χειμώνα, ενώ στην περιοχή της Μεσογείου κατά τη διάρκεια των θερινών μηνών. Μικρότερη θέρμανση πρόκειται να εμφανίσουν οι ωκεανοί στα νότια και ο Βόρειος Ατλαντικός (Σχήμα 2.6).



Σχήμα 2.6: Χωρική κατανομή των αλλαγών στη μέση πλανητική θερμοκρασία για τα σενάρια εκπομπών A2, B1 και A1B για τρεις μελλοντικές περιόδους. Οι μεταβολές υπολογίζονται σε σχέση με την περίοδο βάσης 1980-1999 (IPCC, 2007).

Σύμφωνα με τα περισσότερα κλιματικά μοντέλα η βροχόπτωση εκτιμάται ότι θα αυξηθεί πάνω από τον τροπικό Ειρηνικό ωκεανό, σε περιοχές όπου εμφανίζονται τοπικά μέγιστα στο ύψος της βροχής, όπως είναι για παράδειγμα οι μουσωνικές περιοχές, καθώς και στα μεγάλα γεωγραφικά πλάτη. Αντίθετα, μείωση της βροχόπτωσης αναμένεται στις υποτροπικές περιοχές. Στην Ευρώπη η βροχόπτωση ποικίλει από περιοχή σε περιοχή. Συγκεκριμένα, τα κλιματικά μοντέλα προβλέπουν αύξηση των μέσων υψών της βροχόπτωσης στη Βόρεια Ευρώπη και μείωση στη

Μεσόγειο. Γενικά, σε πλανητική κλίμακα οι μέσες συγκεντρώσεις των υδρατμών, η εξάτμιση και η βροχόπτωση προβλέπεται ότι θα παρουσιάσουν αύξηση (Σχήμα 2.7).



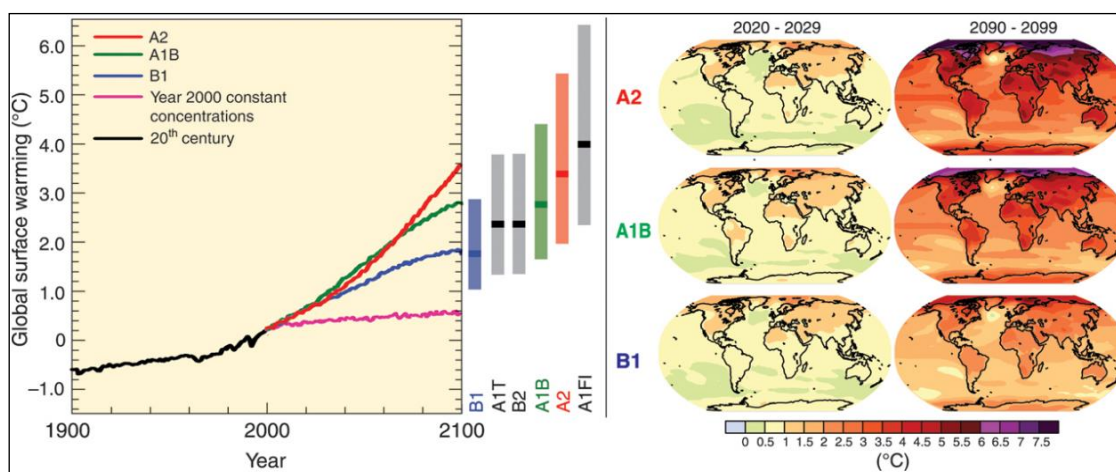
Σχήμα 2.7: Αλλαγές στο καθεστώς βροχόπτωσης για τη χρονική περίοδο 2090-2099 σε σχέση με την περίοδο βάσης 1980-1999 σύμφωνα με το σενάριο εκπομπών A1B για τους μήνες Δεκέμβριο-Ιανουάριο (αριστερά) και Ιούνιο-Αύγουστο (δεξιά) (IPCC, 2007).

Ως το τέλος του 21^{ου} αιώνα, το είδος η ένταση και η συχνότητα των ακραίων καιρικών φαινομένων πρόκειται να μεταβληθούν. Σε περιοχές όπου εκτιμάται αύξηση της μέσης βροχόπτωσης αναμένεται και αύξηση των ακραίων βροχοπτώσεων και αύξηση της πιθανότητας εκδήλωσης πλημμυρικών φαινομένων. Αντίθετα, σε περιοχές όπου η μέση βροχόπτωση θα παρουσιάσει μείωση, εκτιμάται ότι η ξηρασία θα ενταθεί. Τέλος, οι μελλοντικοί τροπικοί κυκλώνες θα γίνουν πιο ισχυροί και θα συνοδεύονται από ανέμους με μεγαλύτερες ταχύτητες και από μεγαλύτερη ένταση βροχοπτώσεων.

Τέλος, η αύξηση της μέσης πλανητικής θερμοκρασίας του αέρα που αναμένεται να σημειωθεί κατά τη διάρκεια του 21^{ου} αιώνα συνεπάγεται τη μείωση του θαλάσσιου πάγου στην Αρκτική και την Ανταρκτική. Στην περιοχή της Αρκτικής αναμένεται η μείωση να επιταχυνθεί. Αύξηση εκτιμάται ότι θα παρουσιάσει και η μέση στάθμη της θάλασσας. Η θερμική διαστολή των ωκεανών και το λιώσιμο των πάγων αποτελούν τα κύρια αίτια της αύξησης της μέσης στάθμης της θάλασσας. Η στάθμη της θάλασσας λόγω της μη ομοιόμορφης αλλαγής της θερμοκρασίας και της αλμυρότητας του νερού, καθώς και των αλλαγών στην ωκεάνια κυκλοφορία δεν αυξάνει ομοιόμορφα (IPCC 2007, Regional Climate Projections).

Για τον προσδιορισμό των συνθηκών του παρόντος κλίματος και για τη σύγκριση τους με τις μελλοντικές συνθήκες, ορίστηκε μια αρχική περίοδος ως περίοδος βάσης. Η περίοδος που χρησιμοποιείται ως περίοδος βάσης στην Τέταρτη

Έκθεση Αξιολόγησης του IPCC είναι η χρονική περίοδος 1980 – 1999, καθώς κατά τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περισσότερα. Στο Σχήμα 2.8 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι εκτιμήσεις των Ατμοσφαιρικών Ωκεάνιων Μοντέλων Γενικής Κυκλοφορίας για την αύξηση της θέρμανσης στην επιφάνεια του εδάφους. Οι γραμμές απεικονίζουν τις πολυμοντελικές μέσες τιμές της θέρμανσης της επιφάνειας του πλανήτη (σύμφωνα με την περίοδο βάσης 1980–1999) σχετικά με τα SRES σενάρια εκπομπών A2, A1B, B1, που παρουσιάζονται ως συνέχειες των προσομοιώσεων του 20^{ου} αιώνα. Οι ράβδοι απεικονίζουν το πιθανό εύρος των SRES σεναρίων για την περίοδο 2090 – 2099 σε σχέση με την περίοδο 1980-1999. Οι εικόνες παρουσιάζουν τις πολυμοντελικές μέσες προβλέψεις για τα SRES σενάρια A2, A1B, B1 για τις δεκαετίες 2020-2029 και 2090-2099.



Σχήμα 2.8: Προβλέψεις κλιματικών μοντέλων (IPCC,2007).

2.7.1 Προβλέψεις κλιματικών μοντέλων για την Ελλάδα

Οι προβλέψεις των κλιματικών μοντέλων για την Ελλάδα δείχνουν μείωση της βροχόπτωσης και παράλληλα, αύξηση των ραγδαίων βροχοπτώσεων κατά τη χειμερινή περίοδο (Tolika et al., 2007, Tolika et al., 2008). Συγκεκριμένα, ως το τέλος του 21^{ου} αιώνα οι χειμώνες εκτιμάται ότι θα γίνουν ξηρότεροι. Σύμφωνα με τα σενάρια εκπομπών A2 και A1B εκτιμάται ότι η μείωση της βροχόπτωσης θα υπερβεί το 30% στη Νότια Ελλάδα. Ωστόσο, το σενάριο εκπομπών B2 εκτιμά ότι η βροχόπτωση θα μειωθεί κατά 15% και σε περιοχές της Βορειοανατολικής Ελλάδας η μείωση αυτή θα είναι μικρότερη. Κατά τους θερινούς μήνες η μείωση της βροχόπτωσης αναμένεται να ξεπεράσει το 60% (Tolika et al., 2012).

Όσον αφορά τη θερμοκρασία αναμένεται να παρουσιάσει αύξηση και ειδικότερα κατά τους θερινούς μήνες (Zanis et al., 2009). Κατά τη χειμερινή περίοδο η θερμοκρασία αναμένεται να αυξηθεί από 3°C έως 4,5°C σύμφωνα με το σενάριο A2, από 3°C έως 4 °C σύμφωνα με το σενάριο A1B και 2,5°C έως 3,0°C σύμφωνα με το σενάριο B2. Η αύξηση της θερμοκρασίας αναμένεται να είναι μεγαλύτερη πάνω από τις ηπειρωτικές περιοχές.

2.8 Αξιοπιστία κλιματικών μοντέλων

Η συμβολή των κλιματικών μοντέλων στην εκτίμηση και στην αξιολόγηση της κλιματικής αλλαγής είναι πολύ σημαντική. Τα κλιματικά μοντέλα, παρά τις όποιες αβεβαιότητες, παρέχουν αξιόπιστες εκτιμήσεις της κλιματικής αλλαγής.

Η αξιοπιστία των κλιματικών μοντέλων έγκειται, αρχικά, στο γεγονός ότι ως μαθηματικά μοντέλα στηρίζονται σε φυσικούς νόμους, όπως η αρχή διατήρησης της μάζας, της ορμής, της ενέργειας, καθώς και σε πληθώρα παρατηρήσεων. Επιπρόσθετα, έχουν τη δυνατότητα της προσομοίωσης των μέσων τιμών των κλιματικών χαρακτηριστικών όπως για παράδειγμα οι βροχοπτώσεις, η μεγάλης κλίμακας κατανομή της ατμοσφαιρικής θερμοκρασίας, ο άνεμος, τα ωκεάνια ρεύματα, η έκταση του θαλάσσιου πάγου και πτυχών της μεταβλητότητας του κλίματος, όπως είναι οι εποχιακές αλλαγές της θερμοκρασίας και τα παλιρροιακά συστήματα.

Ένας τρόπος ελέγχου της αξιοπιστίας των κλιματικών μοντέλων μπορεί να επιτευχθεί αν χρησιμοποιηθούν ως μετεωρολογικά μοντέλα με σκοπό την αναπαράσταση την εποχιακή και ενδοετήσια μεταβλητότητα σε μικρότερες κλίμακες. Τέλος, η δυνατότητα αναπαράστασης των παρατηρούμενων αλλαγών του παρελθόντος και του παρόντος συμβάλει στην αξιοπιστία των κλιματικών μοντέλων (IPCC, 2007) .

Τα κλιματικά μοντέλα, παρά την αξιοπιστία τους παρουσιάζουν σημαντικές αβεβαιότητες. Οι αβεβαιότητες αυτές σχετίζονται με την υπολογιστική δύναμη που χρησιμοποιείται, καθώς και με τις παραμετροποιήσεις διαφόρων φυσικών διαδικασιών. Η διαρκής βελτίωση των υπολογιστικών συστημάτων και η προσομοίωση με μεγαλύτερη ανάλυση των φυσικών διαδικασιών σε συνδυασμό με την επιστημονική γνώση καθιστούν τα μοντέλα πιο αποτελεσματικά (IPCC, 2007).

3 Μοντέλα προσομοίωσης υπόγειας ροής

3.1 Γενικά

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση σε νερό για την κάλυψη των υδατικών αναγκών, σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στον υδρολογικό κύκλο και την ποιοτική υποβάθμιση, οδηγούν στην ανάγκη της καλύτερης κατανόησης του μηχανισμού ροής του υπόγειου νερού. Το υπόγειο νερό αποτελεί την κύρια πηγή κάλυψης των υδατικών αναγκών. Συνεπώς, η προσομοίωση της υπόγειας ροής με τη χρήση ενός μοντέλου συμβάλλει στη λεπτομερέστερη μελέτη και στην περαιτέρω κατανόηση του υπόγειου νερού. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερες μέθοδοι προσομοίωσης (simulation) και μοντελοποίησης (modeling), ώστε να επιτευχθούν προσεγγιστικές λύσεις στα επιστημονικά προβλήματα. Έτσι, τα μοντέλα έχουν αρχίσει να καταλαμβάνουν εξέχουσα θέση στο χώρο της υδρογεωλογίας (Voudouris et al., 2012; Tizro et al., 2011).

Ως προσομοίωση καλείται η διαδικασία εκείνη κατά την οποία η εφαρμογή ενός πρότυπου μοντέλου οδηγεί στην αναπαραγωγή της πραγματικότητας. Ένα μοντέλο αποτελεί μια απλοποιημένη και ασυμπτωτική προσέγγιση ενός φυσικού συστήματος, καθώς και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε αυτό (Βουδούρης, 2004).

Ο όρος υδρολογικό μοντέλο αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα μαθηματικών μετασχηματισμών που χρησιμοποιούν δεδομένα πεδίου και εύλογες υποθέσεις σχετικά με τους φυσικούς μηχανισμούς με στόχο την ποσοτική εκτίμηση των υδρολογικών μεταβλητών (Ευστρατιάδης κ.ά, 2009).

Το πεδίο εφαρμογής των υδρολογικών μοντέλων είναι είτε η λεκάνη απορροής είτε ο υδροφορέας. Στην περίπτωση της λεκάνης απορροής επιχειρείται αναπαράσταση του υδρολογικού κύκλου σε μια συγκεκριμένη χωρική ενότητα περιγράφοντας τον μετασχηματισμό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων σε απορροή. Στην περίπτωση του υδροφορέα προσομοιώνεται ο μηχανισμός κίνησης του υπόγειου νερού.

Τα υδρολογικά μοντέλα, ανάλογα, με τη μαθηματική τους δομή διακρίνονται σε μοντέλα φυσικής βάσης, σε εννοιολογικά μοντέλα, σε στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα και σε μοντέλα μαύρου κουτιού.

Τα μοντέλα φυσικής βάσης (physically-based models) αναπαριστούν τις υδρολογικές διεργασίες μικρής κλίμακας και στηρίζονται στους φυσικούς νόμους που σχετίζονται με την κίνηση του νερού, καθώς και σε εμπειρικές σχέσεις που έχουν προκύψει από έρευνες σε πειραματικές λεκάνες.

Τα εννοιολογικά μοντέλα (conceptual models) αποτελούνται από ένα σύνολο παραδοχών με τις οποίες το πραγματικό φυσικό πρόβλημα ανάγεται σε μια απλοποιημένη μορφή, που συνιστά το υπόβαθρο για το αριθμητικό μοντέλο. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι η προσομοίωση πολύπλοκων διεργασιών με έντονη χωρική ανομοιογένεια μέσω ενός μικρού αριθμού παραμέτρων.

Τα στατιστικά και στοχαστικά μοντέλα στηρίζονται στην πιθανολογική προσέγγιση των υδρολογικών διεργασιών. Εδώ, οι φυσικές διεργασίες αντιμετωπίζονται είτε ως τυχαίες μεταβλητές, είτε ως μεμονωμένες ή από κοινού.

Τέλος, τα μοντέλα μαύρου κουτιού (black-box models) δεν αναπαριστούν τις ενδιάμεσες διεργασίες του υδρολογικού κύκλου, όπως συμβαίνει με τα εννοιολογικά και τα φυσικής βάσης μοντέλα.

3.2 Ιστορική αναδρομή

Η πρώτη προσπάθεια προσομοίωσης του υδρολογικού κύκλου αποδίδεται στον Thornthwaite (1948). Ο Thornthwaite ανέπτυξε ένα μονοπαραμετρικό σχήμα μηνιαίου υδατικού ισοζυγίου για την εκτίμηση της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής απλών λεκανών και χωρίς τη συνεισφορά των υπόγειων νερών (Dingman, 1994, Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999). Το 1955 οι Thornthwaite και Mather παρουσίασαν μια τροποποιημένη εκδοχή του Thornthwaite (1948), η οποία αποτέλεσε τον ακρογωνιαίο λίθο για τα μεταγενέστερα σχήματα υδρολογικής προσομοίωσης.

Η ταχύτατη ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων τη δεκαετία του 1960 είχε ως αποτέλεσμα και την εκτεταμένη χρήση των μοντέλων υδρολογικής προσομοίωσης. Αρχικά, η πρακτική εφαρμογή των μοντέλων αφορούσε τις δύο διαστάσεις (Pinder 1970, Prickett and Lonngquist 1971). Με την πάροδο του χρόνου και την περαιτέρω βελτίωση και εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων τα μοντέλα εφαρμόζονται και για τις τρεις διαστάσεις (Trescott 1975).

Οι Singh and Woolhiser (2002) διέκριναν ένα πλήθος υδρολογικών σχημάτων τα οποία κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής τους, τη χωρική τους κλίμακα, τη χρονική διακριτικότητα και τη μαθηματική τους δομή. Στον πίνακα που ακολουθεί παρατίθενται τα πιο χαρακτηριστικά μοντέλα της διεθνούς βιβλιογραφίας (Πίνακας 3.1).

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά μοντέλα της διεθνούς βιβλιογραφίας (Singh and Woolhiser, 2002).

Ονομασία μοντέλου	Παραπομπή	Περιγραφή	Πεδίο Εφαρμογής
Thonthwaite -Mather	Thonthwaite –Mather (1955)	Μηνιαίο, εννοιολογικό με μοναδική παράμετρο την εδαφική υγρασία	Εκτίμηση πραγματικής εξατμισοδιαπνοής λεκανών
Stanford Watershed Model	Crawford and Linsley (1962, 1966)	Συνεχές με 35 παραμέτρους εκτιμώμενες ως επί το πλείστον με βάση τα χαρακτηριστικά της λεκάνης	Τυπικό μοντέλο βροχής – απορροής της δεκαετίας 1960-1970
National Weather Service – River Forecast System (Sacramento)	Burnash et al. (1973)	Συνεχές με ημερήσιο χρονικό βήμα και με χρήση 17 παραμέτρων	Τυπικό μοντέλο πρόγνωσης των Η.Π.Α
Australian Water Balance Model	Boughton (1984) Boughton and Carroll (1993)	Εννοιολογικό, εκτιμά την ημερήσια απορροή ή την ωριαία πλημμύρα	Το υδρολογικό μοντέλο της Αυστραλίας
Systeme Hydrologique Europeene (MIKE -SHE)	Abbott et al. (1986)	Μοντέλο απορροής και περιγραφής διεργασιών ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης	Τυπικό μοντέλο υδρολογικής ανάλυσης από πολλά ευρωπαϊκά κράτη, το οποίο υποστηρίζεται από την εταιρεία DHI

Τα πιο διαδεδομένα μοντέλα προσομοίωσης της υδροδυναμικής κατάστασης των υδροφορέων είναι το μοντέλο GMS (Groundwater Modeling System), το οποίο υποστηρίζεται από τους κώδικες MODFLOW (Modular three dimensional finite difference ground water flow model), FEMWATER, MODAEM, MODPATH, MT3DMS, RT3D, SEAM3D, SEEP2D, T-PROGS και UTEXAS και το πρόγραμμα FEFLOW (Finite Element subsurface Flow system). Το MODFLOW της Αμερικάνικης Υπηρεσίας Γεωλογικών Ερευνών (U.S.G.S.) αποτελεί το πλέον πλήρες και εύχρηστο πακέτο προσομοίωσης των υπόγειων ροών για εφαρμογή σε 3-διαστάσεις. Το MODFLOW αναπτύχθηκε μεταξύ της άνοιξης του 1981 και του χειμώνα του 1983 από τους Michael G. McDonald και Arlen W. Harbaugh (McDonald & Harbaugh, 2003). Ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1990 το MODFLOW αποτελούσε το πιο ευρέως γνωστό μοντέλο προσομοίωσης της ροής των υπόγειων νερών. Το 1996 ο κώδικας MODFLOW βελτιώνεται και μετατρέπεται σε έναν πιο εύχρηστο κώδικα και πλέον ονομάζεται MODFLOW-96 (Harbaugh and McDonald, 1996). Το πλέον ολοκληρωμένο και βελτιωμένο πακέτο προσομοίωσης αποτελεί το MODFLOW-2000 (Harbaugh, 2000).

Η πρώτη έκδοση του FEFLOW ήταν το 1979 και αναπτύχθηκε από το Institut Water Resources Planning and Systems Research Inc., στο Βερολίνο. Το FEFLOW έχει τη δυνατότητα της προσομοίωσης της ροής υπό συνθήκες κορεσμού, του φρεάτιου υδροφορέα και της θαλάσσιας διείσδυσης και εφαρμόζεται, κυρίως, σε περιπτώσεις με πολύπλοκη γεωλογική δομή.

Τα προγράμματα MODFLOW και FEFLOW δεν είναι προγράμματα διαχείρισης υδατικών πόρων. Με τη χρήση τους όμως, είναι εφικτό να εξαχθούν συμπεράσματα για τη μεταβολή της στάθμης του υπόγειου νερού και συνεπώς και των αποθεμάτων του, υπό καθεστώς διαφόρων διαχειριστικών σεναρίων (Βουδούρης, 2013).

Τέλος, αξιοσημείωτο είναι να αναφερθεί και ο κώδικας SEAWAT. Το SEAWAT, αρχικά, αποτελεί συνδυασμό του MODFLOW και MTED σε ένα ενιαίο πρόγραμμα με σκοπό την προσομοίωση της ροής υπόγειου νερού μεταβλητής πυκνότητας. Η ιδέα αυτή τεκμηριώθηκε για πρώτη φορά από τους Guo και Bennett. Αργότερα, ο Γεωλογικός Φορέας των Η.Π.Α το χρησιμοποίησε για την

ποσοτικοποίηση των υποθαλάσσιων υδάτων. Το SEAWAT βελτιώθηκε το 1999 από τους Lavengin και Guo.

3.3 Ο κώδικας MODFLOW

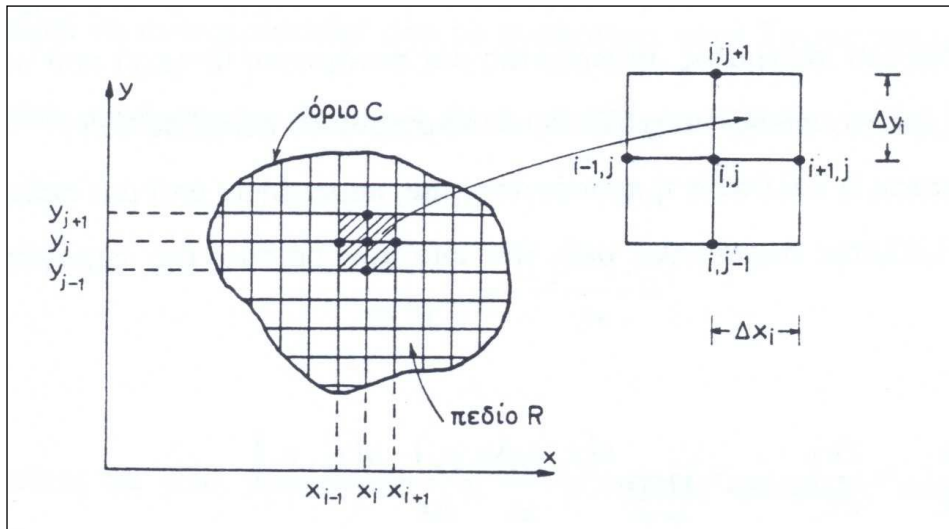
Το πρόγραμμα MODFLOW (Modular three dimensional difference groundwater flow model) εξαιτίας της πληθώρας των πλεονεκτημάτων που συνδυάζει, παρέχει τα εχέγγυα μιας αξιόπιστης λειτουργίας. Η συμβατότητά του με τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (Γ.Σ.Π) αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματά του.

Το πρόγραμμα στηρίζεται στην αριθμητική επίλυση μιας κύριας διαφορικής εξίσωσης, η οποία προκύπτει από την εξίσωση της διατήρησης της μάζας και του νόμου του Darcy. Πρόκειται για ένα τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών με επίλυση στο κέντρο των κυψελίδων του κανάβου.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος προσέγγισης της υπόγειας ροής. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην απλότητα που παρουσιάζει η μέθοδος και στην ευκολία με την οποία μπορεί να εφαρμοστεί σε τρισδιάστατα προβλήματα. Βασική ιδέα της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method) είναι η αναγωγή ενός συνεχούς συστήματος σε ένα αντίστοιχο διακριτό. Με τη μέθοδο αυτή το συνεχές χωρίο, στο οποίο ορίζεται η προς προσδιορισμό άγνωστη συνάρτηση, χωρίζεται σε ένα σύνολο διακεκριμένων σημείων και η μερική διαφορική εξίσωση που διέπει το πρόβλημα προσεγγίζεται από μια αντίστοιχη εξίσωση διαφορών σε κάθε κομβικό σημείο (σχήμα 3.1).

Η διακριτοποίηση αυτή του συνεχούς χωρίου σε μεμονωμένα κομβικά σημεία και η αντικατάσταση των παραγώγων της προς προσδιορισμό συνάρτησης μέσω διαφορών, καθώς και των συνθηκών που ικανοποιεί αυτή ανάγει το πρόβλημα σε ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων, η φύση του οποίου εξαρτάται από τη φύση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει το πρόβλημα.

Το MODFLOW είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN και περιλαμβάνει το κεντρικό πρόγραμμα και μια σειρά από ανεξάρτητα υποπρογράμματα (packages). Τα υποπρογράμματα συνίστανται από υπορουτίνες (modules) (Βουδούρης, 2004).



Σχήμα 3.1: Τυπική μορφή κανάβου πεπερασμένων διαφορών (Λατινόπουλος, 1986).

Τα κυριότερα υποπρογράμματα είναι τα ακόλουθα:

Basic package, BCF2 (Block centered flow) package, River package, Stream package, Well package, Drain package, Evapotranspiration package, General-head package, SIP solution package, PCG2 solution package, Output control package.

Για την εφαρμογή του MODFLOW απαραίτητα είναι τα ακόλουθα δεδομένα εισόδου:

- Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.
- Οι αρχικές συνθήκες δηλαδή οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου σε όλους τους κόμβους.
- Οι οριακές συνθήκες είτε με τιμές πιεζομετρικού φορτίου, είτε με τη μορφή ροής στα όρια του κανάβου.
- Τα βάθη των υδροφόρων στρωμάτων.
- Οι υδραυλικές παράμετροι (υδραυλική αγωγιμότητα, συντελεστής αποθηκευτικότητας).
- Οι παροχές των αντλήσεων ή του εμπλουτισμού.
- Τα δεδομένα της κατείσδυσης τα οποία προκύπτουν από τις βροχοπτώσεις, την εξατμισοδιαπνοή και το είδος των γεωλογικών σχηματισμών.
- Οι διηθήσεις από τους ποταμοχειμάρρους.
- Οι επιστροφές από τις αρδεύσεις.

Η ακρίβεια της προσομοίωσης του μοντέλου έγκειται στην αξιοπιστία των εισαγόμενων πληροφοριών.

3.3.1 Μέθοδοι επίλυσης του κώδικα MODFLOW

Η τρισδιάστατη κίνηση των υπόγειων νερών υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής διαμέσου ενός ετερογενούς και ανισότροπου πορώδους μέσου μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση 3.1 (Anderson and Woessner, 1992):

$$\frac{\partial}{\partial x}(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(T_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (3.1)$$

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

h = το υδραυλικό φορτίο (L)

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

S_y = η ειδική απόδοση του πορώδους μέσου και

t = ο χρόνος (T).

Η παραπάνω εξίσωση μαζί με τον προσδιορισμό της ροής, των αρχικών συνθηκών της πιεζομετρικής στάθμης και των συνθηκών της πιεζομετρικής στάθμης στα όρια του υδροφόρου συστήματος, αποτελεί τη μαθηματική αναπαράσταση της ροής του υπόγειου νερού. Η επίλυση της εξίσωσης επιτυγχάνεται μέσω της αριθμητικής μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών. Έτσι λοιπόν, το συνεχές σύστημα που περιγράφεται από την εξίσωση αυτή, αντικαθίσταται από ένα πλέγμα διακριτών σημείων στο χώρο και στο χρόνο και οι μερικές παράγωγοι αντικαθίστανται από τις διαφορές στις τιμές του υδραυλικού φορτίου στα σημεία αυτά. Η επίλυση των συστημάτων γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων παρέχει τις τιμές της στάθμης σε καθορισμένα σημεία και χρόνους.

Για την επίλυση το πρόγραμμα MODFLOW χρησιμοποιεί την επαναληπτική μέθοδο. Συγκεκριμένα υπάρχει δυνατότητα χρήσης τριών διαφορετικών μεθόδων: της Ισχυράς Πεπλεγμένης (Strongly Implicit Producedure, S.I.P.), της Σταδιακής υπερχαλάρωσης των κόμβων (Slice Successive Overlation, S.O.R.) και της Υπό

προϋποθέσεις συζυγών κλίσεων (Preconditioned Conjugate Gradient, P.C.G.). Αναλυτικά, οι μέθοδοι επίλυσης περιλαμβάνουν:

Ισχυρά πεπλεγμένη μέθοδος (Strongly Implicit Procedure package, SIP)

Το πακέτο αυτό συνιστά μια μέθοδο επίλυσης του συστήματος γραμμικών εξισώσεων, οι οποίες προκύπτουν με τη χρήση επαναληπτικών διαδικασιών. Όπως έχει προαναφερθεί για κάθε κυψελίδα χρησιμοποιείται μια εξίσωση πεπερασμένων διαφορών. Το σύνολο των εξισώσεων του κανάβου πρέπει να επιλύεται σε κάθε βήμα. Η επίλυση συνιστάται στη λήψη μιας τιμής της πιεζομετρικής στάθμης για κάθε κόμβο.

Υπό προϋποθέσεις συζυγών κλίσεων (Preconditioned Conjugate Gradient, P.C.G.)

Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται μέθοδος της συζυγούς βαθμίδας με σκοπό την επίλυση ταυτόχρονων εξισώσεων που δημιουργούνται από το μοντέλο. Είναι δυνατό να προσομοιωθούν τόσο γραμμικές όσο και μη γραμμικές συνθήκες ροής. Η μέθοδος PCG2 λειτουργεί προσεγγίζοντας την επίλυση σε δύο επίπεδα, σε ένα χρονικό βήμα.

Σταδιακή υπερχαλάρωση των κόμβων (Slice Successive Overlution, S.O.R.)

Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται για την επίλυση μεγάλων συστημάτων γραμμικών εξισώσεων με τους μέσους όρους επαναλήψεων. Κατά την εφαρμογή της, το πλέγμα διαιρείται σε κάθετες φέτες, ομαδοποιώντας τις εξισώσεις των κόμβων σε δύο διακριτές ομάδες, στις οποίες κάθε ομάδα αντιστοιχεί σε μία φέτα.

Η χωρική διακριτοποίηση του υδροφορέα πραγματοποιείται με τη μορφή ενός δικτύου από στοιχειώδη τρισδιάστατα ορθογώνια που ονομάζονται κυψελίδες (cells), η θέση των οποίων περιγράφεται με τη μορφή γραμμών, στηλών και στρωμάτων.

Η στάθμη του υπόγειου νερού υπολογίζεται για ένα σημείο της κάθε κυψελίδας που ονομάζεται κόμβος. Ο υπολογισμός του φορτίου γίνεται στο κέντρο των κυψελίδων (block – centered).

Οι τύποι των κυψελίδων που χρησιμοποιούνται για να αναπαραστήσουν τις συνθήκες στα όρια είναι οι ακόλουθοι:

α) Σταθερού φορτίου (constant head). Στα όρια αυτά η στάθμη παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αποδίδονται με τον κώδικα **-1**.

β) Κυψελίδες μηδενικής ροής (no flow boundary ή inactive). Στα όρια μηδενικής ροής περιλαμβάνονται κυψελίδες, όπου οι εισροές είναι μηδενικές. Αποδίδονται με τον κωδικό **0**.

γ) Κυψελίδες μεταβαλλόμενου φορτίου (variable head cell). Ο τύπος κυψελίδων μεταβαλλόμενου φορτίου είναι αυτός, κατά τον οποίο η στάθμη μεταβάλλεται με το χρόνο. Αποδίδονται με τον κωδικό **1**.

δ) Κυψελίδες σταθερής εισροής ή constant flux ή GHB (general head boundaries). Η εισροή παραμένει σταθερή και η στάθμη μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές στις γειτονικές κυψελίδες.

Το μέγεθος του μοντέλου προσδιορίζεται με τον αριθμό των γραμμών, τον αριθμό των στηλών και τον αριθμό των στρωμάτων (NROW, NCOL, NLAY). Τα υδροφόρα στρώματα είναι δυνατόν να προσομοιωθούν αν υπό πίεση ή ελεύθερα ή και σαν συνδυασμός των δύο.

Ο κώδικας MODFLOW εφαρμόζεται σε πορώδη μέσα, όπου και ισχύει ο Νόμος του Darcy. Παρόλα αυτά εφαρμόζεται και σε καρστικούς σχηματισμούς όταν εξετάζονται σε μεγάλη κλίμακα. Οι καρστικοί σχηματισμοί και γενικότερα τα κατακερματισμένα συστήματα είναι δυνατό να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας τα ακόλουθα θεωρητικά μοντέλα: του Ισοδύναμου Πορώδους Μέσου (Equivalent Porous Medium, EPM), των Διακριτοποιημένων ρωγματώσεων (Discrete Fractures, DF) και του Διπλού Πορώδους (Dual Porosity DP).

Συνοψίζοντας, οι βασικές αρχές που διέπουν τον κώδικα MODFLOW είναι οι ακόλουθες (Essink, 2000, Καλλιώρας, 2007):

- ✓ Το υδρογεωλογικό σύστημα μπορεί να προσομοιωθεί τόσο σε σταθερές συνθήκες όσο και σε μεταβαλλόμενες.
- ✓ Το μαθηματικό υπόβαθρο στηρίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών για το κέντρο κάθε κυψελίδας (cell) του μοντέλου.
- ✓ Δεν υπάρχει ροή έξω από τα όρια του μοντέλου.
- ✓ Το μέσο (κυρίως πορώδες) το οποίο προσομοιώνεται μπορεί να είναι ομοιογενές.

✓ Το μέσο (κυρίως πορώδες) το οποίο προσομοιώνεται μπορεί να είναι ανισότροπο.

✓ Το σύστημα μπορεί να έχει ακανόνιστο σχήμα και να περικλείει συνδυασμούς υδροφορέων, δηλαδή ελεύθερους, ημι-ελεύθερους και υπό πίεση.

✓ Η ροή μπορεί να προσομοιωθεί πλήρως σε τρισδιάστατη μορφή ή απεικόνιση.

3.3.2 Βασικά υποπρογράμματα του κώδικα MODFLOW

Τα πακέτα που συνήθως χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση των υπόγειων νερών είναι τα εξής (Βουδούρης, 2013):

Βασικό πακέτο (Basic Package, BAS)

Τα δεδομένα που εισάγονται στο βασικό πακέτο αφορούν:

- Τον αριθμό των γραμμών και των στηλών
- Τον αριθμό των υδροφόρων στρωμάτων
- Τη χρονική περίοδο προσομοίωσης και το βήμα της κάθε περιόδου
- Τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης
- Τις οριακές συνθήκες σε κάθε κόμβο του κανάβου
- Ως αρχική συνθήκη εισάγεται η πιεζομετρία στην αρχή της χρονικής

περιόδου, οι οποίες προέρχονται από τις μετρήσεις πεδίου.

Block – Centered Flow Package (BCF)

Στο πακέτο αυτό εισάγονται πληροφορίες που αφορούν:

- Τον τύπο του υδροφορέα (ελεύθερος, υπό πίεση, ημιελεύθερος)
- Τις συνθήκες ροής (μόνιμη ή μη μόνιμη κατάσταση ροής)
- Τις διαστάσεις των κυψελίδων κατά τη διεύθυνση των αξόνων x και y
- Τις συνιστώσες της υδραυλικής αγωγιμότητας για τους ελεύθερους

υδροφόρους ορίζοντες

- Τον συντελεστή αποθηκευτικότητας ή το ενεργό πορώδες

Απαραίτητη προϋπόθεση είναι κάθε κόμβος να βρίσκεται στο κέντρο κάθε κυψελίδας του μοντέλου.

Εμπλουτισμός (Recharge Package, RCH)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει την επιφανειακή κατανομή του εμπλουτισμού προς το υπόγειο υδροφόρο σύστημα. Ο εμπλουτισμός αναφέρεται, είτε στην κατείσδυση από τις βροχοπτώσεις, είτε σε τεχνητό εμπλουτισμό.

Ο εμπλουτισμός μπορεί να εισαχθεί μόνο στο ανώτερο στρώμα (top layer). Για αυτόν ακριβώς το λόγο, δεν χρειάζεται ο υπολογισμός του εμπλουτισμού, που λαμβάνει χώρα ταυτόχρονα σε πολλαπλά επίπεδα μιας κατακόρυφης στήλης, αφού ο φυσικός εμπλουτισμός εισέρχεται ο υδροφορέας από την επιφάνεια του εδάφους.

Γεωτρήσεις (Well Package)

Το πακέτο αυτό αναφέρεται στα δεδομένα των γεωτρήσεων άντλησης ή εμπλουτισμού σε έναν υδροφορέα για μια δεδομένη χρονική περίοδο. Θετικές τιμές της παροχής υποδηλώνουν εμπλουτισμό, ενώ οι αρνητικές κατάσταση άντλησης. Ο ρυθμός άντλησης θεωρείται ανεξάρτητος, τόσο από την έκταση της κυψελίδας, όσο και από την πιεζομετρική στάθμη σε αυτή.

Υδρορεύματα (Rivers, RIV)

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τη ροή του νερού του υδρορεύματος (ποταμού, λίμνης) και υδροφορέα. Τα υδρορεύματα τροφοδοτούν τον υδροφορέα ή τροφοδοτούνται από αυτόν ανάλογα με την υδραυλική κλίση μεταξύ του επιφανειακού υδάτινου σώματος και του υδροφορέα. Το πακέτο Rivers απαιτεί τις ακόλουθες πληροφορίες για κάθε κυψελίδα που περιέχει όριο ποταμού:

- Το υψόμετρο της στάθμης του υδρορεύματος, το οποίο μπορεί να αλλάζει με το χρόνο.
- Το υψόμετρο του πυθμένα του υδρορεύματος
- Την αγωγιμότητα (C). Είναι μια αριθμητική παράμετρος που αντιπροσωπεύει την αντίσταση στη ροή μεταξύ υδρορεύματος και υδροφορέα. Υπολογίζεται από το μήκος του υδρορεύματος (L), το πλάτος του υδρορεύματος ανά κυψελίδα (W) και την υδραυλική αγωγιμότητά τους (K) (τύπος 3.2).

Η αγωγιμότητα (C), συνεπώς, δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{K.L.W}{M} \quad (\text{τύπος 3.2})$$

Όριο Γενικού Φορτίου (General Head Boundary (G.H.B))

Το πακέτο αυτό χρησιμοποιείται κυρίως για να προσομοιώσει την υπόγεια υδραυλική επικοινωνία γειτονικών υδροφορέων. Έτσι αυτό το πακέτο μπορεί να προσομοιώσει την υδραυλική σύνδεση με έναν υδροφόρα, που βρίσκεται εκτός των ορίων της προσομοιωμένης περιοχής και υποδηλώνει την ύπαρξη μιας πλευρικής τροφοδοσίας.

Η παροχή της τροφοδοσίας είναι ανάλογη της διαφοράς της στάθμης ανάμεσα στην εξωτερική αυτή πηγή και σε κάθε κυψελίδα στην περιοχή του μοντέλου. Η παροχή αυτή εξαρτάται από την αγωγιμότητα των υλικών ανάμεσα στην εξωτερική πηγή και στην κυψελίδα ή τις κυψελίδες με τις οποίες γειτνιάζει. Η αγωγιμότητα είναι μια αριθμητική παράμετρος και ορίζεται ως η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα της κυψελίδας πολλαπλασιασμένη με την εγκάρσια διατομή αυτής και διαιρούμενη με την απόστασή της από την εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

Το πακέτο αυτό απαιτεί για κάθε κυψελίδα, που έχει το όριο αυτό:

α) Το γενικό φορτίο: Αυτό το φορτίο είναι το επίπεδο της υδάτινης επιφάνειας στο όριο. Αυτό μπορεί να είναι φυσικά καθορισμένο, όπως για παράδειγμα η επιφάνεια μιας λίμνης ή μπορεί να ληφθεί από τη ρύθμιση του μοντέλου.

β) Την αγωγιμότητα η οποία αντιπροσωπεύει την αντίσταση της ροής ανάμεσα στο όριο γενικού φορτίου και τα υπόγεια νερά της προσομοιωμένης περιοχής.

Σταθερό Φορτίο (Constant head)

Τα όρια σταθερού φορτίου μένουν αμετάβλητα κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αυτό προϋποθέτει ότι στην έναρξη και στο τέλος της προσομοίωσης τα φορτία είναι σταθερά.

Εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration (ET))

Το πακέτο αυτό προσομοιώνει τα αποτελέσματα της διαπνοής των φυτών και της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους. Στο MODFLOW η εξατμισοδιαπνοή εισάγεται στην οροφή του ανώτερου στρώματος.

Αποστραγγίσεις (Drains)

Το πακέτο αυτό έχει σχεδιασθεί να προσομοιώνει τα αποτελέσματα της επιστροφής του αρδευτικού νερού στον υδροφόρο ορίζοντα.

Ροή πηγών (Spring Flow)

Οι πηγές μπορεί να προσομοιωθούν με το υποπρόγραμμα Drain. Το επίπεδο ανάλυσης της πηγής στην επιφάνεια είναι το επίπεδο του αγωγού αποστράγγισης. Οι κόμβοι του Drain ενεργοποιούνται μόνο όταν το φορτίο στον υδροφορέα είναι μεγαλύτερο ή ίσο από την επιφάνεια του εδάφους. Επίσης, μπορεί να προσομοιωθούν με το υποπρόγραμμα River θέτοντας το υψόμετρο του πυθμένα του ποταμού ίσο με το υψόμετρο της στάθμης.

Έλεγχος Εξόδου (Output Control)

Στο πακέτο αυτό καθορίζεται ο τρόπος και η μορφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης. Έχει τη δυνατότητα σύνδεσης με άλλα βοηθητικά προγράμματα για τη γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

3.3.3 Φάσεις της προσομοίωσης

Οι διάφορες φάσεις της ανάπτυξης των μοντέλων υπόγειας ροής περιλαμβάνουν (Walton, 1991):

- Την οριοθέτηση του προβλήματος της μελέτης
- Τη συλλογή και την επεξεργασία των δεδομένων
- Τον προγραμματισμό του μοντέλου
- Την εξειδίκευση του μοντέλου μέσω της εισαγωγής των γεωμετρικών χαρακτηριστικών, των διαστάσεων, των υδραυλικών παραμέτρων, καθώς και των ορίων και των αρχικών συνθηκών
- Τη ρύθμιση του προκαταρκτικού μοντέλου καθώς και την οριστικοποίησή του
- Την ανάλυση της ευαισθησίας του προκαταρκτικού μοντέλου
- Την εκτέλεση των ασκήσεων της προσομοίωσης που έχουν σκοπό την επίλυση του προβλήματος
- Την ανάλυση των προσομοιωμένων πληροφοριών
- Την παρουσίαση των τεκμηριωμένων συμπερασμάτων

3.3.4 Πλεονεκτήματα του κώδικα MODFLOW

- Η εύκολη επιλογή του σε κάθε υδρολογική λεκάνη, με αξιοποίηση της γεωμετρίας της.
- Η γρήγορη και φιλική λειτουργία του μοντέλου τόσο κατά τη ρύθμιση, όσο και κατά την εκτέλεσή του.
- Η δυνατότητα για εύκολη επέμβαση στους αλγορίθμους υπολογισμών, καθώς και την αναβάθμισή του. Έτσι, είναι δυνατόν να προστίθενται ή να αφαιρούνται παράμετροι, να γίνεται λεπτομερέστερη κατάτμηση της λεκάνης, να λαμβάνονται υπόψη ή να αγνοούνται χρονοσειρές, να εισάγονται νέες υπολογιστικές διαδικασίες.
- Βοηθά στην αποτελεσματικότερη υδρολογική διαχείριση του συστήματος.
- Δίνεται μια συνολική εικόνα για την πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφορέα.
- Συμπερασματικά, το MODFLOW αποτελεί μια απλουστευμένη προσομοίωση των επιφανειακών και υπόγειων υδρολογικών συστημάτων.

4 Ανάλυση περιοχής έρευνας

4.1 Γεωγραφική θέση

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στη Βόρεια Ελλάδα, στην περιφέρεια της κεντρικής Μακεδονίας και περιλαμβάνει το δήμο Θερμαϊκού, του νομού Θεσσαλονίκης (Σχήμα 4.1). Καταλαμβάνει έκταση 135,27 Km², η περίμετρός της είναι 89,43 Km και οι συντεταγμένες του κέντρου της είναι E 408641–N 447643 (ΕΓΣΑ 87). Το μήκος της ακτογραμμής της περιοχής έρευνας είναι 47,66 Km και αποτελεί τμήμα του Θερμαϊκού κόλπου. Ανήκει στο 10^ο υδατικό διαμέρισμα της Ελλάδας και αποτελείται από μικρές υδρολογικές λεκάνες.



Σχήμα 4.1: Δορυφορική εικόνα της περιοχής έρευνας (Βουδούρης κ.ά, 2014).

4.2 Πληθυσμιακά στοιχεία

Ο δήμος Θερμαϊκού μετά τη συνένωση του προγράμματος «Καλλικράτης» περιλαμβάνει τις δημοτικές Ενότητες της Επανομής, της Μηχανιώνας και του Θερμαϊκού. Ο δήμος Θερμαϊκού συνορεύει με το δήμο Θέρμης στα Ανατολικά και στα Νότια με το δήμο Ν. Προποντίδας. Η Επανομή αποτελεί τη δημοτική ενότητα με τη μεγαλύτερη έκταση, αλλά παρουσιάζει το μικρότερο πληθυσμό. Ο μεγαλύτερος πληθυσμός παρατηρείται στη δημοτική ενότητα του Θερμαϊκού. Ο δήμος Θερμαϊκού αποτελείται από 7 δημοτικές κοινότητες, με πολυπληθέστερη αυτής της Περαιάς (Πίνακας 4.1 & Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.1: Πληθυσμιακά στοιχεία ανά δημοτικές ενότητες (Πηγή ΕΣΥΕ).

Δημοτικές Ενότητες	Έκταση (km ²)	Πληθυσμός 1981	Πληθυσμός 1991	Πληθυσμός 2001	Πληθυσμός 2011	Πληθυσμιακή πυκνότητα ανά Km ²
Θερμαϊκού	22,67	4704	5803	20253	27553	1215
Μηχανιώνας	21,71	5144	7684	9425	11901	548
Επανομής	90,89	5503	6560	8671	10810	118
Σύνολο	135,27	15351	20047	38349	50264	371

Πίνακας 4.2: Πληθυσμιακά στοιχεία ανά δημοτικές ενότητες (Πηγή ΕΣΥΕ).

Δημοτικές Κοινότητες	Πληθυσμός 2011
Επανομής	8979
Μεσημερίου	1831
Αγίας Τριάδος	3023
Νέων Επιβατών	5984
Περαιάς	18546
Νέας Μηχανιώνας	8775
Αγγελοχωρίου	1178
Ν.Κερασιάς	1948

4.3 Μορφολογία

Η έκταση της περιοχής έρευνας είναι 135,27 Km² και η περίμετρος 89,43 Km. Το 52% της περιοχής είναι ακτογραμμή. Το μέγιστο υψόμετρο είναι 213m και εντοπίζεται στην κορυφή Κεφάλι, μεταξύ των περιοχών Καρδίας και Μεσημερίου. Το ελάχιστο υψόμετρο είναι 0 m, αφού η περιοχή είναι παράκτια (Σχήμα 4.2 & Πίνακας 4.3).

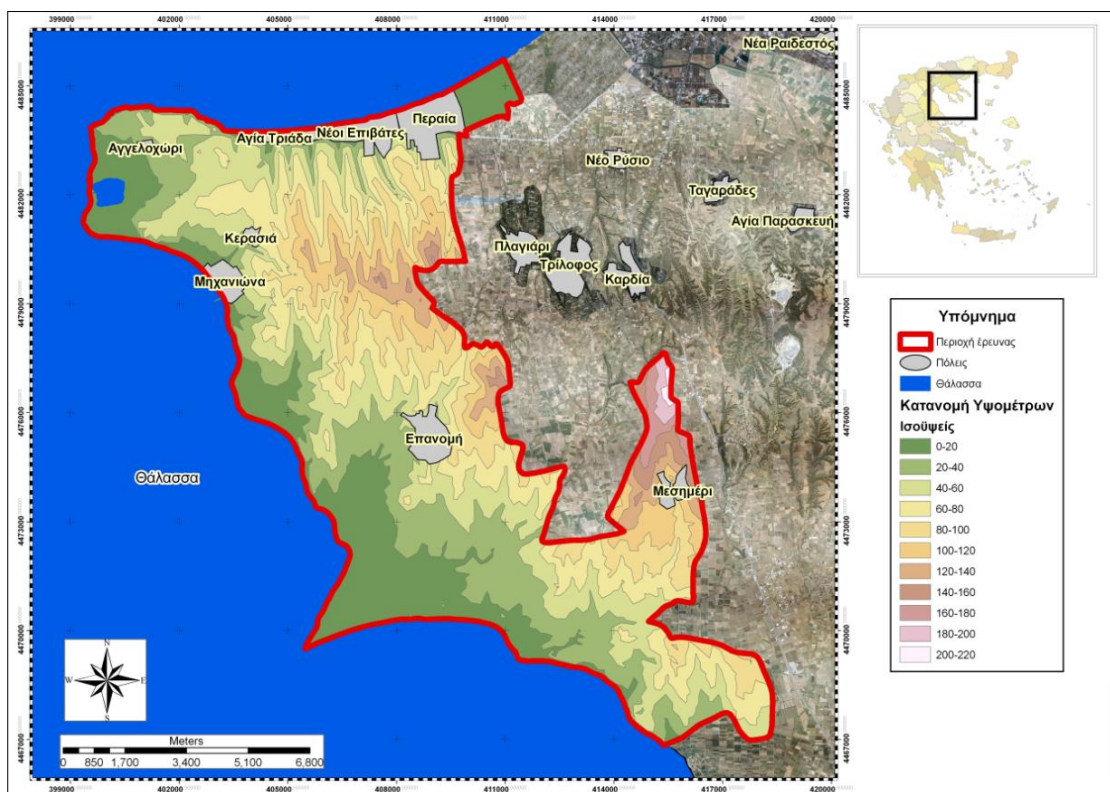
Πίνακας 4.3:Μορφολογικά χαρακτηριστικά του δήμου Θερμαϊκού.

Εμβαδό (E)	135.27 km ²
Περίμετρος (P)	89.43 km
Μέγιστο υψόμετρο (H _{max})	213 m
Ελάχιστο υψόμετρο (H _{min})	0 m
Μέσο υψόμετρο (H _{mean})	55.17 m
Μέση κλίση (S)	1.85 %

Το 40% της περιοχής μελέτης βρίσκεται σε υψόμετρο έως 60m, ενώ μόλις το 3% βρίσκεται σε υψόμετρο μεγαλύτερο των 100m. Σύμφωνα, με την ταξινόμηση του Dikau (1989), η περιοχή χαρακτηρίζεται ως πεδινή (Πίνακας 4.4). Στο Σχήμα 4.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται ο χάρτης με την κατανομή των υψομέτρων που δημιουργήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος.

Πίνακας 4.4: Ταξινόμηση του ανάγλυφου σύμφωνα με το υψόμετρο (Dikau 1989).

Τύπος ανάγλυφου	Υψόμετρο	Επιφάνεια (%)
Πεδινή περιοχή	<150	98.69
Λοφώδης περιοχή	150-600	1.31
Υψηλοί λόφοι-ημιορεινές περιοχές	600-900	0
Ορεινές περιοχές	>900	0

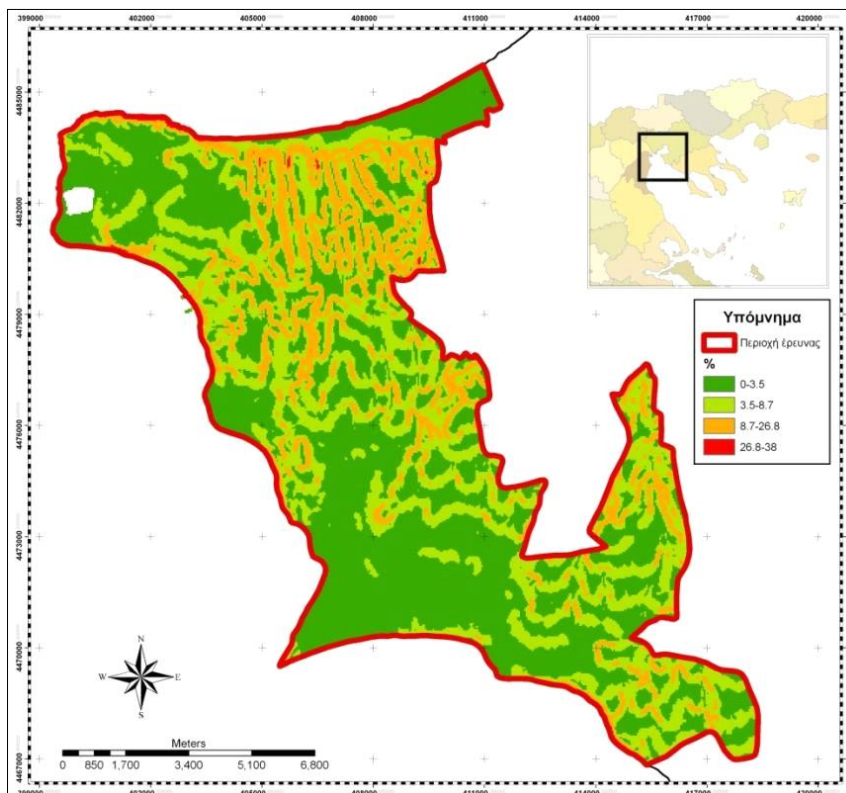


Σχήμα 4.2: Μορφολογικός χάρτης του Δήμου Θερμαϊκού (Βουδούρης κ.ά, 2014).

Η μέση κλίση της περιοχής έρευνας, όπως υπολογίστηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος, είναι 1,85%. Οι μικρότερες κλίσεις εντοπίζονται στο παράκτιο τμήμα της Επανομής, στις εγκαταστάσεις της πρώην Ετ3 ανατολικά της Περαιάς, καθώς και μεταξύ των περιοχών Κερασιάς και Αγγελοχωρίου. Ισχυρά κεκλιμένες περιοχές συναντώνται στο παράκτιο τμήμα Αγίας Τριάδας – Αγγελοχωρίου και Μηχανιώνας – Επανομής, καθώς και στη λοφώδη περιοχή της Περαιάς (Σχήμα 4.3). Σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Demek (1972) το 50% της περιοχής χαρακτηρίζεται ως επίπεδο και το 49% της περιοχής ελαφρά ως κεκλιμένο (Πίνακας 4.5).

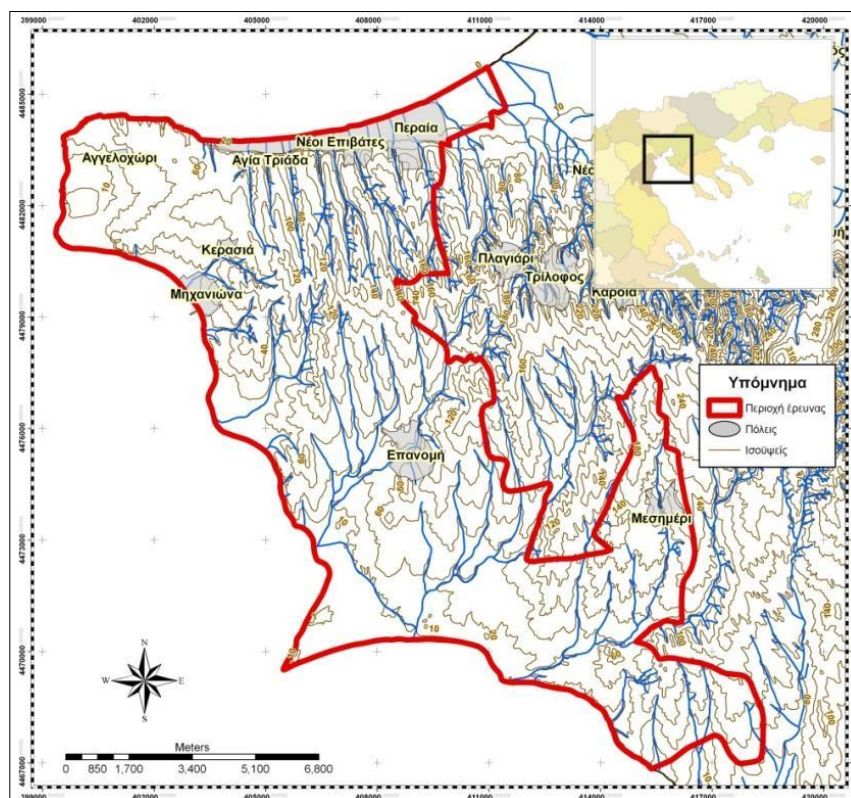
Πίνακας 4.5: Κατανομή των κλίσεων της περιοχής και χαρακτηρισμός κατά Demek (1972).

Κλίση (%)	Κλίση (°)	Έκταση (km ²)	Έκταση (%)	Χαρακτηρισμός
0-3.5	0-2	68.22	50.43	Επίπεδο
3.5-8.75	2-5	45.45	33.6	Ελαφρά κεκλιμένο
8.75-26.8	5-15	21.34	15.78	Ισχυρά κεκλιμένο
26.8-70	15-35	0.26	0.19	Απότομο
70-135	35-55	-	-	Απόκρημνο



Σχήμα 4.3: Χάρτης που απεικονίζει τις κλίσεις (Βουδούρης κ.ά, 2014).

Η περιοχή μελέτης αποστραγγίζεται από σχετικά καλά ανεπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο. Στην περιοχή της Επανομής το υδρογραφικό δίκτυο είναι δενδριτικής μορφής, ενώ στην περιοχή της Περαίας οι κλάδοι των ρεμάτων είναι παράλληλα ανεπτυγμένοι (Σχήμα 4.4). Στην περιοχή δεν υπάρχουν πηγές και οι βροχοπτώσεις σημειώνονται, κυρίως, κατά τους χειμερινούς μήνες. Συνεπώς, τα ρέματα δεν παρουσιάζουν μόνιμη ροή. Στο παρελθόν, έχουν παρατηρηθεί έντονα πλημμυρικά φαινόμενα στις περιοχές της Περαίας και της Επανομής.



Σχήμα 4.4: Χάρτης που απεικονίζει το υδρογραφικό δίκτυο (Βουδούρης κ.ά, 2014).

4.4 Κλίμα

Για τη μελέτη των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής του δήμου Θερμαϊκού αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού της Ε.Μ.Υ. στο αεροδρόμιο της Μίκρας, ο οποίος βρίσκεται σε υψόμετρο 4 m. Ο σταθμός λειτουργεί από το 1959 και τα διαθέσιμα δεδομένα είναι μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασιών, βροχόπτωσης, σχετικής υγρασίας και επικρατούσας διεύθυνσης ανέμων, μέχρι το 2013. Παράλληλα, αξιοποιήθηκαν και τα δεδομένα από το αθροιστικό βροχόμετρο, το οποίο τοποθετήθηκε στην Άνω Περαία σε υψόμετρο 120 m κατά τη διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος.

Το κλίμα της περιοχής θεωρείται μεσογειακό με φανερή την ηπειρωτική επίδραση κατά τις διάφορες εποχές. Οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες σημειώνονται τον Ιούλιο και οι ελάχιστες τον Ιανουάριο. Σύμφωνα με τα δεδομένα από το μετεωρολογικό σταθμό της Μίκρας η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιοχής για τη χρονική περίοδο 1965–2011, είναι 15,09° C. Το μέσο ετήσιο ύψος των κατακρημνισμάτων είναι 475 mm (σχήμα) με βροχερότερους τους μήνες Νοέμβριο

και Δεκέμβριο. Η απόλυτη μέγιστη θερμοκρασία 42 °C καταγράφηκε στις 7/7/1988 και η απόλυτη ελάχιστη -14 °C καταγράφηκε στις 26/1/1963. Η μέση ετήσια σχετική υγρασία είναι 67%. Ο Ιανουάριος είναι ο μήνας, κατά τον οποίο παρατηρείται η μεγαλύτερη σχετική υγρασία, ενώ ο Ιούλιος είναι ο μήνας με τη μικρότερη σχετική υγρασία. Η επικρατούσα διεύθυνση των ανέμων είναι η βορειοδυτική, εκτός από τον Αύγουστο όπου επικρατούν νότιοι άνεμοι.



Σχήμα 4.5: Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης για το σταθμό της Μίκρας.

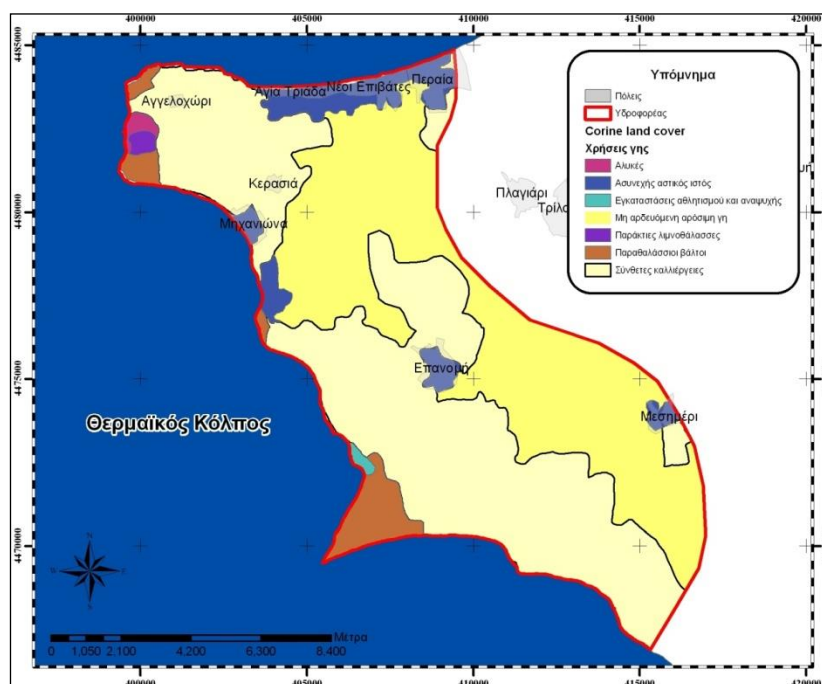
4.5 Χρήσεις Γης

Οι χρήσεις γης παρέχουν σημαντικές πληροφορίες σχετικές με τις δραστηριότητες που αναπτύσσονται σε μία περιοχή, τις εκτάσεις που καταλαμβάνουν, ενώ εκφράζουν την πιθανότητα εκδήλωσης ενός επεισοδίου ρύπανσης. Οι χρήσεις γης στην περιοχή έρευνας παρουσιάζονται στον πίνακα (Πίνακας 4.6), όπως προέκυψαν από το Corine Land Cover (2000) με τις αρδευόμενες εκτάσεις να καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση (54,68%) και τη μικρότερη οι παράκτιες λιμνοθάλασσες (0,01%) (Σχήμα 4.6).

Στο παράκτιο τμήμα τις περιοχής έρευνας εντοπίζονται παράκτιες λιμνοθάλασσες, οι αλυκές του Αγγελοχωρίου, καθώς και παραθαλάσσιοι υφάλμυροι βάλτοι. Στην περιοχή υπάρχουν τρεις προστατευόμενες περιοχές υπό το καθεστώς Φύση 2000 (Natura 2000).

Πίνακας 4.6: Κατανομή των χρήσεων γης στην περιοχή έρευνας.

Χρήσεις γης	Έκταση (Km ²)	Ποσοστό (%)
Παράκτιες λιμνοθάλασσες	0.49	0.36
Αλυκές	0.54	0.40
Παραθαλάσσιοι βάλτοι	5.41	4.00
Σύνθετες καλλιέργειες	73.97	54.68
Μη αρδεύομενη αρόσιμη γη	45.27	33.47
Εγκαταστάσεις αθλητισμού και αναψυχής	0.32	0.24
Αεροδρόμια	1.17	0.86
Ασυνεχής αστικός ιστός	8.1	5.99
Σύνολο	135.27	100



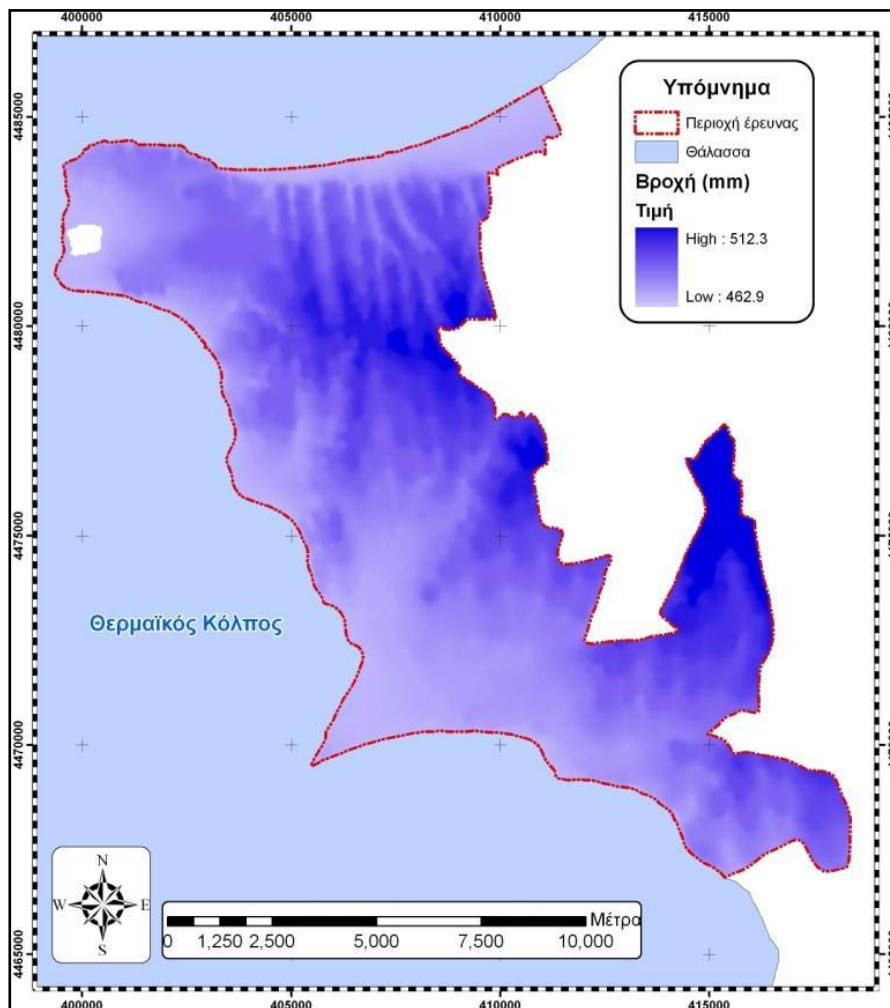
Σχήμα 4.6: Χάρτης χρήσεων γης της περιοχής έρευνας.

4.6 Υδρολογικό Ισοζύγιο

Για τη σύνταξη του βροχομετρικού χάρτη χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω σχέση βροχής (P) - υψομέτρου (H) (4.1) και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους DEM της περιοχής (Καζάκης, 2013):

$$P \text{ (mm)} = 0,23 H \text{ (m)} + 462,9 \text{ (4.1)}$$

Από τη βροχοβαθμίδα προκύπτει αύξηση της βροχόπτωσης κατά 23 mm ανά 100 m αύξησης του υψομέτρου (Καζάκης, 2013). Από το βροχομετρικό χάρτη προκύπτει ότι χαμηλές βροχοπτώσεις εμφανίζονται στο παράκτιο πεδινό τμήμα και οι υψηλότερες στο ανατολικό λοφώδες τμήμα της περιοχής έρευνας (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7:Βροχομετρικός χάρτης της περιοχής έρευνας (Βουδούρης κ.ά, 2014).

Η πραγματική εξατμισιοδιαπνοή (Er) υπολογίζεται με τη μέθοδο Thornthwaite. Η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου πραγματοποιήθηκε μέσω κατάλληλου λογισμικού που αναπτύχθηκε από το εργαστήριο Υδρογεωλογίας του ΑΠΘ, θεωρώντας ως μέγιστη ικανότητα κατακράτησης νερού στο έδαφος την τιμή 110 mm για το πεδινό τμήμα. Η μέση τιμή του συντελεστή πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, που υπολογίστηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος, είναι περίπου 72% .

Επομένως διαπιστώνεται ότι το 30% του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης αντιστοιχεί στις διαδικασίες της επιφανειακής απορροής και της κατείσδυσης. Από τη λιθολογία της περιοχής (η περιοχή ως επί το πλείστον δομείται από τη ψαμμιτομαργαϊκή σειρά) προκύπτει ότι η κατείσδυση κυμαίνεται από 18% έως 22% του ετήσιου ύψους βροχόπτωσης και η επιφανειακή απορροή από 8% έως 10%. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4.7) παρουσιάζεται ένα προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο για την περιοχή έρευνας, απ' όπου προκύπτει ότι ο συνολικός όγκος νερού από βροχόπτωση (P) είναι $66,15 \times 10^6 \text{ m}^3$ (μέση επιφανειακή βροχή=475 mm), εκ των οποίων εξατμίζονται (E) τα $47,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ (ποσοστό 72%). Οπότε ο όγκος νερού που απορρέει επιφανειακά (R) είναι της τάξεως των $5,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ και ο όγκος νερού που κατεισδύει (I) είναι $12,6 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Πίνακας 4.7: Προσεγγιστικό Υδρολογικό Ισοζύγιο της περιοχής έρευνας.

P	I	R	E	ΜΟΝΑΔΕΣ
100	19	10	72	%
475	100	50	350	mm
66,15	12,6	5,9	47,6	10^6 m^3

4.7 Παλαιογεωγραφική και γεωτεκτονική θέση της περιοχής έρευνας

Η περιοχή έρευνας εντάσσεται στη γεωτεκτονική ζώνη Αξιού. Η ζώνη Αξιού συνιστάται από τρεις εσωτερικές ζώνες της Παιονίας, του Παίκου και της Αλμωπίας. Η περιοχή μελέτης ανήκει στην υποζώνη της Παιονίας (Σχήμα 4.8). Η ζώνη της Παιονίας διακρίνεται με βάση τα αλπικά ιζήματα στις ακόλουθες επιμέρους ενότητες πετρωμάτων:

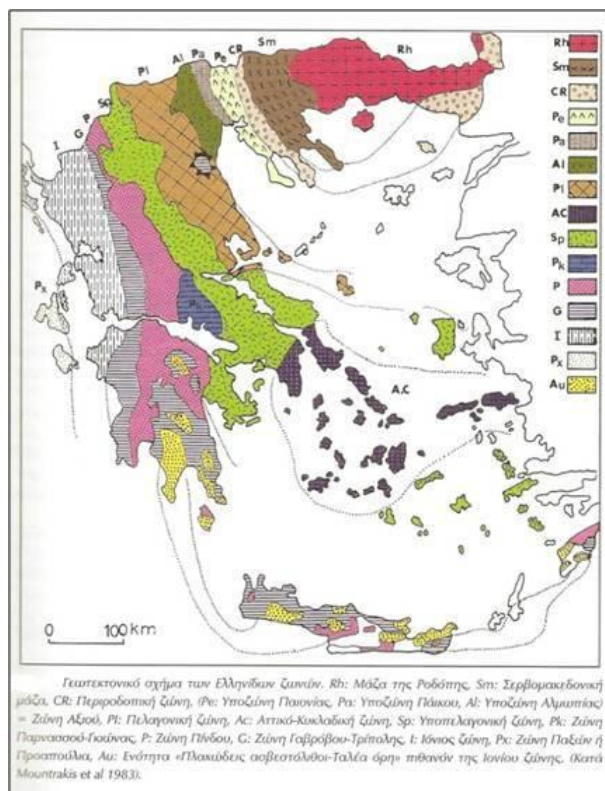
A. Δυτικές Ενότητες:

1. Ενότητα Γευγελής
2. Ενότητα Ωραιοκάστρου
3. Ενότητα Βαφειοχωρίου
4. Ενότητα Αρτζάν

B. Ανατολικές Ενότητες:

1. Ενότητα Άσπρης Βρύσης
2. Ενότητα Μεταλλικού

3. Ενότητα Λεβεντοχωρίου



Σχήμα 4.8: Γεωλογικές ζώνες της Ελλάδας (Μουντράκης, 2010).

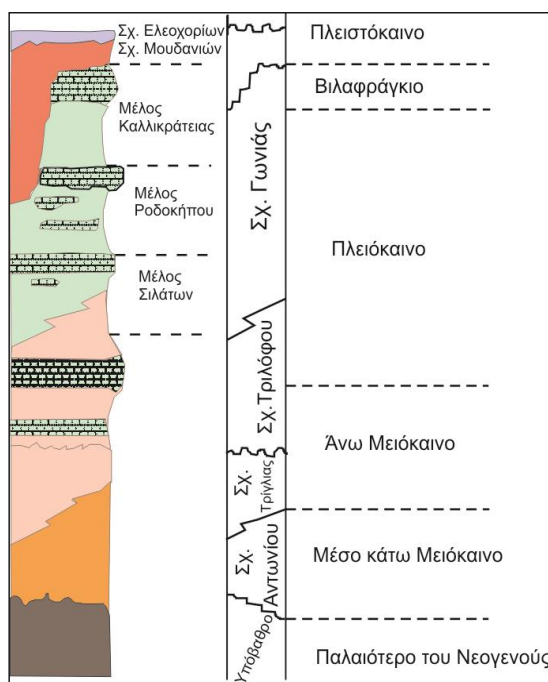
Η ζώνη της Παιονίας αντιπροσωπεύει τμήμα της παλιάς ωκεάνιας περιοχής της Τηθύος. Βασικό τεκτονικό χαρακτηριστικό της είναι η λεπιοειδής τεκτονική. Τα τεκτονικά λείπια σχηματίστηκαν από τις Τριτογενείς φάσεις πτυχώσεων και έχουν μικρές ή μεγάλες διαστάσεις. Οι ενότητες της ζώνης αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλωμα. Λόγω της κάλυψης της περιοχής από τα μεταλλικά νεογενή ιζήματα τα μεγάλωμα εμφανίζονται αποκομμένα μεταξύ τους (Μουντράκης, 2010).

4.8 Γεωλογία της περιοχής μελέτης

Η περιοχή μελέτης δομείται από μεταλλικούς σχηματισμούς, κυρίως ιζήματα που αποτέθηκαν κατά το Νεογενές–Τεταρτογενές. Τα ιζήματα αυτά είναι κυρίως κλαστικά (άμμοι, άργιλοι, κροκάλες κ.ά.), το πάχος τους εκτιμάται περίπου στα 400 m στην περιοχή έρευνας και εκτείνονται από τους πρόποδες του Χορτιάτη έως το ακρωτήριο Μεγάλο Έμβολο και νοτιότερα προς Δυτική Χαλκιδική. Η απόθεση αυτών των ιζημάτων έλαβε χώρα σε διαφορετικά παλαιο-περιβάλλοντα (χερσαίο,

λιμναίο, ποτάμιο, ελώδες, υφάλμυρο) και από στρωματογραφική άποψη τα ιζήματα διαχωρίστηκαν στους εξής γεωλογικούς σχηματισμούς (Σχήμα 4.9) από τον παλαιότερο προς το νεότερο:

- Σχηματισμός Αντωνίου (Μέσο-Ανω Μειόκαινο): ποταμοχειμάρριες κροκάλες άμμοι.
- Σχηματισμός Τρίγλιας (Ανω Μειόκαινο): χερσαία ερυθροστρώματα.
- Σχηματισμός Τριλόφου (Ανώτατο Μειόκαινο): λιμνοθαλάσσιας προέλευσης άμμοι, ψαμμίτες, ασβεστόλιθοι και άργιλοι.
- Σχηματισμός Γωνιάς (Πλειόκαινο): λιμναία-ποτάμια ιζήματα, άμμοι, ψαμμίτες, χάλικες, μάργες, μαζώδεις ασβεστόλιθοι και άργιλοι.
- Σχηματισμός Μουδανίων (Πλειστόκαινο): χερσαία ερυθροστρώματα.



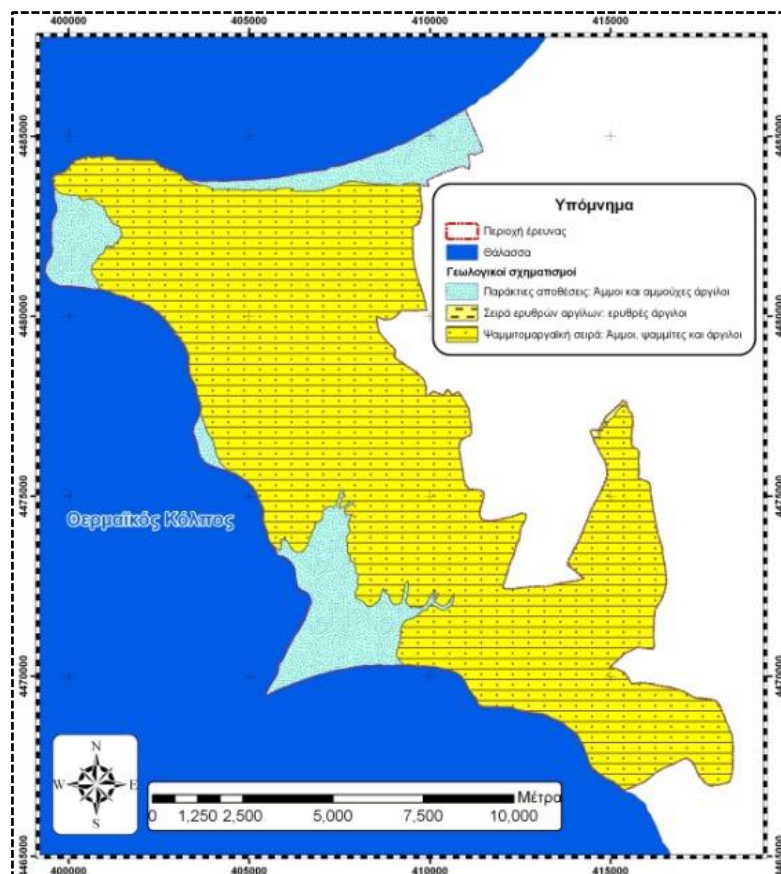
Σχήμα 4.9: Συνοπτική στρωματογραφική στήλη της περιοχής (Sytides, 1990).

Το Δ.Δ. της Περαίας καλύπτεται στη λοφώδη ζώνη από το σχηματισμό της Γωνιάς. Ο σχηματισμός της Γωνιάς αποτελείται από εναλλαγές στρωμάτων λευκών-λευκότεφρων άμμων, ψαμμιτών, μαργών και τεφροπράσινων μαζωδών αργίλων. Είναι αποθέσεις, κυρίως, λιμναίας έως υφάλμυρης φάσης ιζηματογένεσης. Αυτή η νεογενής σειρά ιζηματογενών πετρωμάτων είναι γνωστή στη βιβλιογραφία με τον όρο «Ανοικτόχρωμη ψαμμιτομαργαϊκή σειρά». Τα στρώματα της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς είναι οριζόντια έως ελαφρά κεκλιμένα και παρουσιάζουν μέση κλίση προς Νότο ίση με 5°. Το πάχος της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς είναι

μικρό κοντά στη γραμμή επαφής με τη σειρά των ερυθροπηλών (εμφανίζονται ανατολικά της περιοχής έρευνας) λόγω διαβρώσεως, ενώ καθώς απομακρυνόμαστε από αυτήν αυξάνει. Η επιφανειακή εξάπλωση της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς είναι μεγάλη. Εμφανίζονται σε μια ενιαία έκταση νότια– νοτιοδυτικά της νοητής γραμμής Περαίας-Καρδίας-Λακκώματος– Πετραλώνων-Σωζόπολης, μέχρι την Ακτογραμμή του Θερμαϊκού και του κόλπου της Θεσσαλονίκης και προεκτείνονται κάτω από τα πρόσφατα θαλάσσια ιζήματα αποτελώντας συνέχεια των αντίστοιχων ιζηματογενών πετρωμάτων τη λεκάνης του Αξιού.

Υποκείμενα της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς εμφανίζεται η σειρά ερυθρών αργίλων. Η σειρά ερυθρών αργίλων εντοπίζεται στην περιοχή του Πλαγιαρίου, ανατολικά, δηλαδή της περιοχής μελέτης, ως αποτέλεσμα της δράσης ρήγματος με διεύθυνση ΒΑ/ ΝΔ. Η σειρά ερυθρών αργίλων αποτελείται από μικρής συνοχής εναλλασσόμενα στρώματα πηλών, αργίλων, και αργιλικών ψαμμιτών, χρώματος καστανέρυθρου ως κεραμιδί. Στους πηλούς και τις αργίλους διακρίνονται συχνά πολλά φυλλάρια μαρμαρυγία και κόκκοι χαλαζία. Συχνές είναι και οι ενστρώσεις και οι φακοί από τεφρές μάργες, άμμους, χαλαρά κροκαλοπαγή και πιο σπάνια από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Πρόκειται στην ουσία για ιζήματα χερσαίας ποτάμιας, χειμαρρώδους έως αβαθούς λιμναίας προέλευσης. Τα στρώματα της σειράς αυτής είναι οριζόντια έως ελαφρά κεκλιμένα ομόρροπα προς τη γενική κλίση της εδαφικής επιφάνειας.

Το παράκτιο τμήμα της περιοχής έρευνας καλύπτεται από αλλουβιακές αποθέσεις. Οι προσχώσεις αυτές αποτελούνται από αργίλους, άμμους, χαλίκια, κροκάλες και προϊόντα μεταφοράς και απόθεσης των υλικών διάβρωσης των νεογενών αποθέσεων της λοφώδους ζώνης. Το πάχος των προσχώσεων κυμαίνεται από λίγα μέτρα στο νότιο τομέα της πεδινής ζώνης έως λίγες δεκάδες μέτρα στην παραθαλάσσια ζώνη (Σχήμα 4.10).



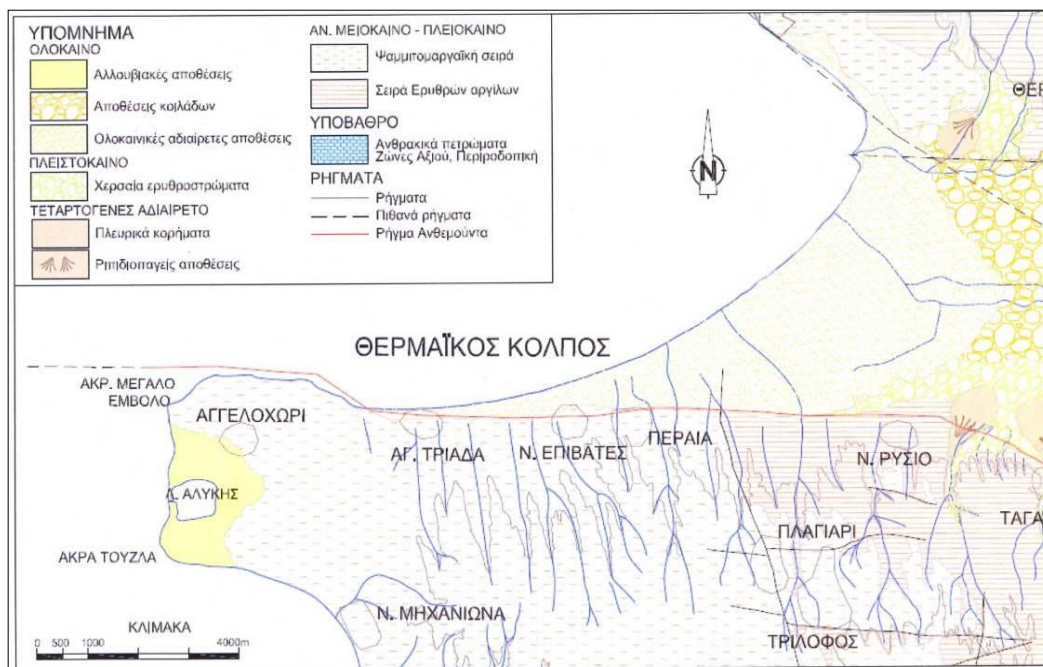
Σχήμα 4.10: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας (Βουδούρης κ.ά, 2014, με τροποποιήσεις από ΙΓΜΕ, Φύλλα Θεσσαλονίκη και Επανομή).

4.9 Τεκτονική

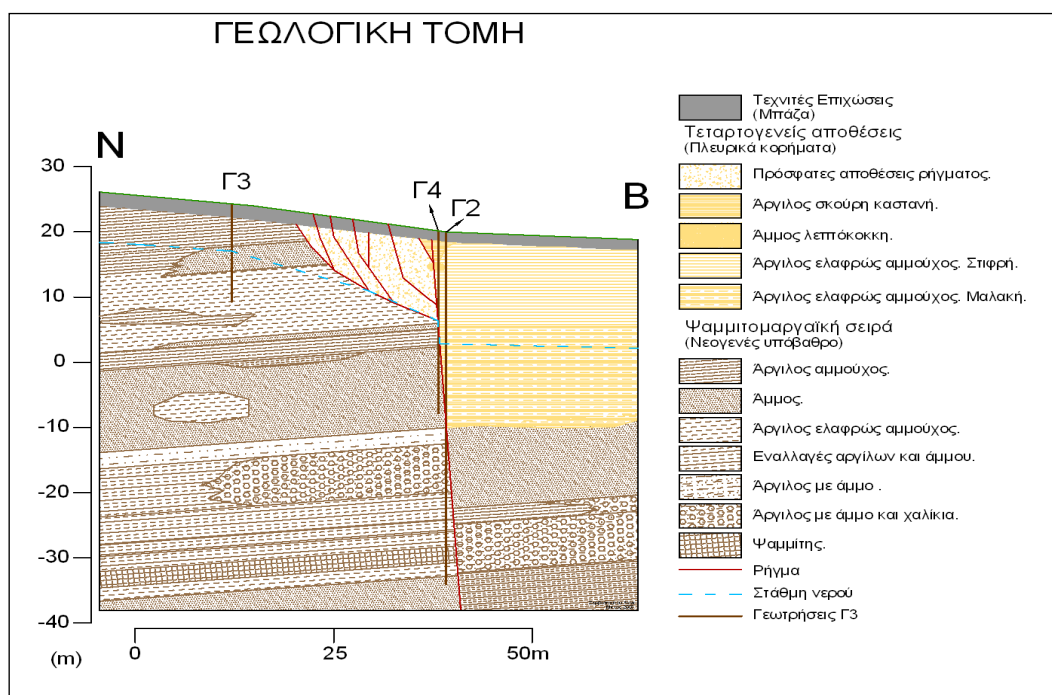
Το κυριότερο ρήγμα της περιοχής έρευνας είναι το ενεργό ρήγμα του Ανθεμούντα με διεύθυνση Α-Δ και το μήκος του εκτείνεται από το Γαλαρηνό μέχρι και τον οικισμό του Αγγελοχωρίου (Ζερβοπούλου, 2010; Μουντράκης, 1985). Αποτελεί κανονικό ρήγμα με μετάπτωση προς Βορρά. Βρίσκεται στο όριο της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς και των πρόσφατων παράκτιων αποθέσεων, στο νότιο μορφολογικό όριο της λεκάνης του Ανθεμούντα (Σχήμα 4.11).

Το ρήγμα της Περαιάς αποτελεί τμήμα του ρήγματος του Ανθεμούντα και διαμορφώνει τη μορφολογία της περιοχής με απότομα πρανή κατά μήκος του ρήγματος. Επιπλέον, το ρήγμα επηρεάζει και διαμορφώνει τις υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής.

Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται σε γεωλογικό σκαρίφημα της περιοχής η δομή του ρήγματος στο Δ.Δ. Περαίας, όπου φαίνεται το ίχνος του ρήγματος Ανθεμούντα (Παυλίδης, 2007).



Σχήμα 4.11: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας (Παυλίδης κ.ά, 2007).

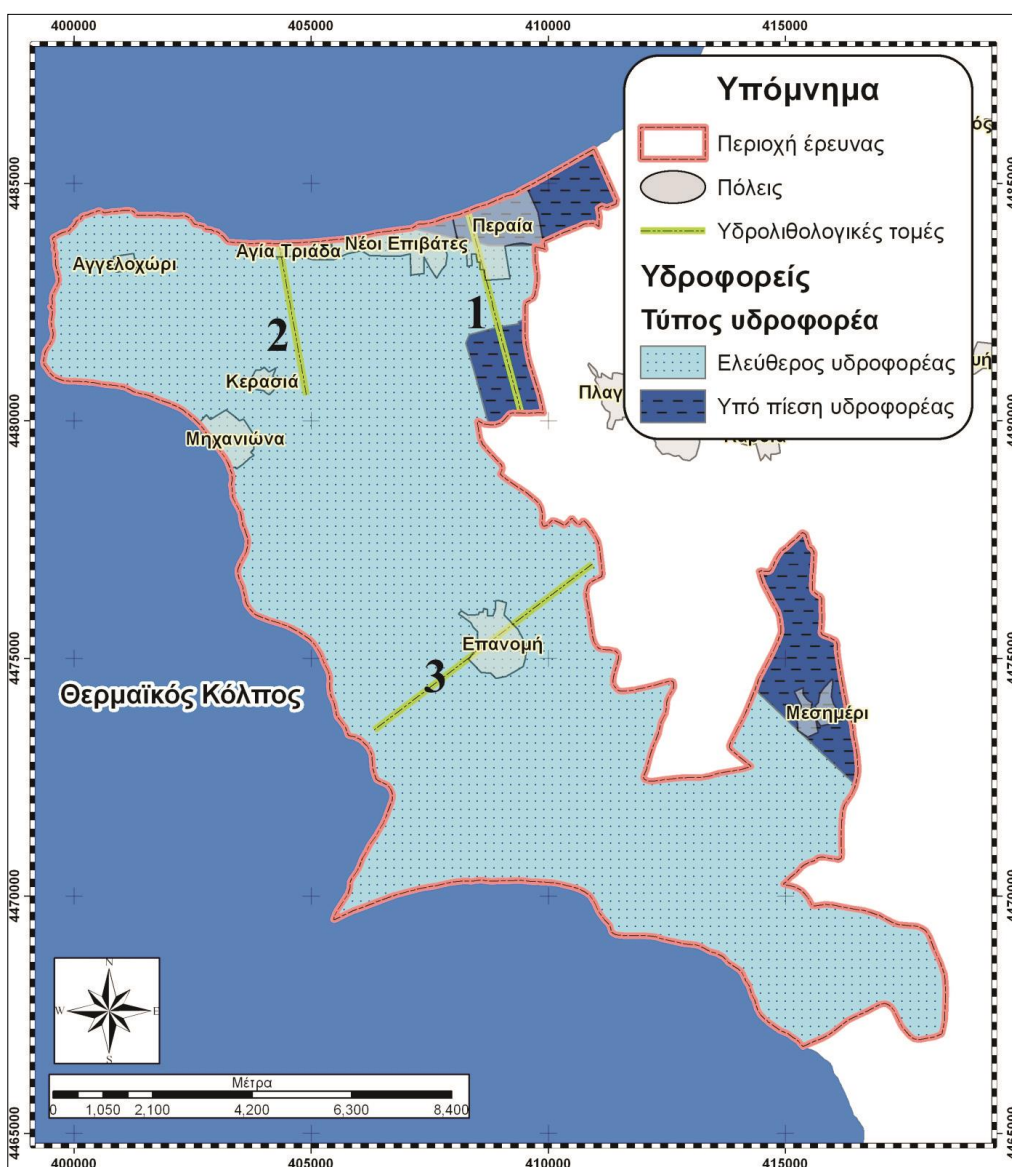


Σχήμα 4.8: Γεωλογική τομή κάθετη στο ρήγμα της Περαίας με διεύθυνση Βορράς –Νότος (Παυλίδης κ.ά, 2007).

5 Υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας

5.1 Υδρογεωλογία

Η περιοχή του δήμου Θερμαϊκού αποτελείται από δύο τύπους υδροφορέων: έναν ελεύθερο και έναν υπό πίεση. Ο ελεύθερος υδροφορέας καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη έκταση. Στο Σχήμα 5.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η γεωγραφική κατανομή των υδροφορέων, όπως αυτό δημιουργήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος.



Σχήμα 5.1: Υδρογεωλογικός χάρτης της περιοχής έρευνας και διεύθυνση υδρολιθολογικών τομών του δήμου Θερμαϊκού (Βουδούρης κ.ά, 2014).

Οι υπό πίεση υδροφορείς συναντώνται στο παράκτιο τμήμα της Περαιάς και στη λοφώδη ζώνη. Στο παράκτιο τμήμα τα επάλληλα υδροφόρα στρώματα

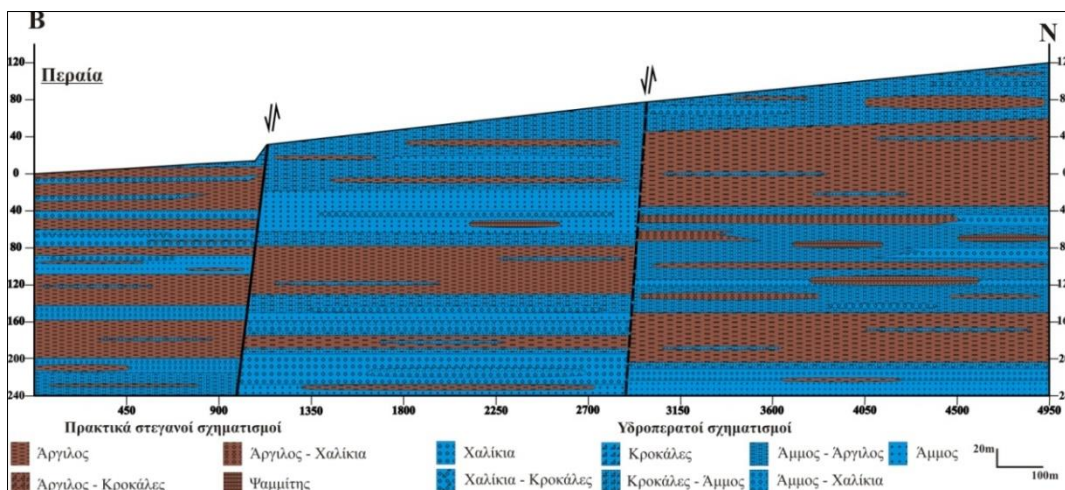
αποτελούνται από χαλίκια, άμμους και άμμους με άργιλο με ποικίλο πάχος (Σχήμα 5.2). Το πιεζομετρικό φορτίο είναι αρνητικό ως απόρροια των υπεραντλήσεων στην ενδοχώρα, ενώ τα επιφανειακά στρώματα είναι υφάλμυρα. Το πάχος του υδροφορέα στο παράκτιο τμήμα κυμαίνεται από 50 έως 100 μέτρα.

Το παράκτιο τμήμα διαχωρίζεται από τη λοφώδη ζώνη με το ρήγμα του Ανθεμούντα. Στο ανατολικό τμήμα της λοφώδους ζώνης αναπτύσσονται επάλληλα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα μικρού πάχους. Τα υδροφόρα αυτά στρώματα αποτελούνται από άμμους με αργίλους και φακούς χαλικιών και συναντώνται εντός των ερυθρών αργίλων. Οι στάθμες του υπόγειου νερού κυμαίνονται από 60 έως 120 m. Ο υπό πίεση υδροφορέας διαχωρίζεται πλευρικά από τον ελεύθερο με κανονικά ρήγματα.

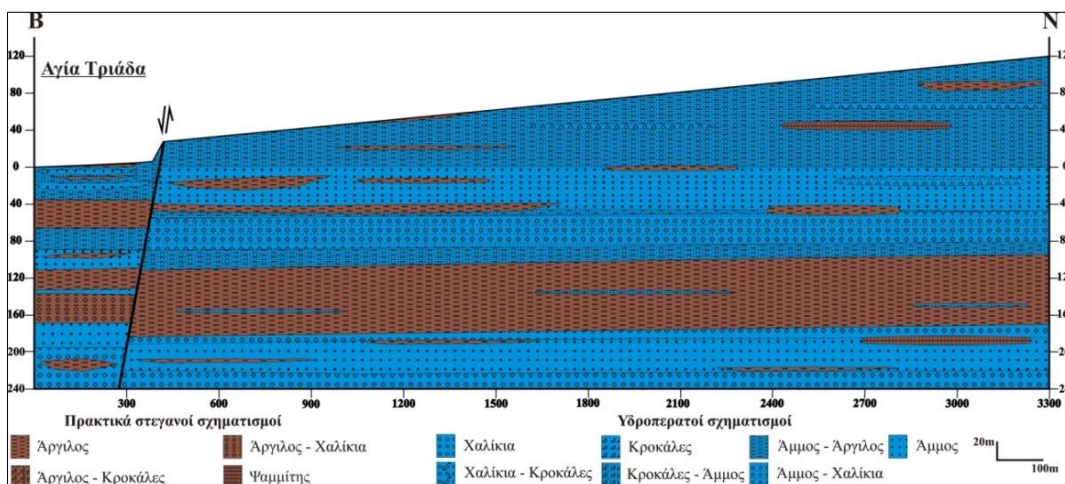
Στο υπόλοιπο τμήμα του δήμου Θερμαϊκού αναπτύσσεται ο ελεύθερος υδροφορέας. Ο ελεύθερος υδροφορέας υπέρκειται ενός βαθύτερου (>150 m) υπό πίεση υδροφορέα. Ο βαθύτερος υπό πίεση υδροφορέας είναι ποιοτικά υποβαθμισμένος, καθώς επηρεάζεται από γεωθερμικά ρευστά και αποτελείται, κυρίως, από στρώματα άμμου και λεπτόκοκκων χαλικιών (Kazakis et al, 2013).

Ο ελεύθερος υδροφορέας αναπτύσσεται εντός της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς και των παράκτιων αποθέσεων. Έχει μέσο πάχος 80 μέτρων, το οποίο μειώνεται προς τη θάλασσα, ενώ διαχωρίζεται από τον βαθύτερο υπό πίεση με ένα αργιλικό στρώμα πάχους περίπου 60 (Καζάκης, 2013) (Σχήμα 5.3 & 5.4). Ο ελεύθερος υδροφορέας αποτελείται από στρώματα άμμου, άμμου με άργιλο, χαλικιών, ενώ παρεμβάλλονται ψαμμιτικά στρώματα μικρού πάχους και αργιτικοί φακοί.

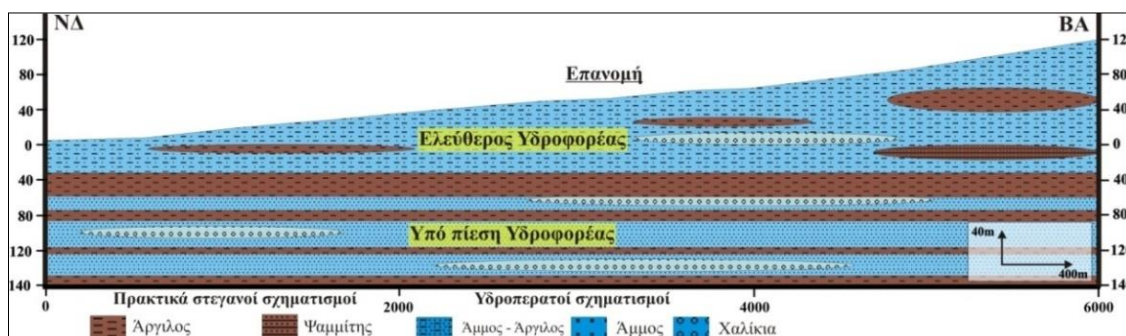
Ο εμπλουτισμός των υδροφορέων επιτυγχάνεται μέσω της κατείδυσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και της περιοδικής διήθησης των ρεμάτων. Στον εμπλουτισμό των υδροφόρων στρωμάτων συμβάλλουν οι επιστροφές των αρδεύσεων, καθώς και οι διαρροές από το δίκτυο της ύδρευσης.



Σχήμα 5.2: Υδρολιθολογική τομή 1 στην περιοχή της Περαιάς (Καζάκης, 2013).



Σχήμα 5.3: Υδρολιθολογική τομή 2 στην περιοχή της Περαιάς (Καζάκης, 2013).



Σχήμα 5.4: Υδρολιθολογική τομή 3 στην περιοχή της Επανομής (Παύλου κ.ά., 2014).

5.2 Υδραυλικά χαρακτηριστικά

Τα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την υδροδυναμική κατάσταση των υδροφορέων και κατ' επέκταση

για τον τρόπο εκμετάλλευσης και διαχείρισής τους. Οι κυριότερες υδραυλικές παράμετροι είναι ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας k , ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας T και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας S . Ο πιο αξιόπιστος τρόπος υπολογισμού των υδραυλικών παραμέτρων αποτελεί η πραγματοποίηση δοκιμαστικών αντλήσεων.

Η υδραυλική αγωγιμότητα (k m/s) ισούται με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα του όγκου νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Η υδραυλική αγωγιμότητα εκφράζει, δηλαδή, την ευκολία με την οποία κινείται το νερό μέσα σε ένα γεωλογικό σχηματισμό. Πολύ μικρές τιμές υδροπερατότητας $k \leq 10^{-9}$ m/s σημαίνουν πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί ενώ τιμές υδροπερατότητας $k \leq 10^{-1}$ m/sec σημαίνουν πολύ υδροπερατοί σχηματισμοί.

Η μεταβιβαστικότητα ($T = k \cdot d$ m²/s) εκφράζει τον όγκο νερού που περνά από μια μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους.

Ο συντελεστής εναποθήκευσης (S) εκφράζει τον όγκο του νερού που μπορεί να απολειφθεί ή να αποθηκευτεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφορέα με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι καθαρός αριθμός και στους ελεύθερους υδροφορείς παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 1% - 30%, ενώ στους υπό πίεση από 0,0001% - 0,5%.

Για τον προσδιορισμό της δομής και των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα αξιοποιήθηκαν υδρολιθολογικές τομές γεωτρήσεων, δοκιμαστικές αντλήσεις και μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος.

Συνεπώς, εκτιμάται ότι για τους υπό πίεση υδροφορείς που συναντώνται στο παράκτιο τμήμα, η υδραυλική αγωγιμότητα κυμαίνεται από 1,7 έως 13,8 m/d, το ενεργό πορώδες από 19 έως 26% και η αποθηκευτικότητα 0,01. Η παροχή των γεωτρήσεων κυμαίνεται μεταξύ 30 και 50 m³/h και η ειδική ικανότητα από 60 έως 200 m²/d. Ενώ στη λοφώδη περιοχή, οι παροχές των γεωτρήσεων δεν υπερβαίνουν τα 10 m³/h, ενώ η ειδική ικανότητα κυμαίνεται από 2 έως 20 m²/d. Για τον ελεύθερο

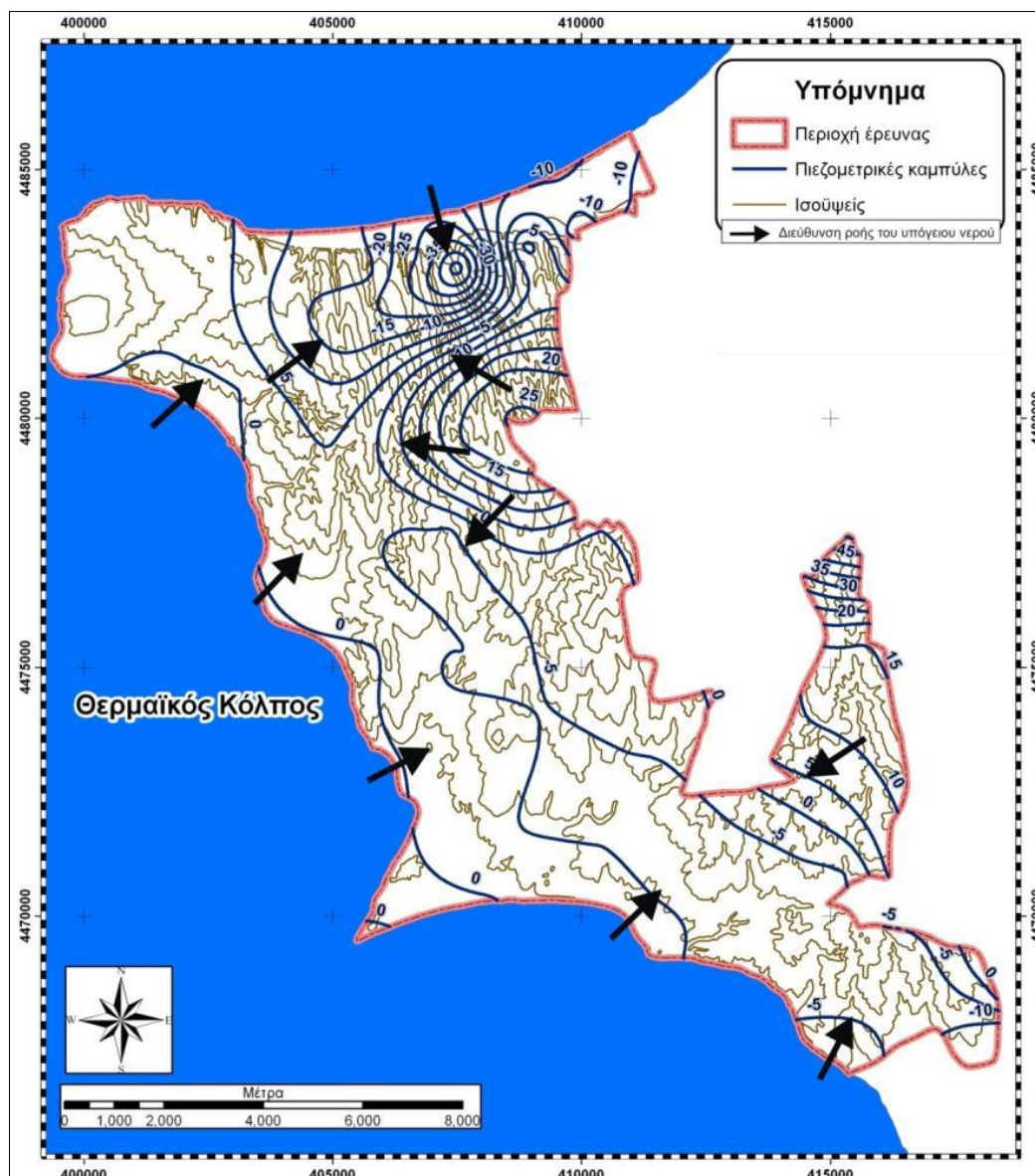
υδροφορέα που συναντάται στο υπόλοιπο τμήμα της περιοχής έρευνας εκτιμάται ότι η υδραυλική αγωγιμότητα κυμαίνεται από 1,7 έως 13,4 m/d, η αποθηκευτικότητα από 0,05 – 5 και η ειδική ικανότητα από 28 – 230 m²/d.

5.3 Πιεζομετρία

Οι πιεζομετρικές συνθήκες σε μία περιοχή παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για την κίνηση του υπόγειου νερού, τη διεύθυνση ροής, την τροφοδοσία των υδροφόρων και τα αποθέματα τους.

Στην περιοχή έρευνας η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού σε συνδυασμό με το μικρό ρυθμό εμπλουτισμού του έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση των αποθεμάτων του υπόγειου νερού καθώς και την πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού έως και 30m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Με βάση τις μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος τόσο κατά τις υγρές όσο και κατά τις ξηρές περιόδους, προέκυψε ο παρακάτω πιεζομετρικός χάρτης (Σχήμα 5.5). Σύμφωνα με τον πιεζομετρικό χάρτη, η πιεζομετρική επιφάνεια κυμαίνεται από -35 m στην περιοχή των Νέων Επιβατών έως +45 m στην περιοχή του Μεσημερίου.

Η ροή του υπόγειου νερού έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ στη λοφώδη ζώνη και συνδυάζεται με θετικό πιεζομετρικό φορτίο. Στο παράκτιο τμήμα η διεύθυνση ροής είναι από τη θάλασσα προς την ενδοχώρα και μεταβάλλεται σύμφωνα με τον προσανατολισμό της ακτής. Συνεπώς, από τη Νέα Ηράκλεια (νότιο τμήμα της περιοχής έρευνας) έως το Αγγελοχώρι (βόρειο δυτικό τμήμα) η κατεύθυνση ροής είναι ΝΔ-ΒΑ και το πιεζομετρικό φορτίο κυμαίνεται από 0 m έως -5 m. Στο τμήμα Περαιάς-Αγίας Τριάδας η διεύθυνση του υπόγειου νερού είναι ΒΒΔ-ΝΝΑ, ενώ στους Νέους Επιβάτες δημιουργείται ένας κώνος αρνητικής πιεζομετρίας με φορτίο έως 35 m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας (Pavlou et al., 2013) (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5: Πιεζομετρικός χάρτης του Δήμου Θερμαϊκού. (Βουδούρης κ.ά, 2014).

5.4 Υδατικές ανάγκες

Διεθνώς το κοινά αποδεκτό όριο της ημερήσιας ανάγκης σε νερό για οικιακή μόνο χρήση είναι 200 lit (λίτρα) ανά κάτοικο (Βουδούρης κ ά, 2014). Στην ποσότητα αυτή θα πρέπει να προστεθεί η κατανάλωση νερού σε κοινόχρηστους χώρους. Προκειμένου να υπολογισθούν οι υδατικές ανάγκες στην περιοχή του Δήμου Θερμαϊκού εκτιμάται, αρχικά, η ειδική κατανάλωση.

Η ειδική κατανάλωση αποτελεί μια πολύ βασική παράμετρο, καθώς είναι δείκτης της ποσότητας νερού που χρησιμοποιείται για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών των κατοίκων. Η ειδική κατανάλωση μεταβάλλεται εποχικά.

Έτσι για τον υπολογισμό της ειδικής κατανάλωσης σε lit/κατ/ημ. για τη χειμερινή περίοδο εφαρμόζεται ο τύπος:

$$\text{Ειδική κατανάλωση} = (\text{κάτοικοι} \times 0,20 \text{ m}^3/\text{ημ.}) \times 1,20$$

όπου:

Ημερήσια κατανάλωση σε νερό για οικιακή χρήση ανά κάτοικο: 200 lit=0,2 m³/ημ.

1,20 αντιστοιχεί σε απώλειες δικτύου (20%)

Κατά τη χειμερινή περίοδο δε λαμβάνεται υπόψη η κατανάλωση νερού για το πλύσιμο / άρδευση των κοινόχρηστων χώρων.

Κατά την περίοδο αιχμής (θερινή) χρησιμοποιείται ο παρακάτω τύπος:

$$\text{Ειδική κατανάλωση} = (\text{κάτοικοι} \times 0,25 \text{ m}^3/\text{ημ.}) \times 1,20$$

όπου:

Ημερήσια κατανάλωση σε νερό για οικιακή χρήση ανά κάτοικο: 250 lit=0,25 m³/ημ.

1,20 αντιστοιχεί σε απώλειες δικτύου

Με βάση τη χρήση των παραπάνω τύπων υπολογίστηκε ημερησίως η ειδική κατανάλωση νερού για το Δήμο Θερμαϊκού κατά τη χειμερινή και θερινή περίοδο. Ως χειμερινή περίοδος θεωρείται το διάστημα από το μήνα Οκτώβριο έως τον Απρίλιο (245 ημέρες) και ως θερινή περίοδος από τον Μάιο έως τον Σεπτέμβριο (120 ημέρες).

Ειδική κατανάλωση χειμερινής περιόδου Δήμου Θερμαϊκού =

$$(50264 \times 0,20 \text{ m}^3/\text{ημ.}) \times 1,20 = 13.068 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Ειδική κατανάλωση θερινής περιόδου Δήμου Θερμαϊκού =

$$(50264 \times 0,25 \text{ m}^3/\text{ημ.}) \times 1,20 = 15.079 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Ετήσια κατανάλωση για υδρευτική χρήση:

$$(13.068 \text{ m}^3/\text{ημ.} \times 245 \text{ ημέρες}) + (15.079 \text{ m}^3/\text{ημ.} \times 120 \text{ ημέρες}) = 5 \times 10^6 \text{ m}^3.$$

Αρδευτικές Ανάγκες

Το μεγαλύτερο μέρος των καλλιεργούμενων εκτάσεων στο Δήμο Θερμαϊκού είναι αρδευόμενες (68.000 στρέμματα). Θεωρώντας ως μέση κατανάλωση τα 300 m³/στρέμμα (Βουδούρης κ ά, 2014), προκύπτει ότι οι ετήσιες αρδευτικές ανάγκες είναι:

$$68000 \text{ στρέμματα} \times 300 \text{ m}^3/\text{στρέμμα} \approx 20 \times 10^6 \text{ m}^3$$

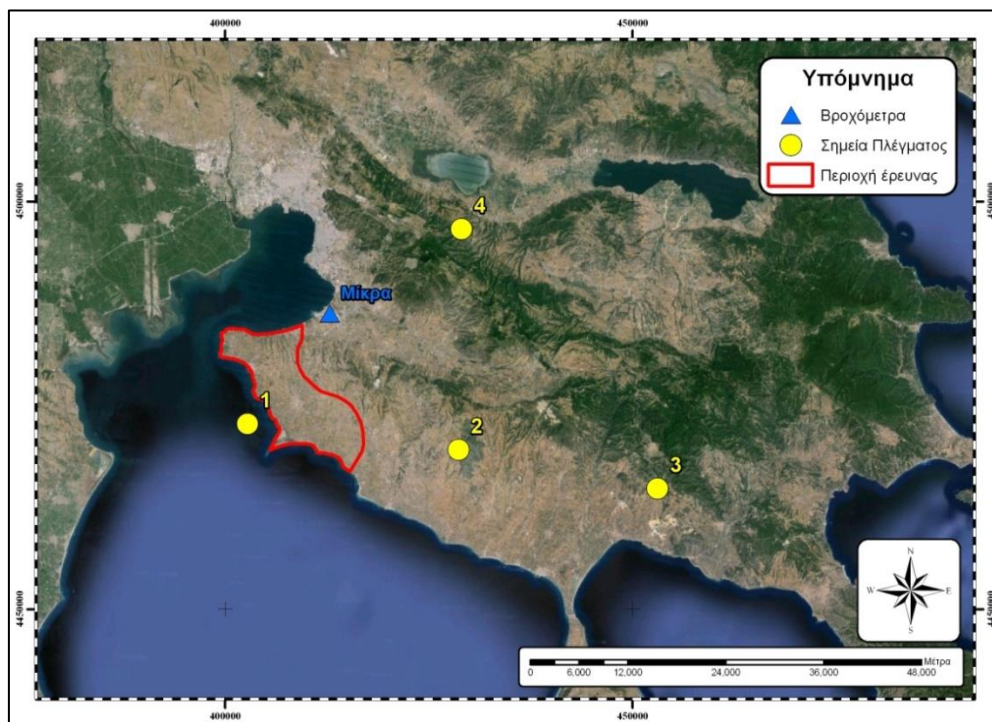
Οι συνολικές ετήσιες υδατικές ανάγκες ανέρχονται περίπου σε $25 \times 10^6 \text{ m}^3$.

6 Εφαρμογή κλιματικού μοντέλου RegCM3 στην περιοχή έρευνας

Το κλιματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση του μελλοντικού κλίματος της περιοχής έρευνας είναι το μοντέλο RegCM3, το οποίο ακολουθεί το σενάριο εκπομπών A1B. Το μοντέλο RegCM3, αρχικά δημιουργήθηκε από τους Giorgi et al. (1993a,b), ενώ στη συνέχεια τροποποιήθηκε και βελτιώθηκε σύμφωνα με τους Giorgi and Mearns (1999) και Pal et al. (2007). Αποτελεί ένα υδροστατικό μοντέλο και έχει σ-κατακόρυφη προβολή (sigma vertical coordinate), ενώ ο δυναμικός του πυρήνας είναι ίδιος με αυτόν του υδροστατικού μοντέλου MM5 του πανεπιστημίου της Πενσυλβάνια και του NCAR (National Center for Atmospheric Research) (Grell et al. 1994a,b). Το σχήμα μεταφοράς βιόσφαιρας – ατμόσφαιρας (BATS) (Dickinson et al. 1993) χρησιμοποιείται για την αναπαράσταση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια, και η φυσική του οριακού στρώματος περιγράφεται μέσω του μη – τοπικού κατακόρυφου σχήματος διάχυσης των Holtslag et al. (1990). Οι φυσικές παραμετροποιήσεις του μοντέλου βασίζονται κατά κύριο λόγο στο σχήμα μεταφοράς ακτινοβολιών του NCAR Community Climate Model και κυρίως της τελευταίας του έκδοσης (Kiehl et al., 1996). Το κλάσμα παγοκρυσταλλίων μέσα στα νέφη υπολογίζεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας τους και μεταφορά ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζεται με την δ-Eddington προσέγγιση. Επίσης, η ακτινοβολία των νεφών ορίζεται μέσα στη συνάρτηση του κλάσματος νεφικής κάλυψης, της ακτίνας των ενεργών νεφοσταγόνων καθώς και της περιεκτικότητας του νέφους σε νερό σε υγρή φάση. Στις προβολές του μοντέλου χωρικής ανάλυσης 25km, χρησιμοποιείται το σχήμα ροής μάζας σε σωρειτόμορφα νέφη (cumulus) του Grell (1993) για τον υπολογισμό της βροχόπτωσης λόγω κατακόρυφης ανάπτυξης μαζί με παραμετροποιήσεις (closure scheme) των Fritsch and Chappell (1980). Η βροχόπτωση στο πλέγμα διακριτοποίησης παρουσιάζεται μέσω του σχήματος των Pal et al. (2000). Αυτό το σχήμα συμπεριλαμβάνει μια προγνωστική εξίσωση για το νερό μέσα στα νέφη και επιτρέπει τον καθορισμό και τον υπολογισμό των νεφών ακόμα και σε μικρότερη κλίμακα από την αρχική του μοντέλου. Οι προσομοιώσεις των 25km οδηγούνται (έχουν ως γονέα) από το μοντέλο γενικής κυκλοφορίας του Max Planck Institute for Meteorology (MPI_ECHAM5) χρησιμοποιώντας το 20C3M (20th Century coupled model simulations with realistic changes in radiative forcing) σενάριο (Roeckner et

al., 2006). Η αναπαράσταση της επιφάνειας του εδάφους έγινε με τη βοήθεια δεδομένων από το The US Geological Survey (USGS) Global Land Cover Characterization (GLCC) καθώς και η κατάταξη BATS (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme). Επίσης, για την καλύτερη προσομοίωση του υψομέτρου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το USGS Global Topography 30-arc second (GTOPO30). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Torma et al 2008, Zanis et al 2009, Torma et al 2011) το μοντέλο RegCM3 γενικά υπερεκτιμά τη βροχόπτωση όταν χρησιμοποιείται η βασική του παραμετροποίηση (*default parameterization*).

Για την εφαρμογή των αποτελεσμάτων του κλιματικού μοντέλου στην περιοχή έρευνας εξετάζονται τέσσερα σημεία πλέγματος, τα οποία καλύπτουν την ευρύτερη περιοχή έρευνας. Στο Σχήμα 6.1 και στον Πίνακα 6.1 που ακολουθούν παρουσιάζονται τα τέσσερα σημεία πλέγματος.



Σχήμα 6.1: Χάρτης με τα σημεία πλέγματος (Grid 1,2,3,4) και το σταθμό της Μίκρας.

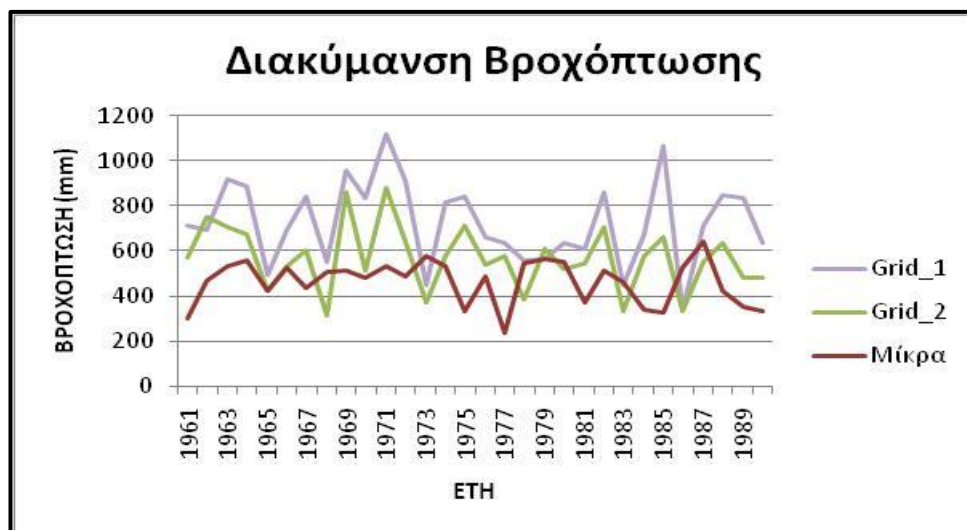
Πίνακας 6.1: Συντεταγμένες των σημείων πλέγματος.

<i>Σημεία πλέγματος</i>	ΣΥΝΤΕΤΑΓΜΕΝΕΣ	
	Γεωγραφικό πλάτος	Γεωγραφικό μήκος
Grid 1	40 24	22 51
Grid 2	40 22 2	23 9
Grid 3	40 20 4	22 27
Grid 4	40 36	23 10 8

Τα σημεία πλέγματος: Grid 3 και Grid 4 δε λαμβάνονται υπόψη, διότι καλύπτουν πιο ορεινή περιοχή από την περιοχή έρευνας. Συνεπώς τα σημεία πλέγματος που εξετάζονται είναι τα: Grid 1 και Grid 2. Ως σταθμός αναφοράς θεωρήθηκε ο μετεωρολογικός σταθμός της Ε.Μ.Υ. στο αεροδρόμιο της Μίκρας, ο οποίος βρίσκεται σε υψόμετρο 4 m και ως έτος αναφοράς η τριακονταετία 1961-1990. Σκοπός της επιλογής της τριακονταετίας 1961-1990, ως περιόδου αναφοράς, αποτελεί το γεγονός ότι τα δεδομένα βροχόπτωσης είναι πιο αντιπροσωπευτικά και πιο αξιόπιστα, διότι μέσα στην τριακονταετία είναι δυνατό να συμπεριληφθούν τόσο υγρές όσο και ξηρές δεκαετίες. Στον πίνακα 6.2 και στο διάγραμμα (Σχήμα 6.2) που ακολουθούν παρουσιάζονται, συγκριτικά, η διακύμανση της βροχόπτωσης για την περίοδο 1961-1990 μεταξύ του σταθμού της Μίκρας και των σημείων πλέγματος Grid 1 και Grid 2.

Πίνακας 6.2: Δεδομένα βροχόπτωσης (mm) για το σταθμό της Μίκρας και για τα σημεία πλέγματος Grid 1,2 για την τριακονταετία 1961-1990.

Έτος	Μίκρα (mm)	Grid 1 (mm)	Grid 2 (mm)
1961	298,50	712,00	568,70
1962	468,10	689,00	751,44
1963	532,30	918,00	706,58
1964	555,30	887,00	670,74
1965	422,60	493,00	424,86
1966	526,10	695,00	529,76
1967	437,60	837,00	606,36
1968	508,50	551,00	315,00
1969	509,40	953,00	859,20
1970	482,60	833,00	516,45
1971	528,40	1116,00	878,67
1972	488,30	912,00	643,80
1973	577,60	448,00	375,20
1974	532,40	811,00	580,78
1975	333,60	840,00	714,86
1976	488,40	657,00	541,30
1977	235,70	637,00	575,19
1978	547,10	557,00	385,17
1979	560,40	561,00	612,00
1980	550,90	636,00	521,97
1981	373,50	608,00	547,21
1982	513,80	856,00	708,37
1983	459,80	448,00	337,29
1984	336,30	672,00	574,78
1985	327,90	1062,00	661,43
1986	523,90	339,00	332,19
1987	640,50	712,00	551,10
1988	420,30	844,00	635,69
1989	352,30	833,00	479,71
1990	329,00	636,00	481,31



Σχήμα 6.2: Συγκριτικό διάγραμμα της διακύμανσης της βροχόπτωσης (mm) μεταξύ Μίκρας – Grid 1 - Grid 2.

Από την αξιολόγηση του διαγράμματος διαπιστώνονται μικρές διαφορές στη μεταβολή της βροχόπτωσης μεταξύ της Μίκρας και του σημείου πλέγματος Grid 2. Αντίθετα, μεγαλύτερες διαφορές στις τιμές της βροχόπτωσης παρατηρούνται μεταξύ της Μίκρας και του Grid 1. Επομένως, για την εφαρμογή των κλιματικών μοντέλων στην περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε το σημείο πλέγματος Grid 2.

Για την καλύτερη, λεπτομερέστερη και πιο αξιόπιστη σύγκριση των δεδομένων του σταθμού της Μίκρας και των δεδομένων από το μοντέλο κρίνεται απαραίτητη η εξέταση της διακύμανσης της βροχόπτωσης σε δύο περιόδους. Η πρώτη περίοδος αφορά την υγρή περίοδο και περιλαμβάνει τους μήνες Οκτώβριο έως και Μάιο. Η δεύτερη περίοδος αφορά τη ξηρή περίοδο, περιλαμβάνοντας τους μήνες Ιούνιο έως και Σεπτέμβριο.

Από τα διαγράμματα (Σχήμα 6.3 & Σχήμα 6.4) που ακολουθούν, προκύπτει ότι για την τριακονταετία 1961-1990, κατά την υγρή περίοδο το κλιματικό μοντέλο RegCM3 υπερεκτιμά τη βροχόπτωση κατά 37% σε σχέση με τα αντίστοιχα πραγματικά δεδομένα. Αντίθετα, κατά τη ξηρή περίοδο το κλιματικό μοντέλο RegCM3 υποτιμά τη βροχόπτωση κατά 27% σε σχέση με τα αντίστοιχα πραγματικά δεδομένα. Συμπεραίνεται, δηλαδή, ότι για την τριακονταετία 1961-1990 η διακύμανση της βροχόπτωσης του σταθμού της Μίκρας προσεγγίζεται ικανοποιητικά από το σημείο πλέγματος Grid 2.



Σχήμα 6.3: Διακύμανση της βροχόπτωσης (mm) μεταξύ Μίκρας – Grid 2 για την υγρή περίοδο της τριακονταετίας 1961-1990.



Σχήμα 6.4: Διακύμανση της βροχόπτωσης (mm) μεταξύ Μίκρας – Grid 2 για τη ξηρή περίοδο της τριακονταετίας 1961-1990.

Για την εκτίμηση των κλιματικών αλλαγών επιλέγονται οι τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100. Τα αποτελέσματα από το κλιματικό μοντέλο RegCM3 για τη βροχόπτωση για τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100 συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για την τριακονταετία 1961-1990 (Πίνακας 6.3 & Πίνακας 6.4). Η μεταβολή της βροχόπτωσης υπολογίζεται από τη σχέση (6.1):

$$\text{Μεταβολή βροχόπτωσης} = x_i - x \text{ (6.1)}$$

Όπου x = η μέση βροχόπτωση της υγρής ή ξηρής περιόδου για την περίοδο αναφοράς (1961-1990).

και x_i = η ετήσια βροχόπτωση για τις μελλοντικές περιόδους

Συγκεκριμένα, αναλύονται τα διαγράμματα της μεταβολής της βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια των τριακονταετιών 2021-2050 και 2071-2100, για την υγρή και τη ξηρή περίοδο. Κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου, της τριακονταετίας 2021-2050, αναμένεται αύξηση της βροχόπτωσης από το 2033 έως το 2037, ενώ κατά τα έτη 2027, 2028, 2033, 2047, 2048 σημαντική μείωση της βροχόπτωσης (Σχήμα 6.5). Κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, της τριακονταετίας 2021-2050, εκτιμάται ότι τα έτη 2027, 2028, 2039 και 2047 θα είναι πιο υγρά, ενώ τα έτη 2033 έως 2037 πιο ξηρά (Σχήμα 6.6).

Κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου της τριακονταετίας 2071-2100, αναμένεται μείωση της βροχόπτωσης κατά τα έτη 2071-074, 2080-2081, 2086-2089, 2092-2100 και αύξηση της βροχόπτωσης τα έτη 2077-2078, 2082-2085 και 2089-2091 (Σχήμα 6.7). Κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου της τριακονταετίας 2071-2100, εκτιμάται ότι τα έτη 2074-2076, 2092, 2098 θα είναι πιο υγρά (Σχήμα 6.8).

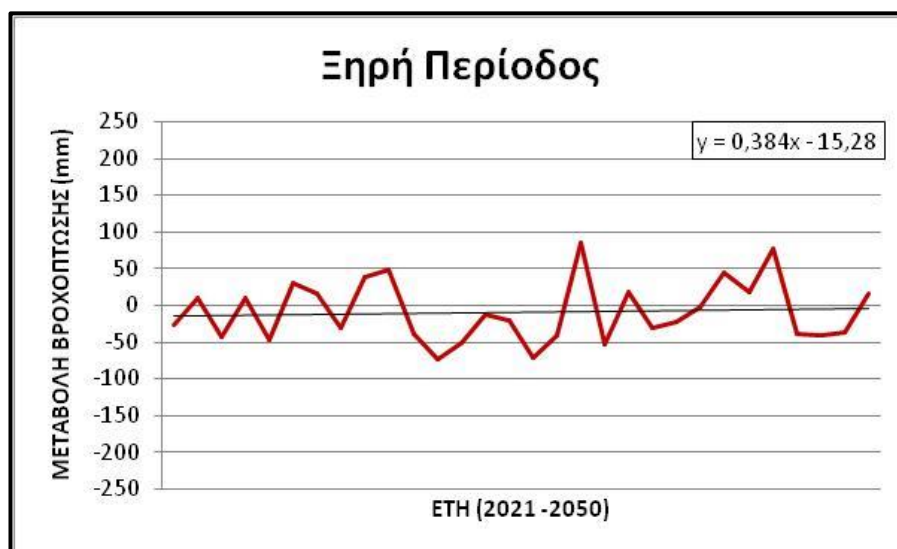
Συνεπώς, προκύπτει ότι για την τριακονταετία 1961-1990 ο μέσος όρος βροχόπτωσης είναι 569,57 mm, για την περίοδο 2021-2050 546,05 mm, ενώ για την περίοδο 2071-2100 443,76 mm. Συνεπώς, εκτιμάται ότι η μείωση της βροχόπτωσης για την τριακονταετία 2021-2050 σε σχέση με την τριακονταετία 1961-1990 είναι 4,12%. Μεγαλύτερη μείωση (22,1%) αναμένεται για την τριακονταετία 2071-2100 (Πίνακας 6.5).

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα για τη βροχόπτωση (mm) από το κλιματικό μοντέλο RegCM3 για την υγρή και τη ξηρή περίοδο των τριακονταετιών 1961-1990 και 2021 -2050.

Υγρή Περίοδος		Ξηρή Περίοδος	
1961 -1990	2021-2050	1961 - 1990	2021 - 2050
508,76	539,11	59,94	49,67
712,05	556,28	39,40	86,61
540,51	588,74	166,07	34,09
588,01	469,46	82,73	86,76
349,55	523,11	75,32	30,58
430,47	707,03	99,29	107,3
578,95	254,10	27,41	92,68
255,05	603,42	59,95	46,82
683,13	326,88	176,08	115,86
461,41	562,34	54,96	125,62
616,39	597,12	262,98	37,64
573,58	273,34	70,22	4,65
254,19	440,76	121,01	25,71
557,65	406,00	23,13	65,27
657,96	393,76	56,90	55,83
401,88	763,84	139,42	5,78
511,25	411,47	63,95	37,13
380,76	569,36	4,41	162,25
555,02	662,47	54,98	25,05
479,81	463,60	42,17	95,83
416,67	327,10	130,54	46,73
613,23	505,11	95,15	53,88
293,81	453,72	43,48	73,95
454,12	614,39	120,66	121,31
653,10	285,22	8,33	95,61
269,59	545,89	62,59	153,53
551,10	616,35	0,00	38,44
536,87	234,92	98,83	35,78
423,22	459,71	56,49	39,70
454,40	295,47	26,92	93,38



Σχήμα 6.5: Μεταβολή της βροχόπτωσης (mm) για την υγρή περίοδο κατά την τριακονταετία 2021-2050.



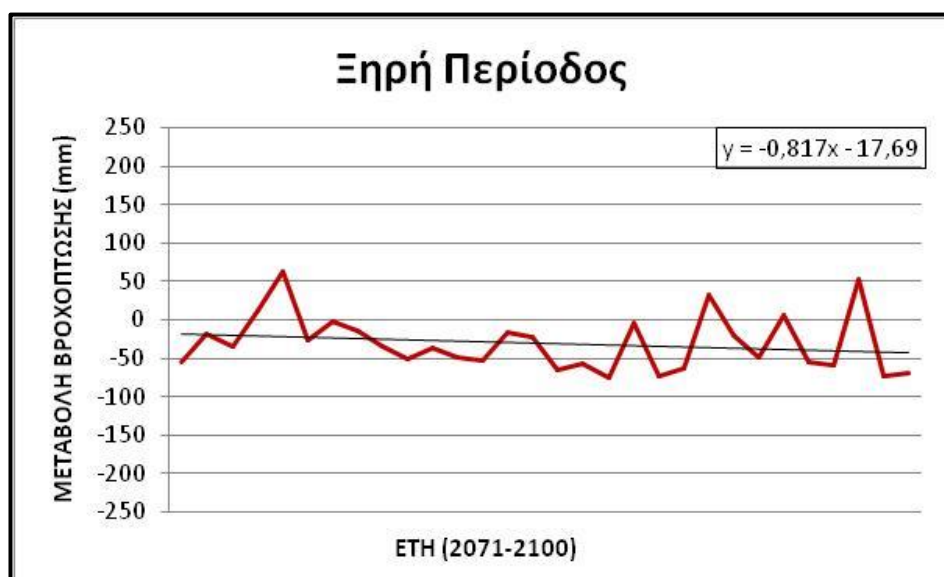
Σχήμα 6.6: Μεταβολή της βροχόπτωσης (mm) για τη ξηρή περίοδο κατά την τριακονταετία 2021-2050.

Πίνακας 6.4: Αποτελέσματα για τη βροχόπτωση (mm) από το κλιματικό μοντέλο RegCM3 για την υγρή και τη ξηρή περίοδο των τριακονταετιών 1961-1990 και 2071-2100.

Υγρή Περίοδος		Ξηρή Περίοδος	
1961 - 1990	2071 - 2100	1961 - 1990	2071 - 2100
508,76	298,36	59,94	22,69
712,05	267,14	39,40	59,56
540,51	264,67	166,07	42,11
588,01	387,84	82,73	90,02
349,55	384,97	75,32	140,52
430,47	298,56	99,29	51,18
578,95	528,75	27,41	76,04
255,05	312,70	59,95	63,8
683,13	448,41	176,08	41,97
461,41	219,94	54,96	26,90
616,39	449,89	262,98	40,79
573,58	296,88	70,22	28,8
254,19	424,35	121,01	23,69
557,65	348,02	23,13	60,58
657,96	571,09	56,90	55,14
401,88	386,97	139,42	12,58
511,25	441,095	63,95	20,48
380,76	329,28	4,41	2,16
555,02	547,22	54,98	72,68
479,81	518,51	42,17	3,90
416,67	536,94	130,54	13,69
613,23	741,29	95,15	109,84
293,81	298,16	43,48	56,09
454,12	462,64	120,66	29,41
653,10	256,68	8,33	84,18
269,59	433,09	62,59	22,59
551,10	522,71	0,00	19,15
536,87	443,97	98,83	129,5
423,22	291,08	56,49	4,32
454,40	248,00	26,92	8,18



Σχήμα 6.7: Μεταβολή της βροχόπτωσης (mm) για την υγρή περίοδο κατά την τριακονταετία 2071-2100.



Σχήμα 6.8: Μεταβολή της βροχόπτωσης (mm) για τη ξηρή περίοδο κατά την τριακονταετία 2071-2100.

Πίνακας 6.5: Ποσοστά μείωσης της βροχόπτωσης για τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100

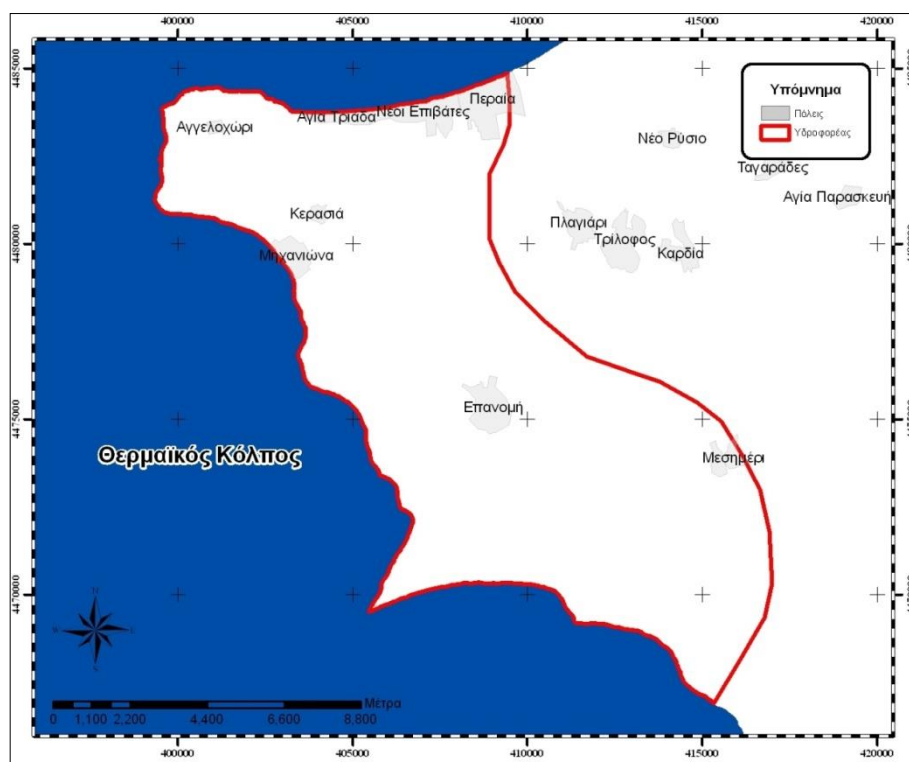
Τριακονταετία	Μέσος όρος Βροχόπτωσης (mm)	Ποσοστό μειώσεων (%)
1961-1990	569,57	
2021-2050	546,05	4,12
2071-2100	443,76	22,10

7 Εφαρμογή του κώδικα MODFLOW στην περιοχή έρευνας

7.1 Εννοιολογικό Μοντέλο

Η προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού προϋποθέτει τη σωστή και πλήρη κατανόηση των μηχανισμών του προσομοιωμένου υδροφόρου συστήματος. Για αυτόν ακριβώς το λόγο κρίνεται απαραίτητη η συγκέντρωση πλήθους στοιχείων της περιοχής έρευνας, όπως γεωλογικών, υδρογεωλογικών, γεωμορφολογικών, υδρομετεωρολογικών, καθώς και μετρήσεων υπαίθρου. Η αξιολόγηση όλων αυτών των στοιχείων οδηγεί στη σύνθεση του εννοιολογικού μοντέλου.

Για την εφαρμογή του μοντέλου επιλέγεται ο ελεύθερος υδροφορέας που αναπτύσσεται στην περιοχή έρευνας, με την παραδοχή ότι είναι ομοιογενής και ισότροπος. Τα γεωμετρικά όρια του υδροφορέα δεν ταυτίζονται με τα όρια του Δήμου Θερμαϊκού. Έτσι, στο Ανατολικό τμήμα του Δήμου έως το Μεσημέρι, το όριο εφάπτεται με τις ερυθρές αργίλους. Αντίθετα, στο Νότιο-Ανατολικό τμήμα ο υδροφορέας περιορίζεται στα όρια του Δήμου (Σχήμα 7.1). Ο υδροφορέας καταλαμβάνει έκταση 137 km^2 και έχει μέσο πάχος 80 m . Η τροφοδοσία του υδροφορέα επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της κατείσδυσης των κατακρημνισμάτων και της επιστροφής των αρδεύσεων. Όπως προέκυψε από τον πιεζομετρικό χάρτη (βλ. Κεφ. 5.3) και τη διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού, ο υδροφορέας τροφοδοτείται από το Ανατολικό και βόρειο Ανατολικό όριο του. Η ποσότητα του νερού που τροφοδοτείται πλευρικά, καθώς και οι εισροές από τη θάλασσα αποτελούν αντικείμενο διερεύνησης της προσομοίωσης του υδροφορέα.



Σχήμα 7.1: Τα γεωμετρικά όρια του υδροφορέα στην περιοχή έρευνας.

7.2 Εισαγωγή δεδομένων

Αρχικά, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι μονάδες που επιλέγονται να εφαρμοστούν στο μοντέλο είναι για το μήκος τα μέτρα (m) και για το χρόνο η ημέρα (d). Ως σύστημα γεωαναφοράς χρησιμοποιείται το ΕΓΣΑ87 (Σχήμα 7.2).

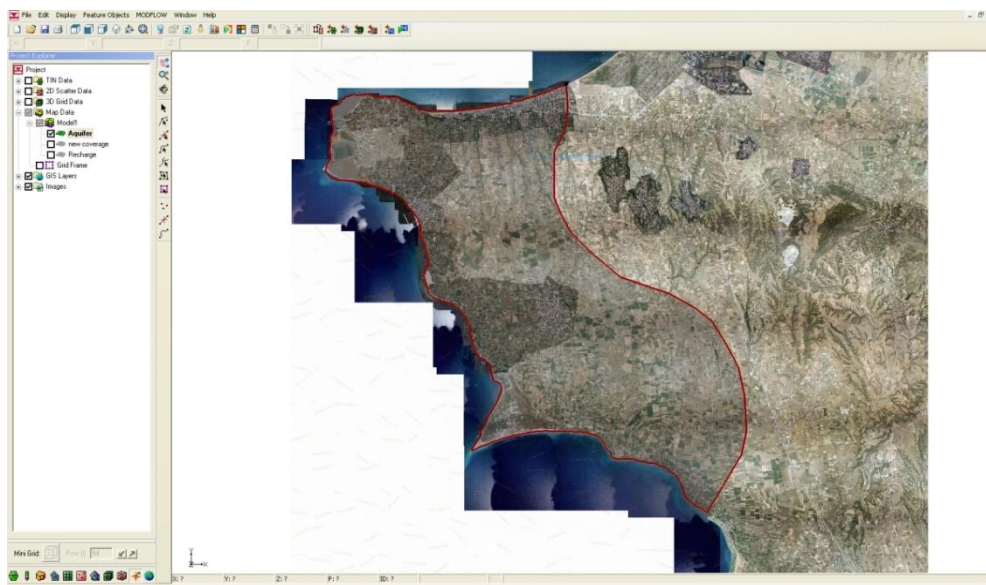
Σχήμα 7.2: Παράθυρο επιλογής μονάδων.

Για τη σχηματοποίηση και η διακριτοποίηση του υδροφορέα χρησιμοποιείται κάναβος 100x100 m (Σχήμα 7.3). Σύμφωνα, με τη γεωλογία της περιοχής έρευνας διαπιστώνεται ότι η λεκάνη της περιοχής του Δήμου Θερμαϊκού θεωρείται ως ένα

ενιαίο υδροφόρο στρώμα (ένα layer), που αναπτύσσεται στην ψαμμιτομαργαϊκή σειρά. Ο υδροφορέας είναι ελεύθερος και καθορίζεται ως τύπου 1. Στον κώδικα MODFLOW ο τύπος 1 αντιστοιχεί σε ελεύθερους υδροφορείς (unconfined). Η ακρίβεια καθορισμού των ορίων του υδροφορέα είναι πολύ σημαντική. Ο προσδιορισμός των ορίων του υδροφορέα επιτυγχάνεται μέσω του λογισμικού ArcGIS και ως οπτικό υπόβαθρο χρησιμοποιείται ο χάρτης από το Εθνικό Κτηματολόγιο (Σχήμα 7.4).

Item	Value	Units
Grid type:	Cell Centered	
X origin:	398465.45161342	(m)
Y origin:	4465995.740122	(m)
Z origin:	-5.0	(m)
Length in X:	19392.003347615	(m)
Length in Y:	19767.701205207	(m)
Length in Z:	60.0	(m)
Rotation angle:	0.0	
AHG'W' X origin:	398465.45161342	(m)
AHG'W' Y origin:	4485763.4413272	(m)
AHG'W' Z origin:	55.0	(m)
AHG'W' Rotation angle:	90.0	
Minimum scalar:	-34.3763	

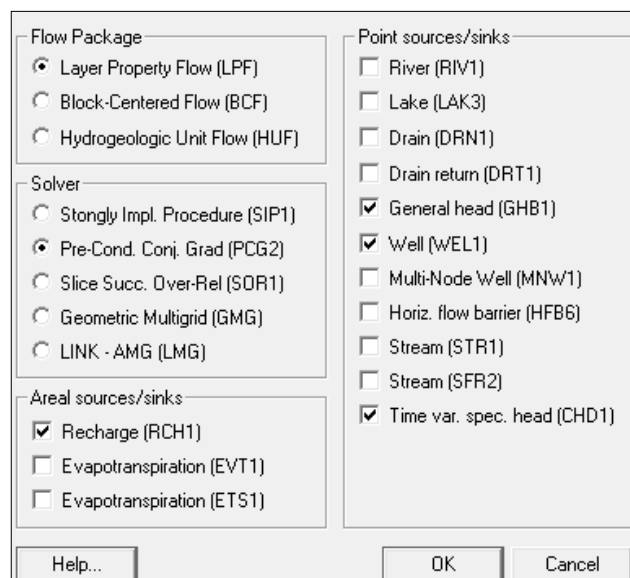
Σχήμα 7.3: Παράθυρο επιλογής των κριτηρίων του κανάβου.



Σχήμα 7.4: Εισαγωγή των ορίων του υδροφορέα στο περιβάλλον προσομοίωσης του MODFLOW.

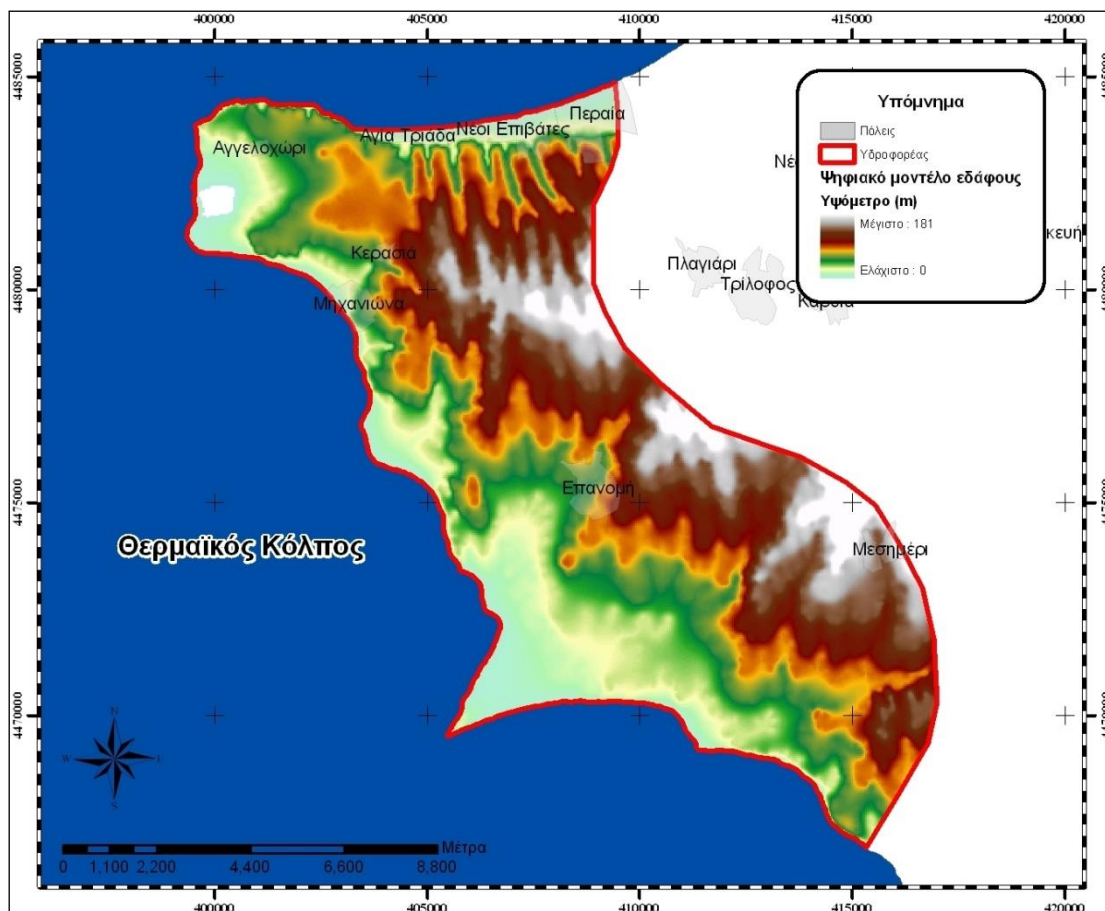
Τα πακέτα του MODFLOW (MODFLOW Packages) που χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση του υπόγειου νερού είναι τα ακόλουθα: το Layer-Property-

Flow Package (LPF), Εμπλουτισμός (Recharge Package, RCH), οι Γεωτρήσεις (Well Package), η μέθοδος των υπό προϋποθέσεων συζυγών κλίσεων (Preconditioned Conjugate Gradient, P.C.G2), το General Head Boundary και το Specified Head (Σχήμα 7.5).



Σχήμα 7.5: Παράθυρο επιλογής πακέτων MODFLOW.

Εν συνεχεία, προσδιορίζονται τα υψόμετρα της επιφάνειας του υδροφορέα (Top Elevation), καθώς και η μορφολογία του πυθμένα του υδροφορέα (Bottom Elevation). Ως άνω όριο για την εισαγωγή της γεωμετρίας του υδροφόρου συστήματος χρησιμοποιείται το τοπογραφικό ανάγλυφο. Η εισαγωγή του Top Elevation πραγματοποιείται μέσω του ArcGIS και του Ψηφιακού Μοντέλου DEM της περιοχής. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια του λογισμικού ArcGIS δημιουργείται ένας χάρτης που περιλαμβάνει τα πλεγματικά επίπεδα πληροφοριών (raster) του τοπογραφικού χάρτη κλίμακας 1:50.000 και το διανυσματικό επίπεδο πληροφορίας των ορίων του υδροφορέα (Σχήμα 7.6). Η μορφολογία του πυθμένα του υδροφορέα αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη διαμόρφωση της υπόγειας ροής. Στην περιοχή έρευνας το μέσο πάχος του υδροφορέα είναι 80 m και ο πυθμένας βρίσκεται στα 140 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Για τη ρύθμιση του μοντέλου, κρίνεται απαραίτητη, κατά θέσεις, η διακύμανση του πυθμένα του υδροφορέα, έτσι ώστε το μέσο πάχος του υδροφορέα να διατηρείται στα 80 m.



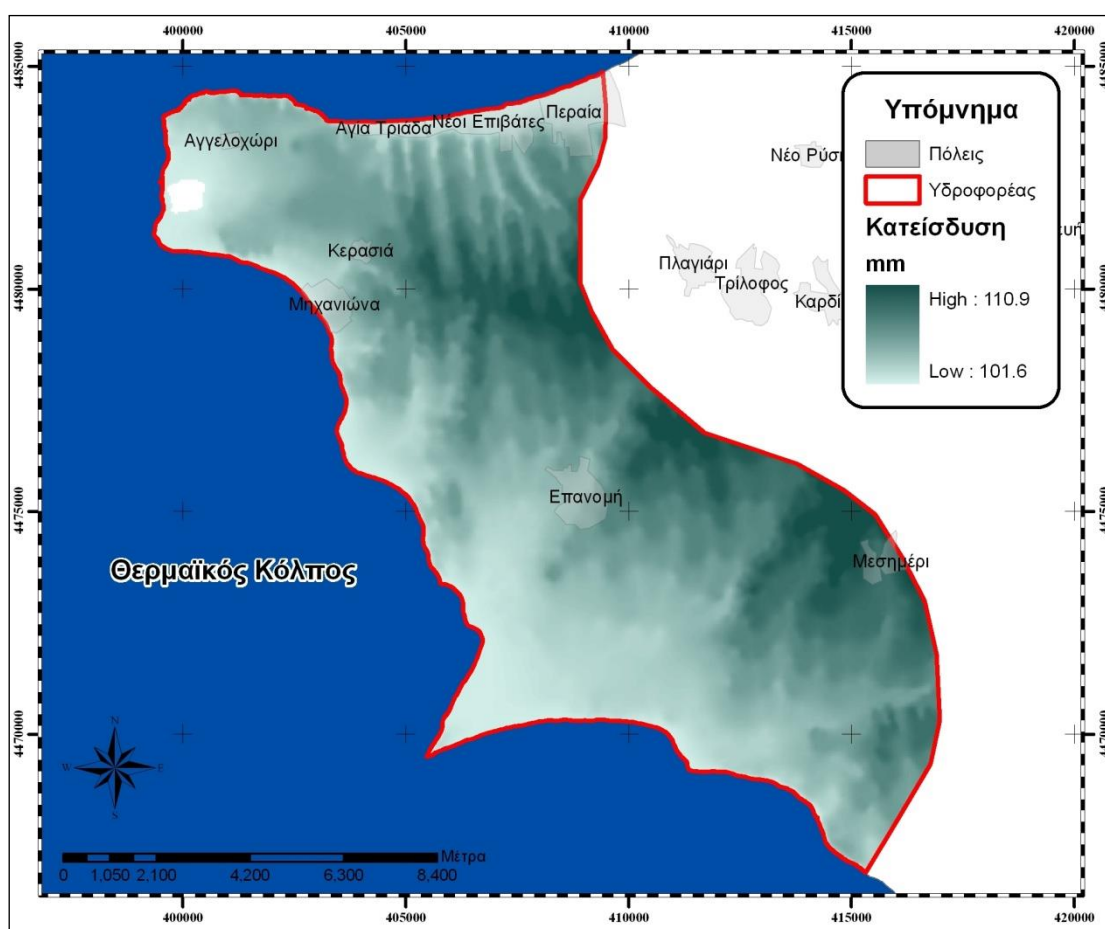
Σχήμα 7.6: Χάρτης του Ψηφιακού Μοντέλου DEM της περιοχής.

Επόμενο σημαντικό βήμα στην εισαγωγή των δεδομένων αποτελεί ο προσδιορισμός του εμπλουτισμού του υδροφορέα. Η τροφοδοσία από την άμεση κατείσδυση των κατακρημνισμάτων και τις επιστροφές από τις αρδεύσεις εισάγονται στο μοντέλο με το πακέτο Recharge. Για τις ανάγκες του μοντέλου δημιουργείται ο θεματικός χάρτης του εμπλουτισμού (Σχήμα 7.7), ο οποίος προέκυψε από το βροχομετρικό (Σχήμα 4.7) και το γεωλογικό χάρτη (Σχήμα 4.10) της περιοχής. Ο βροχομετρικός χάρτης συντάχθηκε από τη σχέση βροχόπτωσης-υψομέτρου και το ψηφιακό μοντέλο εδάφους DEM της περιοχής, ενώ για τον υπολογισμό της κατείσδυσης χρησιμοποιούνται οι συντελεστές του Πίνακα 7.1. Πρέπει να τονιστεί ότι στις περιοχές των πολεοδομικών συγκροτημάτων η κατείσδυση θεωρείται αμελητέα. Συνοψίζοντας, διαπιστώνεται ότι τα κατακρημνίσματα κυμαίνονται μεταξύ 462 mm έως 504 mm (σύμφωνα με τη βροχοβαθμίδα) και ο συντελεστής κατείσδυσης της περιοχής μεταξύ 18% έως 22%. Επομένως, η συνολική ποσότητα των κατακρημνισμάτων που κατεισδύει

κυμαίνεται από 101,6 mm έως 110,9 mm ανά έτος, δηλαδή από $2,81 \times 10^{-4} \text{ m/day}$ έως $2,9 \times 10^{-4} \text{ m/day}$ ανά κυψελίδα ή περίπου $14 \times 10^6 \text{ m}^3$ στο σύνολο της περιοχής (Σχήμα 7.8).

Πίνακας 7.1: Συντελεστές κατείσδυσης για διάφορους λιθολογικούς σχηματισμούς.

Πέτρωμα/Σχηματισμός	Συντελεστής Κατείσδυσης
Παράκτιες αποθέσεις	0,20
Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά	0,22
Σειρά ερυθρών αργίλων	0,12



Σχήμα 7.7: Χάρτης Εμπλουτισμού του υδροφορέα.

Recharge option
 Recharge only at top layer

Multiplier: 1.0

Stress period
 1 Use previous

Start Time: 0.0
 End Time: 1.0

2D Data Set -> Array
 Array -> 2D Data Set
 Constant -> Array

View/Edit: Flux

	7	8	9	10	11	12	13	14	15
39					0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
40					0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
41					0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
42				0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
43				0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
44				0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
45			0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
46			0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
47			0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
48			0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
49			0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
50			0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281	0.000281
51							0.000281	0.000281	0.000281
52									

Help... OK Cancel

Σχήμα 7.8: Τμήμα παραθύρου του εμπλουτισμού.

Ο συντελεστής υδροπερατότητας αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα MODFLOW. Ο συντελεστής υδροπερατότητας ισούται με $k=10^{-5}$ m/s, δηλ. $k = 0,864$ m/day (Σχήμα 7.9) και υπολογίστηκε από τις δοκιμαστικές αντλήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή της έρευνας στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος.

Layer: 1

Multiplier: 1.0

Units: (m/d)

Constant -> Grid... Constant -> Layer...
 3D Data Set -> Grid... 2D Data Set -> Layer...
 Grid -> 3D Data Set... Layer -> 2D Data Set...

	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111
22	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
23	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
24	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
25	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
26	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
27	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
28	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
29	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
30	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
31	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
32	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
33	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
34	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864
35	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864	0.864

Help... OK Cancel

Σχήμα 7.9: Τμήμα παραθύρου του συντελεστή υδροπερατότητας.

Έπειτα, ακολουθεί ο προσδιορισμός της αρχικής πιεζομετρίας. Κύριος σκοπός της εισαγωγής της αρχικής πιεζομετρίας είναι η διευκόλυνση του προγράμματος MODFLOW, έτσι ώστε να πραγματοποιεί λιγότερες πράξεις. Η εισαγωγή της αρχικής πιεζομετρίας επιτυγχάνεται πολύ εύκολα μέσω του λογισμικού ArcGIS (Σχήμα 7.10).

Layer:

1

Constant -> Grid...

Constant -> Layer...

Multiplier:

1.0

3D Data Set -> Grid...

2D Data Set -> Layer...

Units: (m)

Grid -> 3D Data Set...

Layer -> 2D Data Set...

	105	106	107	108	109	110
27	66.953323364258	57.291427612305	45.790962219238	34.605514526367	36.71085357666	
28	66.447708129883	57.185020446777	46.664485931396	37.437461853027	36.86051940918	
29	63.918395996094	53.966384887695	45.19319152832	40.514278411865	37.670421600342	
30	63.843341827393	54.437236785889	49.222095489502	45.828269958496	39.070255279541	
31	67.029876708984	56.765380859375	57.098651885986	52.473392486572		
32	67.566535949707	59.799495697021	60.809955596924	58.119693756104		
33	69.084495544434	62.316265106201	64.266876220703			
34	71.85326385498	64.898490905762	65.996627807617			
35	74.169342041016	68.732521057129				
36	76.388641357422	71.281135559082				
37	80.401031494141					
38	86.489593505859					
39	93.643775939941					
40	102.0620803833					

Help...

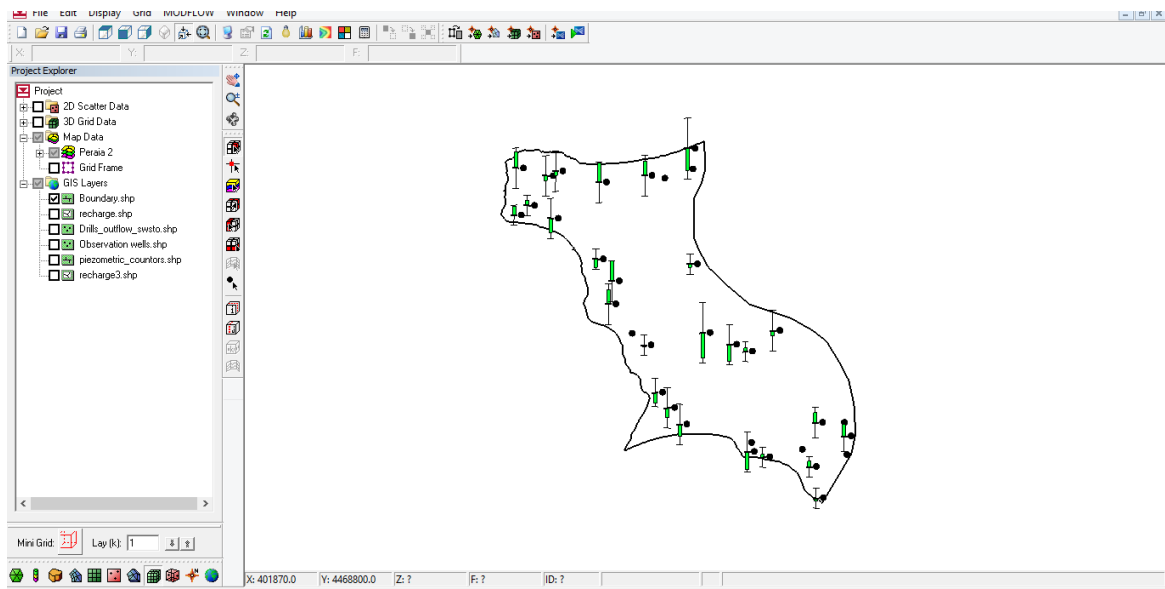
OK

Cancel

Σχήμα 7.10: Τμήμα παραθύρου της αρχικής πιεζομετρίας.

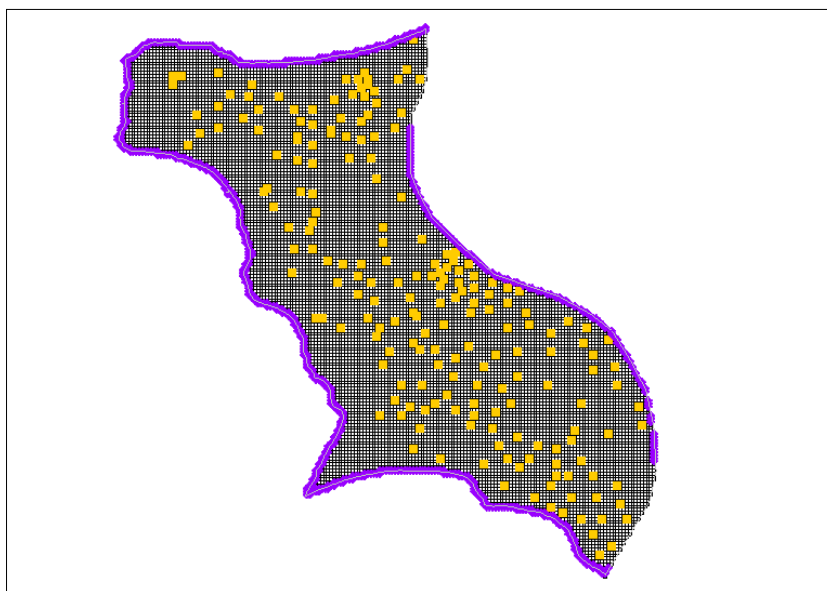
Επόμενο βήμα είναι ο προσδιορισμός των υδατικών αναγκών του δήμου Θερμαϊκού. Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 9, το σύνολο των υδατικών αναγκών ανέρχεται σε $25 \times 10^6 \text{ m}^3$ το έτος. Οι υδρευτικές ανάγκες υπολογίζονται σε $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ το έτος, ενώ οι αρδευτικές $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανά έτος. Η κάλυψη των υδατικών αναγκών πραγματοποιείται μέσω ενός εκτεταμένου δικτύου υδρογεωτρήσεων. Οι υδρογεωτρήσεις προσομοιώνονται στο MODFLOW με το πακέτο Wells.

Τα σημεία παρατήρησης (observations points) αποτελούν σημεία, σύμφωνα με τα οποία γίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων του MODFLOW με την αρχική πιεζομετρία. Ως σημεία παρατήρησης χρησιμοποιούνται 27 γεωτρήσεις σε όλο το εύρος της προσομοιωμένης περιοχής (Σχήμα 7.11).



Σχήμα 7.11: Χάρτης με τα σημεία παρατήρησης (observation wells).

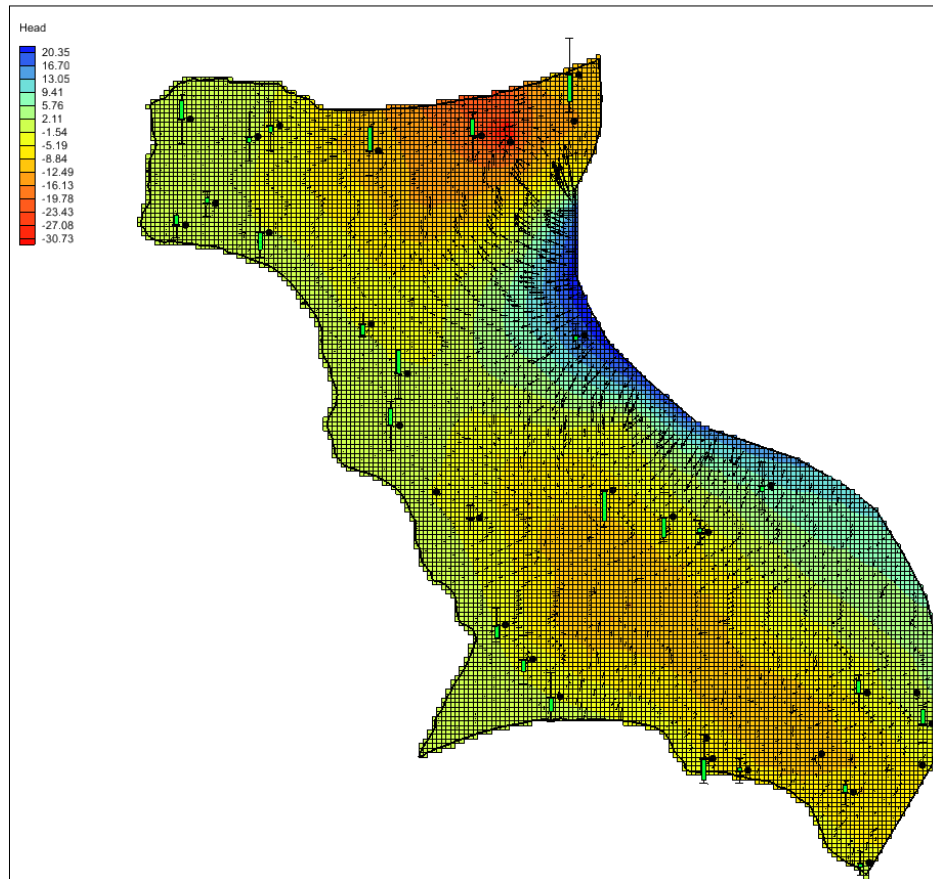
Η δομή του μοντέλου, όπως περιγράφηκε, παρουσιάζεται στο Σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 7.12) και με μωβ χρώμα απεικονίζονται οι κυψελίδες σταθερού φορτίου, με κίτρινο χρώμα οι κυψελίδες με τις γεωτρήσεις, καθώς και με λευκό χρώμα τα κελιά μεταβαλλόμενου φορτίου:



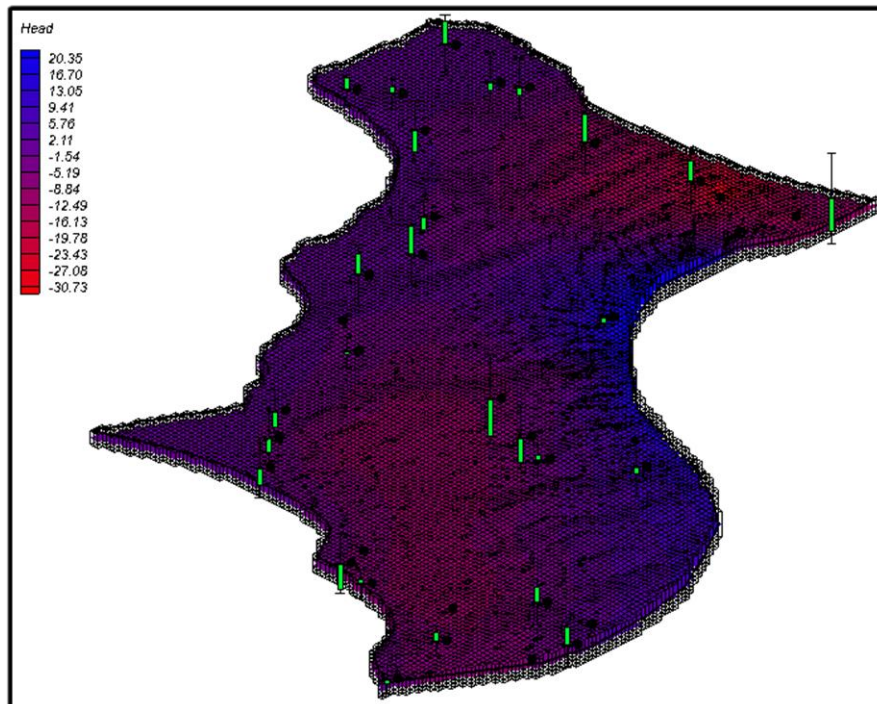
Σχήμα 7.12: Δομή του μοντέλου προσομοίωσης.

7.3 Αποτελέσματα εφαρμογής κώδικα MODFLOW

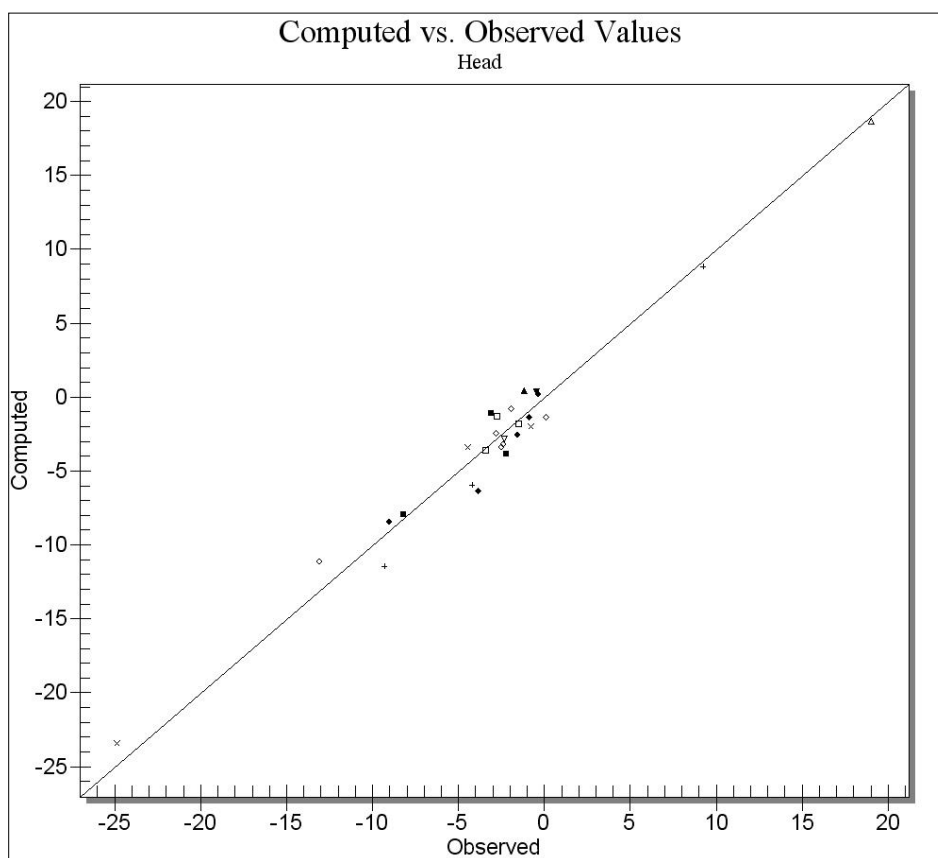
Αφού ρυθμισθεί το μοντέλο και όλες του οι παράμετροι, ελέγχονται τα δεδομένα εισόδου. Έπειτα ακολουθεί εφαρμογή του μοντέλου σε σταθερές συνθήκες (steady state). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν παρατίθενται στα παρακάτω Σχήματα 7.13, 7.14 & 7.15:



Σχήμα 7.13: Κάτοψη της υπολογισμένης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Σχήμα 7.14: Τρισδιάστατη απεικόνιση της υπολογισμένης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Σχήμα 7.15: Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές στάθμης.

Το μοντέλο ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες και επαληθεύει ικανοποιητικά τις υδρογεωλογικές συνθήκες, όπως αυτές περιγράφηκαν. Η ροή του νερού είναι αντίστοιχη με την υπόγεια ροή όπως προκύπτει και από τον πιεζομετρικό χάρτη (βλ. Κεφάλαιο 5.3). Από την εφαρμογή του μοντέλου διαπιστώνεται το ελλειμματικό ισοζύγιο του υπόγειου νερού. Παράλληλα, υπολογίζεται η ποσότητα της εισροής από τη θάλασσα επιβεβαιώνοντας, έτσι, σύμφωνα με προγενέστερες εργασίες (Pavlou et al. 2013; Voudouris et al, 2006). τη διείσδυση θαλασσινού νερού στο παράκτιο τμήμα της περιοχής έρευνας

Στον Πίνακα 7.2 που ακολουθεί παρατίθεται το ισοζύγιο του υπόγειου νερού, όπως υπολογίζεται από το πρόγραμμα MODFLOW.

Πίνακας 7.2: Ισοζύγιο υπόγειου νερού.

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ		
ΕΙΣΡΟΕΣ (m³/ έτος)	Κατείσδυση	14.062.720
	Γεωτρήσεις	0
	Εισροές από θάλασσα	3.358.730
	Εισροές από γειτονικές λεκάνες	8.232.940
ΕΚΡΟΕΣ (m³/ έτος)	Κατείσδυση	-
	Γεωτρήσεις	24.635.310
	Εκροές προς τη θάλασσα	1.019.810
	Εκροές σε γειτονικές λεκάνες	-

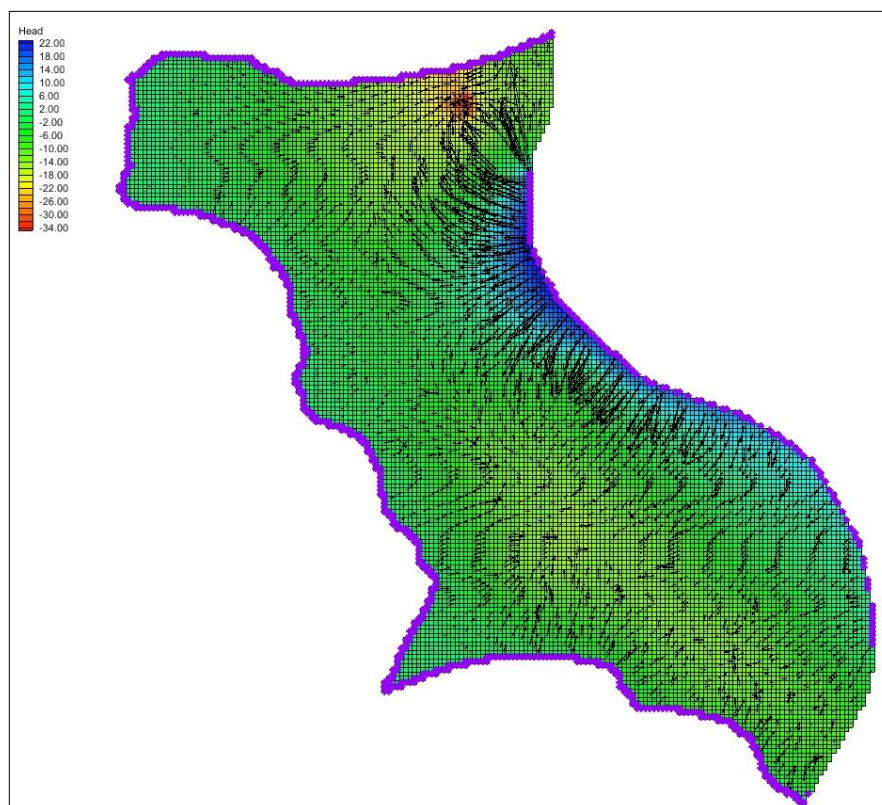
Υποθετικά Σενάρια

Σύμφωνα με το μοντέλο υλοποιούνται δύο υποθετικά σενάρια. Τα σενάρια αποτελούν υποθέσεις στις οποίες μεταβάλλονται οι κλιματικές και αντλητικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή εφαρμογής του μοντέλου. Σκοπός αυτών των υποθέσεων είναι να διαπιστωθεί εάν το μοντέλο είναι ευαίσθητο στην αλλαγή παραμέτρων, όπως είναι για παράδειγμα η κατείσδυση και οι παροχές των αντλήσεων.

ΣΕΝΑΡΙΟ 1^ο

Στο πρώτο σενάριο μειώνεται η βροχόπτωση κατά 20%. Συνεπώς, παρατηρείται μείωση και της κατείσδυσης κατά 20%. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή αυτού του σεναρίου παρατίθενται στα σχήματα που ακολουθούν (Σχήμα 7.16 & Σχήμα 7.17). Από το ισοζύγιο υδάτων (Πίνακας 7.3) προκύπτει ότι η μείωση

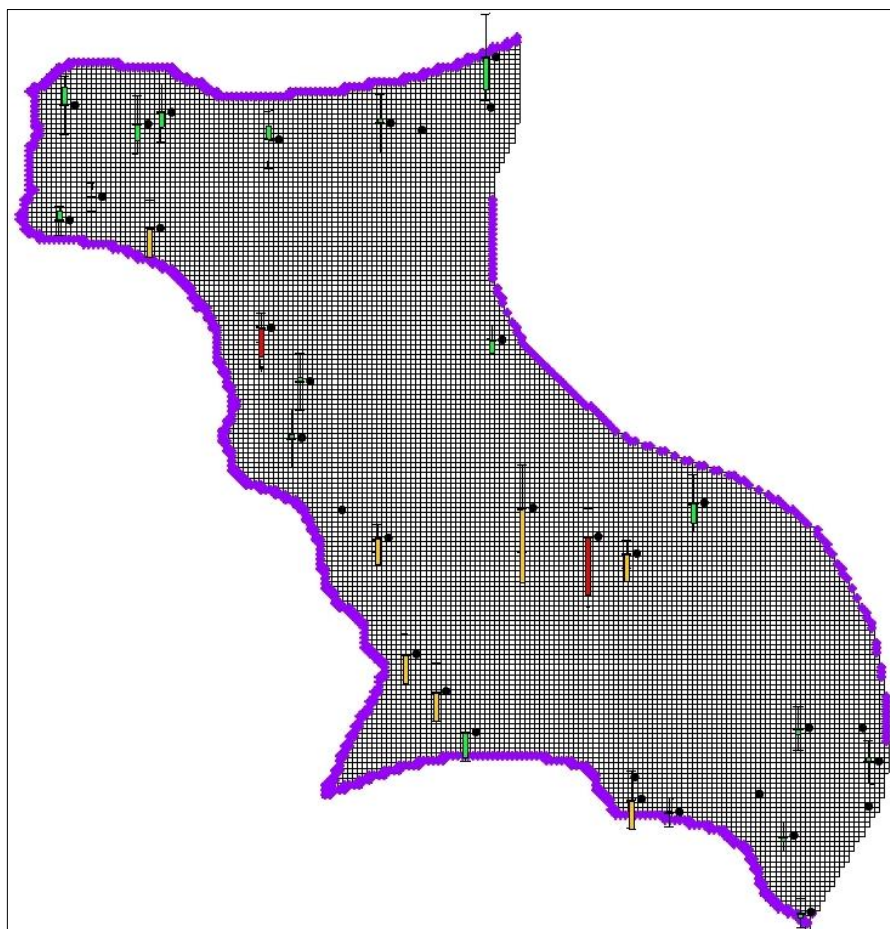
της κατείσδυσης, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εισροών από τη θάλασσα κατά 33%, ενώ θα αυξηθούν κατά 13% οι εισροές από τα Ανατολικά και ΒΑ/κά. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω ποιοτική υποβάθμιση του υπόγειου νερού στο παράκτιο τμήμα λόγω της επέκτασης των υφάλμυρων ζωνών.



Σχήμα 7.16: Κάτοψη της υπολογισμένης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.

Πίνακας 7.3: Ισοζύγιο υπόγειου νερού – Σενάριο 1.

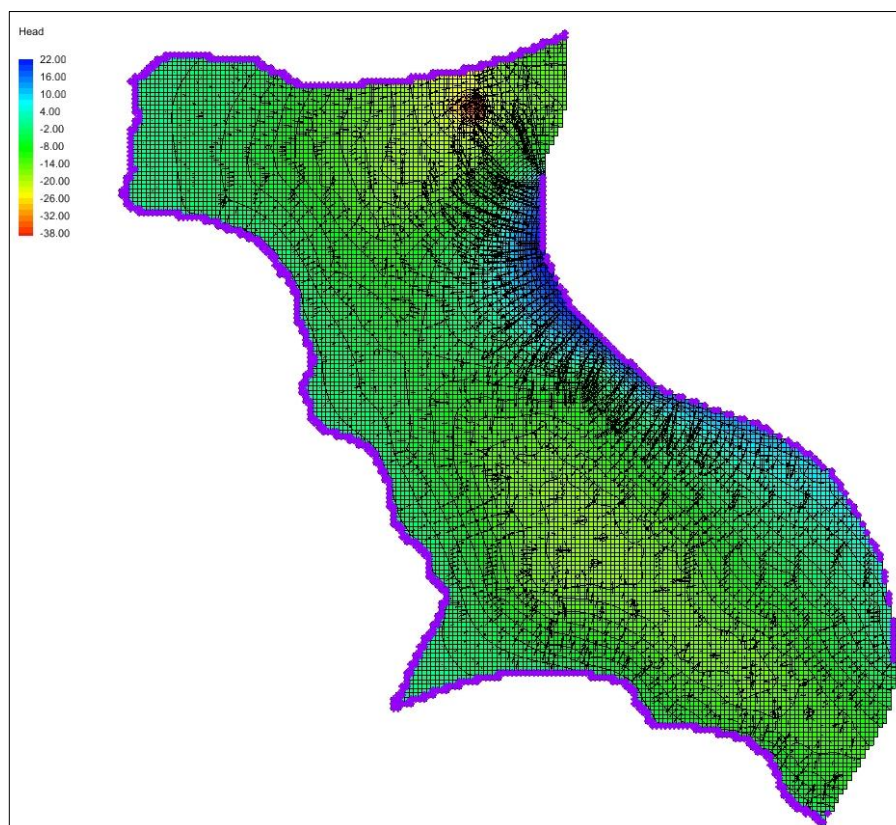
ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ		
ΕΙΣΡΟΕΣ (m³/ έτος)	Κατείσδυση	13.882.045
	Γεωτρήσεις	0
	Εισροές από θάλασσα	4.414.675
	Εισροές από γειτονικές λεκάνες	9.267.715
ΕΚΡΟΕΣ (m³/ έτος)	Κατείσδυση	-
	Γεωτρήσεις	24.635.310
	Εκροές προς τη θάλασσα	596.775
	Εκροές προς γειτονικές λεκάνες	-



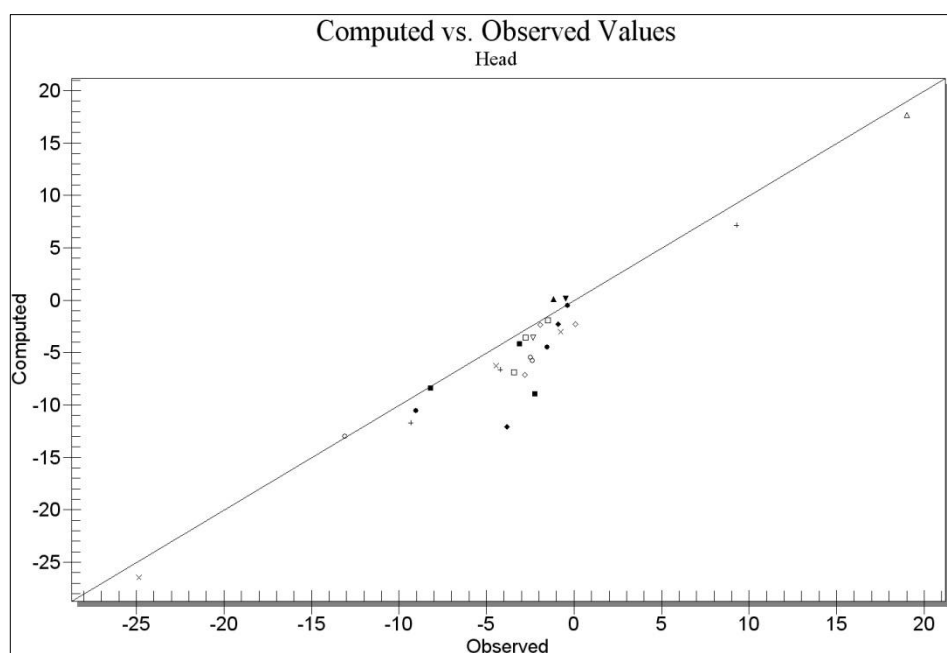
Σχήμα 7.17: Υπολογισμένες προς παρατηρούμενες τιμές στάθμης.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2^ο

Στο σενάριο αυτό θεωρείται μείωση της κατείδυσης κατά 20% και ταυτόχρονη αύξηση της ζήτησης για την κάλυψη των υδατικών αναγκών σε ποσοστό 10%. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή αυτού του σεναρίου παρατίθενται στα Σχήματα 7.18 & 7.19. Από το ισοζύγιο υδάτων (Πίνακας 7.4) προκύπτει ότι η μείωση της κατείδυσης και η αύξηση σε υδατικές ανάγκες, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εισροών από τη θάλασσα από $3,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ σε $5,94 \times 10^6 \text{ m}^3$ και κατ' επέκταση την περαιτέρω ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου τμήματος. Παράλληλα, θα αυξηθούν κατά 25% οι εισροές από τα Ανατολικά και ΒΑ/κά.



Σχήμα 7.18: Κάτοψη της υπολογισμένης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Σχήμα 7.19: Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές στάθμης.

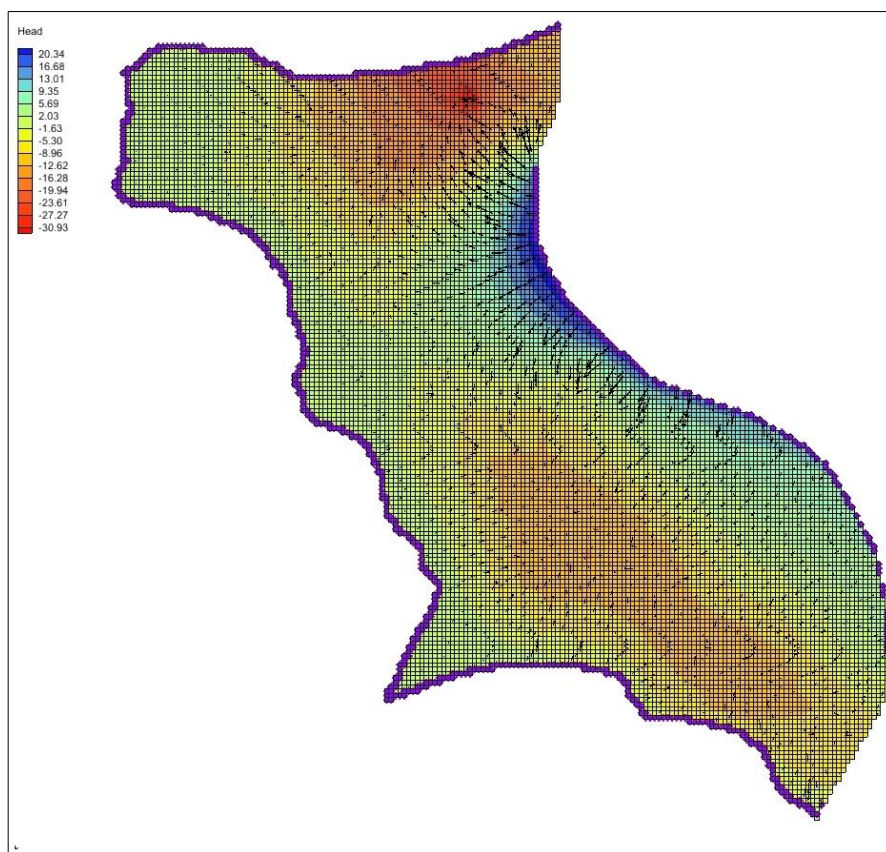
Πίνακας 7.4: Ισοζύγιο υπόγειου νερού – Σενάριο 2.

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ		
ΕΙΣΡΟΕΣ (m³/ έτος)	Κατείσδυση	13.882.045
	Γεωτρήσεις	0
	Εισροές προς τη θάλασσα	5.967.750
	Εισροές από γειτονικές λεκάνες	10.284.240
ΕΚΡΟΕΣ (m³/ έτος)	Κατείσδυση	-
	Γεωτρήσεις	27.097.235
	Εκροές προς τη θάλασσα	408.800
	Εκροές σε γειτονικές λεκάνες	-

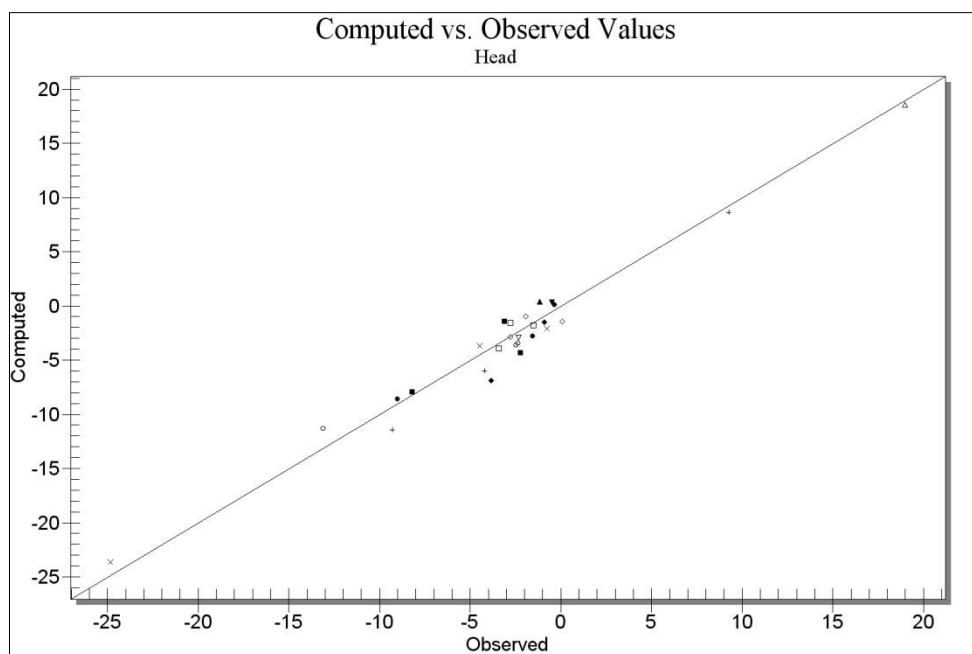
7.4 Εφαρμογή Κλιματικού Μοντέλου RegCM3 στο MODFLOW

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα από το κλιματικό μοντέλο RegCM3 και το πρόγραμμα MODFLOW εκτιμάται η υδροδυναμική κατάσταση του υδροφορέα του δήμου Θερμαϊκού για τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100. Από την ανάλυση και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του κλιματικού μοντέλου προκύπτει ότι κατά την τριακονταετία 2021-2050 η βροχόπτωση μειώνεται κατά 4,12%, ενώ κατά την τριακονταετία 2071-2100 η μείωση είναι μεγαλύτερη και ανέρχεται στο 22,1%. Η μείωση της βροχόπτωσης συνεπάγεται τη μείωση του εμπλουτισμού του υδροφορέα.

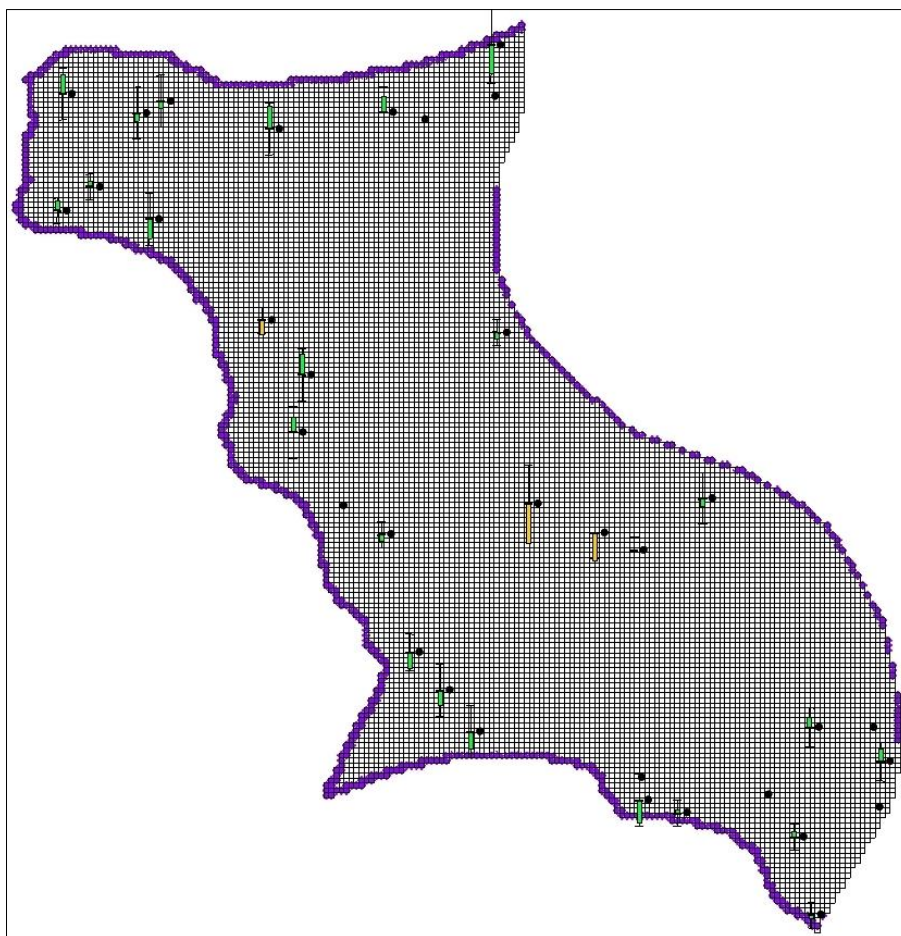
Για την τριακονταετία 2021-2050 μειώνεται η κατείσδυση κατά 4,12%. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του MODFLOW για την τριακονταετία 2021-2050 παρατίθενται στα Σχήματα 7.20, 7.21 & 7.22. Από το ισοζύγιο του υπόγειου νερού (Πίνακας 7.5) προκύπτει ότι η μείωση της κατείσδυσης και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εισροών από τη θάλασσα κατά 5,9% και κατ' επέκταση την ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου τμήματος, εξαιτίας της επέκτασης των υφάλμυρων ζωνών προς την ενδοχώρα. Παράλληλα, θα αυξηθούν κατά 2,5% οι εισροές από τα Ανατολικά και ΒΑ/κά.



Σχήμα 7.20: Κάτοψη της υπολογισμένης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Σχήμα 7.21: Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές στάθμης.



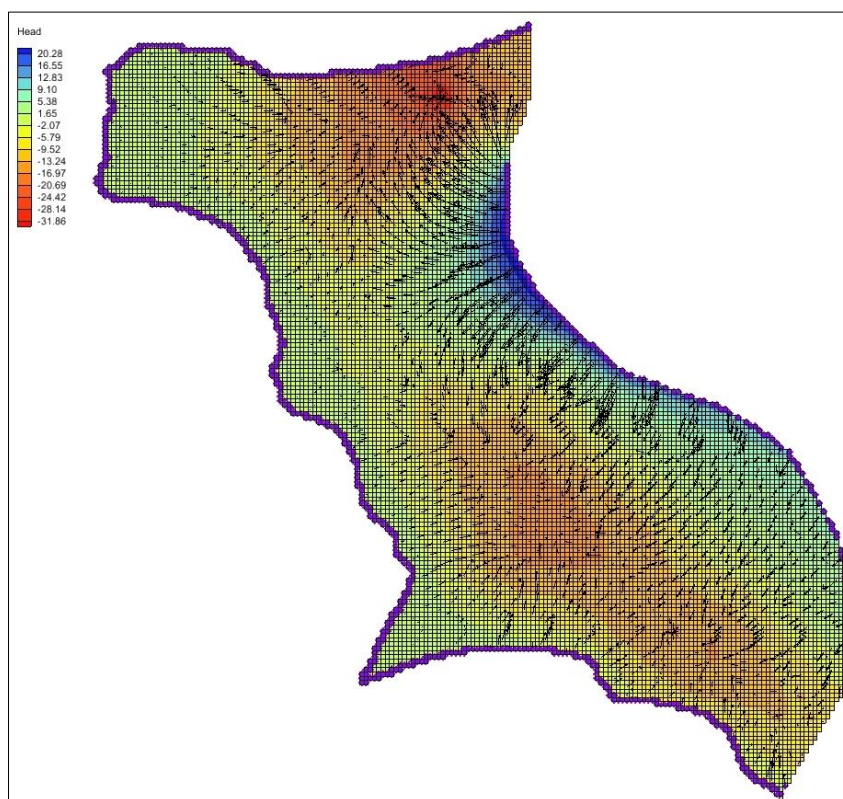
Σχήμα 7.20: Υπολογισμένες προς παρατηρούμενες τιμές στάθμης.

Πίνακας 7.5: Ισοζύγιο υπόγειου νερού – Τριακονταετία: 2021-2050.

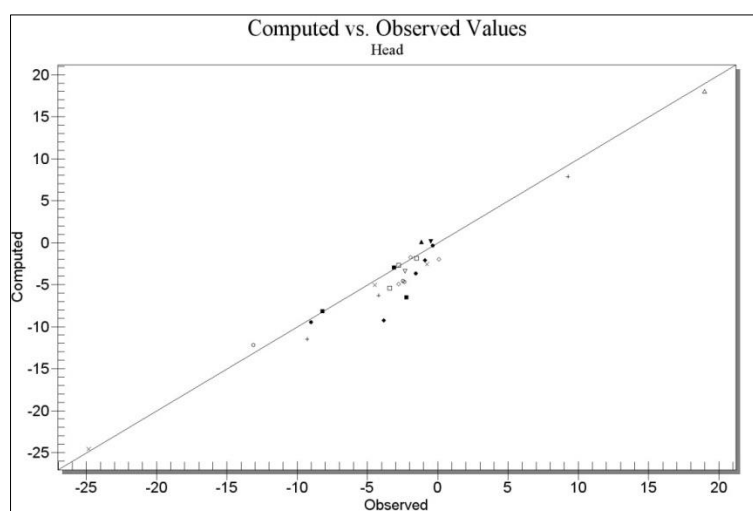
ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ		
ΕΙΣΡΟΕΣ (m³/ έτος)	Κατείσδυση	13.500.211,2
	Γεωτρήσεις	0
	Εισροές από θάλασσα	3.556.560
	Εισροές από γειτονικές λεκάνες	8.440.479
ΕΚΡΟΕΣ (m³/ year)	Κατείσδυση	-
	Γεωτρήσεις	24.635.310
	Εκροές προς τη θάλασσα	917.975
	Εκροές σε γειτονικές λεκάνες	-

Για την τριακονταετία 2071-2100 το ποσοστό μείωσης της κατείσδυσης είναι 22,1%. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του MODFLOW για την τριακονταετία 2071-2100 παρατίθενται στα Σχήματα 7.23, 7.24, 7.25. Από το ισοζύγιο του υπόγειου νερού (Πίνακας 7.5) διαπιστώνεται το ελλειμματικό ισοζύγιο και ότι η μείωση της κατείσδυσης κατά 22,1% και έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των

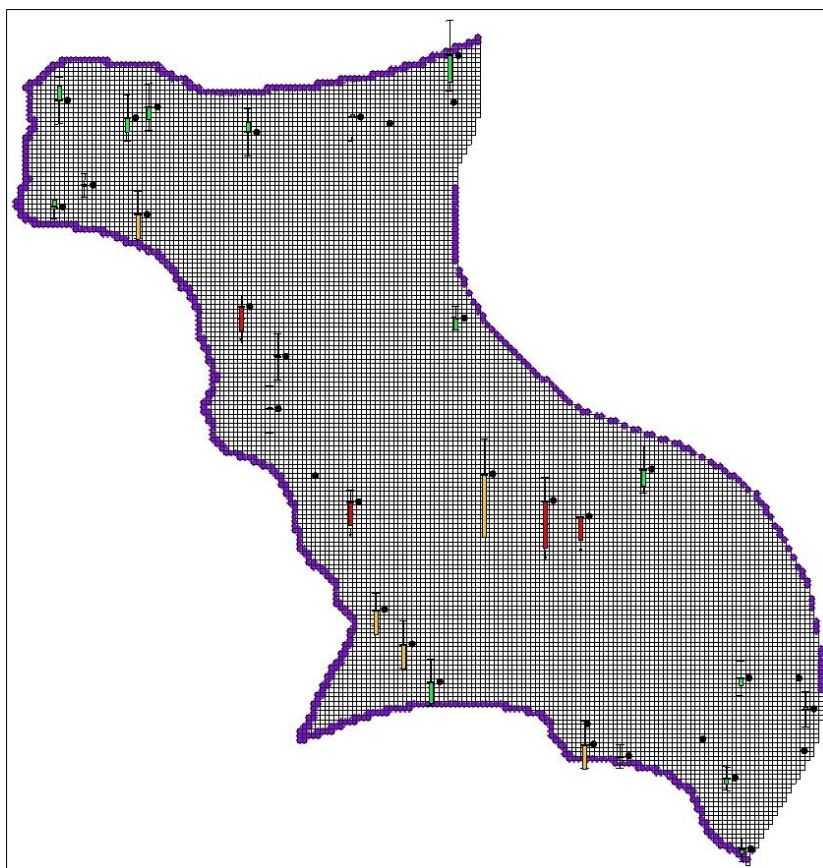
εισροών από τη θάλασσα κατά 42,7%. Η αύξηση των εισροών από τη θάλασσα συνεπάγεται την περαιτέρω ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου τμήματος. Ταυτόχρονα, αυξάνονται κατά 13,3% και οι εισροές από τα Ανατολικά και ΒΑ/κά.



Σχήμα 7.23: Κάτοψη της υπολογισμένης πιεζομετρίας και της διεύθυνσης ροής.



Σχήμα 7.24: Διάγραμμα των υπολογισμένων προς τις παρατηρούμενες τιμές στάθμης.



Σχήμα 7.21: Υπολογισμένες προς παρατηρούμενες τιμές στάθμης.

Πίνακας 7.6: Ισοζύγιο υπόγειου νερού – Τριακονταετία: 2071-2100.

ΙΣΟΖΥΓΙΟ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ		
ΕΙΣΡΟΕΣ (m³/ έτος)	Κατείσδυση	10.968.921,6
	Γεωτρήσεις	0
	Εισροές από θάλασσα	4.793.910
	Εισροές από γειτονικές λεκάνες	9.372.915,3
ΕΚΡΟΕΣ (m³/ έτος)	Κατείσδυση	-
	Γεωτρήσεις	24.635.310
	Εκροές προς τη θάλασσα	564.655
	Εκροές σε γειτονικές λεκάνες	-

Συνοψίζοντας, συμπεραίνεται ότι η μείωση της βροχόπτωσης που εκτιμάται από το κλιματικό μοντέλο RegCM3, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του εμπλουτισμού του υδροφορέα στην περιοχή του δήμου Θερμαϊκού. Παράλληλα, το ισοζύγιο του υπόγειου νερού είναι ελλειμματικό και παρατηρείται διείσδυση θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα και κατ' επέκταση περαιτέρω ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου τμήματος του δήμου Θερμαϊκού.

8 Συμπεράσματα-Προτάσεις

8.1 Γενικά χαρακτηριστικά της περιοχής έρευνας

Από την ανάλυση της περιοχής έρευνας διαπιστώνονται τα ακόλουθα:

- Η περιοχή του Δήμου Θερμαϊκού καταλαμβάνει έκταση 135 Km² και αναπτύσσεται στην παράκτια ζώνη του Ανατολικού Θερμαϊκού Κόλπου. Το υψόμετρο της περιοχής κυμαίνεται μεταξύ 0-213 m και χαρακτηρίζεται ως πεδινή. Η επιφανειακή απορροή είναι παροδική και γίνεται με ένα μέτρια ανεπτυγμένο υδρογραφικό δίκτυο, δενδριτικής μορφής που εκβάλλει στο Θερμαϊκό κόλπο.
- Γεωτεκτονικά, η περιοχή έρευνας εντάσσεται στη ζώνη Αξιού και συγκεκριμένα στην υποζώνη της Παιονίας. Η περιοχή έρευνας καλύπτεται, στο μεγαλύτερο τμήμα της από τον σχηματισμό της Γωνιάς (εναλλαγές στρωμάτων λευκών-λευκότεφρων άμμων, ψαμμιτών, μαργών και τεφροπράσινων αργίλων). Ενώ, στο ανατολικό της τμήμα (λοφώδη ζώνη) από τον σχηματισμό Τρίγλιας – Τριλόφου, που αποτελείται από χερσαία ερυθροστρώματα. Το παράκτιο τμήμα της περιοχής έρευνας (Παραλία Περαιάς, Αγγελοχωρίου και Επανομής) καλύπτεται από αλλουβιακές αποθέσεις.
- Το κλίμα της περιοχής θεωρείται μεσογειακό με φανερή την ηπειρωτική επίδραση κατά τις διάφορες εποχές. Η μέση ετήσια θερμοκρασία της περιοχής έρευνας, για τη χρονική περίοδο 1965–2011, είναι 15° C και το μέσο ετήσιο ύψος των κατακρημνισμάτων είναι 475 mm.
- Όσον αφορά τις χρήσεις γης στην περιοχή έρευνας, όπως προέκυψαν από το Corine Land Cover (2000) οι αρδευόμενες εκτάσεις καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση (54,68%) και τη μικρότερη οι παράκτιες λιμνοθάλασσες (0,01%). Οι καλλιεργούμενες εκτάσεις καλύπτουν έκταση 68.000 στρέμματα και είναι, κυρίως, κηπευτικά, αμπέλια και ελαιόδεντρα.
- Η περιοχή του δήμου Θερμαϊκού αποτελείται από δύο τύπους υδροφορέα: έναν ελεύθερο και έναν υπό πίεση. Ο ελεύθερος υδροφορέας καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη έκταση, παρουσιάζει υδρογεωλογικό ενδιαφέρον και αναπτύσσεται εντός της ψαμμιτομαργαϊκής σειράς και των παράκτιων αποθέσεων. Έχει μέσο πάχος 80 μέτρων, το οποίο μειώνεται προς

τη θάλασσα, ενώ διαχωρίζεται από τον βαθύτερο υπό πίεση με ένα αργιλικό στρώμα πάχους περίπου 60 m. Ο εμπλουτισμός του υδροφορέα επιτυγχάνεται, κυρίως, μέσω της κατείσδυσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και της περιοδικής διήθησης των ρεμάτων. Στον εμπλουτισμό των υδροφόρων στρωμάτων συμβάλλουν και οι επιστροφές των αρδεύσεων, καθώς και οι διαρροές από το δίκτυο της ύδρευσης.

- Η ροή του υπόγειου νερού έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ στη λοφώδη ζώνη και συνδυάζεται με θετικό πιεζομετρικό φορτίο. Στο παράκτιο τμήμα η διεύθυνση ροής είναι από τη θάλασσα προς την ενδοχώρα και μεταβάλλεται σύμφωνα με τον προσανατολισμό της ακτής. Συνεπώς από τη Νέα Ηράκλεια (νότιο τμήμα της περιοχής έρευνας) έως το Αγγελοχώρι (βόρειο δυτικό τμήμα) η κατεύθυνση ροής είναι ΝΔ-ΒΑ και το πιεζομετρικό φορτίο κυμαίνεται από 0 m έως -5 m (αρνητική πιεζομετρία). Στο τμήμα Περαιάς-Αγίας Τριάδας η διεύθυνση του υπόγειου νερού είναι ΒΒΔ-ΝΝΑ, ενώ στους Νέους Επιβάτες δημιουργείται ένας κώνος αρνητικής πιεζομετρίας με φορτίο έως 35 m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας.
- Οι ετήσιες υδατικές ανάγκες της περιοχής του Δήμου Θερμαϊκού ανέρχονται σε $25 \times 10^6 \text{ m}^3$, εκ των οποίων $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ είναι οι αρδευτικές και $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ είναι οι υδρευτικές ανάγκες. Η κάλυψη των υδατικών αναγκών γίνεται αποκλειστικά από την εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων της περιοχής.

8.2 Αποτελέσματα κλιματικού μοντέλου RegCM3

Για την εφαρμογή του κλιματικού μοντέλου RegCM3, το οποίο ακολουθεί το σενάριο εκπομπών A1B, αξιοποιούνται τα δεδομένα βροχόπτωσης (mm) του σημείου πλέγματος Grid 2, ως περίοδος αναφοράς χρησιμοποιείται η τριακονταετία 1961-1990 και ως σταθμός αναφοράς ο μετεωρολογικός σταθμός της Ε.Μ.Υ στη Μίκρα. Η διακύμανση της βροχόπτωσης του σταθμού της Μίκρας προσεγγίζεται ικανοποιητικά από το σημείο πλέγματος Grid 2 κατά την τριακονταετία 1961-1990. Από την ανάλυση και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του κλιματικού μοντέλου προκύπτει ότι κατά την τριακονταετία 2021-2050 η βροχόπτωση

μειώνεται κατά 4,12%, ενώ κατά την τριακονταετία 2071-2100 η μείωση είναι μεγαλύτερη και ανέρχεται στο 22,1%.

8.3 Αποτελέσματα εφαρμογής κώδικα MODFLOW

Η προσομοίωση με τον κώδικα MODFLOW ανταποκρίνεται στις πραγματικές συνθήκες και επαληθεύει ικανοποιητικά τις υδρογεωλογικές συνθήκες. Η ροή του νερού είναι αντίστοιχη με την υπόγεια ροή όπως προκύπτει και από τον πιεζομετρικό χάρτη. Από την εφαρμογή του μοντέλου διαπιστώνεται το ελλειμματικό ισοζύγιο υπόγειου νερού. Παράλληλα, επιβεβαιώνεται και η διείσδυση θαλασσινού νερού στο παράκτιο τμήμα του Δήμου Θερμαϊκού.

Υποθετικά Σενάρια:

ΣΕΝΑΡΙΟ 1^ο

Στο πρώτο σενάριο, κατά το οποίο μειώνεται η βροχόπτωση κατά 20% παρατηρείται μείωση και της κατείσδυσης κατά 20%. Η μείωση της κατείσδυσης, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εισροών από τη θάλασσα κατά 33% και κατ' επέκταση την ποιοτική υποβάθμιση του υπόγειου νερού στο παράκτιο τμήμα. Παράλληλα, παρατηρείται αύξηση κατά 13% των εισροών από τα Ανατολικά και ΒΑ/κά.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2^ο

Στο σενάριο αυτό θεωρείται μείωση της κατείσδυσης κατά 20% και ταυτόχρονη αύξηση της ζήτησης για την κάλυψη των υδατικών αναγκών σε ποσοστό 10%. Η μείωση της κατείσδυσης και η αύξηση σε υδατικές ανάγκες, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εισροών από τη θάλασσα από $3,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ σε $5,94 \times 10^6 \text{ m}^3$ και κατά συνέπεια την περαιτέρω ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου τμήματος. Παράλληλα, θα αυξηθούν κατά 25% οι εισροές από τα Ανατολικά και ΒΑ/κά.

8.4 Αποτελέσματα εφαρμογής κλιματικού μοντέλου RegCM3 στον κώδικα MODFLOW

Η εκτίμηση της υδροδυναμικής κατάστασης του υδροφορέα του δήμου Θερμαϊκού για τις τριακονταετίες 2021-2050 και 2071-2100, πραγματοποιείται μέσω της εφαρμογής των αποτελεσμάτων του κλιματικού μοντέλου RegCM3 για τη βροχόπτωση στον κώδικα MODFLOW. Επομένως, διαπιστώνεται ότι η μείωση της βροχόπτωσης που εκτιμάται από το κλιματικό μοντέλο έχει ως αποτέλεσμα, τη μείωση του εμπλουτισμού του υδροφορέα του δήμου Θερμαϊκού. Παράλληλα, το ισοζύγιο του υπόγειου νερού είναι ελλειμματικό και παρατηρείται διείσδυση θαλασσινού προς την ενδοχώρα και κατ' επέκταση περαιτέρω ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου τμήματος του δήμου Θερμαϊκού. Ταυτόχρονα, παρατηρείται αύξηση των εισροών από τα Ανατολικά και τα Βορειοανατολικά. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της τριακονταετίας 2021-2050, αναμένεται ότι οι εισροές από τη θάλασσα θα αυξηθούν κατά 5,9% και κατά 2,5%, οι εισροές από Ανατολικά και τα ΒΑ/κά. Κατά την τριακονταετία 2071-2100, εκτιμάται ότι οι εισροές από τη θάλασσα θα αυξηθούν κατά 42,7%, ενώ από τα από Ανατολικά και τα ΒΑ/κά. κατά 13,3%.

8.5 Προτάσεις ορθολογικής διαχείρισης

Από την παραπάνω ανάλυση διαπιστώνεται ότι τα υδρογεωλογικά μοντέλα αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για την προσομοίωση της υπόγειας ροής. Παράλληλα, ο συνδυασμός των υδρογεωλογικών μοντέλων σε συνδυασμό με τα κλιματικά μοντέλα παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη μελλοντική υδροδυναμική κατάσταση των υδροφορέων. Συνεπώς, ο συνδυασμός των υδρογεωλογικών και των κλιματικών μοντέλων παρέχουν τα εχέγγυα μιας ορθολογικότερης διαχείρισης και αξιοποίησης του υπόγειου νερού.

Για την ορθολογικότερη διαχείριση και αξιοποίηση του υπόγειου νερού απαιτούνται κατάλληλα μέτρα, με βάση τις διαθέσιμες διαχειριστικές επιλογές. Συνεπώς, οι πολιτικές διαχείρισης ζήτησης αφορούν σε:

- Μέτρα ώστε να μειωθούν σημαντικά οι χρήσεις και οι σπατάλες, όπως αλλαγή των παλαιωμένων δικτύων ύδρευσης, αλλαγή συστημάτων άρδευσης για την εξοικονόμηση νερού.
- Αλλαγή των υδροβόρων καλλιεργειών

- Απαγόρευση της ανόρυξης νέων γεωτρήσεων στο παράκτιο τμήμα, ώστε να εμποδιστεί η περαιτέρω διείσδυση του θαλασσινού νερού.
- Κατασκευή κατάλληλων έργων υποδομής, όπως φραγμάτων ανάσχεσης, τα οποία θα αξιοποιούν τις χειμερινές απορροές των χειμάρρων, με αποτέλεσμα τον τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων.
- Επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων λυμάτων από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Αινεία, που λειτουργεί στο Αγγελοχώρι για αρδευτική χρήση.
- Ενημέρωση και ευαισθητοποίηση των πολιτών, αγροτών και κυρίως των μαθητών για την ορθολογική χρήση του νερού.
- Η τιμολόγηση του νερού θα συμβάλει στη μείωση της σπατάλης και στην εξοικονόμηση του νερού.

Τέλος, συνιστάται η συστηματική παρακολούθηση της στάθμης των υπόγειων νερών και των ποιοτικών χαρακτηριστικών τους στην παράκτια ζώνη.

9 Βιβλιογραφία

Ελληνική Βιβλιογραφία

Βουδούρης, Κ., (2004): Μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης υπόγειων ροών. Α.Π.Θ. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας, Θεσσαλονίκη.

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

Βουδούρης, Κ., κ.ά (2104): Έρευνα υδατικού δυναμικού του Δήμου Θερμαϊκού, Νομού Θεσσαλονίκης, Τελική έκθεση ερευνητικού προγράμματος, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Ευστρατιάδης, Α., Ρόζος, Ε., Κουκοβίνος Α., (2009): Υδρόγειος–Μοντέλο υδρολογικής και υδρογεωλογικής προσομοίωσης, Θεωρητική τεκμηρίωση. Ε.Μ.Π. Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Αθήνα.

Ζερβοπούλου, Α., (2010): Νεοτεκτονικά ρήγματα της ευρύτερης περιοχής της Θεσσαλονίκης σε σχέση με τα εδάφη θεμελίωσης. Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., σελ.300.

Ι.Γ.Μ.Ε., (1969): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας 1:50.000 φύλλο Επανομή υπό Λαλεχού Ν., Bizon, G, Αθήνα.

Ι.Γ.Μ.Ε., (1969): Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας 1:50.000 φύλλο Θεσσαλονίκη υπό Kockel, F., Αντωνιάδη Κ., Ιωαννίδη, Π., Λαχελό Ν., Αθήνα.

Καζάκης, Ν., (2013): Εκτίμηση της διακινδύνευσης του υπόγειου νερού στην εξωτερική ρύπανση: Εφαρμογή στη λεκάνη του Ανθεμούντα, Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ, Θεσσαλονίκη.

Καλλιώρας, Α., (2007): Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφορείς που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος της Ροδόπης. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Ξάνθη, σελ. 290.

Κουτσογιάννης, Δ., και Ξανθόπουλος Θ., (1999): Τεχνική Υδρολογία, Έκδοση 3. Ε.Μ.Π., Αθήνα.

Μουντράκης, Δ., (1985): Γεωλογία της Ελλάδας. University Studio Press, σελ. 204

Μουντράκης, Δ., (2010): Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας, University Studio Press, σελ. 74-80, Θεσσαλονίκη.

Μπάης, Α., και Καρακώστας Θ., (2010): Νερό και κλιματικές μεταβολές, Διεθνές έτος για τον «Πλανήτη Γη» Νερό: πηγή ζωής, University Studio Press, σελ. 61–64, Θεσσαλονίκη.

Λατινόπουλος, Π., (1986): Υδραυλική Υπόγειων νερών, Α.Π.Θ.

Παυλίδης, Σπ., (2007): Γεωλογική και σεισμοτεκτονική έρευνα του ρήγματος Περαιάς. Τελική έκθεση ερευνητικού προγράμματος. Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.

Παύλου, Α., Σούλιος Γ., Καζάκης Ν., Τζόλλας Ν., (2014). Ρύπανση των υπόγειων νερών από βαρέα μέταλλα στο παράκτιο τμήμα Αγγελοχωρίου Καλλικράτειας, στη Βόρεια Ελλάδα. 4^ο Περιβαλλοντικό Συνέδριο Μακεδονία, Θεσσαλονίκη.

Τολίκα, Κ., (2009): Κλιματικές Μεταβολές. Α.Π.Θ. Τομέας Μετεωρολογίας και Κλιματολογίας, Θεσσαλονίκη.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Abbot, M. B., Bathurst, J. C., Cunge J.A., O' Conell P. E., and Rasmussen J., (1986): An introduction to the European Hydrological System – Systeme Hydrologique Europeenne, SHE, 1. History and philosophy of a physically distributed modeling system, Journal of Hydrology, 87, pp. 45-59.

Anderson, M.D., Woessner, W.W., (1992): Applied Ground Water Modeling: Simulation of flow and adjective transport. Academic Press, INC.

Boughton, W.C., (1984): A simple model for estimating the water yield of ungauged catchments, Civil Eng. Trans., I.E. Aust CE26, 2, pp. 83-88.

Boughton, W.C., Caroll D.G., (1993): A simple combined water balance/flood hydrograph model, Proceedings of the 1993 Hydrology Water Resources Symposium, 93/14 Institution of Engineers, Australia, National Conference Publication, pp. 299-304.

Burnash, R. J., Ferral R. L., McGuire R.A., (1973): A Generalized Streamflow Simulation System – Conceptual Modeling for Digital Computers, Joint Federal State River Forecasting Center, Sacramento, California.

Crawford, N. H., Linsley R. K., (1962): The synthesis of continuous streamflow hydropaths on a digital computer, Technical Report No. 12, Depth. of Civil Engineering, Stanford Univ., Palo Alto, Calif.

- Crawford, N. H., Linsley R. K., (1966):** Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV, Technical Report No. 39, Stanford Univ., Palo Alto, Calif.
- Demek, J., (1972):** Manual of Detailed Geomorphological Mapping Academia, Prague, p. 344.
- Dickinson, R., Henderson-Sellers, A., Kennedy, P., (1993):** Biosphere-atmosphere transfer scheme (bats) version 1e as coupled to the ncar community climate model, Technical report, National Center for Atmospheric Research.
- Dikau, R., (1989):** The application of a digital relief model to landform analysis. In: Raper J.F. (ED) 1989: Three dimensional Information Systems. Taylor and Francis, London, pp 51-77.
- Dingman, S.L., (1994):** Physical Hydrology, Prentice – Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Eckhardt, K., Ulbrich, U., (2003):** Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range, Journal of Hydrology, 284, pp. 244-252.
- Essink, Gualbert H. P. Oude, (2000):** Groundwater Modeling. Academic Publishing of Utrecht University, f.15.
- Fritsch, J. M., Chappell, C. F. (1980):** Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. part i: Convective parameterization, Journal of Atmospheric Sciences 37, pp 1722–1733.
- Giorgi, F., Marinucci M. R, Bates G. T., (1993a):** Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part I: Boundary layer and radiative transfer process. Monthly Weather Review, 121, pp 2794-2813.
- Giorgi, F., Marinucci M. R, Bates G. T, DeCanio G., (1993b):** Development of a second generation regional climate model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions. Monthly Weather Review, 121, pp 2814-2832.
- Giorgi, F., Mearns, L. O, (1999):** Introduction to special section: regional climate modeling revisited, Journal of Geophysical Research, 104, 6335-6352.
- Grell, G. (1993):** Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations, Monthly Weather Review 121, pp 764–787.

Grell, G. A., Dudhia, J., Stauer, D. R., (1994a): A description of the fifth-generation penn state/ncar mesoscale model (mm5), Technical Report NCAR/TN-398+STR, National Center for Atmospheric Research.

Grell, G., Dudhia, J., Stauer, D., (1994b): A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). Tech. Note TN-398+IA, Technical report, National Center for Atmospheric Research.

Harbaugh, A.W., Banta E. R., Hill M.C., McDonald M.G., (2000): Modflow–2000, the U.S. Geological Survey Modular Groundwater Model: User guide to modularization concepts and groundwater flow process. U.S. Geological Survey Open – File Report, pp. 00 - 92.

Harbaugh, A.W., McDonald M. G., (1996): User’s documentation for MODFLOW–96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite- difference groundwater flow model. U.S. Geological Survey Open – File Report, pp. 96-485.

IPCC, (2007): Regional Climate Projections, pp 94.

Holtzlag, A., de Bruijn, E. Pan, H.-L., (1990): A high resolution air mass transformation model for short-range weather forecasting, Monthly Weather Review 118, pp 1561– 1575.

IPCC, (2007): Synthesis Report, An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change ([www.ipcc.ch/publications and data/publications_ipcc_fourth_assessment_synthesis_report.htm](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_synthesis_report.htm)).

IPCC, (2008): Climate Change and Water (www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-change-water-en.pdf).

Kazakis, N., Voudouris, K., Vargemezis, G., Pavlou, A., (2013): Hydrogeological regime and groundwater occurrence in the Anthemountas River basin, northern Greece. Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. XLVII (in press).

Kiehl, J., Hack, J., Bonan, G., Boville, B., Breigleb, B., Williamson, D., Rasch, P. (1996): Description of the ncar community climate model (ccm3), Technical Report NCAR/TN-420+STR, National Center for Atmospheric Research.

Kolokytha, E. G., Mylopoulos, Y. A., Mentis A. K., (2002): Evaluating demand management aspects of urban water policy. A field survey in city of Thessaloniki, Greece. Urban Water , pp 391-400.

Liebsch, G., Novotny K., Dietrich, R., (2002): Untersuchung von Pegelreihen der Änderung des mittleren Meeresspiegels an den europäischen Küsten. Technische Universität, Dresden, Germany.

McDonald, M. G., Harbaugh, A. W., (2003). The history of MODFLOW, Ground Water, Vol 41, No 2 pp. 280-283.

Nakicenovic, N., Alcamo J. and co-authors, (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge University, Cambridge.

Pal, J. S., Giorgi, F., Elguindi, X. Bi, Solmon, N. F., Gao, X. S. Rauscher, A., Francisco, R., Zakey, A., Winter, J., Ashfaq, M., Syed, F. S., Bell, J. L., N. S. Diffenbaugh, Karmacharya, J., Konare, A., Martinez, D. R. P. da Rocha, Sloan, L. C., and Steiner, A., (2007): Regional climate modeling for the developing world: The ICTP RegCM3 and RegCNET. Bulletin of the American Meteorological Society, 88, 1395-1409.

Pavlou, A., Soulios, G., Dimopoulos, G., Tsokas, G., Mattas, C., Kazakis, N., Voudouris, K., (2013): Groundwater quality of the coastal aquifers in the eastern part of Thermaikos Gulf (From Aggelochori to Kallikrateia). Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. XLVII (in press).

Pinder, G. F., (1970): A digital model for aquifer elevation: U.S. Geological Survey Techniques of Water – Resources Investigations, Book 7, Chapter C1.

Prickett, T. A., Lonquist C. G., (1971): Selected digital computer techniques for groundwater evaluation, Illinois State Water Survey Bulletin 55.

Roeckner, E., Brokopf, B., Esch, M., Giorgetta, M., Hagemann, S. Kornblueh, L., (2006): Sensitivity of Simulated Climate to Horizontal and Vertical Resolution in the ECHAM5 Atmosphere Model, *J. Climate*, 19, pp. 3771–3791.

Sing, V.P., Woolhiser, D.A., (2002): Mathematical modeling of watershed hydrology, *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 74, pp. 270-292.

Smith, D.M., (2006): Just one Planet: Poverty, Justice and Climate Change. UK: Practical Action Publishing, pp.21.

Syrides, G., (1990): Lithostratigraphic, biostratigraphic, palaeogeographic, study of the Neogene – Quaternary sedimentary deposits of Chalkidiki Peninsula, Macedonia, PhD Thesis, School of Geology. A.U.T.H., p 230.

Thorntwaite, C. W., (1948): An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Reviews*, 381, pp. 55-94.

Thorntwaite, C.W., Mather J.R., (1955): The water balance, *Publications in Climatology*, 88, pp. 1-104, Laboratory of Climatology, Climatologic Dresel Institute of Technology.

Tizro, T. A., Voudouris K. S. and Akbari K., (2011): Simulation of a groundwater artificial recharge in a semi – arid region of Iran. *Irrigation and Drainage* 60, pp. 393-403.

Torma, Cs., Bartholy J., Pongracz R., Barcza Z., Coppola E., Giorgi F., (2008): Adaptation and validation of the RegCM3 climate model for the Carpathian Basin. *Időjárás*, 112, 233-247.

Torma, Cs., Coppola E., Giorgi F., Bartholy J., Pongrácz R., (2011): Validation of a High-Resolution Version of the Regional Climate Model RegCM3 over the Carpathian Basin. *J. Hydrometeor*, 12, 84–100.

Tolika, K., Anagnostopoulou C., Maheras P., Vafiadis 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 H. A., Arseni – Papadimitriou, A., (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.

Tolika, K., Zanis, P., Anagnostopoulou, C., (2012): Regional climate scenarios for Greece: Future temperature and precipitation projections for ensembles of RCMs, *Global NEST Journal*, Vol. 14, No4, pp. 407-421.

Trescott, P.C., (1975): Documentation of finite–difference model for aquifer simulation of three – dimensional groundwater flow. U.S. Geological Survey Open – File Report, pp. 75-438.

Voudouris, K., Sotiriadis M., Pavlou, A., Hatziliontos, C., (2006): Groundwater quality in the coastal aquifer system of the Eastern Thermaikos Gulf, North Greece, *Journal of Enviromental Protection and Ecology*, Vol 7, No. 2, p 269.

Voudouris, K., Mavtomatis, T., Krinis, P., (2012): Assessing runoff in future climate conditions in Messara valley in Crete with a rainfall-runoff model. Meteorological Applications 19, pp. 473-483.

Walton, W.C., (1991): Principles of groundwater engineering, Lewis Publ, INC, Chelsea Michigan, USA, p. 414.

Wilby, R.L., Wigley, T.M.L., (1997): Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. Progress in Physical Geography 21, pp. 530-548.

Zanis, P., Kapsomenakis, I., Philandras, C., Douvis, K., Nikolakis, D., Kanellopoulou, E., Zerefos, C., Repapis, C., (2009): Analysis of an ensemble of present day and future regional climate simulations for Greece, International Journal of Climatology, 29, pp. 1614 -1633.

Πηγές από το Διαδίκτυο:

www.usgs.gov

www.statistics.gr (Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία)