

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ**

**ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Δ. ΠΑΥΛΟΥ
ΓΕΩΛΟΓΟΣ - ΥΠΟΤΡΟΦΟΣ Ι.Κ.Υ.**

**ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ
ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ Ν.Α. ΤΗΣ ΛΑΡΙΣΑΣ**

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας
Ειδίκευση «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία»

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2006

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ
ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ Ν.Α. ΤΗΣ ΛΑΡΙΣΑΣ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Δ. ΠΑΥΛΟΥ
ΓΕΩΛΟΓΟΣ - ΥΠΟΤΡΟΦΟΣ Ι.Κ.Υ.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων: Καθηγητής Γεώργιος Σούλιος

Μέλος: Καθηγητής Γεώργιος Δημόπουλος

Μέλος: Λέκτορας Κωνσταντίνος Βουδούρης

*Η εργασία αυτή αφιερώνεται στους
γονείς μου, στον αδελφό μου καθώς
και στην μνήμη όλων των αγαπημένων
προσώπων που έχασα.*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Μετά την ολοκλήρωση της διατριβής αυτής αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο κατά την διάρκεια της εκπόνησης της.

Ευχαριστώ, ολόψυχα μέσα από την καρδιά μου, τον Καθηγητή μου κ. Γ. Σούλιο για την πολύτιμη βοήθειά του και την καθοδήγησή του κατά την διάρκεια της διατριβής. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Γ. Δημόπουλο για τις υποδείξεις του, καθώς επίσης και τον Λέκτορα κ. Κ. Βουδούρη για την πολύτιμη βοήθειά του. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω και τους Καθηγητές κ. Β. Χρηστάρα και κ. Μ. Φυτίκα για την συνεργασία και την βοήθειά τους καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω την Διεύθυνση Εγγείων Βελτιώσεων Λάρισας και ειδικά τον προϊστάμενό της κ. Α. Ευαγγελόπουλο για την παράδοση στοιχείων της περιοχής, δίχως τα οποία θα ήταν αδύνατη η συγγραφή της εργασίας αυτής. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δ. Καλφούτζο από το ΕΘΙΑΓΕ για την βοήθειά του.

Τις θερμές ευχαριστίες μου, στην μεταπτυχιακή φοιτήτρια του Τμήματος Γεωλογίας κ. Ανθή Καραμουχτάρη και στον υποψήφιο διδάκτορα του Τμήματος Γεωλογίας κ. Μ. Σωτηριάδη για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά το στάδιο υπαίθρου. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και γνωστούς μου, που μου συμπαραστάθηκαν ηθικά κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους αγρότες και ιδιοκτήτες αρδευτικών γεωτρήσεων για την βοήθειά τους κατά την δειγματοληψία του υπόγειου νερού.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών για την οικονομική υποστήριξη που μου προσέφερε κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την ηθική και οικονομική υποστήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1.	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
2.	ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	10
3.	ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	12
4.	ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	16
4.1.	Γενικά.....	16
4.2.	Στρωματογραφία.....	17
4.2.1.	Σχηματισμοί του υποβάθρου.....	17
4.2.2.	Νεογενείς αποθέσεις.....	18
4.2.3.	Τεταρτογενείς αποθέσεις.	18
4.3.	Τεκτονική δομή της περιοχής.....	20
5.	ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	21
5.1.	Γενικά.....	21
5.2.	Υδρολιθολογία.....	21
5.2.1.	Σχηματισμοί του υποβάθρου.....	21
5.2.2.	Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις.....	22
6.	ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	24
6.1.	Γενικά.....	24
6.2.	Θερμοκρασία αέρα.....	24
6.3.	Βροχόπτωση.....	27
6.4.	Παγετοί – Πάχνη.....	31
6.5.	Χαλάζι – Χιόνι.....	31
6.6.	Άνεμοι.....	31
6.7.	Υγρασία.....	32
7.	ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ.....	34
7.1.	Γενικά.....	34
7.2.	Τα κατακρημνίσματα.....	35
7.3.	Η εξατμισοδιαπνοή.....	36

7.3.1.	<i>Γενικά.....</i>	36
7.3.2.	<i>Δυνητική εξατμισοδιαπνοή.....</i>	37
7.3.3.	<i>Πραγματική εξατμισοδιαπνοή.....</i>	38
7.3.4.	<i>Αξιολόγηση των μεθόδων.....</i>	45
7.4.	Ολική απορροή – Προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο.	46
8.	Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	49
8.1.	Γενικά.....	49
8.1.1.	<i>Η χρονική διακύμανση της στάθμης των υπόγειων νερών.....</i>	49
8.1.1.1	<i>Εποχική (ενδοετήσια) διακύμανση της στάθμης.....</i>	49
8.1.1.2.	<i>Υπερετήσια διακύμανση της στάθμης.....</i>	50
8.1.2.	<i>Μεταβολές της στάθμης των υδροφόρων λόγω φυσικών αιτιών.....</i>	51
8.1.3.	<i>Μεταβολές της στάθμης των υδροφόρων λόγω ανθρωπογενών επιδράσεων.....</i>	57
8.2.	Η εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων στην περιοχή του Πλατυκάμπου Λάρισας.....	58
8.2.1.	Γενικά.....	58
8.2.2.	<i>Η διακύμανση της στάθμης στην περιοχή μελέτης.....</i>	62
8.2.3.	<i>Η μέση άνοδος της στάθμης κατά την περίοδο Οκτώβριο – Μάρτιο σε σχέση με την βροχόπτωση.....</i>	78
8.2.4.	<i>Η μέση ετήσια πτώση στάθμης με το χρόνο.....</i>	81
8.2.5.	<i>Χάρτες ίσης πτώσης στάθμης.....</i>	83
9.	ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.....	91
9.1.	Γενικά.....	91
9.2.	Χημικές αναλύσεις.....	93
9.3.	Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (T.D.S.) των νερών της περιοχής μελέτης.....	97
9.4.	Το pH των νερών της περιοχής μελέτης.....	99
9.5.	Ιστογράμματα συχνοτήτων για τις τιμές των κύριων ιόντων. .	100
9.6.	Ιοντικοί λόγοι.....	102
9.7.	Προέλευση των ιόντων στα νερά της περιοχής μελέτης.....	106

9.8.	Συσχετίσεις μεταξύ των ιόντων.....	109
9.9.	Ανάλυση κυρίων συνιστωσών.....	113
9.10.	Ταξινόμηση των υπόγειων νερών.....	118
9.10.1.	Γενικά.....	118
9.10.2.	Διάγραμμα Piper – De Wiest.....	118
9.10.3.	Διάγραμμα Durov.....	119
9.10.4.	Διάγραμμα Schoeller.....	121
9.10.5.	Διάγραμμα S.A.R.....	122
9.10.6.	Διάγραμμα Wilcox.....	124
9.11.	Υδροχημικοί χάρτες – Υδροχημικές τομές.....	125
10.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	132
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	136

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.

Η παρούσα Διατριβή Ειδίκευσης εκπονήθηκε στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης στον κλάδο ειδίκευσης «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία». Η ανάθεσή της έγινε από το Τμήμα Γεωλογίας με πρόταση από τον Καθηγητή του Α.Π.Θ. κ. Γ. Σούλιο, ο οποίος ήταν και ο κύριος επιβλέπων αυτής. Τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής ήταν ο Καθηγητής κ. Γ. Δημόπουλος και ο Λέκτορας κ. Κ. Βουδούρης.

Στόχος της εργασίας αυτής, είναι η μελέτη εξέλιξης της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων κατά τα τελευταία 30 έτη στη Ν.Α. Θεσσαλία (περιοχή Πλατυκάμπου Λάρισας), αλλά και γενικότερα των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε γεωλογική, στρωματογραφική, υδρολιθολογική διερεύνηση της περιοχής. Συλλέχθηκαν στοιχεία που αφορούσαν μετρήσεις της στάθμης του υπόγειου νερού των τελευταίων 30 ετών και τα οποία επεξεργάστηκαν κατάλληλα. Επίσης ελήφθησαν δείγματα νερού απ' όλη την περιοχή μελέτης για την εκτέλεση φυσικών-χημικών αναλύσεων, στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Α.Π.Θ.

Από πλευράς οργάνωσης η Διατριβή αποτελείται από 10 κεφάλαια. Μετά την παρούσα εισαγωγή στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα γεωγραφικά στοιχεία της περιοχής μελέτης καθώς επίσης και στη διοικητική της υπαγωγή.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η γεωμορφολογική δομή της περιοχής, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη γεωλογία της περιοχής και παρουσιάζονται αναλυτικά οι σχηματισμοί που εμφανίζονται σ' αυτήν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής και γίνεται κυρίως αναφορά στην υδρολιθολογία των σχηματισμών της. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα κλιματικά στοιχεία της περιοχής, ενώ στο έβδομο πραγματοποιείται προσδιορισμός των παραμέτρων του

υδρολογικού ισοζυγίου και υπολογίζεται ένα προσεγγιστικό ισοζύγιο για την περιοχή μελέτης.

Το όγδοο κεφάλαιο αναφέρεται στην εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων στην περιοχή μελέτης. Παρουσιάζεται η διακύμανση της στάθμης κατά τα τελευταία 20-30 έτη για κάθε μια γεώτρηση ξεχωριστά. Επίσης παρουσιάζονται χάρτες ίσης πτώσης στάθμης της περιοχής μελέτης.

Το ένατο κεφάλαιο αναφέρεται στους υδροχημικούς χαρακτήρες των νερών της περιοχής. Υπολογίζονται διάφοροι ιοντικοί λόγοι και εξετάζονται πιθανές συσχετίσεις μεταξύ των ιόντων. Παρουσιάζονται ιστογράμματα συχνοτήτων των συγκεντρώσεων των κύριων ιόντων, πραγματοποιείται ταξινόμηση των νερών της περιοχής με βάση τις μέχρι σήμερα αποδεκτές κατατάξεις, καθώς επίσης παρουσιάζονται και υδροχημικοί χάρτες της περιοχής και υδροχημικές τομές με διάφορες διευθύνσεις.

Τέλος, στο δέκατο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τη διατριβή αυτή.

2. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η περιοχή μελέτης (Σχήμα 2.1.) βρίσκεται ανατολικά – νοτιοανατολικά της πόλης της Λάρισας και καλύπτει έκταση περίπου 210 Km². Το κέντρο της περιοχής (περιοχή Πλατυκάμπου) απέχει από την πόλη της Λάρισας περίπου 10 Km. Το κεντρικό τμήμα της περιοχής διαρρέεται από το Κουσμπασανιώτικο ρέμα.

Διοικητικά η περιοχή υπάγεται στον νομό Λάρισας και συγκεκριμένα στους Δήμους Πλατυκάμπου και Νίκαιας. Ο συνολικός πληθυσμός, σύμφωνα με την απογραφή του 2001, φτάνει τους 11500 κατοίκους. Οι περισσότεροι από αυτούς είναι αγρότες, ενώ οι υπόλοιποι εργάτες και υπάλληλοι. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται αναλυτικά τα πληθυσμιακά στοιχεία για κάθε Δημοτικό Διαμέρισμα της περιοχής ενώ στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 2.1. Πληθυσμιακά στοιχεία για την περιοχή μελέτης.

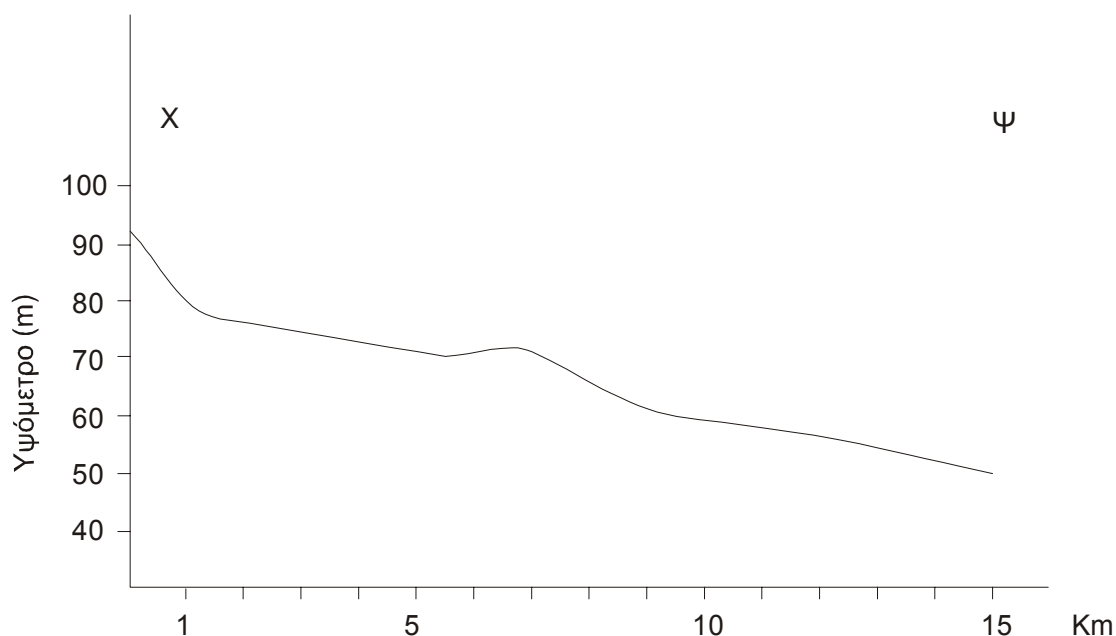
ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΔΗΜΟΥ	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ 2001
Δήμος Πλατυκάμπου:	
1. Δημοτικό Διαμέρισμα Γλαύκης	844
2. Δημοτικό Διαμέρισμα Ελευθερίου	383
3. Δημοτικό Διαμέρισμα Μελίας	841
4. Δημοτικό Διαμέρισμα Μελισσοχωρίου	770
5. Δημοτικό Διαμέρισμα Ναμάτων	142
6. Δημοτικό Διαμέρισμα Ομορφοχωρίου	730
7. Δημοτικό Διαμέρισμα Πλατυκάμπου	2700
8. Δημοτικό Διαμέρισμα Χάλκης	1882
Δήμος Νίκαιας:	
1. Δημοτικό Διαμέρισμα Νικαίας	3149
2. Δημοτικό Διαμέρισμα Νέας Λεύκης	151



Σχήμα 2.1. Η γεωγραφική θέση της περιοχής μελέτης.

3. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

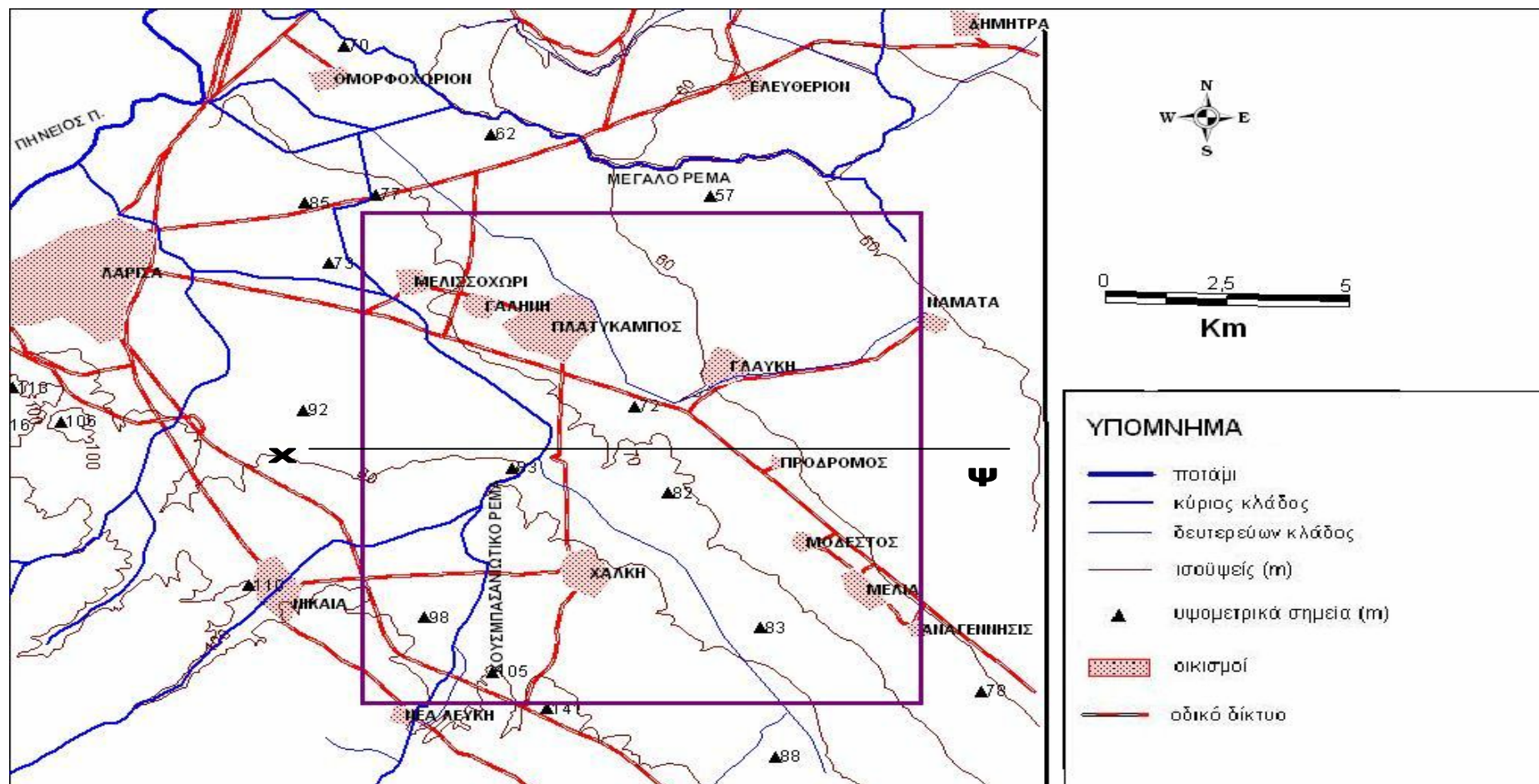
Η ευρύτερη περιοχή μελέτης βρίσκεται, όπως αναφέρθηκε, ανατολικά – νοτιοανατολικά της πόλης της Λάρισας. Αποτελεί το βόρειο τμήμα της λεκάνης της Κάρλας. Διακρίνεται από ομαλό ανάγλυφο και από πολύ μικρές κλίσεις, μικρότερες του 1%. Στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής το ανάγλυφο γίνεται ημιλοφώδες και οι κλίσεις φτάνουν το 4%. Τα χαμηλότερα υψόμετρα βρίσκονται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής και είναι περίπου 50 m, ενώ τα μέγιστα είναι περίπου 140 m και βρίσκονται στο νοτιοδυτικό τμήμα, στις περιοχές Νίκαια και Νέα Λεύκη. Γενικότερα το ανάγλυφο της περιοχής ομαλοποιείται από τα δυτικά προς τα ανατολικά. Στο παρακάτω Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η γεωμορφολογική τομή X - Ψ της περιοχής σε διεύθυνση Δ – Α, ενώ η θέση της παρουσιάζεται στον τοπογραφικό χάρτη του Σχήματος 3.2. Ο τοπογραφικός χάρτης της περιοχής σχεδιάστηκε με το πρόγραμμα GIS – MapInfo professional 6.5 βάση των τοπογραφικών διαγραμμάτων της Γ.Υ.Σ. (φύλλα Λάρισα και Πλατύκαμπος κλίμακας 1:50.000).



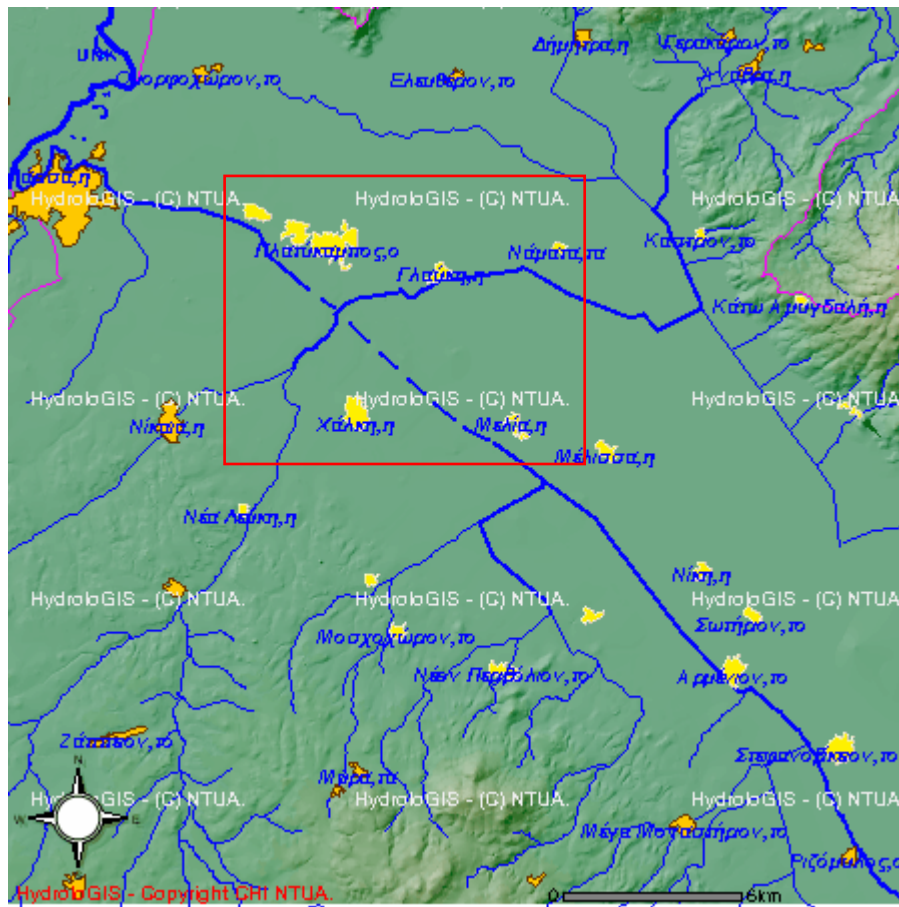
Σχήμα 3.1. Γεωμορφολογική τομή X-Ψ με διεύθυνση Δ - Α.

Στα βόρεια τμήματα της ευρύτερης περιοχής διακρίνονται οι πρόποδες του όρους Όσσα, ενώ στα νότια και ανατολικά εκτείνεται η λεκάνη της τέως λίμνης Κάρλας, η οποία αποξηράνθηκε το 1962. Δυτικά και βορειοδυτικά εκτείνονται οι πεδινές εκτάσεις της Λάρισας, ενώ στα νοτιοδυτικά διακρίνονται οι ημιλοφώδεις περιοχές και οι πρόποδες του Χαλκοδονίου όρους. Σε όλη την περιοχή μελέτης συναντώνται μικροί λόφοι (Μαγούλες) διαφόρων υψομέτρων, όπως η Μαγούλα Καρτάλη (98 m) και η Μαγούλα Καρδαρά (88 m) ανατολικά της Νίκαιας, η Τζιλή Μαγούλα (57 m) βορειοανατολικά του Πλατύκαμπου, η Μαγούλα Καπουρνιώτικη (55 m) ανατολικά της Μελίας κ.α..

Αναφορικά με το υδρογραφικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής μελέτης, αυτό εμφανίζεται πολύ καλά ανεπτυγμένο στο ημιλοφώδες νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής. Είναι δενδριτικής μορφής και η πολύ καλή ανάπτυξή του οφείλεται στην μικρή περατότητα των νεογενών ιζημάτων και στην μικρή σχετικά κλίση των πρηνών. Στην βόρεια ευρύτερη περιοχή, στους πρόποδες της Όσσας, εκεί που επικρατούν οι σχιστόλιθοι και οι σχιστογενέσιοι, το υδρογραφικό δίκτυο εμφανίζεται ανεπτυγμένο και πυκνό με σχετικά μικρούς κλάδους. Το ανατολικό τμήμα της περιοχής, δηλαδή οι πεδινές εκτάσεις της τέως λίμνης Κάρλας, από την περιοχή της Μελίας μέχρι και τον Πλατύκαμπο, χαρακτηρίζεται από ευρύ τεχνητό στραγγιστικό δίκτυο μέσω του οποίου γίνεται εφικτή η διευθέτηση των πεδινών υδάτων της περιοχής και η ταχύτερη στράγγιση των αντίστοιχων περιοχών. Τέλος, οι περισσότεροι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου χαρακτηρίζονται από μη συνεχόμενη ροή νερού. Ο κύριος κλάδος της περιοχής είναι το Κουσμπασανιώτικο ρέμα, το οποίο διασχίζει την περιοχή μελέτης από τα νοτιοδυτικά προς τα βορειοκεντρικά και αποστραγγίζει το νοτιοδυτικό τμήμα της ευρύτερης περιοχής (Μαυροβούνι). Εμφανίζει ροή νερού μόνο κατά τους χειμερινούς μήνες. Επίσης, το Ασμάκι ρέμα και ο Άμυρος ποταμός, διασχίζουν το βόρειο τμήμα της περιοχής, αποστραγγίζοντας το νότιο τμήμα του όρους Όσσα. Το υδρογραφικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής μελέτης απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.2. Τοπογραφικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής (σχεδιάστηκε από τον τοπογραφικό χάρτη κλίμακας 1:50.000 της Γ.Υ.Σ. με G.I.S. πρόγραμμα).



Σχήμα 3.3. Το υδρογραφικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής (από το n.t.u.a)

4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

4.1. Γενικά.

Η περιοχή μελέτης ανήκει γεωτεκτονικά στην Πελαγονική ζώνη (Μουντράκης, 1985). Αυτή θεωρείται ότι αποτελεί τμήμα της Κιμμερικής ηπείρου (Brunn, 1956 – Aubouin, 1959), εκατέρωθεν της οποίας είχαν αναπτυχθεί δύο ωκεάνιες περιοχές, η Παλαιοτηθύς (ζώνη Αξιού) και η Νεοτηθύς (Υποπελαγονική και Πίνδος). Καθ' όλη τη διάρκεια του Μεσοζωϊκού, η Πελαγονική ζώνη χαρακτηρίζεται από ανθρακική, καθαρά νηριτική ιζηματογένεση, ενώ σε μερικές περιοχές εμφανίζονται πελαγικά ιζήματα μαζί με οφειολιθικές μάζες.

Η ζώνη έχει διεύθυνση ΒΒΔ – ΝΝΑ και εκτείνεται από τη πρώην Γιουγκοσλαβία προς τους ορεινούς όγκους της βόρειας και κεντρικής Ελλάδας, του Βέρνου, του Βόρρα, του Βέρμιου, των Πιερίων, του Ολύμπου, της Όσσας, του Πηλίου και της Βόρειας Εύβοιας, έπειτα κάμπτεται προς τις Σποράδες, περιλαμβάνοντας τα νησιά Σκιάθος, Σκόπελος, Σκύρος, ενώ η πιθανή συνέχεια της ζώνης στο Αιγαίο είναι τα νησιά Οινούσες από όπου η ζώνη περνάει στην Βόρεια Μικρά Ασία (Μουντράκης, 1985).

Συνοπτικά, στην ευρύτερη περιοχή μελέτης κυριαρχούν τα πετρώματα της Πελαγονικής, τα οποία αποτελούν το υπόβαθρο της λεκάνης, και τα Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα, τα οποία τοποθετούνται ασύμφωνα πάνω στα προηγούμενα. Τα μεταμορφωμένα πετρώματα της Πελαγονικής διακρίνονται στα βορειοανατολικά και ανατολικά της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Τα Νεογενή ιζήματα βρίσκονται στο νοτιοδυτικό τμήμα της ευρύτερης περιοχής, ενώ τα Τεταρτογενή καταλαμβάνουν το υπόλοιπο κεντρικό τμήμα.

Η γεωλογική δομή της ευρύτερης περιοχής μελέτης παρουσιάζεται στο γεωλογικό χάρτη του Σχήματος 4.1, ενώ παρουσιάζεται και μια γεωλογική τομή, η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική για την περιοχή μελέτης (Σχήμα 4.2).

4.2. Στρωματογραφία.

4.2.1. Σχηματισμοί του υποβάθρου.

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης αποτελείται από ποικίλους σχηματισμούς της Πελαγονικής ζώνης. Αυτοί είναι: τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα Παλαιοζωικής – Μέσο Τριαδικής ηλικίας, τα μεταμορφωμένα οφειολιθικά πετρώματα και μεταϊζήματα Ανωτέρου Ιουρασικού, το οφειολιθικό λατυποπαγές και οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Αγιάς Ανωτέρου Κρητιδικού.

- *Κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα:* Βόρεια των οικισμών Ελευθέριο και Δήμητρα, στους πρόποδες της Όσσας και ανατολικά από τον οικισμό Νάματα, στους πρόποδες του Μαυροβουνίου, συναντάται ένα σύστημα μεταμορφωμένων πετρωμάτων μεγάλου πάχους της Πελαγονικής ζώνης, που έχει υποστεί μια παλαιά πρασινοσχιστολιθικής φάσεως μεταμόρφωση και μια νεότερη σε συνθήκες υψηλών πιέσεων και χαμηλών θερμοκρασιών. Το σύστημα αυτό συνιστούν, γνευσιοσχιστόλιθοι, υποκείμενοι του Ηωελληνικού τεκτονικού καλύμματος, και μαρμαρυγιακοί σχιστόλιθοι, που αποτελούν πλευρική μετάβαση των γνευσιοσχιστολίθων. Έχουν πολλές ενστρώσεις χαλαζιτών και υφή σχιστώδη παράλληλα προσανατολισμένη και έντονα μικροπτυχωμένη. Το πάχος αυτών ανέρχεται στα 600 m περίπου.

- *Μεταμορφωμένα οφειολιθικά πετρώματα:* Μεγάλη εξάπλωση στην περιοχή παρουσιάζει το σύμπλεγμα των μεταμορφωμένων οφειολιθικών πετρωμάτων που συνοδεύεται από μεταϊζήματα. Συναντάται ΒΑ και ΝΑ του οικισμού Δήμητρα. Οι σχηματισμοί του συμπλέγματος αυτού έχουν υποστεί μεταμόρφωση υψηλών πιέσεων και χαμηλών θερμοκρασιών μετά την τεκτονική τους τοποθέτηση που έγινε κατά το τέλος του Ανώτερου Ιουρασικού, πάνω στο Παλαιοζωικό – Μέσο Τριαδικό σύστημα των γνευσιοσχιστολίθων και μαρμαρυγιακών σχιστόλιθων. Αποτελείται από σερπεντινίτες, που καταλαμβάνουν το ανώτερο τμήμα του Ηωελληνικού καλύμματος και από μεταμορφωμένα βασικά πετρώματα και μεταϊζήματα που καταλαμβάνουν το κατώτερο τμήμα του τεκτονικού καλύμματος και που διακρίνονται σε αμφιβολίτες, πρασινίτες και αμφιβολιτικούς – επιδοτιτικούς – χλωριτικούς σχιστόλιθους.

Το μέγιστο πάχος των σερπεντινιτών φτάνει τα 150 m περίπου, ενώ τα μεταμορφωμένα βασικά πετρώματα και μεταϊζήματα έχουν συνολικό πάχος 300 m.

- *Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι*: Βορειοδυτικά από τον οικισμό Ελευθέριο εμφανίζονται οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι της Αγιάς. Πρόκειται για κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους ανωκρητιδικής ηλικίας, οι οποίοι υπέρκεινται του Ηωελληνικού καλύμματος. Το μέγιστο πάχος των κρυσταλλικών ασβεστόλιθων της Αγιάς φτάνει τα 250 m περίπου.

- *Οφειολιθικό λατυποπαγές*: Βορειοανατολικά του οικισμού Ομορφοχώριο συναντάται το οφειολιθικό λατυποπαγές επικλύσεως Ομορφοχωρίου. Πρόκειται για ιδιόμορφη εμφάνιση που αποτελείται κυρίως από τεμάχια σερπεντινιτών, πρασινιτών και μαρμάρων και έχουν πάχος 150 m.

4.2.2. Νεογενείς αποθέσεις.

Οι νεώτερες αποθέσεις εμφανίζονται επιφανειακά στο νοτιοδυτικό τμήμα της ευρύτερης περιοχής μελέτης (νοτιοδυτικά της Χάλκης), ενώ το υπόλοιπο τμήμα της περιοχής μελέτης καλύπτεται από τις νεώτερες αποθέσεις του Τεταρτογενούς.

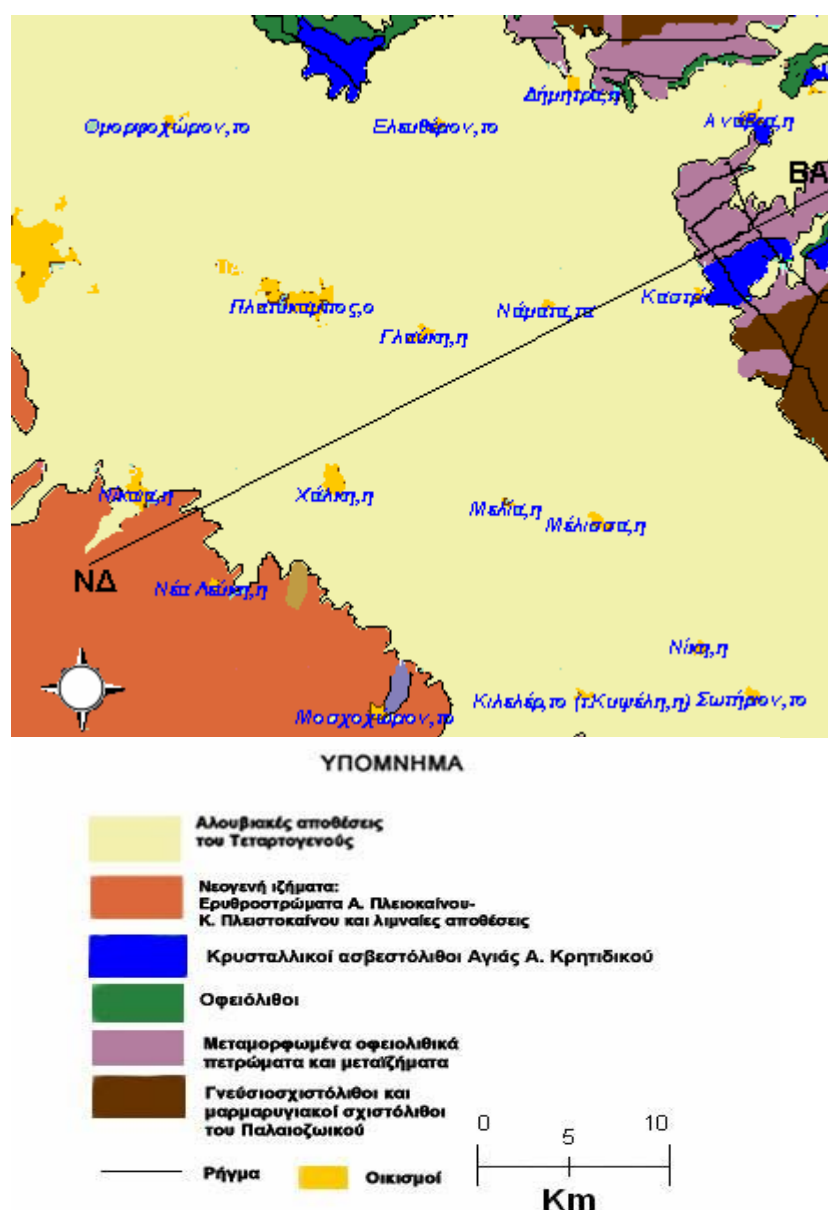
Τα παλαιότερα από τα νεογενή ιζήματα είναι μάργες και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι που αποτέθηκαν σε λιμναίο έως υφάλμυρο περιβάλλον κατά το Μειόκαινο.

Στα νεώτερα και ανώτερα στρώματα των νεογενών αποθέσεων εμφανίζονται χερσοποτάμιοι σχηματισμοί (ερυθροστρώματα) που αποτέθηκαν κατά την περίοδο υποχώρησης των νερών της αρχικής λίμνης της Θεσσαλίας και χέρσευσης της περιοχής στο τέλος του Νεογενούς και στις αρχές του Τεταρτογενούς. Το ορατό πάχος των νεογενών αποθέσεων είναι περίπου 100 m.

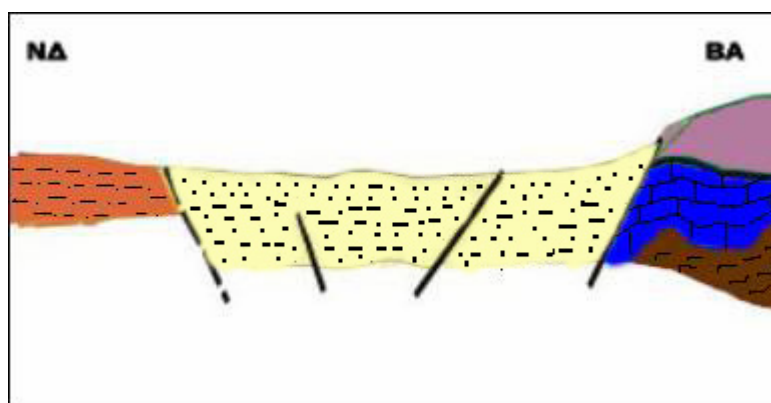
4.2.3. Τεταρτογενείς αποθέσεις.

Το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης καλύπτεται από τεταρτογενείς αλουβιακές αποθέσεις. Πρόκειται για ανοικτότεφρα έως καστανότεφρα ασύνδετα υλικά από αργίλους, άμμους, κροκαλολατύπες και ποταμολιμναία

υλικά, που αποτέθηκαν στην λεκάνη της Κάρλας και που εναλλάσσονται μεταξύ τους. Το πάχος των αλουβιακών αποθέσεων είναι αρκετά μεγάλο. Στα περιθώρια της λεκάνης, προς τις ορεινές περιοχές της Όσσας και συγκεκριμένα βόρεια από τους οικισμούς Ελευθέριο και Δήμητρα, εμφανίζονται αδρομερέστεροι σχηματισμοί – πλευρικά κορήματα και σωροί κορημάτων, ενώ στις περισσότερες χαραδρώσεις αναπτύσσονται χερσαίες αναβαθμίδες που αποτελούνται επί το πλείστον από αδρομερή στοιχεία και οι οποίες έχουν ύψος περίπου 20 m. Προς το κέντρο της λεκάνης τα υλικά γίνονται βαθμιαία λεπτομερέστερα.



Σχήμα 4.1. Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής(βασισμένο σε αντίστοιχο του π.τ.υ.α με ανασχεδίαση από τον συγγραφέα).



Σχήμα 4.2. Γεωλογική τομή της ευρύτερης περιοχής μελέτης (υπόμνημα όμοιο με αυτό του γεωλογικού χάρτη).

4.3. Τεκτονική δομή της περιοχής.

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης συναντώνται δύο κύρια συστήματα ρηγμάτων. Το πρώτο, το οποίο θεωρείται και παλαιότερο, έχει διεύθυνση ΒΒΔ – ΝΝΑ, ενώ το δεύτερο και νεώτερο έχει διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ έως Α – Δ (Doutsos, 1979, Ψιλοβίκος, Μουντράκης, Παυλίδης, 1988).

Η ηλικία του πρώτου συστήματος ρηγμάτων είναι Α. Μειόκαινο – Κ. Πλειστόκαινο και σε αυτό οφείλεται η δημιουργία του αρχικού τεκτονικού βυθίσματος της λεκάνης της Λάρισας. Το δεύτερο σύστημα ρηγμάτων οφείλεται σε μια νεώτερη εφελκυστική διαδικασία η οποία έλαβε χώρα από το Μ – Α. Πλειστόκαινο και συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Στον εφελκυσμό αυτό οφείλεται και η δημιουργία των εξαρμάτων και βυθισμάτων που εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή σχεδόν εγκάρσια στην αρχική επιμήκη διάταξη που είχαν δημιουργήσει τα ρήγματα με διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ ή ΑΒΑ – ΔΝΔ.

Όσον αφορά την τεκτονική κατάσταση των γύρω ορεινών όγκων, χαρακτηριστικό είναι οι πολλές και πυκνές διαρρήξεις και η ύπαρξη πτυχών μεγάλου εύρους. Τα μάρμαρα και οι γνευσιοσχιστόλιθοι παρουσιάζουν πυκνό δίκτυο διακλάσεων. Οι διακλάσεις – διαρρήξεις έχουν κατά κύριο λόγο διεύθυνση ΒΑ – ΝΔ, ενώ κατά δεύτερο ΒΔ- ΝΑ. Στα μάρμαρα είναι ανοιχτές, ενώ οι περισσότερες διαρρήξεις και διακλάσεις στους γνευσιοσχιστόλιθους είναι κλειστές λόγω της απόθεσης αργίλου μέσα σε αυτές (Καλλέργης και Παπανικολάου, 1979).

5. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.

5.1. Γενικά.

Οι διάφοροι σχηματισμοί που συναντώνται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης χαρακτηρίζονται από διαφορετική υδρογεωλογική συμπεριφορά. Αυτοί διακρίνονται: στους σχηματισμούς που συνιστούν το υπόβαθρο της περιοχής (γνευσιοσχιστόλιθοι και κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι) και στις Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις της Κάρλας, που καταλαμβάνουν ολόκληρη την περιοχή μελέτης.

5.2. Υδρολιθολογία.

5.2.1. Σχηματισμοί του υποβάθρου.

- *Οι γνευσιοσχιστόλιθοι:* Αυτοί χαρακτηρίζονται από πολύ μικρό ενεργό πορώδες, πρωτογενές και δευτερογενές (κατατμήσεις). Το πολύ μικρό πρωτογενές πορώδες οφείλεται στον υψηλό βαθμό διαγένεσης, τον οποίο έχουν υποστεί τα πετρώματα αυτά. Αντίθετα, το μικρό δευτερογενές πορώδες οφείλεται στην διεργασία της εξαλλοίωσης ορυκτών που βρίσκονται σε αυτά τα πετρώματα, όπως οι άστριοι, οι μαρμαρυγίες, οι αμφίβολοι κ.τ.λ.. Έτσι, παρόλο που στα πετρώματα αυτά διαπιστώνονται πολλές ασυνέχειες, λόγω του έντονου τεκτονισμού που έχουν υποστεί, οι επιφάνειες των ασυνεχειών έχουν αποφραχθεί από τα προϊόντα εξαλλοίωσης των ορυκτών που προαναφέρθηκαν. Έτσι λοιπόν οι γνευσιοσχιστόλιθοι μπορούν να χαρακτηριστούν ως σχεδόν αδιαπέρατοι και υδατοστεγανοί σχηματισμοί. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι γνευσιοσχιστόλιθοι εμφανίζονται βόρεια της περιοχής μελέτης στους πρόποδες της Όσσας και ανατολικά στους πρόποδες του Μαυροβουνίου.

- *Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι:* Εμφανίζονται ισχυρά κατακερματισμένοι και έντονα καρστικοποιημένοι. Αποτελούν τα κατ' εξοχήν υδροπερατά πετρώματα της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Οι συχνές γνευσιοσχιστολιθικές παρεμβολές μέσα στους κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους αποτελούν στεγανά διαφράγματα, με αποτέλεσμα οι τελευταίοι να λαμβάνουν τον χαρακτήρα ασυνεχών υδροφορέων. Οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι, όπως αναφέραμε, απαντώνται

βορειοδυτικά από τον οικισμό Ελευθέριο καθώς και ανατολικά, στα κεντρικά και χαμηλότερα τμήματα του Μαυροβουνίου, όπου η διαπερατότητα αυτών είναι μεγάλη λόγω της έντονης καρστικοποίησης που έχουν υποστεί.

5.2.2. *Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις.*

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται η υδρογεωλογική συμπεριφορά των ιζημάτων του Μειόκαινου – Πλειο-Πλειστόκαινου καθώς και εκείνη των νεώτερων αποθέσεων του Τεταρτογενούς.

- *Μειοκαινικά–Πλειο-Πλειστοκαινικά ιζήματα:* Αυτά εμφανίζονται στο νοτιοδυτικό τμήμα της ευρύτερης περιοχής μελέτης (νοτιοδυτικά της Χάλκης) και συνίστανται, όπως έχει ήδη αναφερθεί, από μάργες – μαργαϊκούς ασβεστόλιθους και χερσοποτάμιους σχηματισμούς (ερυθροστρώματα).

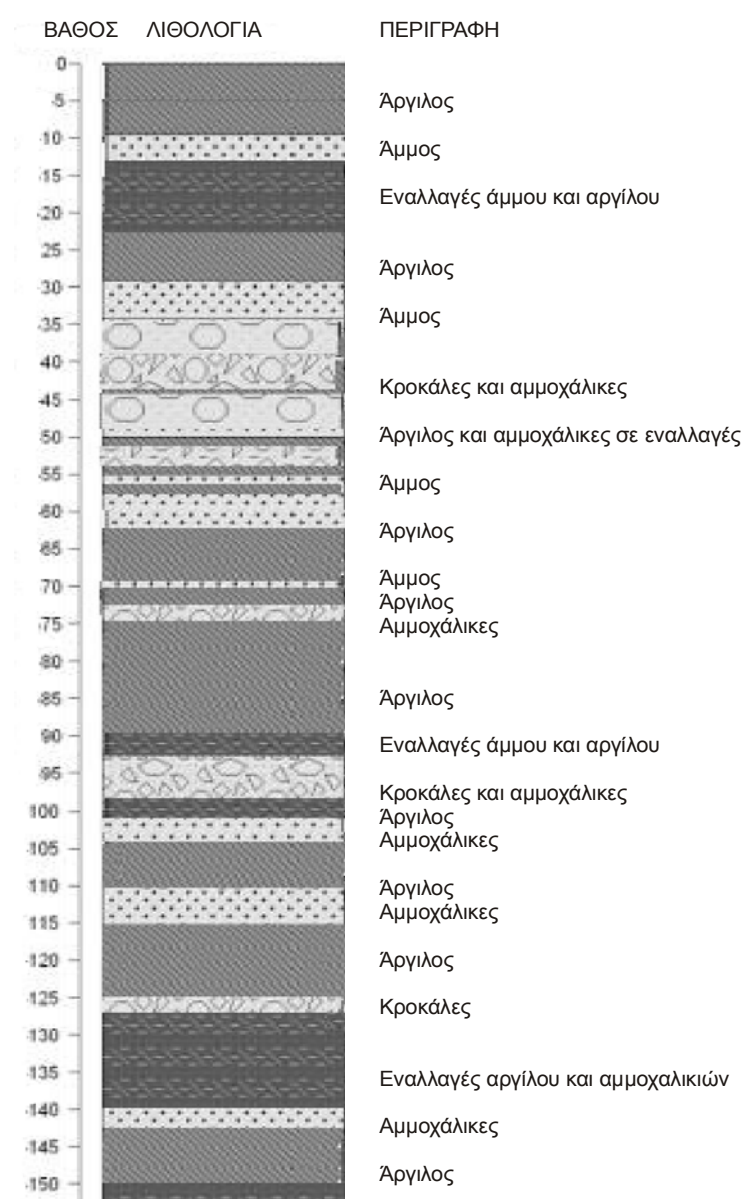
Χαρακτηρίζονται από φτωχή υδροφορία λόγω της λιθολογικής τους σύστασης, η οποία αποτελείται από αργιλομαργαϊκά ιζήματα μικρής διαπερατότητας.

- *Αποθέσεις Τεταρτογενούς:* Οι αποθέσεις του Τεταρτογενούς καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης. Οι αλουβιακές αποθέσεις συνίστανται από αργίλους, άμμους, κροκαλολατύπες και ποταμολιμναία υλικά που εναλλάσσονται μεταξύ τους. Οι τιμές του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (k) κυμαίνονται μεταξύ $10^{-5} - 10^{-8}$ m/sec. Σε περιοχές όπου η περιεκτικότητα σε άμμο είναι μεγάλη (11-24%) παρουσιάζονται μεγαλύτερες τιμές διαπερατότητας ($1,53 \cdot 10^{-5} - 2,45 \cdot 10^{-4}$ m/sec), ενώ σε περιοχές με μικρή περιεκτικότητα σε άμμο (0-3%) παρατηρήθηκαν μικρές τιμές ($10^{-7} - 10^{-8}$ m/sec) (Μπαμπατζιμόπουλος και Αντωνόπουλος, 1990). Βόρεια από τους οικισμούς Ελευθέριο και Δήμητρα, προς τις ορεινές περιοχές της Όσσας, εμφανίζονται αδρομερέστεροι σχηματισμοί (πλευρικά κορήματα, αναβαθμίδες των διαφόρων χειμάρρων) αυξημένης περατότητας.

Στο Σχήμα 5.1, βλέπουμε μια αντιπροσωπευτική λιθολογική τομή από υδρευτική γεώτρηση στην περιοχή της Χάλκης. Η ανόρυξη της γεώτρησης πραγματοποιήθηκε το Φεβρουάριο του 1984 από τους Γ. Γκανάτσα Γεωλόγο-Μελετητή και Γεώργιο Μπούντα Γεωτρυπανιστή. Μέχρι τα 150 μέτρα βάθος

παρατηρούνται συνεχείς εναλλαγές αργίλου, άμμου και αμμοχάλικων με κροκάλες. Τα υδροφόρα στρώματα αναπτύσσονται από τα 42 m έως τα 70 m βάθος και από τα 92 m έως τα 126 m, με συχνές παρεμβολές αργιλικών στρωμάτων.

Γενικά η υδροφορία της περιοχής χαρακτηρίζεται από μέση δυναμικότητα και η δίαίτά της εξασφαλίζεται σε ένα βαθμό από τις πλευρικές τροφοδοσίες των ρεμάτων Κουσμπασανιώτη ο οποίος τροφοδοτεί πλευρικά την περιοχή με $9 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ και Μεγάλο Ρέμα (Ευαγγελόπουλος, 2004).



Σχήμα 5.1. Λιθολογική τομή υδρευτικής γεώτρησης στην περιοχή της Χάλκης (κατά Γ. Γκανάτσα, 1984).

6. ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.

6.1. Γενικά.

Το κλίμα στην περιοχή μελέτης μπορεί να χαρακτηριστεί ως ηπειρωτικό ημίξηρο χαρακτηριζόμενο από θερμό και ξηρό Καλοκαίρι και ψυχρό και υγρό Χειμώνα. Το κλίμα αυτό μεταβαίνει προς τα νότια σε Μεσογειακό, το οποίο χαρακτηρίζεται από ήπιους υγρούς χειμώνες και ήπια, ζεστά και ξηρά καλοκαίρια λόγω της επιρροής των υποτροπικών αντικυκλώνων.

Σύμφωνα με την κλιματική κατάταξη του Korppen (1936) το κλίμα της περιοχής μελέτης ανήκει στον τύπο Csa, όπου:

- Το C δηλώνει υγρό κλίμα με ήπιους χειμώνες, με κριτήριο ότι η θερμοκρασία του θερμότερου μήνα σε °C είναι $T_{\theta} > 10$ °C και η θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα σε °C είναι -3 °C $< T_{\psi} < 18$ °C.
- Το s δηλώνει ξηρό Καλοκαίρι με κριτήριο ότι η κατακρήμνιση του ξηρότερου μήνα του θερμού εξαμήνου σε mm είναι $R_{\xi\theta} < 40$ mm και ότι ισχύει $R_{\xi\theta} < R_{\upsilon\psi}$, όπου $R_{\upsilon\psi}$ είναι η κατακρήμνιση του υγρότερου μήνα του ψυχρού εξαμήνου σε mm.
- Το a δηλώνει μεγάλο και θερμό Καλοκαίρι, με κριτήριο ότι η θερμοκρασία του θερμότερου μήνα σε °C είναι $T_{\theta} > 22$ °C και ότι η θερμοκρασία ενός μήνα σε °C είναι $T_{\mu} > 10$ °C για 4 τουλάχιστον μήνες το χρόνο.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται τα μετεωρολογικά δεδομένα του σταθμού της Λάρισας, τα οποία είναι και τα πιο αξιόπιστα και πλήρως αντιπροσωπευτικά για την περιοχή μελέτης.

6.2. Θερμοκρασία αέρα.

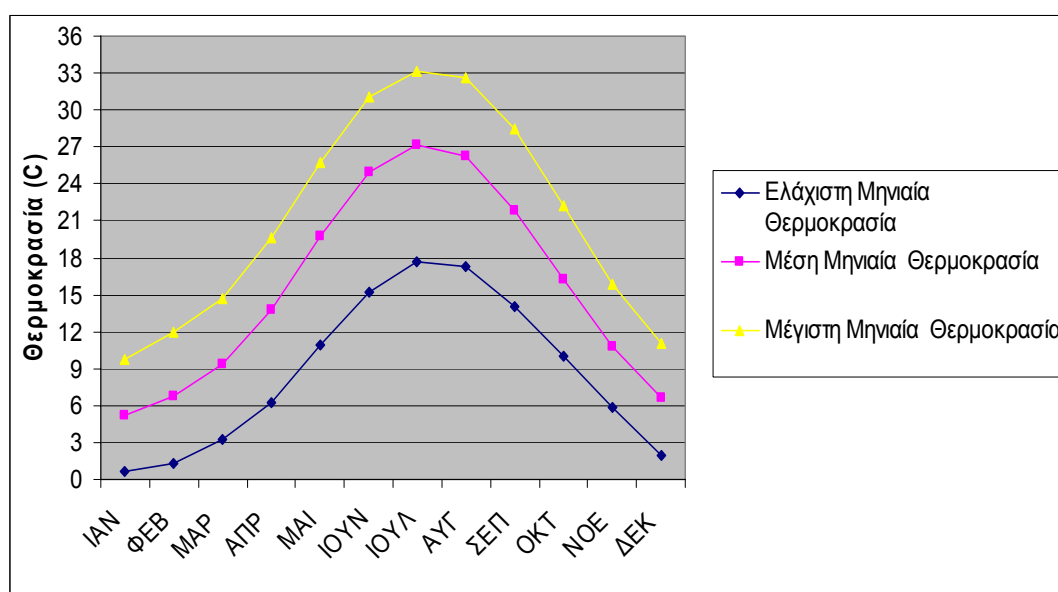
Στον παρακάτω Πίνακα 6.1. δίνονται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα (μέση-μέση μέγιστη-μέση ελάχιστη) στο μετεωρολογικό σταθμό της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (Ε.Μ.Υ.) στη Λάρισα για την περίοδο 1955 έως 2004. Από τις τιμές του Πίνακα προέκυψε το Σχήμα 6.1.

Η μέση θερμοκρασία είναι πάντα πάνω από το μηδέν. Η απόλυτη ελάχιστη θερμοκρασία παρατηρήθηκε κατά τον μήνα Ιανουάριο και ήταν $-21,6$ °C, ενώ

η μέγιστη απόλυτη θερμοκρασία παρατηρήθηκε κατά τον μήνα Ιούλιο και ήταν 45,2 °C. Γενικά οι μεγαλύτερες θερμοκρασίες παρατηρούνται κατά τους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο. Η μέση μηνιαία θερμοκρασία, κατά την διάρκεια ενός έτους στην περιοχή μελέτης (για την περίοδο 1956-2004), κυμαίνεται από 5,2 °C τον Ιανουάριο έως 27,2 °C τον Ιούλιο.

Πίνακας 6.1. Μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες αέρα (°C) στην Λάρισα (περίοδος 1955-2004).

	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Μ.Ο
Ελάχιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	0,7	1,3	3,3	6,2	10,9	15,2	17,7	17,3	14	10	5,8	2	8,7
Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία	5,2	6,8	9,4	13,8	19,7	25	27,2	26,2	21,8	16,2	10,8	6,6	15,7
Μέγιστη Μηνιαία Θερμοκρασία	9,8	12	14,7	19,6	25,7	31	33,1	32,6	28,4	22,2	15,8	11,1	21,3

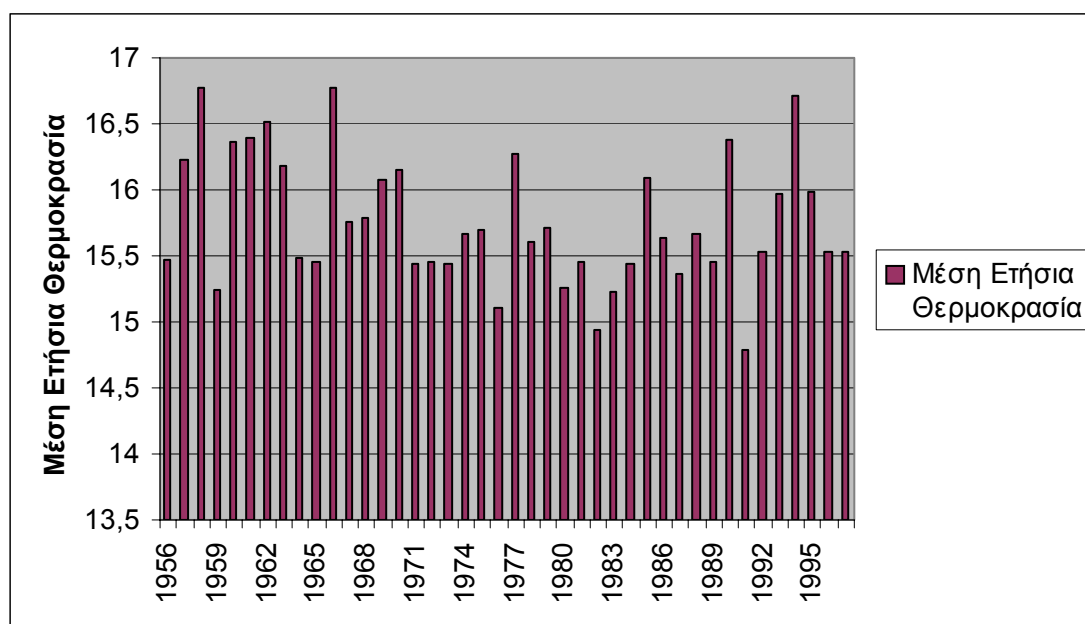


Σχήμα 6.1. Διάγραμμα της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας στη Λάρισα (περίοδος 1955-2004).

Στον παρακάτω Πίνακα 6.2. δίνονται οι μέσες ετήσιες τιμές θερμοκρασίας στην Λάρισα για την περίοδο 1956-1997, ενώ στο Σχήμα 6.2. δίνεται και το αντίστοιχο διάγραμμα.

Πίνακας 6.2. Μέσες ετήσιες τιμές θερμοκρασίας στην Λάρισα για την περίοδο 1956-1997.

Έτος	Μέση Ετήσια Θερμοκρασία	Έτος	Μέση Ετήσια Θερμοκρασία
1956	15,47	1977	16,28
1957	16,22	1978	15,60
1958	16,77	1979	15,71
1959	15,24	1980	15,26
1960	16,36	1981	15,46
1961	16,39	1982	14,94
1962	16,51	1983	15,23
1963	16,18	1984	15,44
1964	15,49	1985	16,09
1965	15,45	1986	15,64
1966	16,77	1987	15,36
1967	15,76	1988	15,66
1968	15,79	1989	15,45
1969	16,08	1990	16,38
1970	16,15	1991	14,79
1971	15,44	1992	15,53
1972	15,46	1993	15,97
1973	15,44	1994	16,71
1974	15,67	1995	15,99
1975	15,70	1996	15,53
1976	15,11	1997	15,53



Σχήμα 6.2. Ραβδοδιάγραμμα διακύμανσης της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας για την περίοδο 1956-1997.

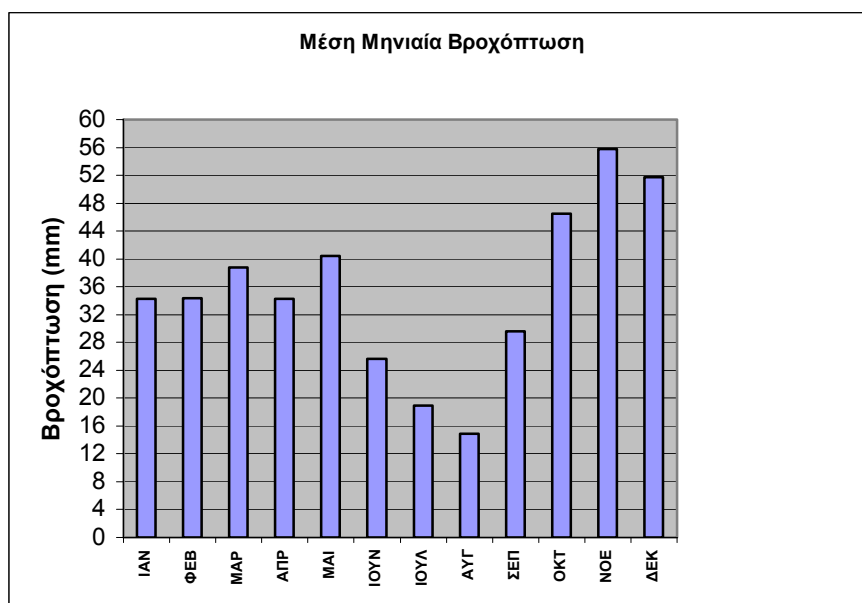
Από το ραβδοδιάγραμμα του Σχήματος 6.2. προκύπτει ότι κατά την χρονική περίοδο 1956-1997 η μικρότερη μέση ετήσια θερμοκρασία που παρατηρήθηκε ήταν 14,79 °C κατά το έτος 1991, ενώ η μεγαλύτερη ήταν 16,77 °C και παρατηρήθηκε κατά τα έτη 1958 και 1966.

6.3. Βροχόπτωση.

Στον Πίνακα 6.3. δίνονται οι μέσες μηνιαίες τιμές ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (mm) του μετεωρολογικού σταθμού της Λάρισας για την περίοδο 1955 έως 2004, ενώ βάσει των τιμών αυτών προέκυψε και το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος 6.3. Οι υψηλότερες τιμές ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων παρατηρούνται κατά τους μήνες Νοέμβριο, Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο. Η μέση ετήσια βροχόπτωση φτάνει τα 423,2 mm, ενώ οι συνολικές μέρες βροχής το χρόνο είναι κατά μέσο όρο 116,7 ημέρες.

Πίνακας 6.3. Μέσες μηνιαίες τιμές ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων στην Λάρισα (για την περίοδο 1955-2004).

	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	ΕΤΗΣΙΟ
Μέση Μηνιαία Βροχόπτωση (mm)	34,3	34,4	38,8	34,3	40,4	25,6	18,9	14,9	29,6	46,5	55,8	51,7	425,2



Σχήμα 6.3. Ραβδοδιάγραμμα μέσων μηνιαίων τιμών ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων Λάρισας (περίοδος 1955-2004).

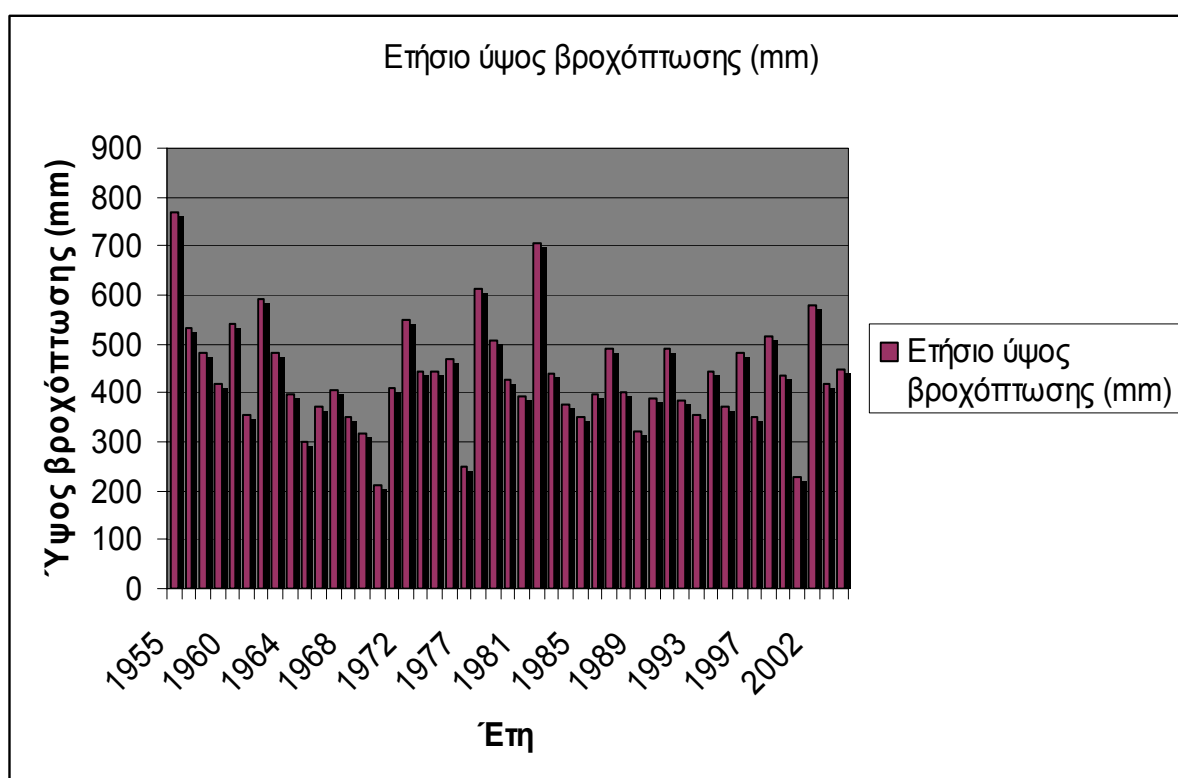
Η μέγιστη μηνιαία βροχόπτωση παρουσιάζεται κατά το μήνα Νοέμβριο (55,8 mm ή 13,12 % της συνολικής ετήσιας βροχόπτωσης). Έπονται οι μήνες Δεκέμβριος (51,7 mm ή 12,16%) και Οκτώβριος (46,5 mm ή 10,9%). Οι πλέον ξηροί μήνες είναι ο Αύγουστος (14,9 mm ή 3,5%) και ο Ιούλιος (18,9 mm ή 4,4%).

Στον Πίνακα 6.4. παρουσιάζονται οι ετήσιες τιμές βροχόπτωσης του σταθμού της Λάρισας για την περίοδο 1955-2004.

Πίνακας 6.4. Ετήσια ύψη βροχόπτωσης στην Λάρισα για την περίοδο 1955-2004.

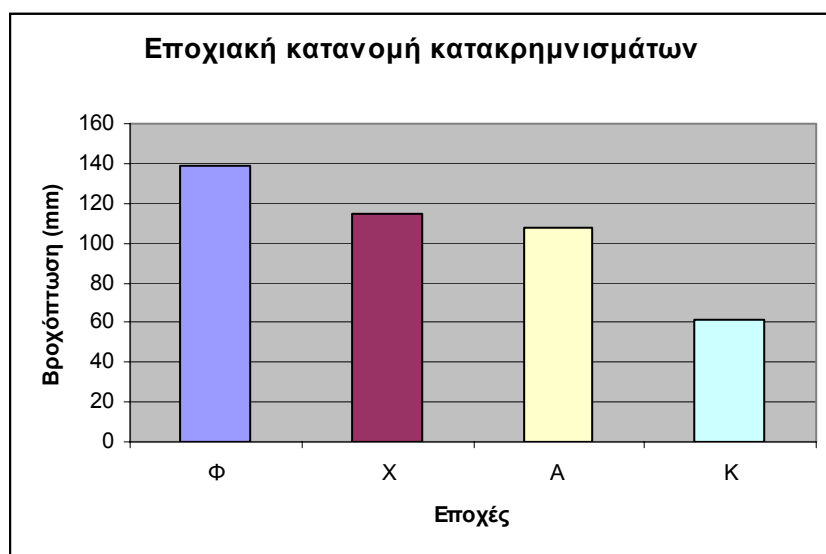
α/α	Έτος	Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (mm)	α/α	Έτος	Ετήσιο ύψος βροχόπτωσης (mm)
1	1955	769,7	25	1981	391,8
2	1956	534,5	26	1982	704,3
3	1957	482,1	27	1983	440,8
4	1959	420,2	28	1984	376,2
5	1960	540,5	29	1985	351,2
6	1961	354,3	30	1986	397,0
7	1962	589,5	31	1987	489,2
8	1963	481,2	32	1988	402,2
9	1964	396,9	33	1989	322,8
10	1965	299,2	34	1990	390,1
11	1966	371,7	35	1991	489,5
12	1967	407,3	36	1992	383,2
13	1968	350,9	37	1993	356,7
14	1969	318,7	38	1994	444,8
15	1970	211,3	39	1995	370,5
16	1971	407,8	40	1996	482,9
17	1972	550,6	41	1997	349,1
18	1973	443,5	42	1998	513,4
19	1975	441,7	43	1999	435,8
20	1976	470,3	44	2000	227,9
21	1977	247,5	45	2002	579,0
22	1978	613,7	46	2003	417,0
23	1979	507,8	47	2004	448,0
24	1980	425,6	Μ.Ο		434,04

Όσον αφορά την κατανομή των βροχοπτώσεων, με βάση την γραφική παράσταση (Σχήμα 6.4.) των τιμών του Πίνακα 6.4., προκύπτει ευρεία διακύμανση των ετήσιων τιμών της βροχόπτωσης. Τα έτη με τις μεγαλύτερες βροχοπτώσεις είναι το 1955 με 769,7 mm βροχής, το 1982 με 704,3 mm και το 1978 με 613,7 mm. Επίσης οι χαμηλότερες βροχοπτώσεις αντιστοιχούν στα έτη 1970 με 211,3 mm βροχής, 2000 με 227,9 mm και 1977 με 247,5 mm.

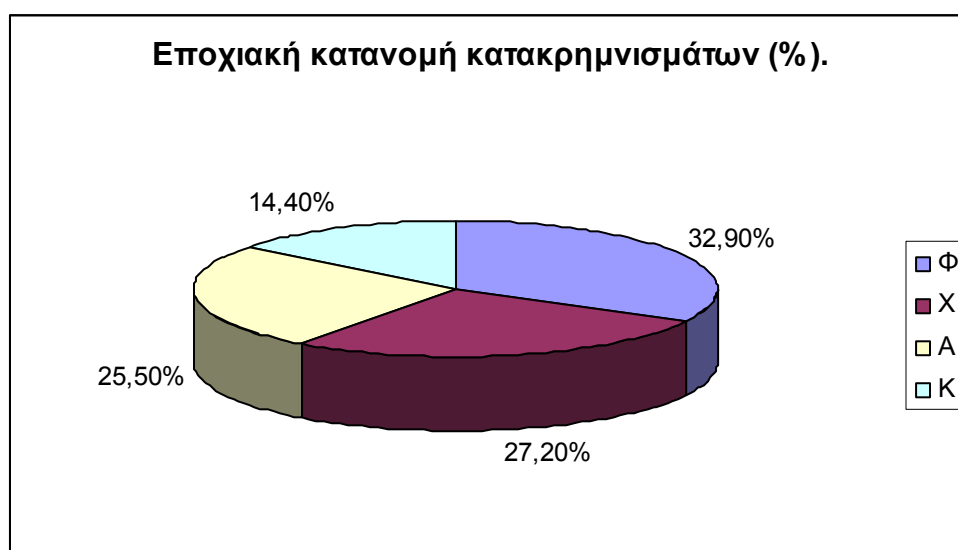


Σχήμα 6.4. Διακύμανση της ετήσιας βροχόπτωσης στην Λάρισα για την περίοδο 1955-2004.

Στα Σχήματα 6.5. και 6.6. παρουσιάζεται η εποχιακή κατανομή των κατακρημνισμάτων εκφρασμένη σε mm και επί τοις εκατό (%) αντίστοιχα.



Σχήμα 6.5. Εποχιακή κατανομή των κατακρημνισμάτων (εκφρασμένη σε mm) στην Λάρισα για την περίοδο 1955-2004.



Σχήμα 6.6. Εποχιακή κατανομή των κατακρημνισμάτων (εκφρασμένη επί τοις εκατό %) στην Λάρισα για την περίοδο 1955-2004.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των κατακρημνισμάτων παρατηρείται το Φθινόπωρο (32,9%). Ακολουθεί ο Χειμώνας (27,2%), η Άνοιξη (25,5%), ενώ αρκετά σημαντικό είναι και το ποσοστό των βροχοπτώσεων κατά το Καλοκαίρι (14,4%).

6.4. Παγετοί – Πάχνη.

Στην περιοχή παρατηρούνται παγετοί κατά την περίοδο Δεκεμβρίου – Μαρτίου, και σπανιότερα κατά τους μήνες Νοέμβριο και Απρίλιο, ενώ ο μέσος όρος ημερών στις οποίες σημειώθηκε πάχνη είναι 5 ημέρες περίπου το χρόνο.

6.5. Χαλάζι – Χιόνι.

Η πτώση χαλαζιού δεν είναι συχνό φαινόμενο στην περιοχή. Κατά μέσο όρο, χαλάζι παρατηρήθηκε 0,3 ημέρες το χρόνο, συνήθως κατά τους μήνες Απρίλιο, Μάιο και Ιούνιο.

Ο μέσος αριθμός ημερών χιονιού το έτος είναι 4,7. Αυτές οι ημέρες είναι κατά τους μήνες Δεκέμβριο, Ιανουάριο, Φεβρουάριο και σπανιότερα το Μάρτιο και το Νοέμβριο.

6.6. Άνεμοι.

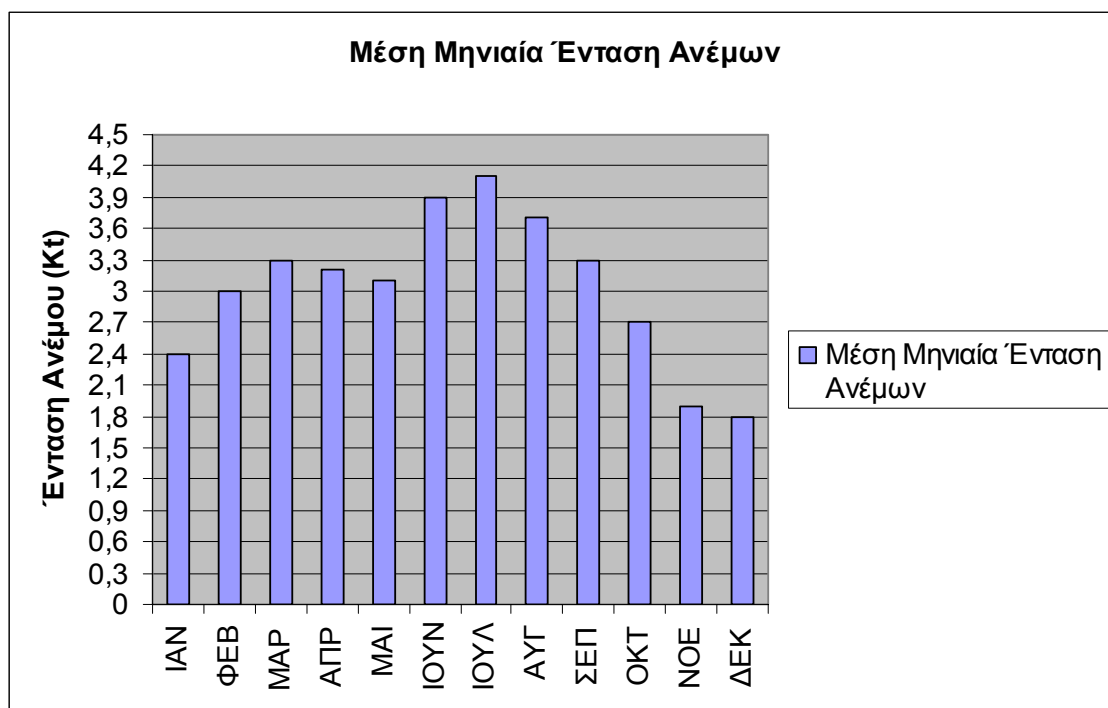
Η περιοχή μελέτης δεν χαρακτηρίζεται από ισχυρούς ανέμους. Στους Πίνακες 6.5. και 6.6. δίνονται η μέση μηνιαία ένταση ανέμων και η μέση μηνιαία διεύθυνση αντίστοιχα, για την περίοδο 1955 έως 2004. Βάση των τιμών του Πίνακα 6.5. προέκυψε το διάγραμμα του Σχήματος 6.7. Οι μεγαλύτεροι σε ένταση άνεμοι παρατηρούνται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες Ιούνιο – Ιούλιο – Αύγουστο. Η πλειοψηφία των ανέμων είναι ανατολικής διεύθυνσης, εκτός από τους μήνες Δεκέμβριο και Ιανουάριο όπου κυριαρχούν οι βόρειοι άνεμοι.

Πίνακας 6.5. Μέση μηνιαία ένταση ανέμων στη Λάρισα (περίοδος 1955-2004).

	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
Μέση Μηνιαία Ένταση Ανέμων (Κt)	2,4	3	3,3	3,2	3,1	3,9	4,1	3,7	3,3	2,7	1,9	1,8

Πίνακας 6.6. Μέση μηνιαία διεύθυνση ανέμων στη Λάρισα (περίοδος 1955-2004).

	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ
Μέση Μηνιαία Διεύθυνση Ανέμων	Β	Α	Α	Α	Α	Α	Α	Α	Α	Α	Α	Β



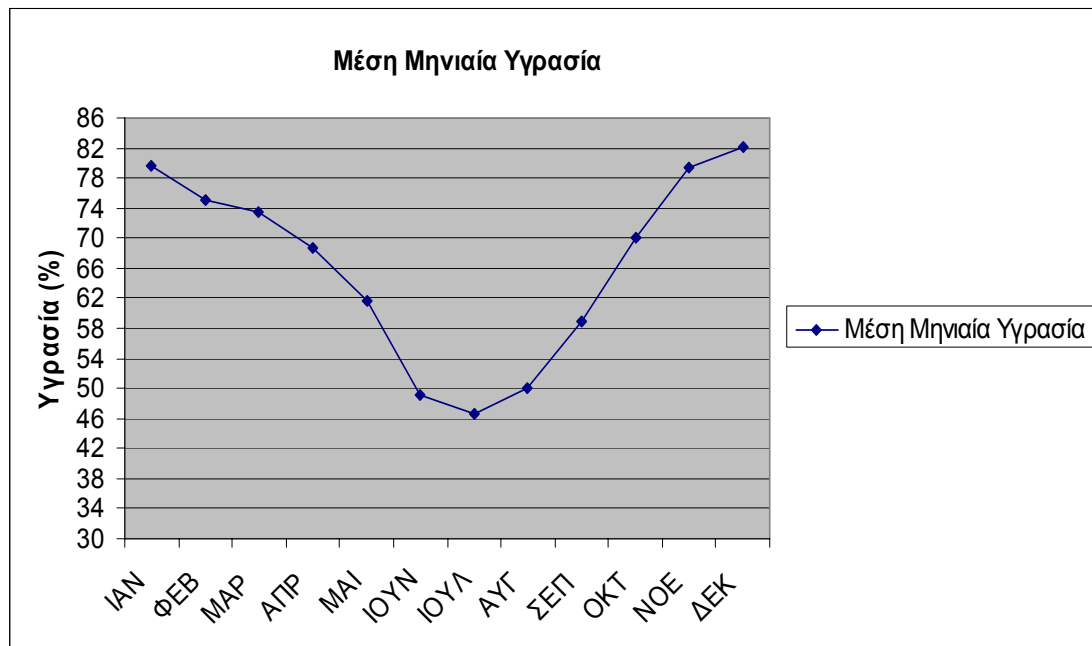
Σχήμα 6.7. Ραβδοδιάγραμμα μέσης μηνιαίας έντασης ανέμων στη Λάρισα (περίοδος 1955-2004)

6.7. Υγρασία.

Στον Πίνακα 6.7. δίνεται η μέση μηνιαία υγρασία, ενώ βάση των τιμών προέκυψε το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος 6.8. Η μέση μέγιστη υγρασία που παρατηρείται στην περιοχή είναι 82,2 % κατά το μήνα Δεκέμβριο, ενώ η μέση ελάχιστη υγρασία παρατηρείται κατά τον μήνα Ιούλιο και είναι 46,6%.

Πίνακας 6.7. Μέση μηνιαία υγρασία στη Λάρισα (περίοδος 1955-2004).

	Ι	Φ	Μ	Α	Μ	Ι	Ι	Α	Σ	Ο	Ν	Δ	Μ.Ο
Μέση Μηνιαία Υγρασία	79,6	75,1	73,4	68,7	61,6	49,2	46,6	50	58,9	70	79,5	82,2	66,2



Σχήμα 6.8. Διάγραμμα της μέσης μηνιαίας υγρασίας στη Λάρισα (περίοδος 1955-2004).

7. ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟ.

7.1. Γενικά.

Η υδάτινη οικονομία μιας περιοχής καθορίζεται από το υδρολογικό της ισοζύγιο. Αυτό είναι που καθορίζει το υπάρχον υδατικό δυναμικό, την τροφοδοσία του υπόγειου νερού και γενικά σε μεγάλο βαθμό τα εκμεταλλεύσιμα αποθέματα της κάθε περιοχής. Η υδρολογία των υπόγειων νερών δεν είναι ανεξάρτητη εκείνης των επιφανειακών. Για την εύρεση του υπόγειου δυναμικού μιας περιοχής είναι απαραίτητη η εύρεση του ισοζυγίου των επιφανειακών νερών. Το υδρολογικό ισοζύγιο εκφράζεται από τη σχέση:

$$P = I + R + E \pm dw \pm dq, \text{ όπου}$$

P = τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα.

I = η κατείσδυση.

R = η επιφανειακή απορροή.

E = η εξατμισοδιαπνοή.

dw = η μεταβολή υπόγειων αποθεμάτων.

dq = το αποτέλεσμα επέμβασης του ανθρώπου.

Οι παράγοντες που παίζουν ρόλο στον καθορισμό του υδρολογικού ισοζυγίου μιας περιοχής είναι:

- Οι κλιματικές συνθήκες, και κυρίως η βροχόπτωση και η θερμοκρασία.
- Η φύση των πετρωμάτων που συνιστούν το υπέδαφος της περιοχής.
- Η μορφολογία της περιοχής και το υδρογραφικό δίκτυο.
- Η βλάστηση και η επέμβαση του ανθρώπου (με άροση, καλλιέργειες, αντλήσεις).

Στο κεφάλαιο αυτό θα υπολογιστεί το επιφανειακό υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής ($P = I + R + E$), αφού για τον προσδιορισμό του συνολικού ισοζυγίου

νερού απαιτείται ο προσδιορισμός της μεταβολής των υπόγειων αποθεμάτων της περιοχής (dw), καθώς και το μέγεθος των ανθρωπογενών επεμβάσεων στην ίδια περιοχή (dq). Για τον υπολογισμό ενός αξιόπιστου επιφανειακού υδρολογικού ισοζυγίου είναι απαραίτητη η γνώση του ύψους της ετήσιας βροχόπτωσης και της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Στα παρακάτω κεφάλαια θα ασχοληθούμε ξεχωριστά για κάθε μια παράμετρο του ισοζυγίου.

7.2. Τα κατακρημνίσματα.

Με τον όρο κατακρημνίσματα P εννοούμε το σύνολο του μετεωρικού νερού που φθάνει στην επιφάνεια της Γης με οποιαδήποτε μορφή (βροχή, χιόνι, χαλάζι, δροσιά κ.λ.π.).

Λόγω της απουσίας αξιόπιστων και κοντινών βροχομετρικών σταθμών στην περιοχή, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τον βροχομετρικό σταθμό της Λάρισας, ο οποίος βρίσκεται κοντά στην περιοχή μελέτης και του οποίου τα δεδομένα θεωρούνται πλήρως αξιόπιστα. Ο σταθμός βρίσκεται υπό την δικαιοδοσία της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας. Οι συντεταγμένες του είναι: Γεωγραφικό Μήκος, 22 27 E – Γεωγραφικό Πλάτος, 39 39 N και βρίσκεται σε υψόμετρο 74 m.

Είναι γνωστό ότι η χωρική κατανομή των βροχοπτώσεων (P) επηρεάζεται σημαντικά από το υψόμετρο του βροχομετρικού σταθμού. Συγκεκριμένα αποδεικνύεται ότι αρκετές φορές υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ υψόμετρου και ύψους κατακρημνισμάτων μιας ορισμένης περιοχής. Ο συντελεστής συσχέτισης της γραμμικής αυτής σχέσης είναι λίγες φορές υψηλός και τις περισσότερες μέσος ή χαμηλός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εκτός από το υψόμετρο υπεισέρχονται και άλλοι παράγοντες στην κατανομή των κατακρημνισμάτων. Σε γενικές γραμμές πάντως, παρατηρείται αύξηση του ύψους της βροχής καθώς το υψόμετρο αυξάνει.

Παρόλα αυτά, στην περιοχή μελέτης η κατανομή των κατακρημνισμάτων δεν επηρεάζεται από το υψόμετρο, αφού το τελευταίο δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές στην περιοχή και όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο οι κλίσεις του ανάγλυφου στην περιοχή είναι σχεδόν μηδενικές.

Επιπλέον, το μέσο υψόμετρο της περιοχής, το οποίο είναι κατά προσέγγιση περίπου 75 m, είναι σχεδόν ίδιο με το υψόμετρο του βροχομετρικού σταθμού της Ε.Μ.Υ., το οποίο είναι 74 m.

Για την εύρεση του υδρολογικού ισοζυγίου θα χρησιμοποιηθούν οι μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης του σταθμού της Λάρισας για την χρονική περίοδο 1956-2004 καθώς και το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης για την ίδια περίοδο και τα οποία παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

7.3. Η εξατμισοδιαπνοή.

7.3.1. Γενικά.

Η εξατμισοδιαπνοή Ε, είναι το μέρος εκείνο των κατακρημνισμάτων που επανέρχεται στην ατμόσφαιρα είτε από εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους, από τα πρώτα στρώματα του εδάφους, από τις ελεύθερες επιφάνειες νερού (ρυάκια, μικροσυγκεντρώσεις νερού σε κοιλάματα), από το νερό που με μορφή λεπτού υμένιου περικαλύπτει τα φυτά κατά την βροχή ή που επικάθεται σε αυτά με μορφή σταγόνων, είτε από την διαπνοή των φυτών. Δηλαδή είναι οι κάθε είδους φυσικές πρωτογενείς απώλειες του νερού των κατακρημνισμάτων από εξάτμιση ή διαπνοή που επανέρχονται άμεσα στην ατμόσφαιρα (Σούλιος, 1986).

Η εξάτμιση και η διαπνοή πραγματοποιούνται με το μέγιστο δυνατό βαθμό όταν υπάρχει πλήρης προσφορά νερού προς εξάτμιση, με μειωμένο βαθμό όταν η προσφορά νερού είναι περιορισμένη και τέλος παύουν να πραγματοποιούνται όταν μηδενίζεται η προσφορά νερού.

Η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί βασικό παράγοντα του υδρολογικού ισοζυγίου δεδομένου ότι ρυθμίζει σε μεγάλο βαθμό τις ποσότητες των υπόγειων νερών. Επηρεάζεται άμεσα από κλιματικούς παράγοντες (θερμοκρασία εδάφους αέρα, υγρασία κ.α.).

Για τον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκαν οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες του σταθμού της Λάρισας για το χρονικό διάστημα 1956-2004, οι οποίες παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Όσον αφορά την επίδραση του υψομέτρου στην μέση ετήσια και μηνιαία θερμοκρασία του αέρα, εδώ ισχύουν όσα αναφέραμε και στην περίπτωση των κατακρημνισμάτων. Η μέση ετήσια και η μηνιαία θερμοκρασία γενικά ελαττώνονται με την αύξηση του υψομέτρου. Παρόλα αυτά στην περιοχή μελέτης η θερμοκρασία δεν επηρεάζεται από το υψόμετρο, αφού αυτό δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές και οι κλίσεις του ανάγλυφου στην περιοχή είναι σχεδόν μηδενικές. Εξάλλου όπως αναφέρθηκε, το μέσο υψόμετρο της περιοχής (75 m) είναι σχεδόν ίδιο με το υψόμετρο του μετεωρολογικού σταθμού της Ε.Μ.Υ. (74 m).

7.3.2. Δυνητική εξατμισοδιαπνοή.

Η δυνητική εξατμισοδιαπνοή (E_{Δ}) είναι η οριακή τιμή την οποία θα μπορούσε να φθάσει η εξατμισοδιαπνοή αν η προσφορά νερού κάλυπτε συνεχώς την απώλεια από εξάτμιση και διαπνοή σε όλη την διάρκεια του υδρολογικού έτους. Ουσιαστικά δηλαδή είναι ένας κλιματικός δείκτης και δείχνει το όριο το οποίο θα μπορούσε να φθάσει η πραγματοποιούμενη διαπνοή κάτω από τις κλιματικές της συνθήκες, αν υπήρχε συνεχής προσφορά νερού.

Στα μεσογειακά κλίματα, αλλά και στο σύνολο σχεδόν των άλλων πλην των πολικών, οι συνθήκες δυνητικής εξατμισοδιαπνοής είναι πολύ περιορισμένες χρονικά. Τότε η πραγματοποιούμενη εξατμισοδιαπνοή είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_{Π} .

Για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Thornthwaite (1948). Ο Thornthwaite προτείνει μια εμπειρική σχέση μεταξύ της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και της μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας του αέρα. Η σχέση αυτή έχει την παρακάτω μορφή:

$$E'_{\Delta} = 16(10T/I)^{\alpha}, \text{ όπου:}$$

E'_{Δ} : η μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm),

T: η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα (σε °C) για τον υπόψη μήνα,

$$\alpha = 0,49239 + 1792 \cdot 10^{-5} I^2 - 771 \cdot 10^{-7} I + 675 \cdot 10^{-9} I^3$$

I: ο ετήσιος θερμικός δείκτης που δίνεται από τον τύπο:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i, \text{ όπου:}$$

i: ο μηνιαίος θερμικός δείκτης.

$$i = (T/5)^{1,514}$$

E_{Δ} : η διορθωμένη τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (mm).

Οι υπολογιζόμενες τιμές E_{Δ}' για κάθε μήνα διορθώνονται με ένα συντελεστή (n), στον οποίο υπεισέρχονται τόσο ο αριθμός των ημερών κάθε μήνα όσο και των πραγματικών ωρών μεταξύ ανατολής και δύσης του ηλίου, ο οποίος και εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού.

Η τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, έπειτα από την εφαρμογή της μεθόδου στην περιοχή, υπολογίστηκε ίση με 869,7 mm.

7.3.3. Πραγματική εξατμισοδιαπνοή.

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή E_{Π} , είναι αυτή που πραγματικά λαβαίνει χώρα κάτω από τις πραγματικά υπάρχουσες κλιματικές συνθήκες γενικά και τις συνθήκες προσφοράς νερού ειδικά (Σούλιος, 1986). Σε αντίθεση με την δυνητική εξατμισοδιαπνοή της οποίας η σημασία είναι κυρίως θεωρητική και βοηθητική, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή αποτελεί βασική υδρολογική παράμετρο για τον καθορισμό του υδρολογικού ισοζυγίου. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή μπορεί να είναι πολύ ή λίγο μικρότερη της δυνητικής, αλλά πάντοτε μικρότερη για τις κατοικούμενες περιοχές της Γης, ίσως με πολύ ελάχιστες εξαιρέσεις για τις περιοχές όπου η βροχή είναι καθημερινό σχεδόν φαινόμενο. Για τον υπολογισμό της χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι, οι οποίοι εκτός από την θερμοκρασία T περιέχουν και τον παράγοντα των κατακρημνισμάτων P , τον κυριότερο παράγοντα που τη ρυθμίζει. Αυτοί είναι οι εξής:

α. Τύπος του Turc.

Ο Turc (1951) προσδιόρισε τον παρακάτω τύπο που δίνει την πραγματική εξατμισοδιαπνοή E.

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}, \text{ όπου:}$$

E= η πραγματική ετήσια εξατμισοδιαπνοή σε mm.

P= το ύψος των ετήσιων κατακρημνισμάτων σε mm.

$$L = 300 + 25 \cdot T + 0,05 \cdot T^3$$

T= η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα σε °C.

Ο τύπος του Turc δεν λαμβάνει υπόψη την βλάστηση, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα και συνήθως δίνει αυξημένες τιμές εξατμισοδιαπνοής. Γενικά όμως έχει αποδειχτεί ότι ο τύπος έχει καλή εφαρμογή για υψηλό ετήσιο βροχομετρικό δείκτη (πάνω από 700 mm). Στην Ελλάδα δεν αποδείχθηκε σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμόσιμος (Σούλιος, 1986).

Αν τα δεδομένα το επιτρέπουν είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται στον τύπο του Turc όχι η μέση θερμοκρασία T, αλλά η διορθωμένη θερμοκρασία T_{Δ} που δίνεται από τον τύπο:

$$T_{\Delta} = \frac{P_1 \cdot T_1 + P_2 \cdot T_2 + \dots + P_{12} \cdot T_{12}}{P_{\text{ολ}}}, \text{ όπου:}$$

$P_1, P_2, \dots, P_{12}$ = τα ύψη των κατακρημνισμάτων σε κάθε έναν από τους 12 μήνες.

$T_1, T_2, \dots, T_{12}$ = η αντίστοιχη μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα.

Η διορθωμένη θερμοκρασία στην περίπτωση μας υπολογίστηκε ίση με $T_{\Delta} = 14^{\circ}\text{C}$. Εφαρμόζοντας τον τύπο για $T = 15,7^{\circ}\text{C}$, βρέθηκε $L = 885,99$ και $E = 399,94$ mm. Δηλαδή εξατμίζεται το 94,05% των κατακρημνισμάτων. Χρησιμοποιώντας την διορθωμένη θερμοκρασία $T_{\Delta} = 14^{\circ}\text{C}$, βρέθηκε $L = 787,2$ και $E = 389,5$ mm. Δηλαδή εξατμίζεται το 91,6% των κατακρημνισμάτων.

Στον Πίνακα 7.1. που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής του τύπου του Turc τόσο με την μέση ετήσια θερμοκρασία (T) όσο και με τη διορθωμένη (T_{Δ}).

Πίνακας 7.1. Μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή κατά Turc (1956-2004).

Μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)	T(°C)	E _Π (mm)	Ποσοστό	T _Δ (°C)	E _Π (T _Δ) (mm)	Ποσοστό (T _Δ)
425,2	15,7	399,94	94,05%	14	389,5	91,6%

β. Τύπος του Coutagne.

Ο Coutagne (1954) διατύπωσε την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$E_{\Pi} = P - \lambda P^2$$

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,14 \cdot T}, \text{ όπου:}$$

E_Π και P, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή και η ετήσια βροχόπτωση αντίστοιχα, εκφρασμένα σε m. Ο τύπος του Coutagne είναι εφαρμόσιμος μόνο εάν ισχύει η παρακάτω συνθήκη:

$$\frac{1}{8 \cdot \lambda} < P < \frac{1}{2 \cdot \lambda}$$

Εάν τα κατακρημνίσματα είναι μικρότερα από 1/8λ, τότε η εξατμισοδιαπνοή είναι ίση με τα κατακρημνίσματα και δεν υπάρχει απορροή. Όταν είναι μεγαλύτερα από 1/2λ, τότε η εξατμισοδιαπνοή είναι ανεξάρτητη από αυτά και δίνεται από την σχέση:

$$E = 0,2 + 0,035 \cdot T$$

Ο τύπος του Coutagne εφαρμόστηκε για την περιοχή μελέτης χρησιμοποιώντας εκτός από την μέση ετήσια θερμοκρασία και τη διορθωμένη τιμή της, αφού ο τύπος εφαρμοζόμενος με τη διορθωμένη θερμοκρασία δίνει μικρότερα σφάλματα. Γενικά ο τύπος του Coutagne δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε περιοχές με χαμηλά υψόμετρα, όπως είναι η περιοχή μελέτης μας, και σχετικά μέτριες θερμοκρασίες.

Εφαρμόζοντας λοιπόν τον τύπο για $T = 15,7^{\circ}\text{C}$, βρέθηκε το $\lambda = 0,3336$. Ο τύπος του Coutagne είναι εφαρμόσιμος αφού $1/8\lambda = 0,3747 < P$ και $1/2\lambda = 1,4988 > P$ ($P = 0,4252$ m). Οπότε, αντικαθιστώντας τις τιμές έχουμε $E_{\Pi} = 0,3649$ m = 364,9 mm. Δηλαδή εξατμίζεται το 85,8% των κατακρημνισμάτων. Χρησιμοποιώντας την διορθωμένη θερμοκρασία $T_{\Delta} = 14^{\circ}\text{C}$, βρέθηκε το $\lambda = 0,3623$. Και σε αυτή την περίπτωση η συνθήκη ισχύει αφού $1/8\lambda = 0,345 < P$ και $1/2\lambda = 1,38 > P$, οπότε αντικαθιστώντας τις τιμές έχουμε $E_{\Pi} = 0,3597$ m = 359,7 mm. Δηλαδή εξατμίζεται το 84,6% των κατακρημνισμάτων.

Στον παρακάτω Πίνακα 7.2. παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα της εφαρμογής του τύπου του Coutagne, τόσο με την μέση ετήσια θερμοκρασία (T) όσο και με τη διορθωμένη (T_{Δ}).

Πίνακας 7.2. Μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή κατά Coutagne (1956-2004).

Μέσο ετήσιο ύψος βροχής (mm)	$T(^{\circ}\text{C})$	E_{Π} (mm)	Ποσοστό	$T_{\Delta} (^{\circ}\text{C})$	$E_{\Pi} (T_{\Delta})$ (mm)	Ποσοστό (T_{Δ})
425,2	15,7	364,9	85,82%	14	359,7	84,6%

γ. Μέθοδος Thornthwaite – Mather.

Η μέθοδος των Thornthwaite – Mather χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (E_{Π}) από την δυνητική (E_{Δ}). Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου των Thornthwaite – Mather είναι ο καθορισμός της μέγιστης αποθηκευτικής ικανότητας S_{to} , η οποία εξαρτάται κυρίως από την κοκκομετρική – λιθολογική σύσταση των υδροφόρων, την πυκνότητα και το είδος της βλάστησης, το βάθος της στάθμης του υδροφόρου στρώματος από την επιφάνεια του εδάφους και την εδαφική κλίση (Βαφειάδης, 1983, Ράπτη, 1995). Στην περίπτωση μας για την μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα των νεογενών και τεταρτογενών ιζημάτων της περιοχής μελέτης χρησιμοποιήθηκε η τιμή 90 mm.

Για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (E_{Π}) από την δυνητική (E_{Δ}) ακολουθούνται τα εξής (Thorntwaite, 1955, Βαφειάδης, 1983, Βουδούρης, 1995):

Αν η βροχόπτωση (P) υπερβαίνει την E_{Δ} τότε η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι ίση με τη δυνητική. Η διαφορά ($P - E_{\Delta}$) αποθηκεύεται στο έδαφος μέχρι να κορεσθεί αυτό από υγρασία. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ικανότητα κατακράτησης κάθε μήνα σύμφωνα με τη σχέση:

$$S_t = S_{to} \cdot e^{\frac{APWL}{S_{to}}}, \text{ όπου:}$$

S_t : είναι η ικανότητα κατακράτησης κάθε μήνα.

S_{to} : η μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα του εδάφους (σε mm).

APWL: ποσότητα που εκφράζει την απώλεια νερού που υφίσταται το έδαφος από την ελάττωση της υγρασίας του.

Αυτή η απώλεια νερού (APWL) είναι μηδέν, όταν η βροχόπτωση είναι μεγαλύτερη από τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Στην αντίθετη περίπτωση για τον υπολογισμό της προστίθεται στην αρνητική τιμή ($P - E_{\Delta}$) του μήνα η τιμή της APWL του προηγούμενου μήνα.

Αν οι μηνιαίες βροχοπτώσεις είναι μικρότερες από την E_{Δ} τότε η E_{Π} είναι ίση με το άθροισμα των βροχοπτώσεων και της ΔS_t . Το ΔS_t εκφράζει τη μεταβολή της ποσότητας του νερού που υπάρχει στο έδαφος από μήνα σε μήνα. Η διαφορά της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αποτελεί το πλεόνασμα νερού και αντιπροσωπεύει εκείνες τις ποσότητες του νερού που αντιστοιχούν στις διαδικασίες της επιφανειακής απορροής και της κατείσδυσης.

Οι παραπάνω υπολογισμοί αρχίζουν από το μήνα Ιανουάριο, κατά τον οποίο το έδαφος έχει ικανοποιήσει τις ανάγκες σε νερό. Τα αποτελέσματα της μεθόδου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.3.

Εφαρμόζοντας λοιπόν την μέθοδο Thorntwaite – Mather για την περιοχή μελέτης προκύπτει ότι η μέση ετήσια πραγματική

εξατμισοδιαπνοή είναι ίση με 378,6 mm, δηλαδή το 89% των κατακρημνισμάτων εξατμίζεται. Επίσης διαπιστώνεται ότι η κύρια τροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής γίνεται κυρίως κατά τους μήνες Δεκέμβριο (μέσα Δεκεμβρίου και έπειτα), Ιανουάριο, Φεβρουάριο και Μάρτιο, ενώ κατά τους υπόλοιπους μήνες παρατηρείται έλλειμμα νερού και γίνεται χρήση της υγρασίας του εδάφους.

Πίνακας 7.3. Μέση μηνιαία δυνητική και πραγματική εξατμισοδιαπνοή (mm) κατά Thornthwaite - Mather για την περιοχή μελέτης (χρονική περίοδος 1956-2004).

	I	Φ	M	A	M	I	I	A	Σ	O	N	Δ	Σ/ Μ.Ο.
P (mm)	34,3	34,4	38,8	34,3	40,4	25,6	18,9	14,9	29,6	46,5	55,8	51,7	425,2
T °C	5,2	6,8	9,4	13,8	19,7	25	27,2	26,2	21,8	16,2	10,8	6,6	15,7
i	1,06	1,59	2,6	4,65	7,97	11,44	12,99	12,28	9,29	5,93	3,21	1,52	74,53
E _{Δ'}	8,8	13,7	23,6	44,9	81,4	121,3	139,7	131,2	96,5	58,7	29,8	13,1	
n	0,84	0,83	1,03	1,11	1,24	1,25	1,27	1,18	1,04	0,96	0,83	0,81	
E _Δ	7,4	11,4	24,3	49,8	100,9	151,6	177,4	154,8	100,4	56,4	24,7	10,6	869,7
S _{to}	90	90	90	74,5	14	0	0	0	0	0	31,1	72,2	
E _Π	7,4	11,4	24,3	49,8	100,9	39,6	18,9	14,9	29,6	46,5	24,7	10,6	378,6

7.3.4. Αξιολόγηση των μεθόδων.

Στον παρακάτω Πίνακα 7.4. παρουσιάζονται οι τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής για την περιοχή μελέτης, όπως προέκυψαν μετά την εφαρμογή των εμπειρικών μεθόδων.

Πίνακας 7.4. Τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής για την περιοχή μελέτης (περίοδος 1956-2004), όπως προέκυψαν μετά την εφαρμογή εμπειρικών μεθόδων.

Μέθοδος	Εξατμισοδιαπνοή E_{Π} mm (%)
1. Turc (1951) με T με T_{Δ}	399,94 mm (94,05%) 389,5 mm (91,6%)
2. Coutagne (1954) με T με T_{Δ}	364,9 mm (85,82%) 359,7 mm (84,6%)
3. Thornthwaite and Mather (1955) $S_{to} = 90$ mm	378,6 mm (89%)

Η μέθοδος του Turc, L. (1951) έδειξε ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά την πραγματικότητα. Ιδιαίτερα μάλιστα όταν εφαρμόζεται με την διορθωμένη θερμοκρασία T_{Δ} , η προσέγγιση προς την πραγματικότητα είναι αξιοπαρατήρητη. Η εφαρμογή με την πραγματική θερμοκρασία T υπερτιμά την εξατμισοδιαπνοή κάτι που έχει διαπιστωθεί και σε άλλες περιπτώσεις στον ελληνικό χώρο, όπως στην λεκάνη Σκλήθρου Φλώρινας (Σούλιος, Γ. κ.α., 1989) και στις λεκάνες της Ξυνιάδας και του Σοφαδίτη (G. Soulios et al., 1991), και ειδικά μάλιστα σε λεκάνες με λίγα κατακρημνίσματα. Αντίθετα σε λεκάνες με υψηλά κατακρημνίσματα ($P > 800$ mm) φαίνεται ότι δεν υπάρχει αυτή η υπερτίμηση (πλην φυσικά καρστικών περιοχών).

Η μέθοδος του Coutagne (1954) προσεγγίζει και αυτή ικανοποιητικά την πραγματικότητα όταν εφαρμόζεται με την πραγματική θερμοκρασία T .

Από τα αποτελέσματα των τριών μεθόδων που χρησιμοποιήσαμε παρατηρούμε ότι η τιμή της E_{Π} που προέκυψε με τον τύπο του Turc, χρησιμοποιώντας την διορθωμένη θερμοκρασία, δεν απέχει και πάρα πολύ από αυτή που προκύπτει με τη μέθοδο Thornthwaite – Mather. Στον ίδιο τύπο του Turc, η χρήση της μέσης ετήσιας θερμοκρασίας δίνει υψηλότερες τιμές της

πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Αντίθετα, η εφαρμογή του τύπου του Coutagne έδωσε χαμηλότερες τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, είτε χρησιμοποιώντας την μέση ετήσια θερμοκρασία είτε την διορθωμένη τιμή της.

Η μέθοδος Thornthwaite – Mather (1955) προσεγγίζει με αξιοσημείωτο τρόπο την πραγματικότητα, αφού η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη της εκτός από το ολικό ύψος των κατακρημνισμάτων και την ετήσια διακύμανσή τους κατά τους 12 μήνες, καθώς επίσης την φύση του πετρώματος και την κάλυψή του, καθώς και το βάθος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Άρα, τα αποτελέσματα της μεθόδου Thornthwaite – Mather θεωρούνται ως πιο αξιόπιστα.

7.4. Ολική απορροή – Προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο

Όπως υπολογίστηκε και με την μέθοδο Thornthwaite – Mather, το 89% των κατακρημνισμάτων εξατμίζεται. Το υπόλοιπο 11% αποτελεί την ολική απορροή (Q), δηλαδή το άθροισμα της επιφανειακής απορροής (R) και της κατείσδυσης (I).

Με τον όρο επιφανειακή απορροή R ορίζεται εκείνο το τμήμα του νερού των κατακρημνισμάτων που μόλις πέσει στη επιφάνεια της Γης ρέει επιφανειακά και εισέρχεται στο υδρογραφικό σύστημα της περιοχής από το οποίο απάγεται οδηγούμενο τελικά στη θάλασσα (ή σε λίμνη) όπου και εκχύνεται. Στην επιφανειακή απορροή υπάγεται και η υποδερμική απορροή δηλαδή οι μικρές ποσότητες νερού που διαπερνούν την επιφάνεια του εδάφους και κινούνται για λίγο στα επιπόλαια τμήματα του εδάφους – υπεδάφους, για να επανέλθουν πάλι στο φως και να εισέλθουν στο υδρογραφικό σύστημα, χωρίς προηγουμένως κατά την υπόγεια διαδρομή τους, να έχουν φθάσει στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες.

Οι παράγοντες που ρυθμίζουν την επιφανειακή απορροή είναι:

- Η ένταση, η κατανομή και το συνολικό ετήσιο ύψος των κατακρημνισμάτων.
- Η θερμοκρασία και ο άνεμος.

- Η κλίση του εδάφους, η λιθολογική του σύσταση, η βλάστηση, καθώς και το υδρογραφικό δίκτυο.

Η κατείσδυση αποτελεί το μέρος εκείνο των κατακρημνισμάτων που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους, φθάνει στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες και προστίθενται στο υπόγειο νερό μετέχοντας έτσι στις κινήσεις του τελευταίου.

Οι παράγοντες που ρυθμίζουν την κατείσδυση είναι:

- Το ύψος των κατακρημνισμάτων και η κατανομή τους μέσα στο υδρολογικό έτος.
- Η θερμοκρασία και οι άλλοι κλιματικοί παράγοντες που ρυθμίζουν την εξατμισοδιαπνοή και έτσι επιδρούν έμμεσα στην κατείσδυση.
- Η λιθολογική σύσταση του εδάφους, η κλίση και η βλάστηση αυτού.
- Η υγρασία του εδάφους, η άροσή του, το βάθος στο οποίο βρίσκεται ο υποκείμενος υδροφόρος ορίζοντας κ.α.

Λόγω της έλλειψης δεδομένων δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε με ακρίβεια τα ποσοστά που αντιστοιχούν στην κατείσδυση και στην επιφανειακή απορροή. Λόγω όμως της μικρής κλίσης του εδάφους καθώς και της λιθολογικής του σύστασης (αλουβιακές αποθέσεις) μπορούμε να πούμε ότι η κατείσδυση υπερτερεί της επιφανειακής απορροής.

Τέλος, αφού προσδιορίσαμε τις τιμές της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και της ολικής απορροής, μπορούμε να συντάξουμε το προσεγγιστικό υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής μελέτης. Αυτό, λοιπόν, έχει την μορφή:

$$P = E + Q$$

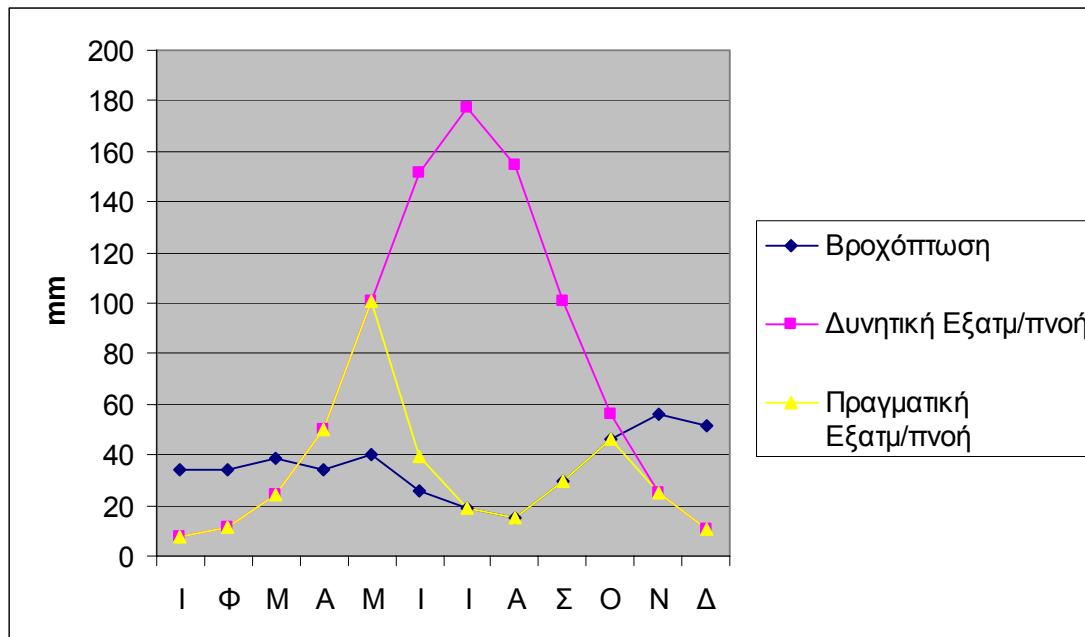
Έτσι λοιπόν, το υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής, βάση της παραπάνω σχέσης, θα είναι:

$$100 = 89 + 11 \quad (\%)$$

ή

$$425,2 = 378,6 + 46,6 \quad (\text{mm})$$

Στο Σχήμα 7.1. παρουσιάζεται το μέσο υδρολογικό ισοζύγιο με βάση τα στοιχεία του Πίνακα 7.3.



Σχήμα 7.1. Μέσο υδατικό ισοζύγιο για την περιοχή μελέτης (χρονική περίοδος 1956-2004).

8. Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.

8.1. Γενικά.

Είναι γνωστό ότι η στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων δε βρίσκεται σε στατική ισορροπία, αλλά σε δυναμική ισορροπία και μεταβάλλεται συνεχώς με το χρόνο. Αυτή η μεταβολή της στάθμης προκαλείται από την διαφορά που υπάρχει πάντα ανάμεσα στις εισροές και εκροές του υπόγειου νερού, από τις διακυμάνσεις της απορροής στα υδατορεύματα, τα μετεωρολογικά και παλιρροιακά φαινόμενα, την οικιστική ανάπτυξη, τους σεισμούς και τα εξωτερικά φορτία. Η χρονικά διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού σε ένα σημείο περιγράφεται από τα διαγράμματα στάθμης h – χρόνου t . Μεταβολή της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων σημαίνει και μεταβολή των αποθεμάτων του υπόγειου νερού.

8.1.1. Η χρονική διακύμανση της στάθμης των υπόγειων νερών.

8.1.1.1. Εποχική (ενδοετήσια) διακύμανση της στάθμης.

Οι στάθμες των υδροφόρων στρωμάτων παρουσιάζουν εποχικά διακύμανση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, οι βροχοπτώσεις και οι αντλήσεις του νερού, κατά την αρδευτική περίοδο, ακολουθούν καθορισμένους εποχικούς κύκλους. Στην Ελλάδα και γενικά στη βόρεια εύκρατη ζώνη, η υγρή περίοδος αρχίζει τον Οκτώβριο, όπου τα κατακρημνίσματα υπερέχουν της εξατμισοδιαπνοής. Έτσι, από το τέλος του Οκτωβρίου αρχίζει η άνοδος της στάθμης των υδροφόρων, η οποία εντείνεται κυρίως κατά τους μήνες Ιανουάριο-Μάρτιο και φτάνει στο ετήσιο μέγιστό της κατά το Μάιο, οπότε αρχίζει πλέον η ξηρή περίοδος κατά την οποία η εξατμισοδιαπνοή είναι μεγαλύτερη από τα κατακρημνίσματα. Κατά την ξηρή περίοδο, με λίγες εξαιρέσεις, δεν παρατηρείται τροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων, αλλά εκφόρτισή τους από τις πηγές και τις αναβλύσεις ή από μετάγγιση προς γειτονικά ή υποκείμενα υδροφόρα. Έτσι λοιπόν κατά την ξηρή περίοδο η στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων υποχωρεί βαθμιαία μέχρι να φθάσει στο

ετήσιο ελάχιστο στο τέλος περίπου του Οκτωβρίου, όπου αρχίζει η επόμενη υγρή περίοδος (Σούλιος, 2004).

8.1.1.2. Υπερετήσια διακύμανση της στάθμης.

Σε αυτή τη περίπτωση, η διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού εκτείνεται σε περιόδους μερικών τουλάχιστον χρόνων. Οι διακυμάνσεις της στάθμης, που έχουν μεγάλη περίοδο επανάληψης (30-35 έτη) προκαλούνται από τις εναλλαγές υγρών και ξηρών ετών. Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα δεν αποτελούν ασφαλή ένδειξη των μεταβολών της στάθμης του υπόγειου νερού. Καθοριστικός παράγοντας είναι ο εμπλουτισμός, ο οποίος ελέγχεται από την ένταση και την κατανομή της βροχής και από την ποσότητα της απορροής (Καλλέργης, 2001).

Από τα διαγράμματα διακύμανσης της στάθμης φαίνεται πως τόσο ο ρόλος του βροχομετρικού συστήματος, όσο και ο ρόλος της γεωλογικής σύστασης του υδροφορέα και ιδίως του υπερκείμενου στρώματος, είναι πολύ σημαντικός. Η αντίδραση της στάθμης του υπόγειου νερού μετά από βροχοπτώσεις είναι πιο άμεση και έντονη στα καρστικά υδροφόρα στρώματα, λιγότερη στα ρηχά αλλουβιακά και ακόμη πιο λιγότερη στα βαθιά υδροφόρα στρώματα με αδιαπέρατο επικάλυμμα. Φυσικά αυτό εξαρτάται και από το καθεστώς των αντλήσεων στην κάθε περιοχή. Σύμφωνα με έρευνες που έγιναν στη Γαλλία το 1976, αλλά και στην Ελλάδα το 1989 και 1990, σε περιόδους ξηρασίας η υποχώρηση της στάθμης των υδροφορέων ακολουθεί εκθετική καμπύλη της μορφής (Σούλιος, 2004):

$$h=h_0 \cdot e^{-at}$$

όπου, h_0 = η αρχική στάθμη στο χρόνο t_0 κατά την έναρξη της ξηρασίας.

t = ο χρόνος σε ημέρες από την στιγμή t_0

h = η στάθμη μετά την παρέλευση t ημερών από τη στιγμή t_0

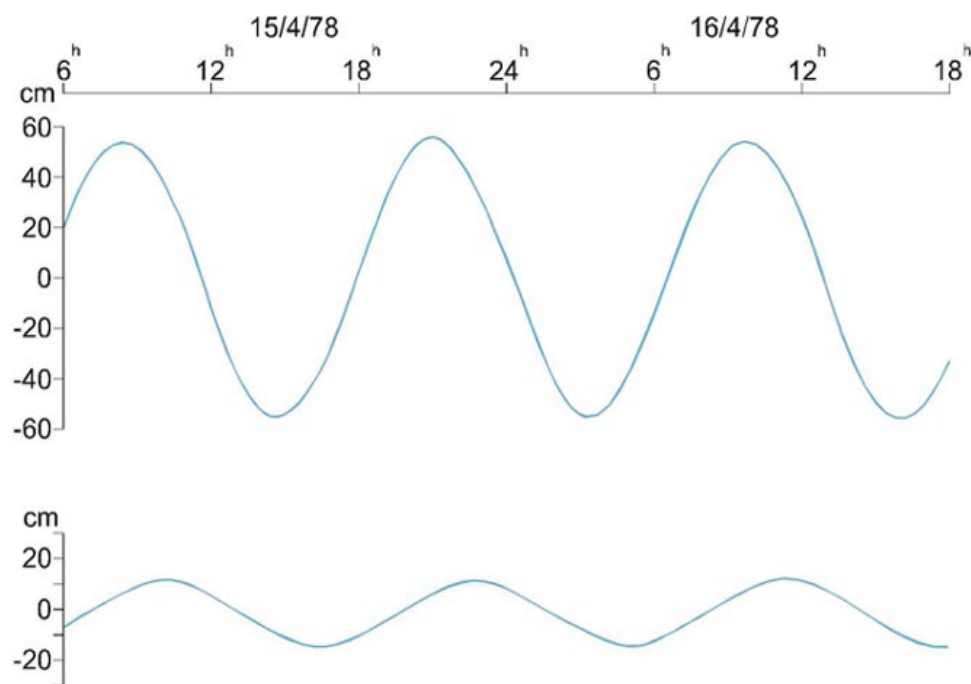
a = ο συντελεστής αποστράγγισης.

Στις παρακάτω ενότητες του κεφαλαίου δίνεται πλήθος διαγραμμάτων που δείχνουν την ενδοετήσια και την υπερετήσια διακύμανση της στάθμης στην περιοχή του Πλατυκάμπου Λάρισας.

8.1.2. Μεταβολές της στάθμης υδροφόρων λόγω φυσικών αιτιών.

ι) Η επίδραση της παλίρροιας.

Στα παράκτια υδροφόρα στρώματα, που βρίσκονται σ' επαφή με τη θάλασσα, η στάθμη τους μεταβάλλεται ημιτονοειδώς κατά την εκδήλωση των παλιρροιακών φαινομένων. Τα υδροφόρα στρώματα που βρίσκονται σε άμεση γειτνίαση με τη θάλασσα επηρεάζονται σημαντικά. Όσο απομακρυνόμαστε από αυτή, η επίδρασή της καθίσταται όλο και πιο αμυδρή, αλλά πάντως είναι αισθητή και σε απόσταση χιλιομέτρων.



Σχήμα 8.1. Παλιρροϊκή διακύμανση της στάθμης της θάλασσας (πάνω και της στάθμης γεώτρησης σε απόσταση 350 m από την ακτή, στην περιοχή νοτιοδυτικής Πορτογαλίας (κατά τους Razack, M. et al. 1979, ανασχεδιασμένο από τον Σούλιο, 2004).

Σύμφωνα με τον Todd (1980), η καθαρή άνοδος ή κάθοδος της στάθμης (h) στον υδροφόρο, σε σχέση με τη μέση στάθμη, που προκαλείται από τα παλιρροιακά φαινόμενα, δίνεται από την εξίσωση:

$$h = h_0 \cdot e^{-x \sqrt{\pi \cdot S / t_0 \cdot T}} \cdot \sin(2\pi t / t_0 - x \sqrt{\pi \cdot S / t_0 \cdot T})$$

όπου, h_0 = το μισό της συνολικής παλιρροϊκής κύμανσης της στάθμης της θάλασσας,

t_0 = η περίοδος της παλίρροιας,

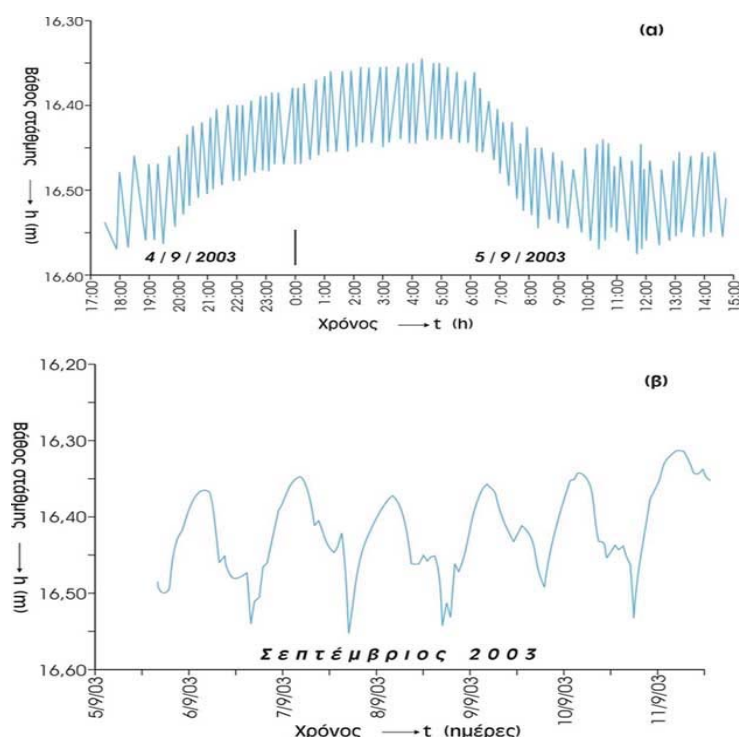
T = η μεταβιβαστικότητα του υδροφόρου,

S = ο συντελεστής εναποθήκευσης του υδροφόρου,

x = η απόσταση του υδροφόρου από την ακτή.

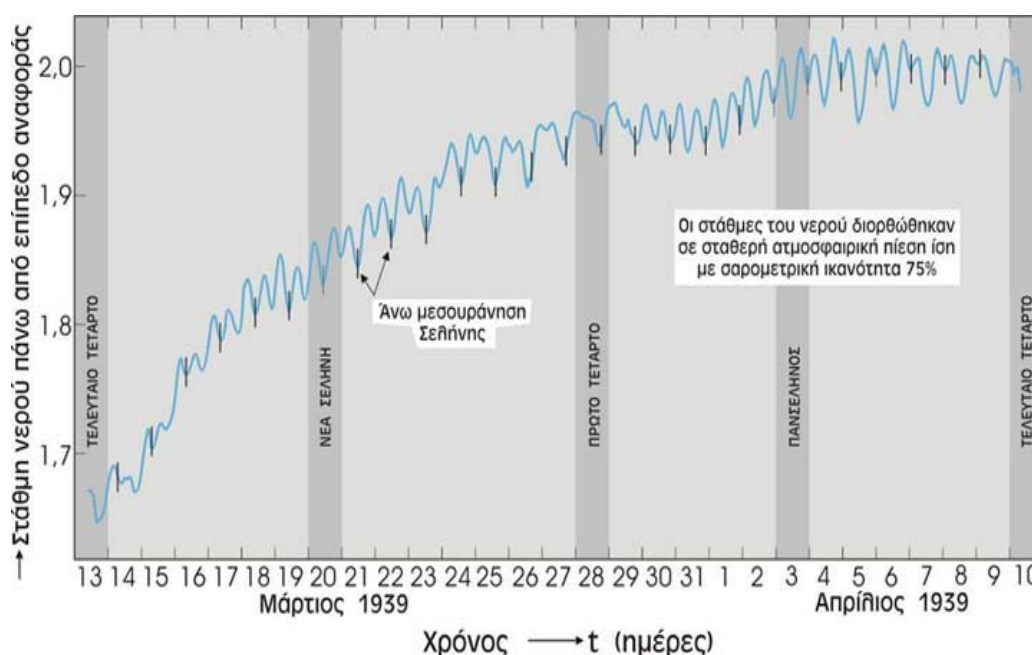
Τα φαινόμενα της παλιρροϊκής διακύμανσης της στάθμης δεν παρατηρούνται μόνο σε παράκτια υδροφόρα στρώματα, αλλά και σε υδροφόρα τα οποία βρίσκονται πολύ μακριά από τη θάλασσα και που δεν συνδέονται κατ' ουδέν τρόπο με αυτήν. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «γήινη παλίρροια». Η παλίρροια αυτή έχει διακύμανση της στάθμης από λίγα χιλιοστά έως αρκετά εκατοστά του μέτρου.

Μια τέτοια περίπτωση γήινης παλίρροιας παρατηρήθηκε σε γεώτρηση στο χωριό Ρύζια Ορεστιάδας, κοντά στον ποταμό Άρδα. Η παλίρροια αυτή είναι διπλή, μία με περίοδο περίπου 10-15 λεπτών και πλάτος διακύμανσης 5-7 cm, και μία με περίοδο περίπου ημερήσια και με πλάτος διακύμανσης περίπου 20 cm. Η παλίρροια με μακρά περίοδο ίσως και να επηρεάζεται από τη στάθμη του ποταμού (Σούλιος, 2004).



Σχήμα 8.2. Παλιρροϊκές διακυμάνσεις γεώτρησης στην περιοχή Ορεστιάδας Έβρου (από Σούλιο, 2004).

Τέλος, μικρές κανονικές δωδεκάωρες διακυμάνσεις έχουν παρατηρηθεί σε πιεζομετρικές επιφάνειες αρτεσιανών υδροφόρων που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από τον ωκεανό (Robinson – Bell, 1971). Οι διακυμάνσεις αυτές οφείλονται σε παλίρροιες της στεριάς, που προκαλούνται από την έλξη που ασκεί πάνω στο φλοιό της γης η Σελήνη. Παρατηρήθηκε ένας περίπου ημερήσιος κύκλος διακύμανσης της στάθμης των υδροφόρων με τις χαμηλές στάθμες να συμπίπτουν με την άνω και κάτω μεσουράνηση της Σελήνης. Επίσης ρόλο παίζει και σε ποιο τέταρτο του κύκλου της Σελήνης βρισκόμαστε αφού αυτό συνδυάζεται με την θέση της ως προς τον ήλιο.

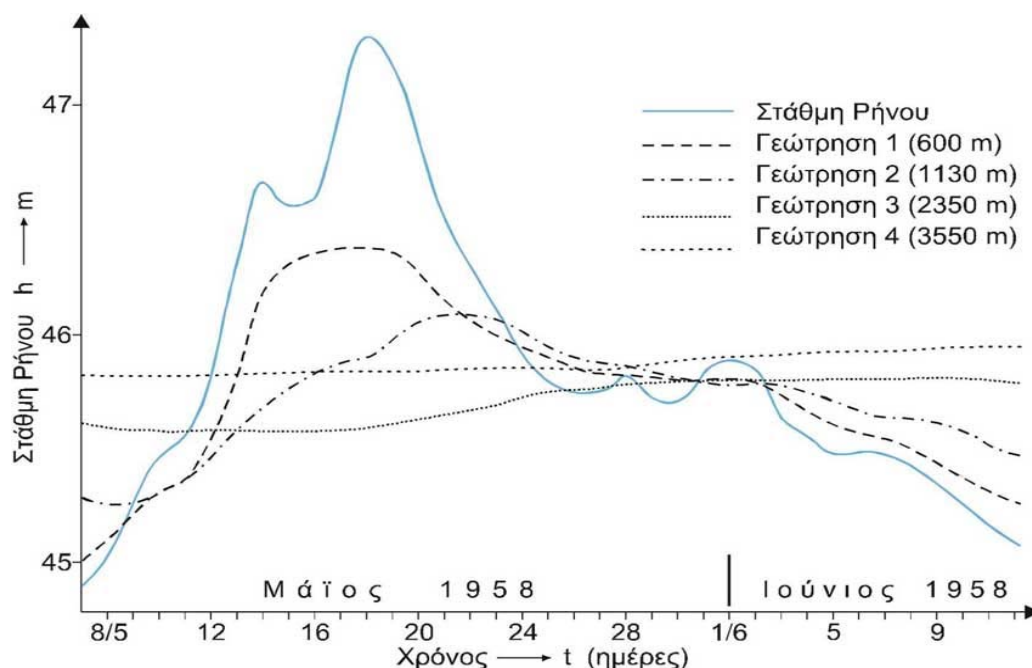


Σχήμα 8.3. Διακύμανση της στάθμης ενός εγκλωβισμένου υδροφόρου στρώματος που οφείλεται σε «γήινη παλίρροια» προκαλούμενη και από τη Σελήνη (κατά Todd C., 1980, ανασχεδιασμένο από τον Σούλιο, 2004).

ii) Η μεταβολή της στάθμης των υδρορευμάτων.

Όταν ένα υδρόρευμα βρίσκεται σε άμεση επαφή με έναν ελεύθερο υδροφόρο, το υδρόρευμα κατά περίπτωση τροφοδοτεί ή τροφοδοτείται απ' αυτόν ανάλογα αν η στάθμη του νερού στο υδρόρευμα βρίσκεται αντίστοιχα πάνω ή κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου. Έτσι, λοιπόν, η στάθμη παραποτάμιων υδροφόρων στρωμάτων που συνδέονται υδραυλικά με τον ποταμό επηρεάζεται από την μεταβολή της στάθμης του. Ένα τέτοιο παράδειγμα έχουμε στον ποταμό Ρήνο, στη Γερμανία. Λόγω της ανόδου της

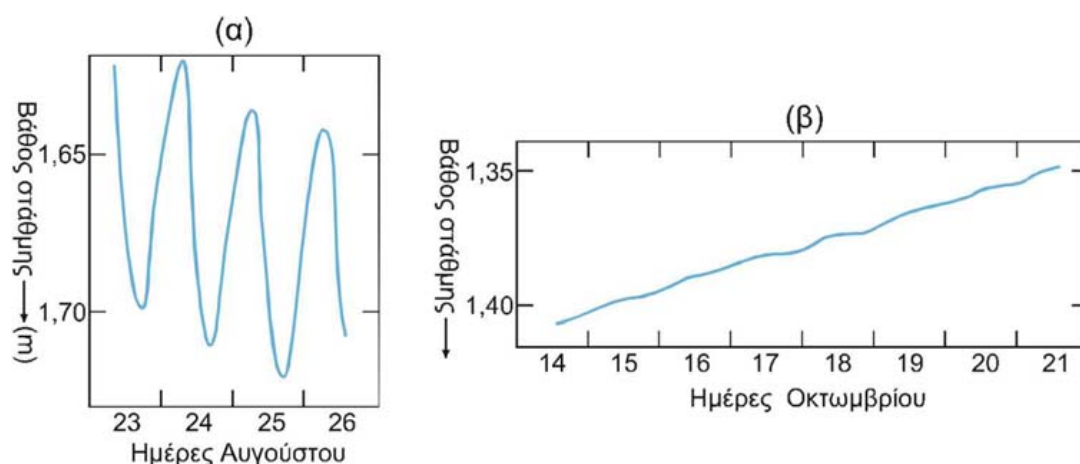
στάθμης του Ρήνου, η στάθμη των γειτονικών υδροφορέων μεταβλήθηκε. Όπως φαίνεται και στο σχήμα η μεταβολή αυτή ήταν έντονη στις κοντινές περιοχές και αμυδρή στις μακρινές.



Σχήμα 8.4. Διακύμανση της στάθμης γεωτρήσεων λόγω της μεταβολής της στάθμης του Ρήνου (κατά Δημόπουλο, Γ. 1983, ανασχεδιασμένο από τον Σούλιο, 2004).

iii) Η επίδραση της εξατμισοδιαπνοής.

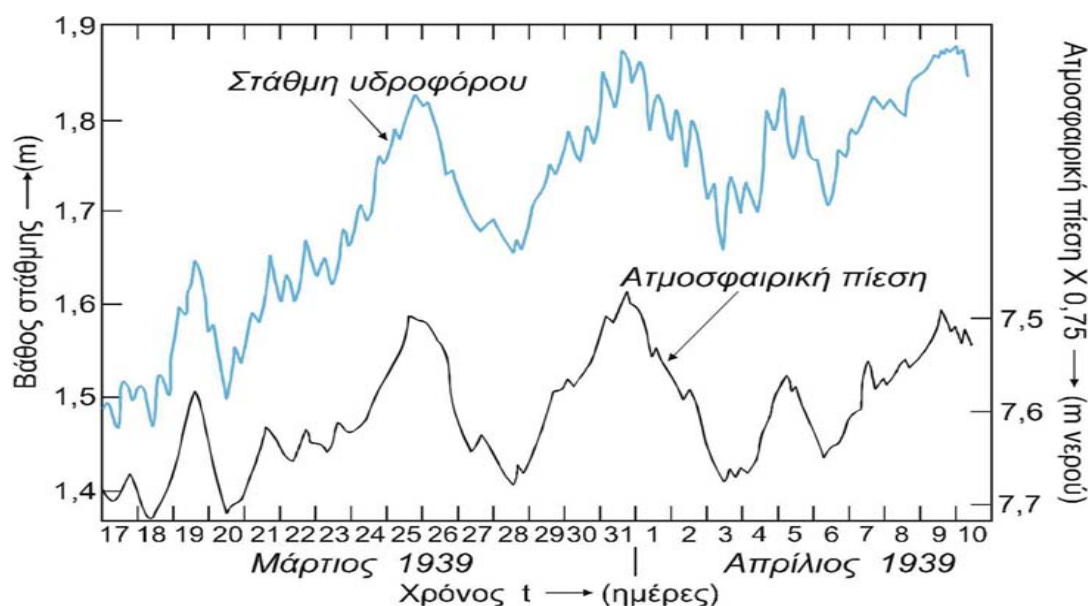
Η εξατμισοδιαπνοή επιδρά στα ρηχά υδροφόρα στρώματα που το βάθος της στάθμης τους είναι μικρότερο από 2m περίπου. Η εξαίτηση από το υπόγειο νερό αυξάνει, καθώς η στάθμη του προσεγγίζει την επιφάνεια, με αποτέλεσμα την πτώση της στάθμης. Επίσης, η επίδραση της διαπνοής των φυτών είναι μεγαλύτερη όταν το ριζικό σύστημα αυτών φτάσει το κορεσμένο στρώμα και εξαρτάται από το είδος της βλάστησης, την εποχή και τον καιρό. Όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, κατά τις θερμές ημέρες του καλοκαιριού, λόγω της εξατμισοδιαπνοής, η στάθμη κατεβαίνει και επανέρχεται μερικώς τη νύχτα. Αυτό όμως δεν συμβαίνει κατά τους μη θερινούς μήνες, π.χ. τον Οκτώβριο, (Σούλιος, 2004).



Σχήμα 8.5. Επίδραση της εξατμισοδιαπνοής στη στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων (κατά τον White 1932 από τον Καλλέργη 2001 με ανασχεδίαση από τον Σούλιο, 2004).

iv) Η επίδραση της ατμοσφαιρικής πίεσης.

Οι μεταβολές της ατμοσφαιρικής πίεσης προκαλούν σημαντικές διακυμάνσεις της στάθμης του νερού στα πηγάδια (Clark, 1967, Gilliland, 1969). Η σχέση τους είναι αντιστρόφως ανάλογη. Αύξηση της ατμοσφαιρικής πίεσης προκαλεί πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού και αντίστροφα (Todd, 1980). Ένα παράδειγμα από τις Η.Π.Α. δίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου φαίνεται καθαρά η επίδραση της ατμοσφαιρικής πίεσης στην στάθμη των υδροφόρων στρωμάτων.



Σχήμα 8.6. Μεταβολές της στάθμης υδροφόρου στρώματος λόγω διακύμανσης της ατμοσφαιρικής πίεσης (κατά τον Robinson 1939 από τον Καλλέργη 2001 με ανασχεδίαση από τον Σούλιο, 2004).

ν) Η βροχόπτωση.

Η βροχόπτωση δεν αποτελεί ασφαλή ένδειξη του εμπλουτισμού των υδροφόρων, λόγω επιφανειακών και υπόγειων απωλειών, καθώς και του χρόνου που χρειάζεται το νερό που κατεισδύει μέχρι να φτάσει στον υδροφόρο (Todd, 1980). Ο χρόνος αυτός μπορεί να κυμαίνεται από μερικά λεπτά στους ρηχούς υδροφόρους που βρίσκονται κάτω από περατούς σχηματισμούς, μέχρι μερικούς μήνες ή μερικά χρόνια για βαθείς υδροφόρους που βρίσκονται κάτω από σχηματισμούς μικρής υδροπερατότητας. Οι ρηχοί ελεύθεροι υδροφόροι αντιδρούν στη βροχόπτωση. Όταν η ακόρεστη ζώνη πάνω από την υδροστατική επιφάνεια έχει έλλειμμα υγρασίας, η υδροστατική επιφάνεια δεν αντιδρά στην τροφοδοσία από την βροχόπτωση, μέχρι να συμπληρωθεί το έλλειμμα υγρασίας. Η αντίδραση της υδροστατικής επιφάνειας είναι άμεση και γρήγορη και στους καρστικούς υδροφόρους, λόγω της πολύ μεγάλης διήθησης που παρατηρείται σε αυτούς (Καλλέργης, 2001). Σε παρακάτω ενότητα του κεφαλαίου φαίνεται σε διαγράμματα η μεταβολή της στάθμης των υδροφόρων κατά την υγρή περίοδο σε σχέση με την βροχόπτωση.

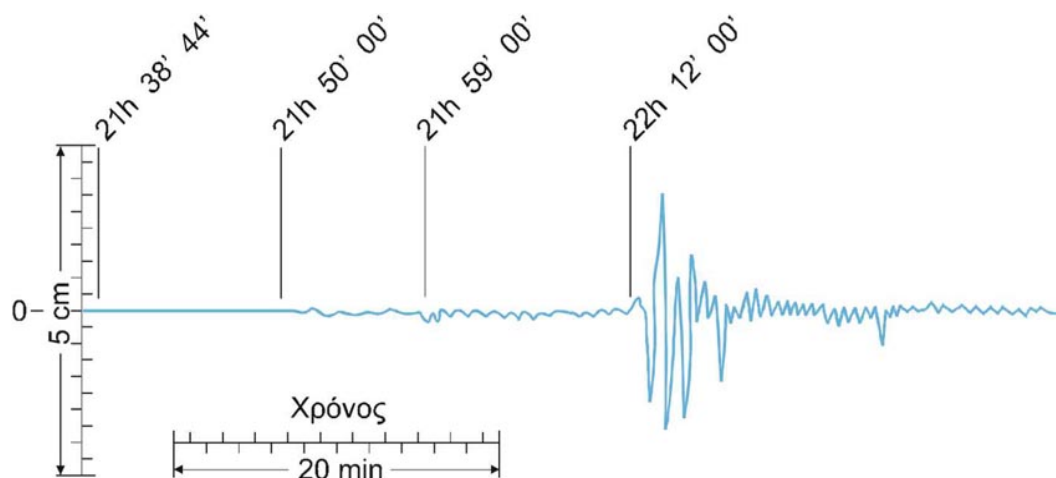
vi) Άλλες αιτίες.

Ο άνεμος που φυσά στην κεφαλή των πηγαδιών προκαλεί μικρές διακυμάνσεις της στάθμης του υπόγειου νερού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όταν ο άνεμος είναι πολύ δυνατός η πίεση του αέρα μέσα στο πηγάδι πέφτει απότομα και έτσι η στάθμη του νερού ανεβαίνει γρήγορα.

Στις περιοχές που υπάρχει παγετός την ψυχρή περίοδο, έχει παρατηρηθεί ότι η στάθμη του υπόγειου νερού πέφτει βαθμιαία κατά το χειμώνα και ανεβαίνει γρήγορα στην αρχή της άνοιξης, όταν λιώνει ο παγετός, πριν λάβει χώρα ο εμπλουτισμός από την επιφάνεια του εδάφους (Schneider, 1961).

Τέλος, οι σεισμοί προκαλούν μια ποικιλία επιδράσεων στο υπόγειο νερό όπως η απότομη ανύψωση ή κάθοδος της στάθμης, απότομες μεταβολές της παροχής πηγών, η εμφάνιση νέων και η εξαφάνιση παλαιών πηγών (Vorhis, 1955, 1964). Το πιο συνηθισμένο φαινόμενο είναι οι μικρές διακυμάνσεις της πιεζομετρικής στάθμης, που είναι γνωστές και σαν υδροσεισμοί, που

προκαλούνται από τις σεισμικές δονήσεις. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται αυτή η επίδραση του σεισμού στη στάθμη, από σεισμό που έγινε στα σύνορα Αργεντινής – Χιλής.



Σχήμα 8.7. Διακύμανση της στάθμης υδροφόρου ορίζοντα που προκλήθηκε από σεισμό (κατά τον Vorhis 1964 από τον Καλλέργη με επανασχεδίαση από τον Σούλιο, 2004).

8.1.3. Μεταβολές της στάθμης των υδροφόρων λόγω ανθρωπογενών επιδράσεων.

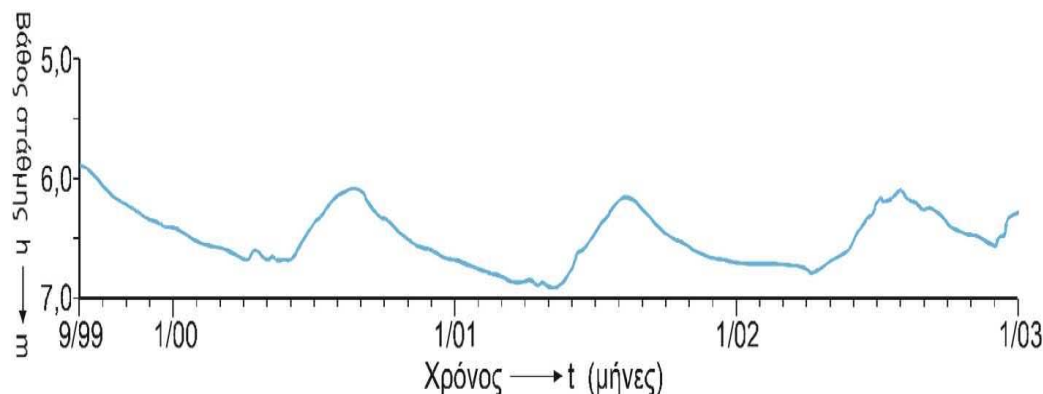
i) Η υπεράντληση υδροφόρων στρωμάτων.

Η υπεράντληση γίνεται συνήθως κατά την ξηρή περίοδο και έχει ως αποτέλεσμα την υποχώρηση της στάθμης σε τέτοιο βάθος ώστε την επόμενη υγρή περίοδο αυτή να μην επανέρχεται στο προηγούμενο επίπεδό της.

ii) Η υπεράρδευση των καλλιεργειών.

Όταν η άρδευση των καλλιεργειών γίνεται με επιφανειακό νερό ποταμών, αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επιτροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων και την άνοδο της στάθμης τους. Έχει υπολογιστεί ότι περίπου το 10% έως το 30% του νερού της άρδευσης καταλήγει στο υποκείμενο στρώμα. Το ποσό αυτό εξαρτάται από το ρυθμό άρδευσης, το βάθος της στάθμης και την περατότητα του επικαλύμματος του υδροφόρου στρώματος. Όσο πιο αβαθές είναι το υδροφόρο στρώμα τόσο πιο εύκολα γίνεται η επιτροφοδοσία του. Στο κάτωθι σχήμα έχουμε την διακύμανση της στάθμης ενός ελεύθερου υδροφόρου στρώματος στην περιοχή του ποταμού Άρδα, στην Ορεστιάδα. Παρατηρούμε

ότι κατά την ξηρή περίοδο η στάθμη, λόγω υπεράρδευσης, βρίσκεται στο ανώτερο επίπεδό της, ενώ κατά την υγρή στο κατώτερο (Σούλιος, 2004).



Σχήμα 8.8. Διακύμανση στάθμης γεώτρησης στην περιοχή Ορεσιτιάδας Έβρου (από Σούλιο, 2004).

iii) Άλλες ανθρωπογενείς επιδράσεις.

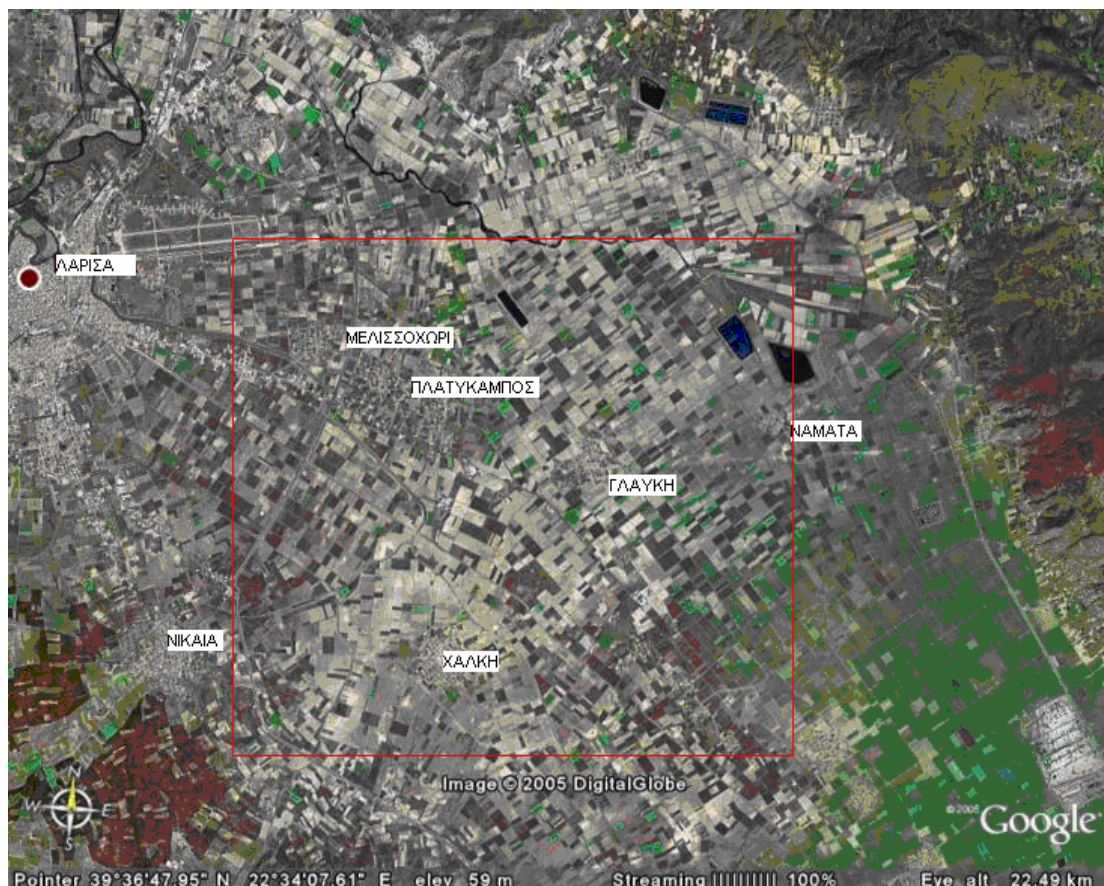
Κατασκευές φραγμάτων ή λιμνοδεξαμενών έχουν ως αποτέλεσμα την άνοδο της στάθμης του υπόγειου νερού, στις περιοχές όπου κατασκευάζονται, λόγω της διήθησης του νερού από τον πυθμένα των έργων αυτών προς τα υδροφόρα στρώματα. Επίσης, οι διελεύσεις βαρέων οχημάτων (π.χ. τρένα) προκαλούν στιγμιαίες μεταβολές της στάθμης, καθώς και τα μεγάλα βάρη πάνω στην επιφάνεια του εδάφους, όπως οι οικίες, έχουν ως συνέπεια την συνίζηση του εδάφους και την ανύψωση της στάθμης του υδροφορέα. Τέλος, η έντονη αστικοποίηση που παρατηρείται στις μέρες μας περιορίζει τη φυσική κατείδδυση του νερού και προκαλεί μακροχρόνια πτώση της στάθμης.

8.2. Η εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων στην περιοχή του Πλατυκάμπου Λάρισας.

8.2.1. Γενικά.

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από έντονη καλλιεργητική δραστηριότητα καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου. Καλλιεργούνται κυρίως βαμβάκια, σιτηρά, δημητριακά (καλαμπόκια) κ.α. Η άρδευση των καλλιεργειών γίνεται κατά το πλείστον από ιδιωτικές και δημοτικές γεωτρήσεις, αφού οι βροχοπτώσεις στην περιοχή είναι λίγες και δεν επαρκούν. Στο παρακάτω Σχήμα 8.9. βλέπουμε μια δορυφορική εικόνα της ευρύτερης

περιοχής του Πλατύκαμπου Λάρισας, όπου φαίνεται η έντονη καλλιεργητική δραστηριότητα στην περιοχή.



Σχήμα 8.9. Δορυφορική εικόνα της ευρύτερης περιοχής του Πλατύκαμπου Λάρισας (από GoogleEarth).

Η μεγάλη λοιπόν ανάγκη για άρδευση των καλλιεργειών έχει οδηγήσει στην υπεράντληση των υδροφόρων στρωμάτων. Η υπεράντληση γίνεται συνήθως κατά την ξηρή περίοδο, όπου οι βροχοπτώσεις είναι ελάχιστες έως και μηδενικές μερικές φορές, και έχει ως αποτέλεσμα την πτώση της στάθμης σε τέτοιο βάθος ώστε την επόμενη περίοδο αυτή να μην επανέρχεται στο προηγούμενο επίπεδό της. Εξαίρεση αποτελούν περιοχές που βρίσκονται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής του Πλατυκάμπου. Οι περιοχές αυτές αρδεύονται και από αρδευτικά κανάλια με νερό του Πηνειού ποταμού, με αποτέλεσμα την επιτροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων από το νερό αυτό και την μικρή πτώση της στάθμης τους.

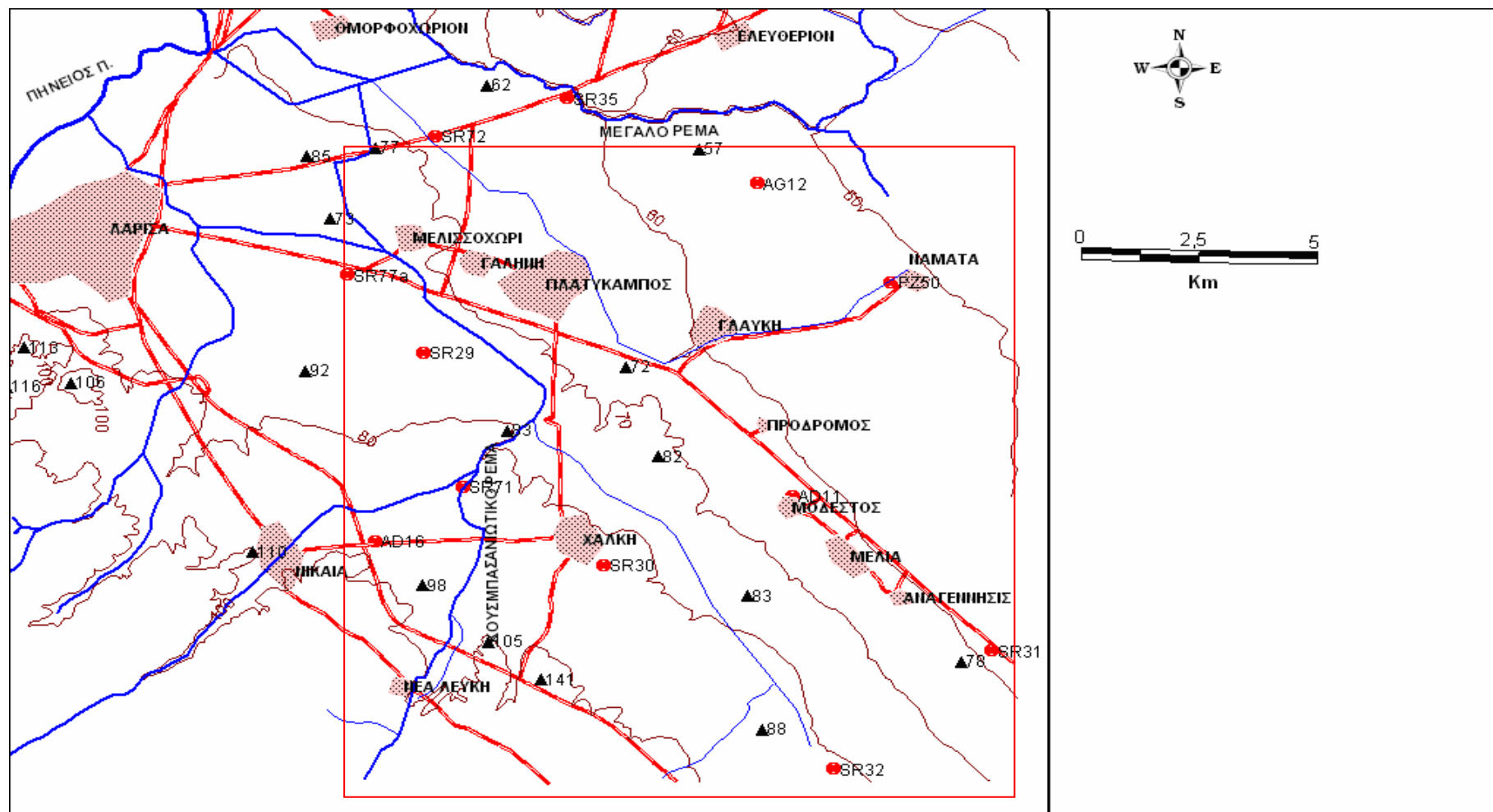
Για την μελέτη της εξέλιξης της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων στην περιοχή απαραίτητη προϋπόθεση ήταν η συλλογή στοιχείων. Τα στοιχεία αυτά

αφορούν τις μηνιαίες τιμές της στάθμης σε διάφορες γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης κατά τα τελευταία 20-30 έτη. Τα στοιχεία αυτά μας παραχωρήθηκαν από την Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων της Λάρισας σε έντυπη μορφή. Καταχωρήθηκαν σε ηλεκτρονική μορφή στο πρόγραμμα Excel και επεξεργάστηκαν κατάλληλα. Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα από την επεξεργασία των στοιχείων παρουσιάζονται στις παρακάτω ενότητες του κεφαλαίου. Οι θέσεις των γεωτρήσεων όπου μετρήθηκαν οι στάθμες του υπόγειου νερού φαίνονται στο παρακάτω Σχήμα 8.10. Στον παρακάτω Πίνακα 8.1. δίνονται οι κωδικοί αριθμοί των γεωτρήσεων αυτών, οι περιοχές στις οποίες βρίσκονται καθώς και το υψόμετρο της περιοχής.

Πίνακας 8.1. Οι γεωτρήσεις στις οποίες μετρήθηκε η στάθμη του υπόγειου νερού.

Κωδ. Γεώτρησης	Περιοχή	Υψόμετρο (m)
AD11	Μόδεστος	59 m
PZ50	Νάματα	50 m
SR35	Ελευθέριο	58 m
SR72	Ομορφοχώρι	61 m
SR77	Μελισσοχώρι	71 m
SR31	Μέλισσα	55 m
AD16	Χάλκη	82 m
AG12	Πλατύκαμπος	51 m
SR32	Κυψέλη	78 m
SR30	Χάλκη	78 m
SR29	Πλατύκαμπος	72 m

Η εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων



Σχήμα 8.10. Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης με τις θέσεις των γεωτρήσεων-πιεζόμετρων στις οποίες μετρήθηκε η στάθμη του υπόγειου νερού.

8.2.2. Η διακύμανση της στάθμης στην περιοχή μελέτης.

Για την μελέτη της διακύμανσης της στάθμης χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα στάθμης 20-30 ετών από διάφορες γεωτρήσεις, κατανεμημένες σε όλη την περιοχή έρευνας. Τα διαγράμματα της διακύμανσης της στάθμης σε κάθε γεώτρηση δίνονται στις παρακάτω σελίδες. Από τα διαγράμματα αυτά, σε γενικές γραμμές, παρατηρούμε ότι: η στάθμη του υπόγειου νερού διαγράφει μια πτωτική πορεία με το χρόνο. Η πτώση αυτή δείχνει να είναι πιο έντονη μετά το 1987. Η κατάσταση πάντως διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή. Η διαφοροποίηση οφείλεται μάλλον στον βαθμό της εκμετάλλευσης των υπόγειων υδάτων και τον τρόπο άρδευσης των καλλιεργειών που πιθανότατα διαφέρει από περιοχή σε περιοχή. Στο βορειοανατολικό και ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης η πτώση της στάθμης είναι μικρότερη απ' ό,τι στις άλλες περιοχές. Αυτό οφείλεται πιθανώς στο γεγονός ότι στις περιοχές αυτές η άρδευση των καλλιεργειών γίνεται εκτός από γεωτρήσεις και από το αρδευτικό δίκτυο του Πηνειού ποταμού. Στη γεώτρηση SR35 η στάθμη του υπόγειου νερού παρουσιάζει μικρή άνοδο με το χρόνο και αυτό οφείλεται στο ότι η γεώτρηση βρίσκεται δίπλα σε υδατόρευμα με αποτέλεσμα τον συνεχή εμπλουτισμό του υδροφόρου. Όσον αφορά την ενδοετήσια διακύμανση της στάθμης στην περιοχή μελέτης: από τον Οκτώβριο στην περιοχή αρχίζει η άνοδος της στάθμης των υδροφόρων και φτάνει το μέγιστό της κατά τον Μάρτιο-Απρίλιο οπότε αρχίζει πλέον η ξηρή περίοδος. Κατά την ξηρή περίοδο η στάθμη υποχωρεί βαθμιαία μέχρι να φθάσει στο ετήσιο ελάχιστο τον Σεπτέμβριο-Οκτώβριο, όπου αρχίζει η επόμενη υγρή περίοδος.

Στα Σχήματα 8.11 έως και 8.21 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές των μηνιαίων τιμών της στάθμης του υπόγειου νερού στις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης (λεπτή γραμμή), η γραμμική τάση με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (διακεκομμένη γραμμή), καθώς και ο κινούμενος μέσος όρος 5 ετών (έντονη γραμμή), που έγιναν με το πρόγραμμα Excel.

Με την μέθοδο των κινουμένων μέσων όρων γίνεται εξομάλυνση της χρονοσειράς (smoothing) παίρνοντας τους μέσους όρους των προηγούμενων και των επομένων τιμών κάθε τιμής x_i της μεταβλητής X . Ο μέσος όρος χ_{μ}

αντικαθιστά την τιμή της νέας εξομαλυσμένης σειράς στη θέση i . Η νέα σειρά αναμένεται να δείξει την ύπαρξη των τάσεων ή των άλλων προσδιοριστικών παραμέτρων.

Αναλυτικά, από τα διαγράμματα διακύμανσης της στάθμης, παρατηρούμε τα εξής για κάθε γεώτρηση:

- *Γεώτρηση AD11*: Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.11) παρατηρούμε ότι η στάθμη κυμαίνεται μεταξύ 2-7 m μέχρι το 1987. Από εκεί και έπειτα παρατηρείται σταδιακή πτώση της στάθμης, που φτάνει τα 33 m βάθος, μέχρι και το 1999, ενώ τα τελευταία 5 χρόνια παρατηρείται μια μικρή άνοδος αυτής, πιθανότατα λόγω τον περιορισμό των αντλήσεων. Η γραμμική τάση της στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y=0,1x -99,1$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια πτωτική τάση της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση AD11, η οποία στατιστικά είναι σημαντική.

- *Γεώτρηση AD16*: Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.12) παρατηρούμε τα εξής: Από το 1972 μέχρι το 1978 δεν παρατηρείται σημαντική διακύμανση της στάθμης. Αυτή κυμαίνεται μεταξύ 4-7 m βάθος. Από το 1978 μέχρι το 1985 παρατηρείται μια μικρή άνοδος αυτής, της τάξεως των 6 m. Από το 1985 μέχρι το 1998 παρατηρείται ραγδαία πτώση της στάθμης, λόγω υπεράντλησης, φτάνοντας τον Οκτώβριο του 1998 τα 40 m βάθος. Η γραμμική τάση της στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y=0,1x -92,18$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια πτωτική τάση της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση AD16, η οποία στατιστικά είναι σημαντική.

- *Γεώτρηση AG12*: Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.13) φαίνεται ότι η στάθμη δεν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις μέχρι το 1988. Από το 1988 μέχρι το 1990 πέφτει απότομα, συνολικά 5 m, ενώ από το 1990 μέχρι το 1997 κυμαίνεται σε σταθερά επίπεδα (περίπου στα 5 m βάθος). Όπως, φαίνεται δηλαδή και από το διάγραμμα, δεν παρατηρείται υπεράντληση μάλλον λόγω της χρήσης νερού από το αρδευτικό δίκτυο του Πηνειού ποταμού, το οποίο επιτροφοδοτεί τους υδροφόρους. Η γραμμική τάση της

στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y=0,025x-24,1$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια μικρή πτωτική τάση της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση AG12, η οποία στατιστικά είναι σημαντική.

- *Γεώτρηση SR29:* Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.14) παρατηρούμε ότι η στάθμη μέχρι το 1978 παρουσιάζει μικρή πτωτική πορεία. Στη συνέχεια μέχρι το 1983 παρουσιάζει άνοδο (7 m περίπου) και από εκεί και έπειτα πέφτει με σταθερό ρυθμό φτάνοντας στα 43 m βάθος τον Οκτώβριο του 2004. Η πτωτική πορεία της στάθμης είναι πιο έντονη μετά το 1987. Η γραμμική τάση της στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y=0,12x-103,5$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια έντονη πτωτική τάση της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση SR29, η οποία στατιστικά είναι σημαντική.

- *Γεώτρηση SR30:* Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.15) παρατηρούμε ότι η στάθμη μέχρι το 1979 παρουσιάζει μικρή πτωτική πορεία. Συνολικά έπεσε κατά 5 m. Στη συνέχεια μέχρι το 1984 παρουσιάζει άνοδο φτάνοντας στα επίπεδα του 1973. Από το 1984 όμως και έπειτα πέφτει με σταθερό ρυθμό, φτάνοντας στα 67 m βάθος κατά τη ξηρή περίοδο του 2004. Φαίνεται λοιπόν ότι οι υπεραντλήσεις στην περιοχή έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στην πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Η γραμμική τάση της στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y=0,15x-137,04$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια έντονη πτωτική τάση της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση SR30, η οποία στατιστικά είναι σημαντική.

- *Γεώτρηση SR31:* Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.16) φαίνεται ότι η στάθμη δεν παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις μέχρι το 1987. Από εκεί και έπειτα παρατηρείται μια σταθερή καθοδική πορεία μέχρι το 2001, φτάνοντας κατά την ξηρή περίοδο στα 50 m βάθος. Τα τελευταία 3 χρόνια όμως φαίνεται η στάθμη να σταθεροποιείται. Η γραμμική τάση της στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y=0,13x-118,5$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια έντονη πτωτική τάση

της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση SR31, η οποία στατιστικά είναι σημαντική.

- *Γεώτρηση SR32:* Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.17) φαίνεται ότι από το 1972 μέχρι το 1985 η στάθμη του υπόγειου νερού κυμαίνεται στα ίδια περίπου επίπεδα (12 έως 20 m). Αντίθετα, από το 1985 μέχρι το 1996 η στάθμη παρουσιάζει μια συνεχόμενη καθοδική πορεία, φτάνοντας μέχρι και τα 100 m βάθος κατά την ξηρή περίοδο του 1995. αυτή η βαθμιαία πτώση της στάθμης οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στην αύξηση των απολήψεων του υπόγειου νερού, μετά το 1985, για αρδευτική και υδρευτική χρήση. Η γραμμική τάση της στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y=0,18x -159,3$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια έντονη πτωτική τάση της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση SR32, η οποία στατιστικά είναι αρκετά σημαντική.

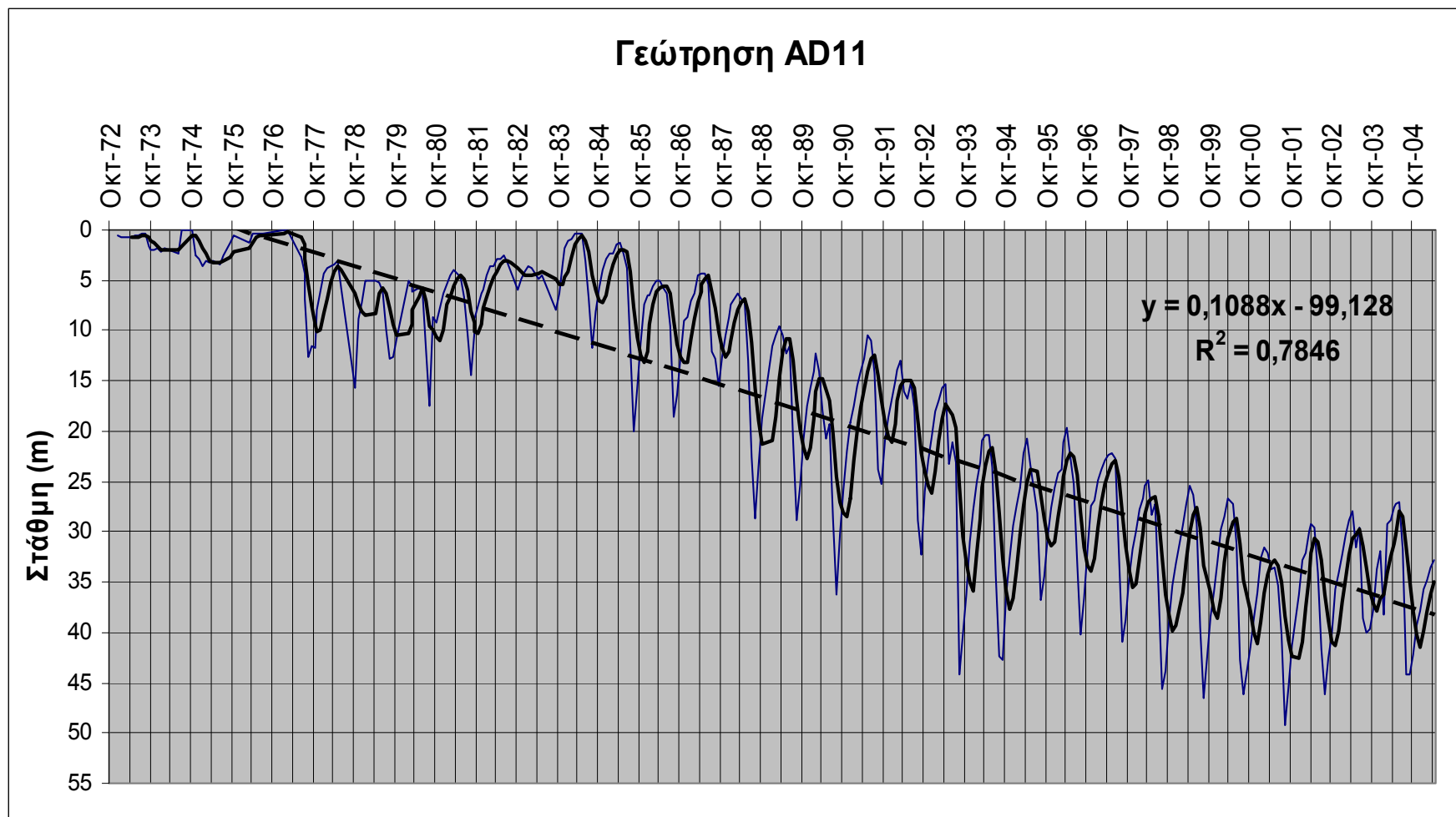
- *Γεώτρηση SR72:* Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.18) φαίνεται ότι η στάθμη από το 1974 μέχρι το 1988 ακολουθεί μια σταθερή σχετικά πορεία με μικρές διακυμάνσεις ανά έτος. Από το 1988 μέχρι το 1995 η στάθμη πέφτει με μεγαλύτερο ρυθμό. Συγκεκριμένα μέσα σε 14 χρόνια η στάθμη έπεσε 14 m περίπου. Από το 1995 μέχρι το 2004 η πορεία της φαίνεται να σταθεροποιείται, ενώ τα τελευταία 3 χρόνια παρατηρείται μικρή άνοδος αυτής. Αυτό οφείλεται πιθανότερα στον περιορισμό των αντλήσεων στην περιοχή. Η γραμμική τάση της στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y=0,09x -81,2$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια πτωτική τάση της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση SR72, η οποία στατιστικά είναι σημαντική.

- *Γεώτρηση SR77:* Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.19) είναι εμφανής η καθοδική τάση της στάθμης ειδικά μετά το 1987. Συγκεκριμένα, κατά το διάστημα 1974-1978 παρατηρείται μικρή πτώση της στάθμης και μετά μέχρι το 1984 η στάθμη ανέρχεται μέχρι τα 5 m βάθος. Από το 1987 μέχρι το 2001 η στάθμη του υπόγειου νερού πέφτει με σταθερό ρυθμό φτάνοντας στα 25 m βάθος κατά την υγρή περίοδο και στα 37 m κατά την ξηρή. Από το 2001 μέχρι το 2005 παρατηρείται μια πάρα πολύ μικρή άνοδος αυτής, της τάξεως

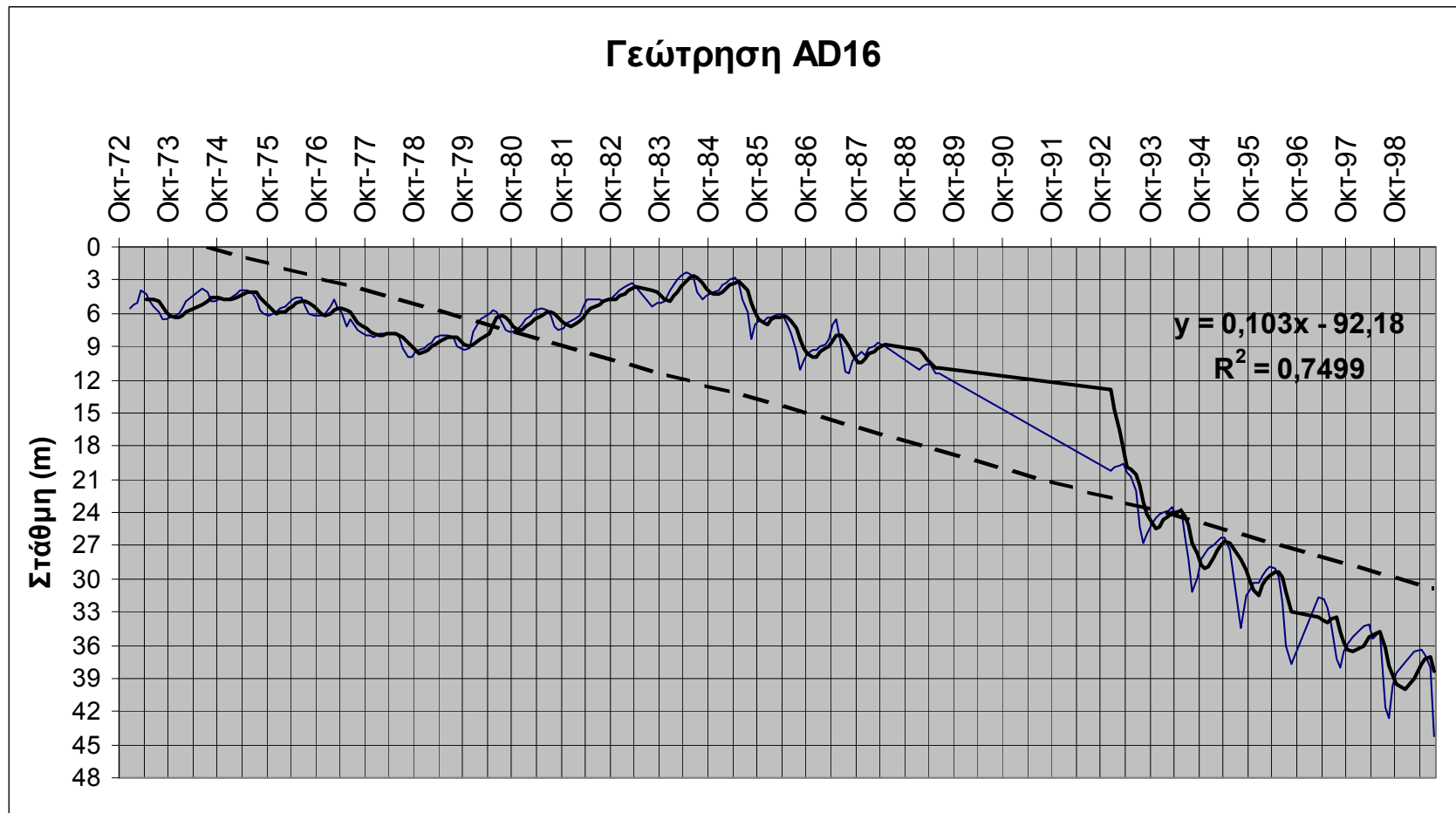
του 1 m. Η γραμμική τάση της στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y=0,07x -60,5$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια πτωτική τάση της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση SR77, η οποία στατιστικά είναι σημαντική.

- *Γεώτρηση PZ50:* Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.20) παρατηρούμε ότι μέχρι το 1987 η στάθμη του υπόγειου νερού βρισκόταν στα 0,5-1,2 m βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Από το 1987 όμως μέχρι το 1988 η στάθμη έπεσε απότομα στα 2,5 m και μέχρι τα μέσα του 2003 κυμαινόταν από 2,5 έως 3,5 m. Από το χρονικό διάστημα εκείνο και έπειτα παρατηρείται ραγδαία πτώση της στάθμης φτάνοντας τον Οκτώβριο του 2004 στα 8,0 m βάθος. Η γραμμική τάση της στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y=0,015x -13,8$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια μικρή πτωτική τάση της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση PZ50, η οποία στατιστικά είναι σημαντική.

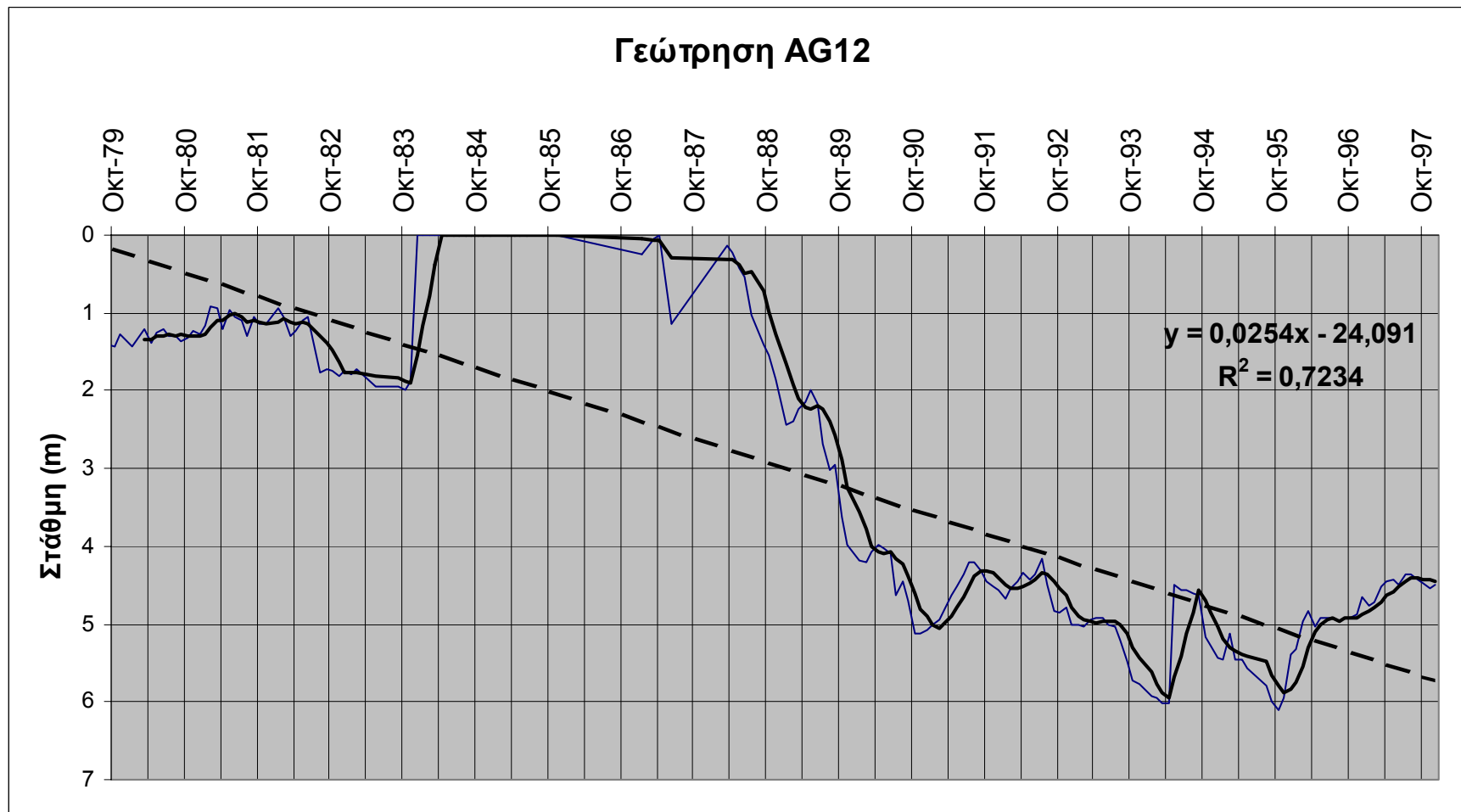
- *Γεώτρηση SR35:* Από το διάγραμμα που προέκυψε (Σχήμα 8.21) φαίνεται μια σταθερή ανοδική πορεία της στάθμης. Από τα 5,5 m βάθος που βρισκόταν το 1973 ανέβηκε στα 3,5 το 2005. Επίσης διακρίνεται και μια αυξητική πορεία της μεταβολής της στάθμης μεταξύ της υγρής και της ξηρής περιόδου. Το σημαντικό λοιπόν σε αυτήν την περιοχή είναι ότι όχι μόνο η στάθμη του υδροφόρου βρίσκεται σε μικρό βάθος, αλλά παρατηρείται επιπλέον και άνοδος αυτής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γεώτρηση βρίσκεται δίπλα σε κοίτη υδατορέματος με αποτέλεσμα την τροφοδοσία των υδροφόρων από τα νερά αυτού. Επιπλέον οι αρδεύσεις των καλλιεργειών από αρδευτικά κανάλια του Πηνειού ποταμού δεν καθιστούν αναγκαία την άντληση μεγάλων ποσοτήτων υπόγειου νερού από τις γεωτρήσεις. Η γραμμική τάση της στάθμης, όπως προσδιορίστηκε με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων είναι: $y= -0,0027x +7,8$. Από τη σχέση αυτή προκύπτει μια μικρή ανοδική τάση της στάθμης με το χρόνο στην γεώτρηση SR35, η οποία στατιστικά είναι ασήμαντη.



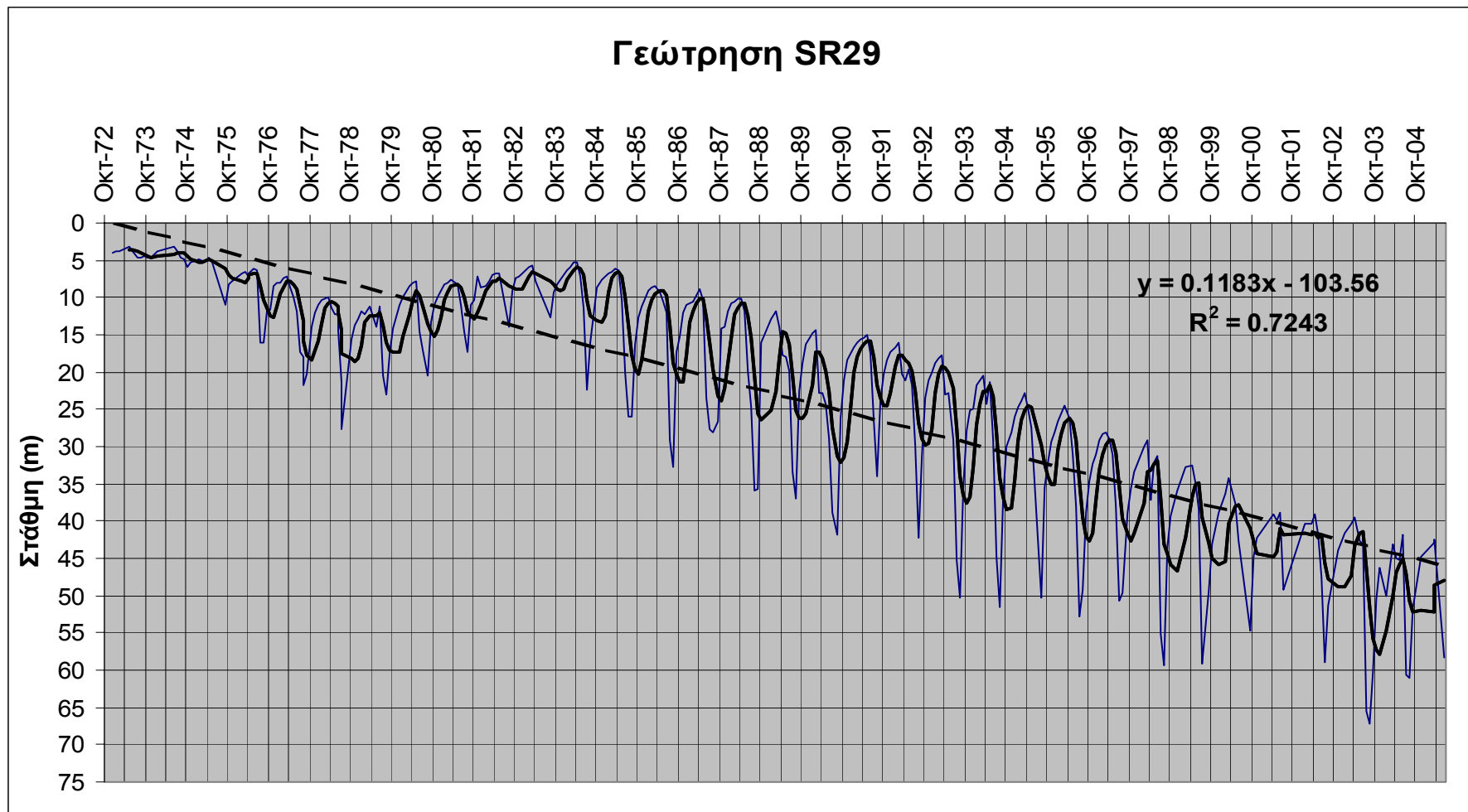
Σχήμα 8.11. Η διακύμανση της στάθμης στην γεώτρηση AD11 κατά την χρονική περίοδο 1972-2005.



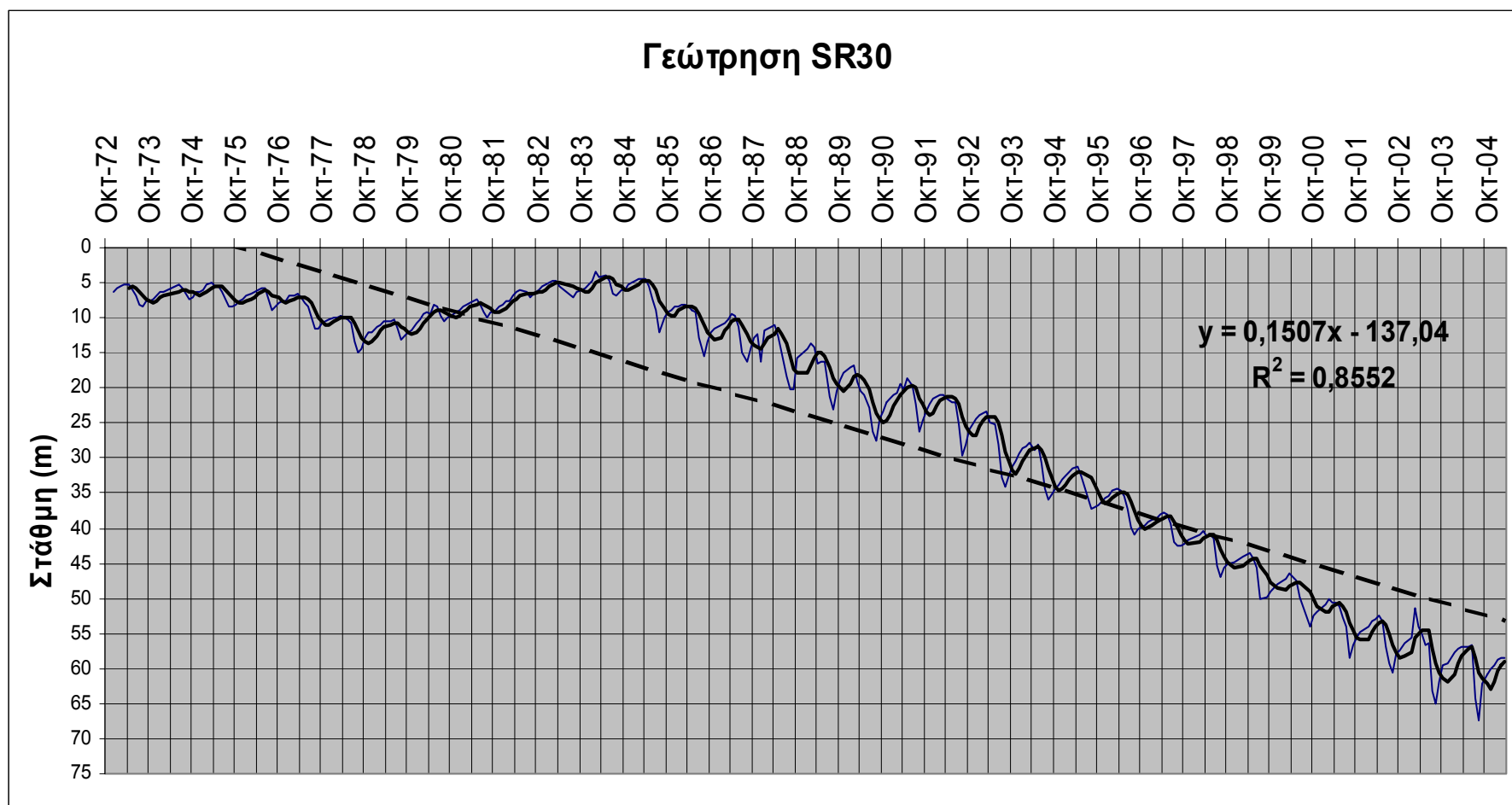
Σχήμα 8.12. Η διακόμανση της στάθμης στην γεώτρηση AD16 κατά την χρονική περίοδο 1972-1999.



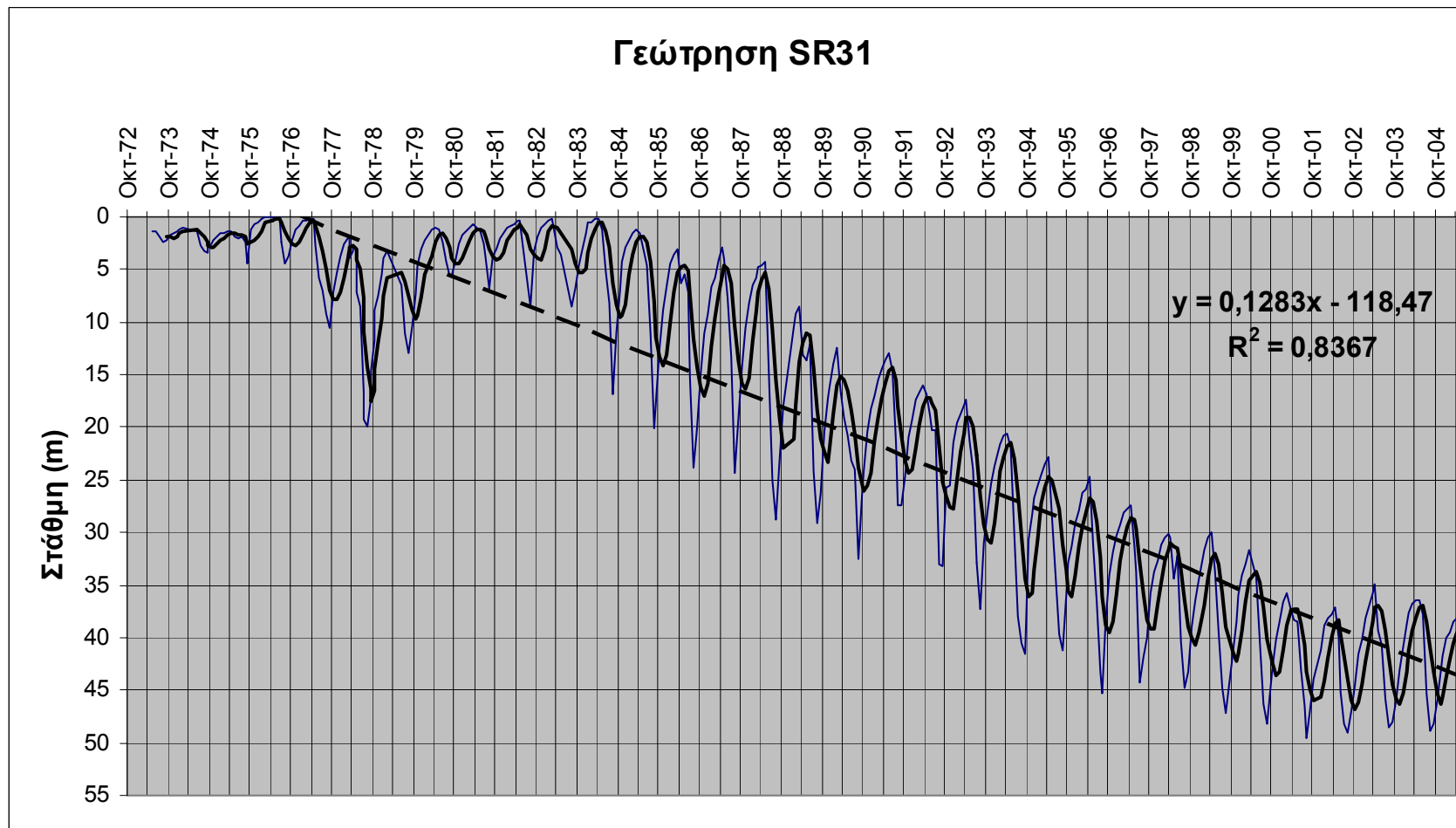
Σχήμα 8.13. Η διακύμανση της στάθμης στην γεώτρηση AG12 κατά την χρονική περίοδο 1979-1997.



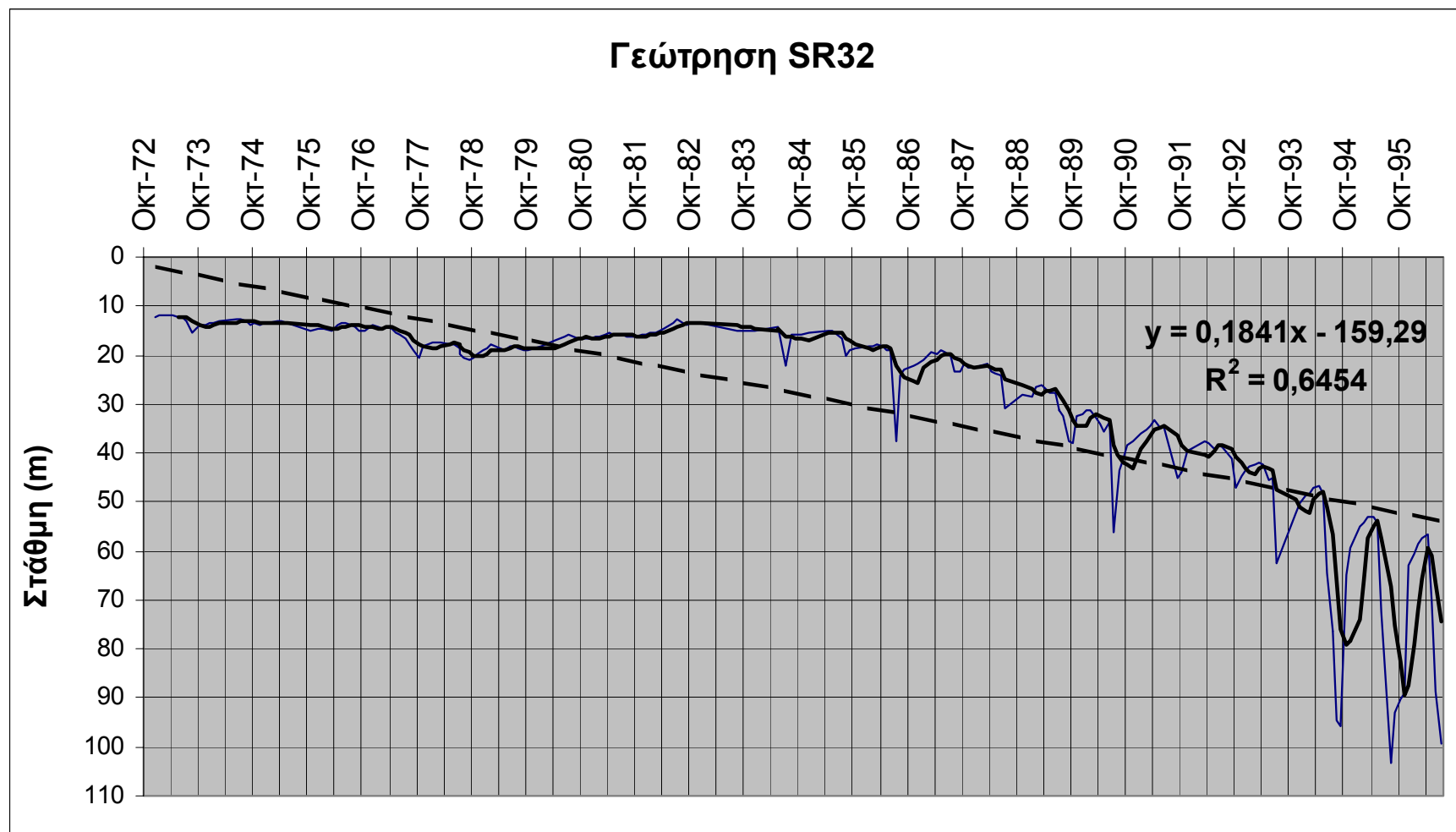
Σχήμα 8.14. Η διακύμανση της στάθμης στην γεώτρηση SR29 κατά την χρονική περίοδο 1972-2005.



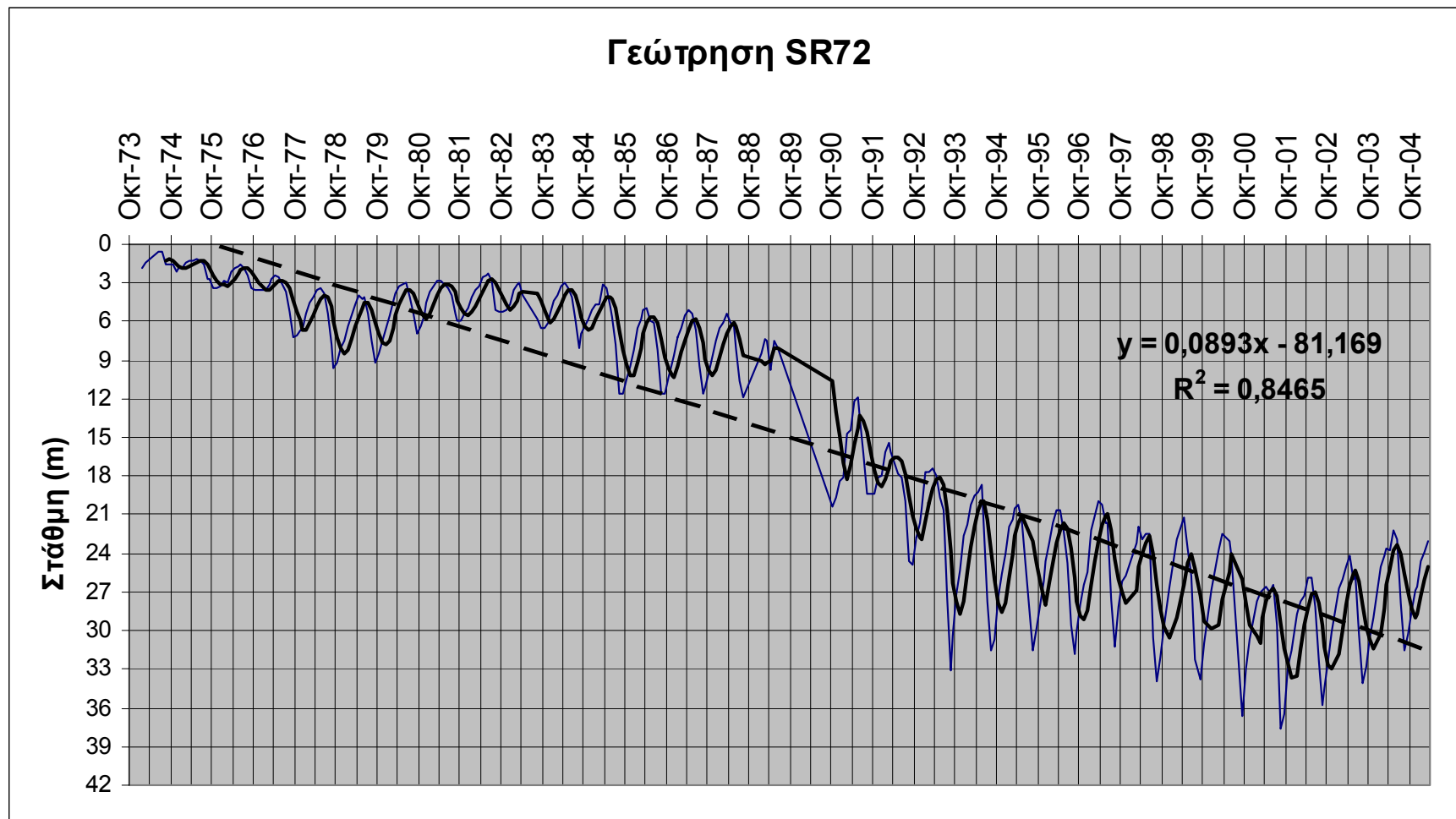
Σχήμα 8.15. Η διακόμανση της στάθμης στην γεώτρηση SR30 κατά την χρονική περίοδο 1972-2005.



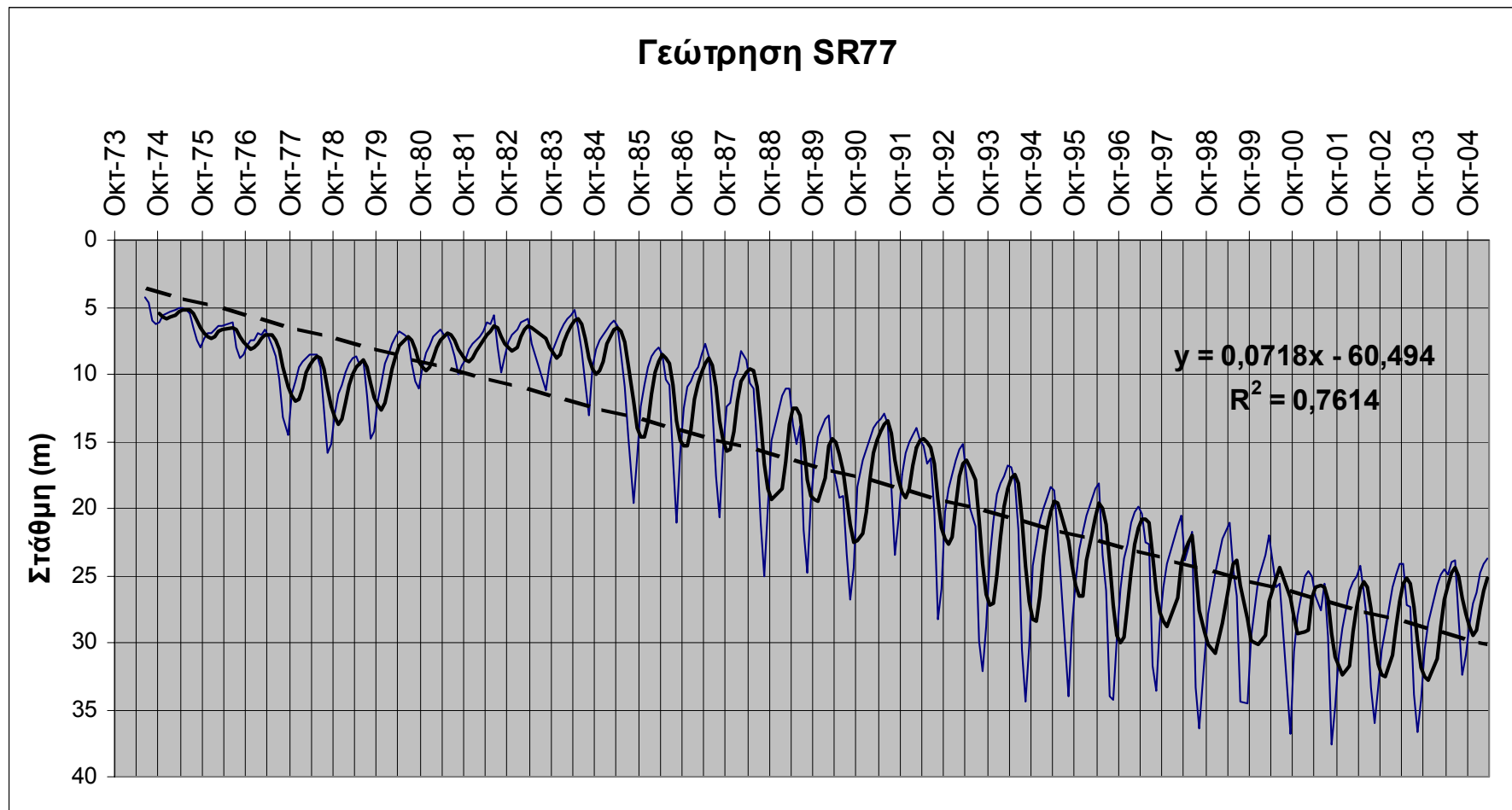
Σχήμα 8.16. Η διακύμανση της στάθμης στην γεώτρηση SR31 κατά την χρονική περίοδο 1973-2005.



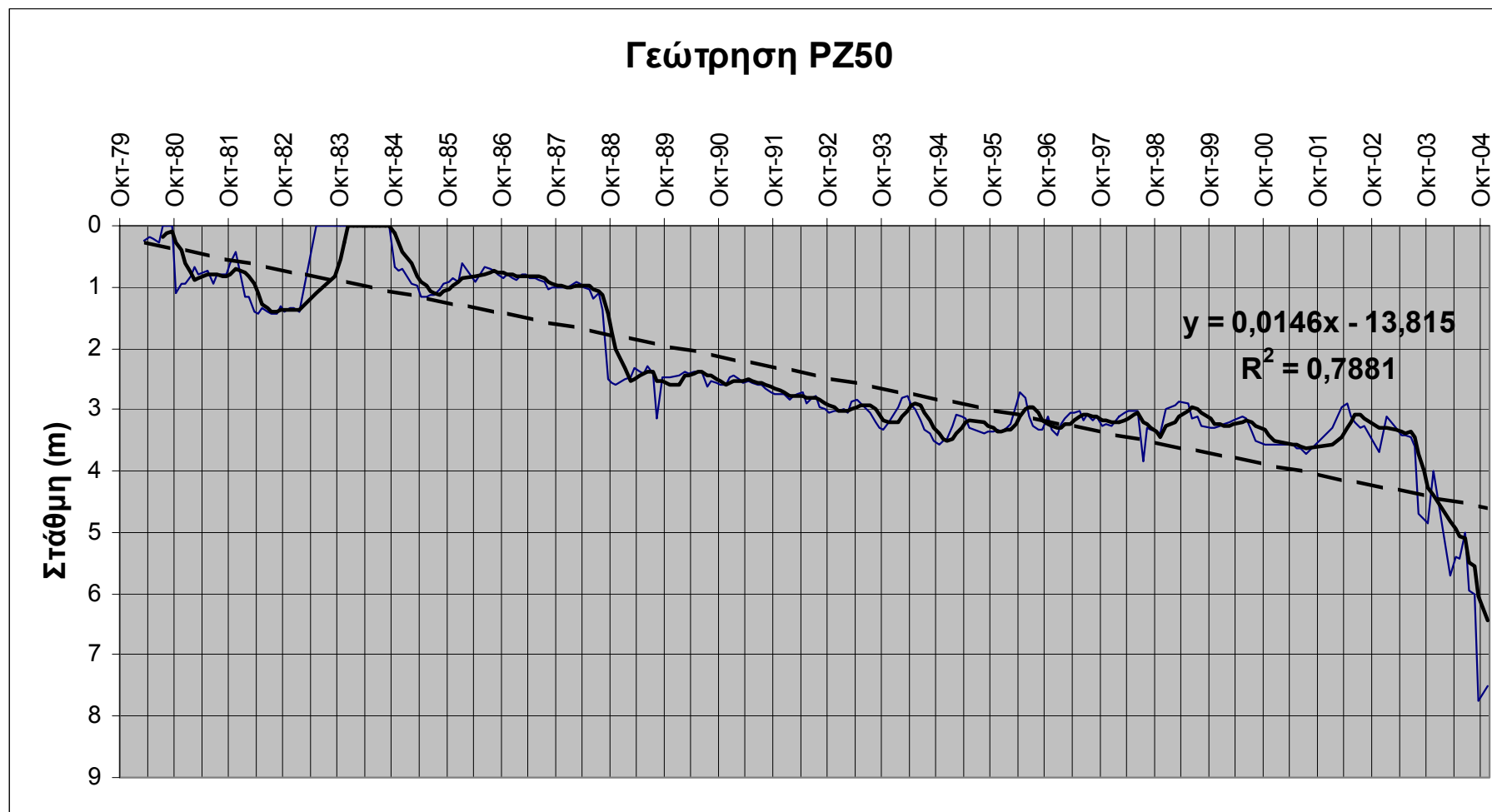
Σχήμα 8.17. Η διακύμανση της στάθμης στην γεώτρηση SR32 κατά την χρονική περίοδο 1972-1996.



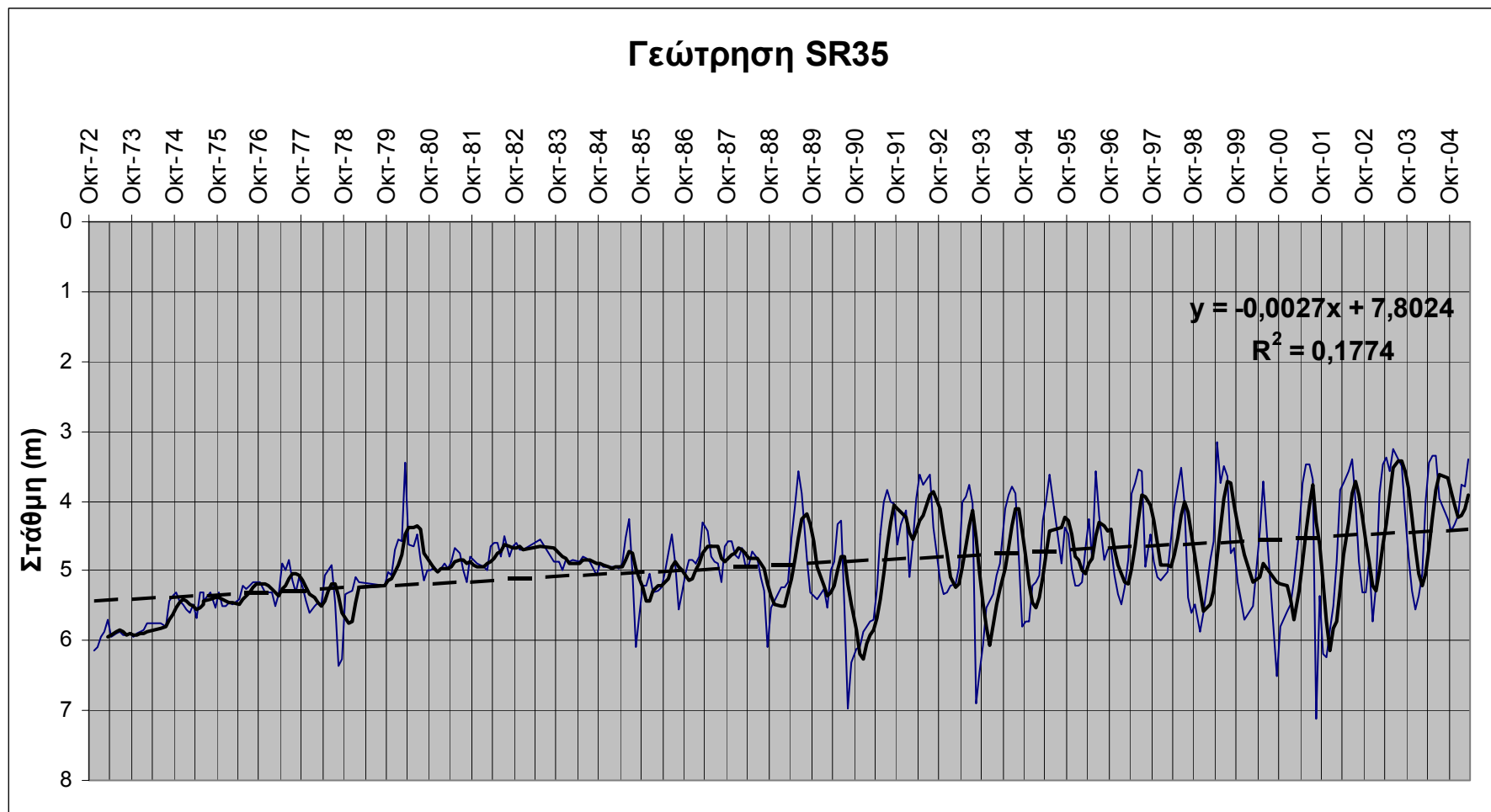
Σχήμα 8.18. Η διακύμανση της στάθμης στην γεώτρηση SR72 κατά την χρονική περίοδο 1973-2005.



Σχήμα 8.19. Η διακύμανση της στάθμης στην γεώτρηση SR77 κατά την χρονική περίοδο 1973-2005.



Σχήμα 8.20. Η διακόμανση της στάθμης στην γεώτρηση PZ50 κατά την χρονική περίοδο 1979-2004.



Σχήμα 8.21. Η διακύμανση της στάθμης στην γεώτρηση SR35 κατά την χρονική περίοδο 1972-2004.

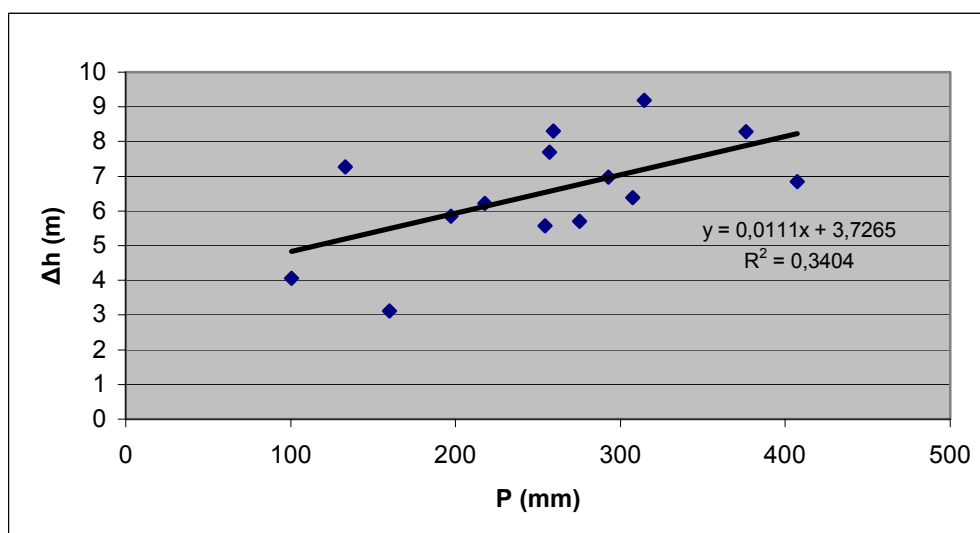
8.2.3. Η μέση άνοδος της στάθμης κατά την περίοδο Οκτώβριο-Μάρτιο σε σχέση με την βροχόπτωση.

Από τις μηνιαίες τιμές της στάθμης του υπόγειου νερού στις γεωτρήσεις της περιοχής μελέτης υπολογίστηκε η μέση άνοδος της στάθμης κατά την περίοδο Οκτώβριο-Μάρτιο (υγρή περίοδος) για κάθε υδρολογικό έτος ξεχωριστά. Αυτή τη μέση άνοδο της στάθμης προσπαθήσαμε να τη συσχετίσουμε με την αντίστοιχη βροχόπτωση της περιόδου αυτής. Στον παρακάτω Πίνακα 8.2. δίνεται η μέση άνοδος της στάθμης κατά το διάστημα Οκτώβριο-Μάρτιο, καθώς και η αντίστοιχη βροχόπτωση για κάθε υδρολογικό έτος.

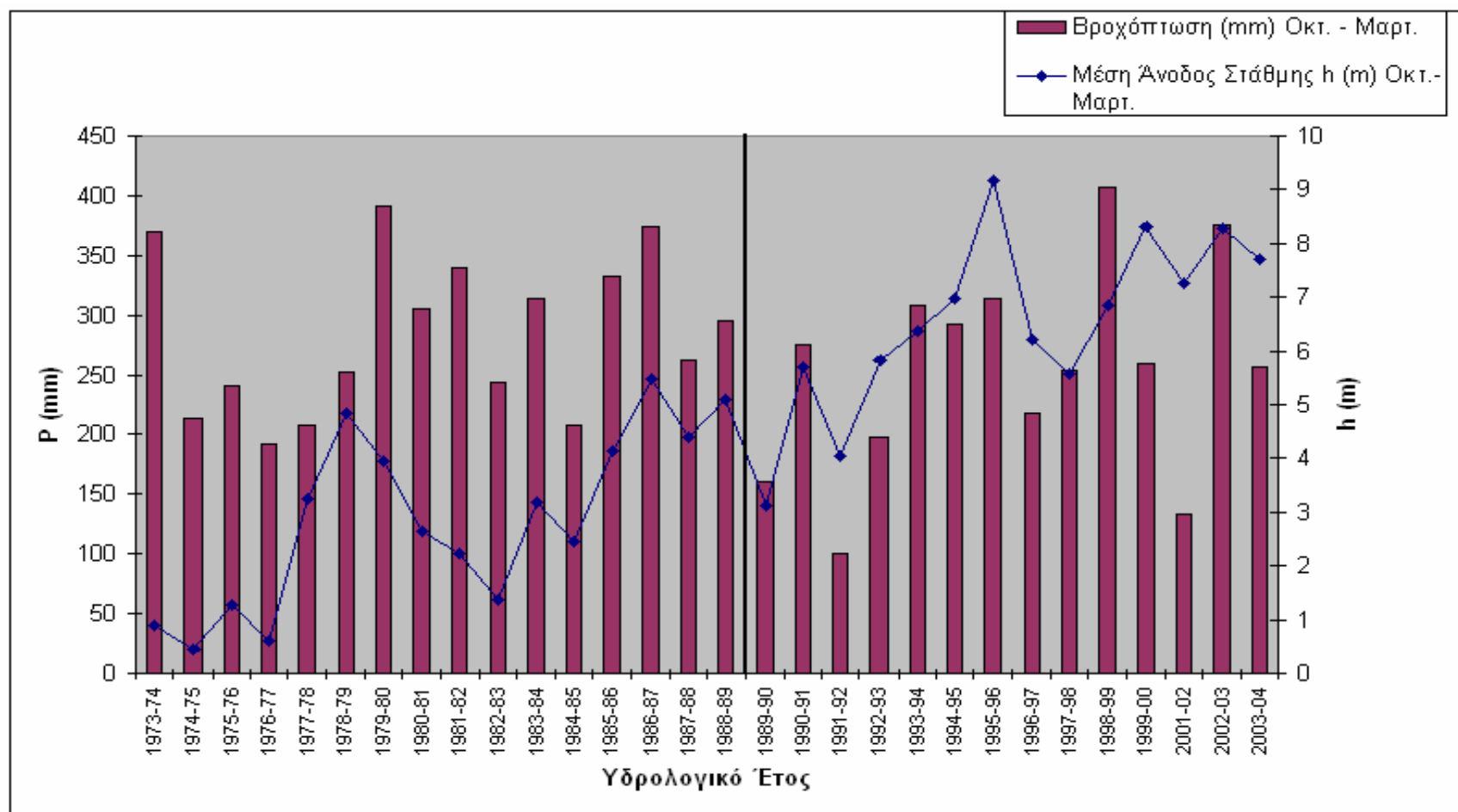
Πίνακας 8.2. Η μέση άνοδος της στάθμης και η αντίστοιχη βροχόπτωση για κάθε υδρολογικό έτος στην περιοχή μελέτης.

Υδρολογικό Έτος	Βροχόπτωση (mm) Οκτ. - Μαρτ.	Μέση Άνοδος Στάθμης h (m) Οκτ.-Μαρτ.
1973-74	369,5	0,9
1974-75	214,1	0,45
1975-76	240,6	1,28
1976-77	192,5	0,62
1977-78	207,1	3,25
1978-79	252,3	4,84
1979-80	391,8	3,94
1980-81	304,8	2,63
1981-82	339,2	2,24
1982-83	243,1	1,36
1983-84	314,3	3,17
1984-85	207,2	2,44
1985-86	332,3	4,13
1986-87	374,7	5,49
1987-88	262,8	4,38
1988-89	295,8	5,11
1989-90	159,9	3,12
1990-91	275,1	5,7
1991-92	100,6	4,06
1992-93	197,2	5,84
1993-94	307,6	6,38
1994-95	292,7	6,97
1995-96	314,5	9,18
1996-97	217,6	6,21
1997-98	254,1	5,58
1998-99	407,2	6,85
1999-00	259,4	8,3
2001-02	133	7,27
2002-03	376	8,28
2003-04	257	7,7

Από την επεξεργασία των στοιχείων προέκυψαν τα παρακάτω Σχήματα 8.22 και 8.23. Στο Σχήμα 8.22. έχουμε το διάγραμμα της μέσης ανόδου της στάθμης σε σχέση με την βροχόπτωση για κάθε υδρολογικό έτος. Επειδή οι υπεραντλήσεις στην περιοχή μελέτης άρχισαν να γίνονται μετά το 1989, το δεύτερο τμήμα του διαγράμματος του Σχήματος 8.22 έχει την μεγαλύτερη σημασία. Παρατηρούμε ότι στα περισσότερα υδρολογικά έτη η μέση άνοδος της στάθμης ανταποκρίνεται μερικώς στην βροχόπτωση αλλά όχι με ανάλογο ρυθμό. Δηλαδή μια μεγάλη αύξηση των κατακρημνισμάτων την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου σε σχέση με το προηγούμενο υδρολογικό έτος δεν έχει ως αποτέλεσμα και μια ανάλογη μεγάλη άνοδο της στάθμης για την περίοδο αυτή. Στο Σχήμα 8.23. έχουμε το διάγραμμα διασποράς XY. Στον άξονα Y έχουμε την μέση άνοδο της στάθμης Δh (m) ενώ στον οριζόντιο άξονα X την αντίστοιχη βροχόπτωση P (mm), για τα υδρολογικά έτη μετά το 1989. Από το διάγραμμα παρατηρούμε μια σημαντική συσχέτιση μεταξύ αυτών των 2 παραμέτρων ($r=0.6$). Είναι πάντως απολύτως φυσικό να μην υπάρχει πολύ υψηλή συσχέτιση μεταξύ αυτών των παραμέτρων, αφού η βροχόπτωση δεν αποτελεί ασφαλή ένδειξη του εμπλουτισμού των υδροφόρων λόγω επιφανειακών και υπόγειων απωλειών, καθώς και του καθεστώτος άντλησης του υπόγειου νερού που διαφέρει από περιοχή σε περιοχή.



Σχήμα 8.23. Συσχέτιση μέσης ανόδου στάθμης Οκτωβρίου-Μαρτίου με την βροχόπτωση για την περιοχή μελέτης για τα υδρολογικά έτη μετά το 1989.



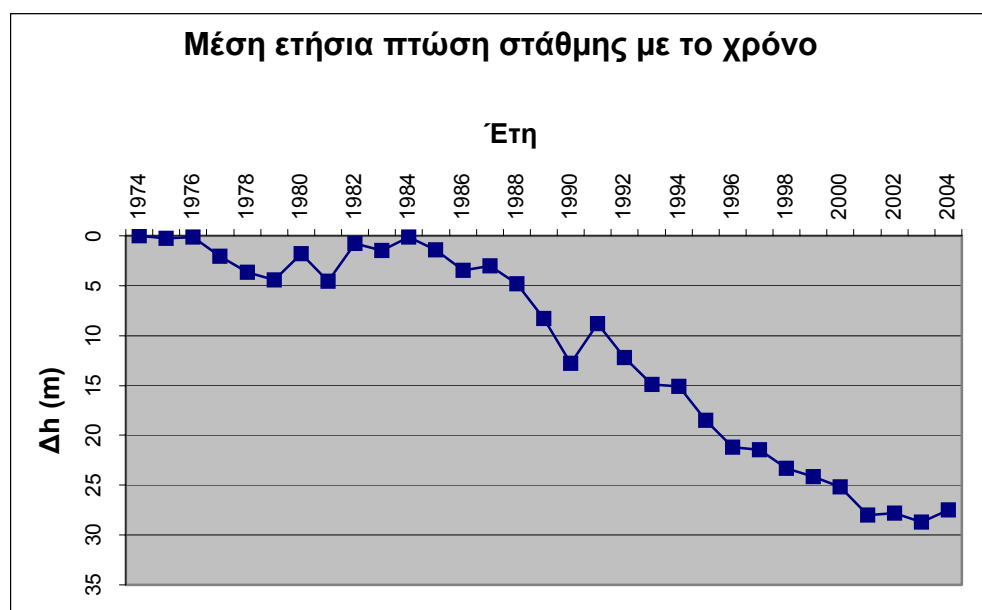
Σχήμα 8.22. Διάγραμμα της μέσης ανόδου της στάθμης, κατά το διάστημα Οκτωβρίου-Μαρτίου, σε σχέση με την βροχόπτωση της ίδιας περιόδου για την περιοχή μελέτης.

8.2.4. Η μέση ετήσια πτώση στάθμης με το χρόνο.

Από τις μηνιαίες τιμές της στάθμης του υπόγειου νερού των γεωτρήσεων της περιοχής μελέτης υπολογίστηκε η μέση ετήσια πτώση στάθμης, απ' όλες τις γεωτρήσεις, με το χρόνο, θεωρώντας ως σημείο αναφοράς την στάθμη του υπόγειου νερού κατά τον Μάιο του 1974. Από την επεξεργασία των στοιχείων προέκυψε ο Πίνακας 8.3. και το αντίστοιχο διάγραμμα του Σχήματος 8.24.

Πίνακας 8.3. Τιμές της μέσης ετήσιας πτώσης στάθμης με το χρόνο.

Έτη	Δh	Έτη	Δh
1974	0	1990	12,78
1975	0,28	1991	8,83
1976	0,13	1992	12,19
1977	2,04	1993	14,92
1978	3,64	1994	15,1
1979	4,42	1995	18,5
1980	1,77	1996	21,2
1981	4,57	1997	21,46
1982	0,78	1998	23,3
1983	1,45	1999	24,14
1984	0,11	2000	25,18
1985	1,41	2001	28,02
1986	3,48	2002	27,83
1987	2,99	2003	28,7
1988	4,79	2004	27,51
1989	8,29		



Σχήμα 8.24. Η μέση ετήσια πτώση στάθμης με το χρόνο.

Από το διάγραμμα παρατηρούμε τα εξής: Η μέση στάθμη στην περιοχή μελέτης διαγράφει μια πτωτική πορεία από το 1974 μέχρι το 1979. Από το 1979 μέχρι το 1984 παρατηρείται άνοδος αυτής φτάνοντας στα αρχικά επίπεδα του 1974. Από το 1984 όμως μέχρι το 2004 η μέση στάθμη στην περιοχή διαγράφει μια έντονη πτωτική πορεία με το χρόνο, με μόνη εξαίρεση κατά το έτος 1990-91, όπου κατά την διάρκεια αυτού παρατηρείται μια άνοδος αυτής. Φαίνεται πάντως ότι τα τελευταία 3 χρόνια η πτωτική πορεία της στάθμης έχει σταματήσει, ίσως λόγω του περιορισμού των αντλήσεων.

8.2.5. Χάρτες ίσης πτώσης στάθμης.

Για την κατασκευή των χαρτών ίσης πτώσης στάθμης θεωρήσαμε ως σημείο αναφοράς την στάθμη του υπόγειου νερού κατά τον Απρίλιο του 1974. Έτσι, κατασκευάστηκαν οι χάρτες ίσης πτώσης στάθμης ανά 5ετία (1979, 1984, 1989, 1994, 1999, 2004), οι οποίοι δείχνουν πόσα μέτρα έχει πέσει συνολικά η στάθμη από τον Απρίλιο του 1974 στην περιοχή μελέτης.

Οι χάρτες, οι οποίοι παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα, προέκυψαν με τον συνδυασμό των προγραμμάτων MapInfo Professional 6.5 και Surfer 8.0.

Από το Σχήμα 8.25. φαίνεται ότι η μεγαλύτερη πτώση στάθμης παρατηρείται νοτιοδυτικά του οικισμού του Πλατυκάμπου. Συγκεκριμένα στην περιοχή αυτή η στάθμη από τον Απρίλιο του 1974 έχει πέσει συνολικά 8-8,5 m, ενώ στις περιοχές της Γλαύκης και της Χάλκης 4,5-5 m.

Από τον χάρτη ίσης πτώσης στάθμης του Σχήματος 8.26. φαίνεται ότι η στάθμη, σε σχέση με τις τιμές του Απριλίου του 1979, παρουσιάζει μια άνοδο σε όλη την περιοχή μελέτης. Σε σχέση όμως πάντοτε με τον Απρίλιο του 1974 παρουσιάζει μια μικρή πτώση. Αυτή η πτώση στάθμης είναι 1,6-2 m γύρω από τον οικισμό του Πλατυκάμπου, 1 m στην περιοχή του οικισμού Νάματα και στον οικισμό της Χάλκης, ενώ παρατηρείται και μικρή άνοδος της στάθμης, σε σχέση με τις τιμές του 1974, στις περιοχές της Νίκαιας και της Νέας Λεύκης. Η άνοδος αυτή ίσως να οφείλεται κατά ένα βαθμό στις υψηλές τιμές των κατακρημνισμάτων των προηγούμενων ετών (1980-1984).

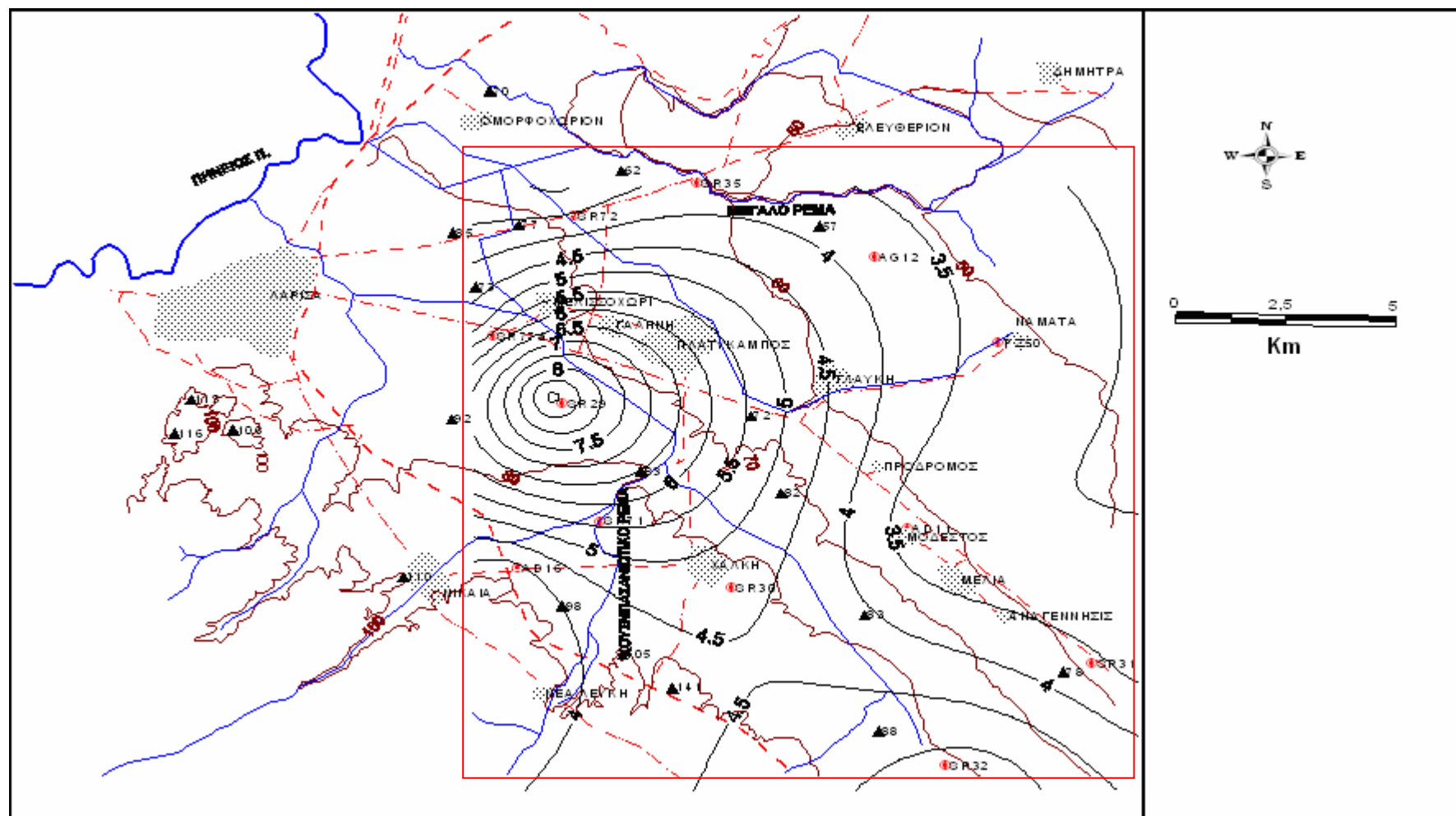
Από το Σχήμα 8.27. φαίνεται ότι η μεγαλύτερη πτώση στάθμης παρατηρείται νοτιοδυτικά του οικισμού του Πλατυκάμπου καθώς και στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης και είναι περίπου 12-13 m.

Από τον χάρτη ίσης πτώσης στάθμης του Σχήματος 8.28. φαίνεται ότι η στάθμη παρουσιάζει σημαντική πτώση σε σχέση με τα επίπεδα του Απριλίου του 1974. στην περιοχή του Πλατυκάμπου παρατηρείται πτώση στάθμης ίση με 19 m, στην περιοχή της Χάλκης 20 m, ενώ η μεγαλύτερη πτώση στάθμης παρατηρείται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης και είναι 29-30 m.

Από το Σχήμα 8.29. φαίνεται ότι, στις περιοχές του Πλατυκάμπου και της Γλαύκης, η στάθμη από τον Απρίλιο του 1974 μέχρι τον Απρίλιο του 1999 έχει πέσει περίπου 25-26 m. Η μεγαλύτερη πτώση στάθμης παρατηρείται στην περιοχή της Χάλκης, 35 m περίπου.

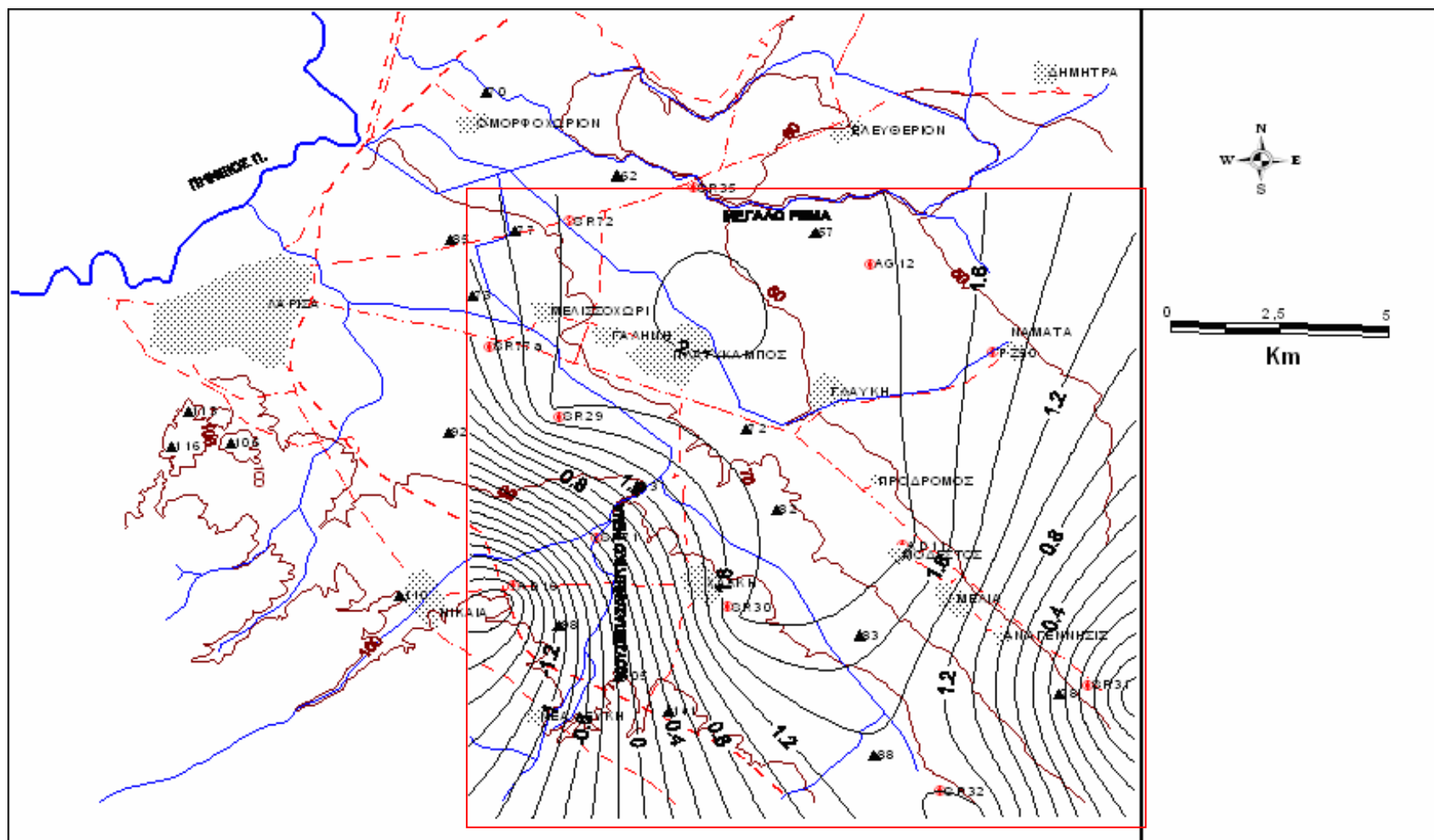
Τέλος, από τον χάρτη ίσης πτώσης στάθμης του Σχήματος 8.30. φαίνεται ότι στις περιοχές του Πλατυκάμπου και της Γλαύκης παρατηρείται πτώση στάθμης 30-34 m σε σχέση με τις τιμές της στάθμης του Απριλίου '74. Η μεγαλύτερη πτώση στάθμης παρατηρείται στην περιοχή της Χάλκης και είναι 48-50 m.

Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι οι μεγαλύτερες τιμές πτώσης στάθμης παρατηρούνται στο δυτικό και νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Οι περιοχές αυτές αρδεύονται επί το πλείστον από ιδιωτικές και δημοτικές γεωτρήσεις. Οι μικρότερες τιμές πτώσης στάθμης παρατηρούνται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, αφού στις περιοχές αυτές η άρδευση των καλλιεργειών γίνεται εκτός από γεωτρήσεις και από το αρδευτικό δίκτυο του Πηνειού ποταμού.

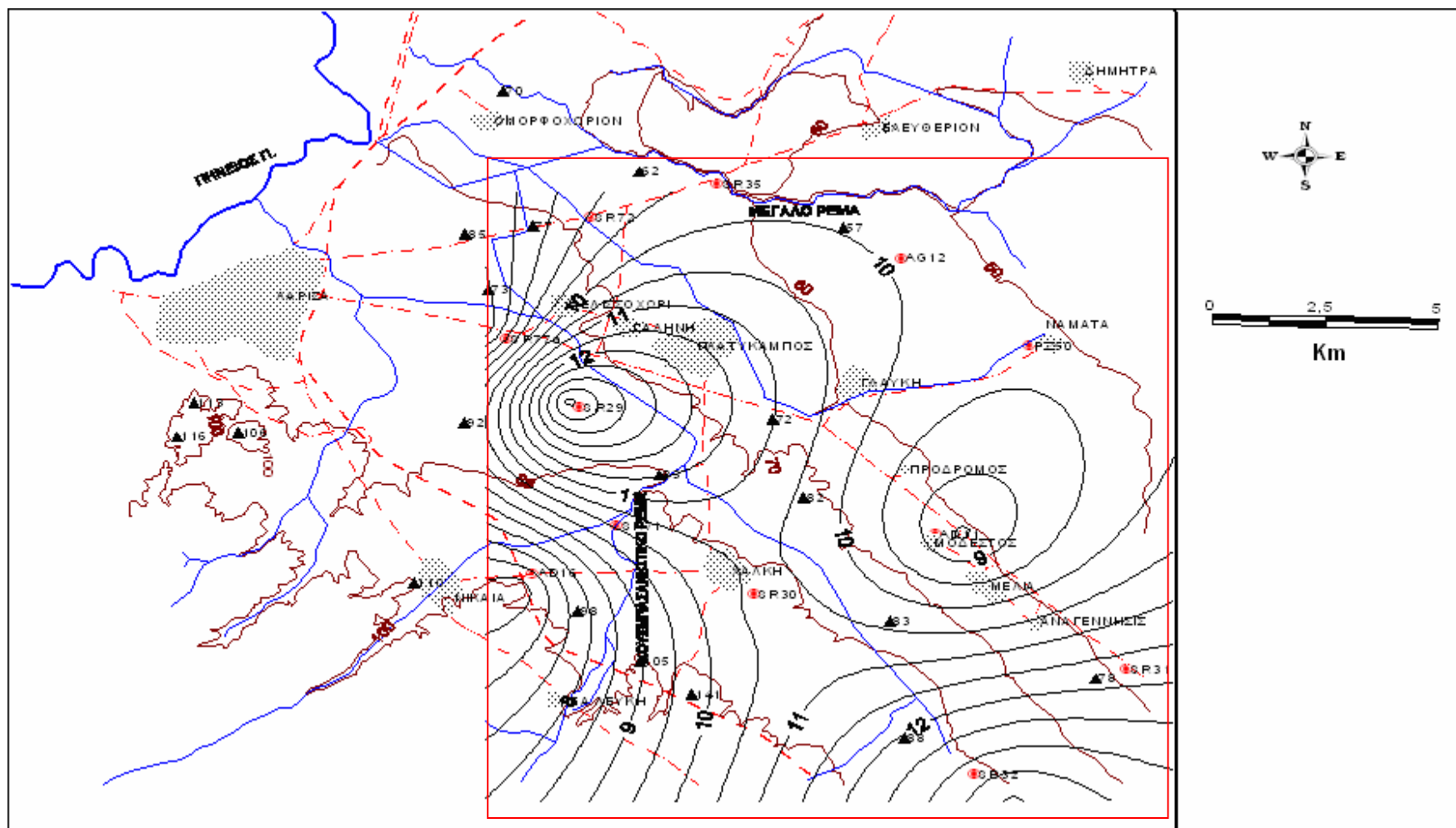


Σχήμα 8.25. Χάρτης ίσης πτώσης στάθμης Απριλίου 1979.

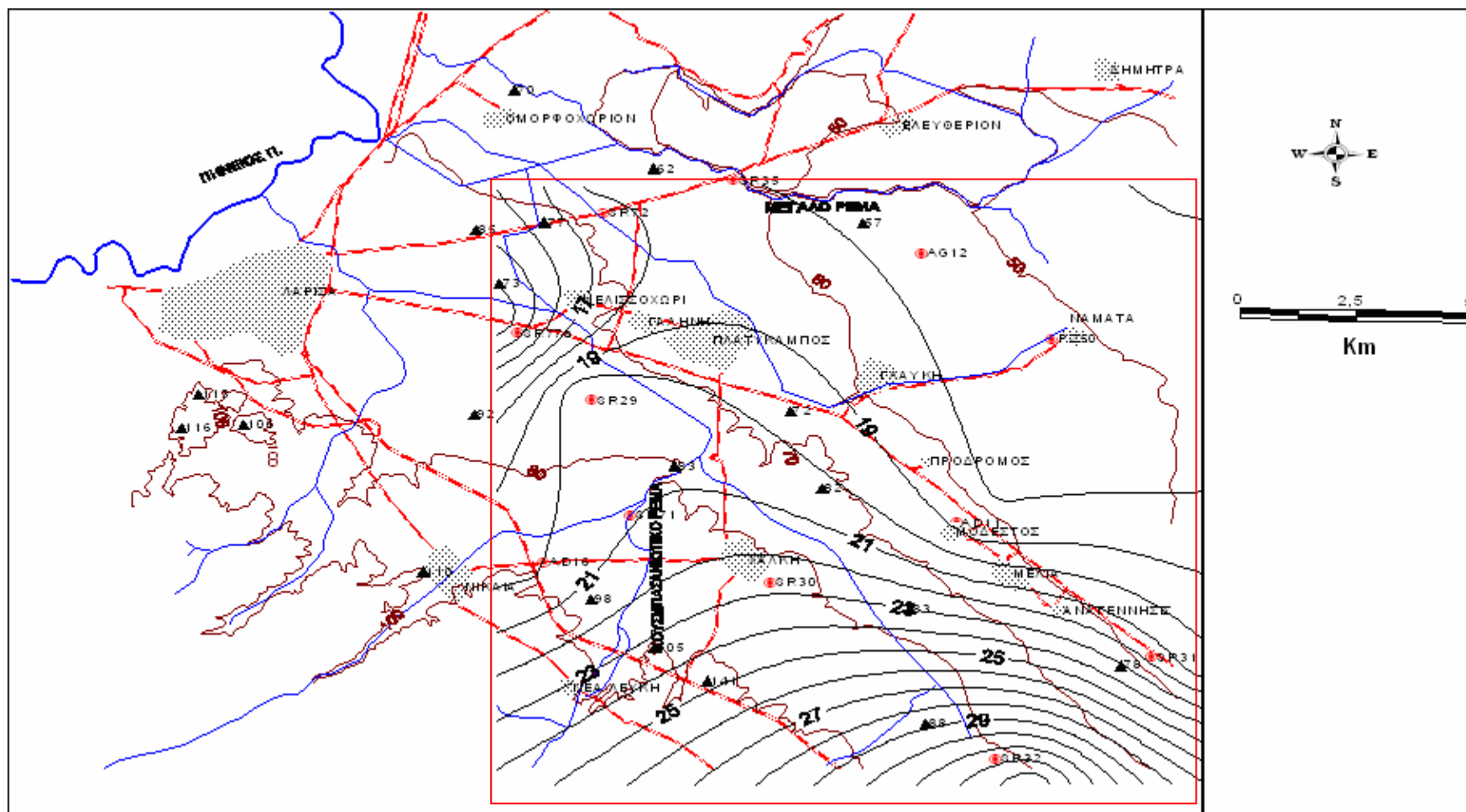
Η εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων



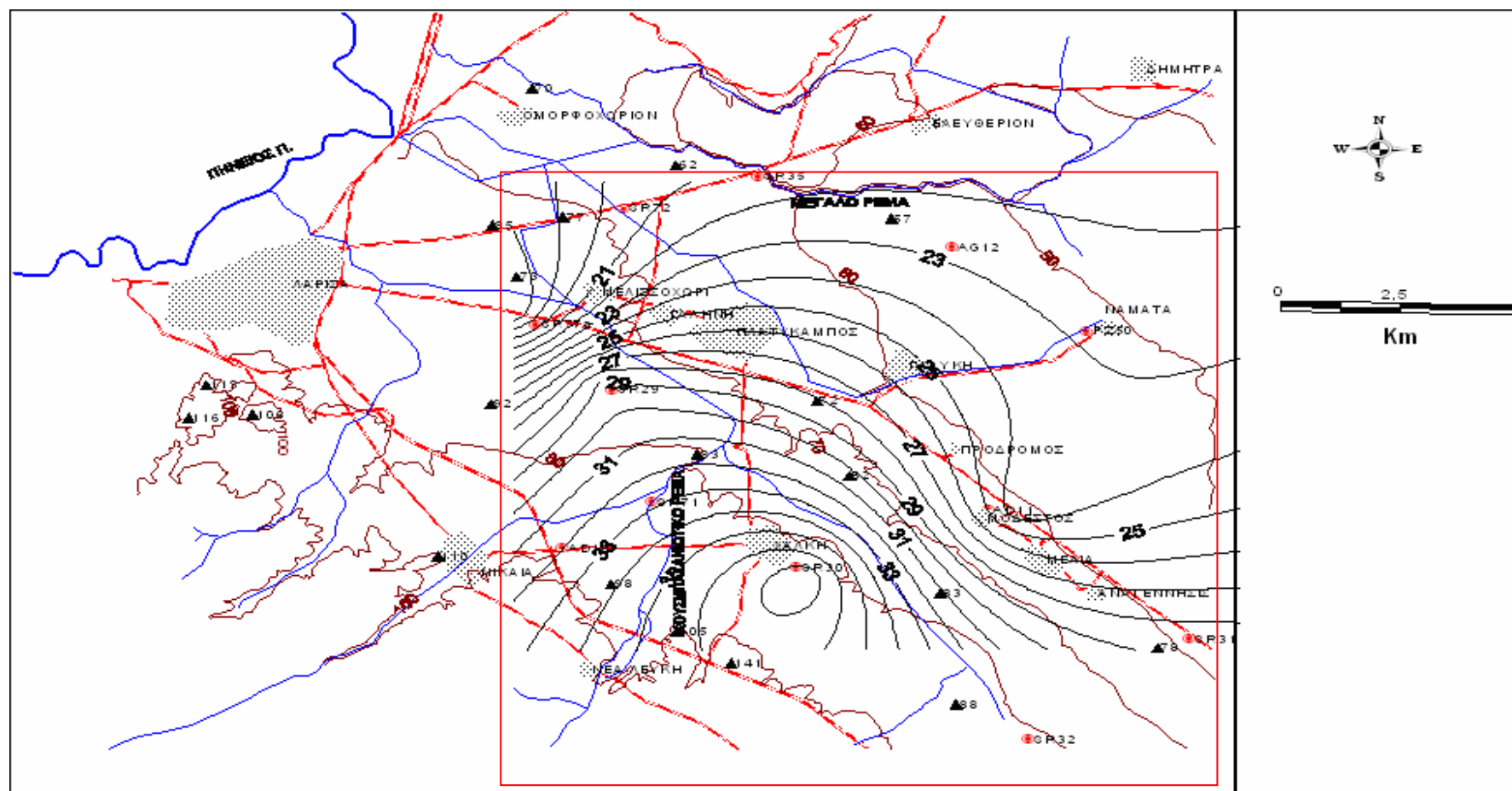
Σχήμα 8.26. Χάρτης ίσης πτώσης στάθμης Απριλίου 1984.



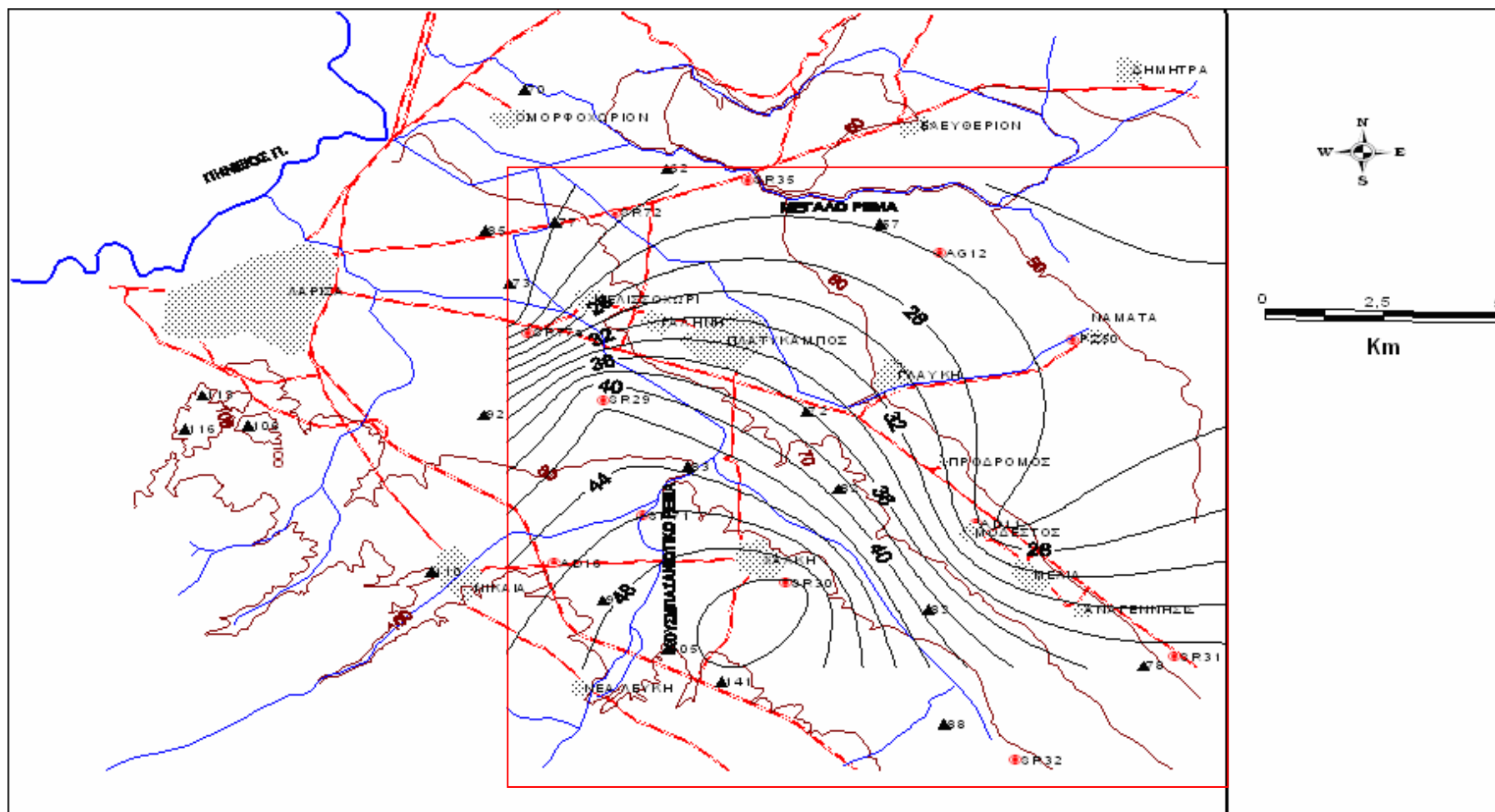
Σχήμα 8.27. Χάρτης ίσης πτώσης στάθμης Απριλίου 1989.



Σχήμα 8.28. Χάρτης ίσης πτώσης στάθμης Απριλίου 1994.



Σχήμα 8.29. Χάρτης ίσης πτώσης στάθμης Απριλίου 1999.



Σχήμα 8.30. Χάρτης ίσης πτώσης στάθμης Απριλίου 2004.

Η εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων

Η εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων

Η εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων

Η εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων

Η εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων

9. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ.

9.1. Γενικά.

Η ποιότητα του υπόγειου νερού καθορίζει την χρήση του από τον άνθρωπο (υδρευτική – αρδευτική – βιομηχανική). Επίσης είναι αυτή που δίνει πληροφορίες για τον τύπο του υδροφόρου ορίζοντα, την προέλευση, την ταχύτητα και την διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού. Για τον καθορισμό της ποιότητας απαιτείται η υδροχημική εξέταση του υπόγειου νερού, από όπου θα εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις επιρροές που υφίσταται το υπόγειο νερό από εξωτερικές επιδράσεις. Οι επιρροές αυτές προέρχονται είτε από βαθείς υδροφόρους ορίζοντες είτε από την επιφάνεια. Οι επιρροές από την επιφάνεια είναι οι πιο σημαντικές και επικίνδυνες για την υγεία του ανθρώπου. Παρουσιάζονται ύστερα από μεταβολές της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, της επιφανειακής λίπανσης των αγρών, της απόθεσης στην επιφάνεια στερεών και υγρών αποβλήτων όπως και άλλων ανθρωπογενών επεμβάσεων, όπου τα διαλυμένα και αραιωμένα άλατα μπορούν να διεισδύσουν δια μέσο επιφανειακών στρωμάτων και να αυξήσουν τη συγκέντρωση των αλάτων του υπόγειου νερού.

Η χημική σύσταση του υπόγειου νερού εξαρτάται από αυτή του εδάφους, η οποία διαφέρει από αυτή των κατακρημνισμάτων. Χαρακτηριστικό του εδάφους είναι η υψηλή συγκέντρωση νιτρικών ιόντων λόγω νιτρορύπανσης γεωργικής προέλευσης (χρήση λιπασμάτων). Τα πορώδη πετρώματα που κατέχουν τους διάφορους υδροφόρους ορίζοντες έχουν και διαφορετική χημική σύσταση. Επίσης κατά την διάρκεια των περιόδων της έντονης εξατμισοδιαπνοής μπορεί να αλλάζουν οι συγκεντρώσεις των εδαφών. Η ελάττωση των ιόντων Cl^- το Φθινόπωρο οφείλεται στις νέες βροχοπτώσεις. Ακόμη η σχέση $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ ελαττώνεται το Νοέμβριο με το βάθος, ενώ το Μάιο αυξάνει. Τέλος, μια ουσιαστική διαφορά ανάμεσα στη συγκέντρωση του νερού, που βρίσκεται στην ανώτερη ζώνη διήθησης και σ' αυτήν του υπόγειου νερού είναι οι πολύ υψηλότερες συγκεντρώσεις HCO_3^- ιόντων που παρατηρούνται στα νερά της ζώνης διήθησης (Δημόπουλος, 1995).

Στα υπόγεια νερά περιέχονται συνήθως τα παρακάτω ιόντα: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} . Σε μικρές συγκεντρώσεις μπορεί να περιέχονται και τα ιόντα NH_4^+ , Fe^{2+} , Mn^{2+} , NO_2^- . Τα διάφορα ιόντα που περιέχονται στο νερό προκαθορίζουν και την ηλεκτρική του αγωγιμότητα, που αποτελεί μέτρο για το περιεχόμενο του νερού σε διαλυμένες ουσίες. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα μετρείται σε $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ένα άλλο βασικό φυσικοχημικό μέγεθος για το χαρακτηρισμό της ποιότητας του νερού αποτελεί η τιμή του pH. Σε φυσικά νερά η τιμή pH βρίσκεται ανάμεσα στις τιμές 4 και 8. Στον παρακάτω Πίνακα 9.1. δίνονται οι οριακές τιμές, που προβλέπονται από την Ευρωπαϊκή Ένωση, (υψηλότερες επιτρεπτές τιμές σε mg/l) των ουσιών που περιέχονται στο νερό για τη χρησιμοποίησή του ως πόσιμο.

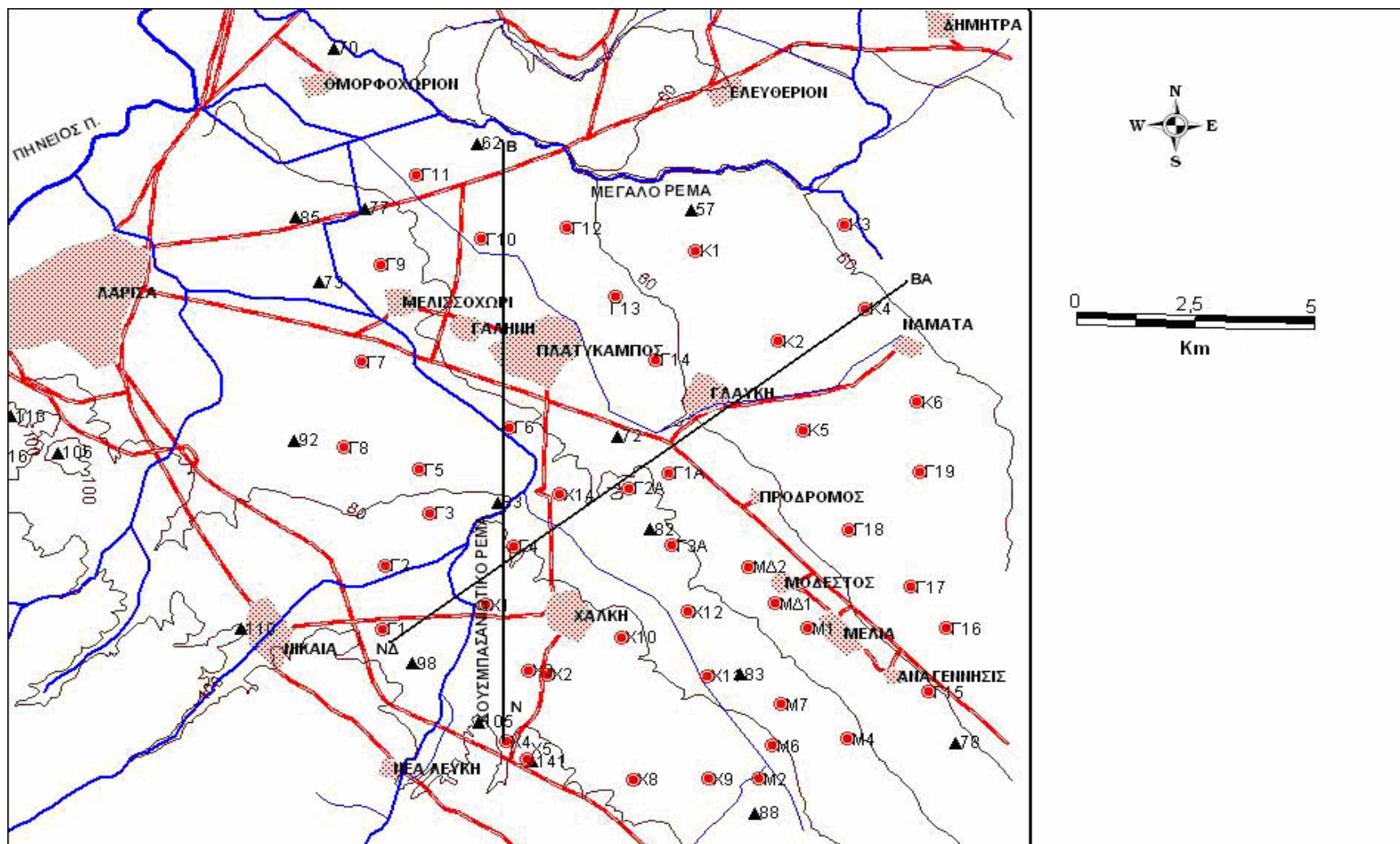
Πίνακας 9.1. Ενδεικτικά επίπεδα και ανώτατες παραδεκτές συγκεντρώσεις των κυριότερων παραμέτρων του πόσιμου νερού.

α/α	Παράμετροι	Έκφραση των αποτελεσμάτων	Ενδεικτικό Επίπεδο	Ανώτατη παραδεκτή συγκέντρωση
1	Συγκέντρωση σε ιόντα υδρογόνου	Μονάδα pH	6,5 έως 8,5	
2	Αγωγιμότητα	$\mu\text{S}/\text{cm}$ έως 20°C	500	
3	Χλώριο	$\text{mg}/\text{l Cl}^-$	25	250
4	Θειικά	$\text{mg}/\text{l SO}_4^{2-}$	25	250
5	Ασβέστιο	$\text{mg}/\text{l Ca}^{2+}$	100	
6	Μαγνήσιο	$\text{mg}/\text{l Mg}^{2+}$	30	50
7	Νάτριο	$\text{mg}/\text{l Na}^+$	20	200
8	Κάλιο	$\text{mg}/\text{l K}^+$	10	12
9	Νιτρικά	$\text{mg}/\text{l NO}_3^-$	25	50
10	Νιτρώδη	$\text{mg}/\text{l NO}_2^-$		0,1
11	Αμμώνιο	$\text{mg}/\text{l NH}_4^+$	0,05	0,5
12	Σίδηρος	$\mu\text{g}/\text{l Fe}^{2+}$	50	200
13	Μαγγάνιο	$\mu\text{g}/\text{l Mn}^{2+}$	20	50
14	Αρσενικό	$\mu\text{g}/\text{l As}$		10
15	Βόριο	$\text{mg}/\text{l Bo}$		1,0

9.2. Χημικές αναλύσεις.

Στα πλαίσια της διερεύνησης των υδρογεωλογικών και υδροχημικών συνθηκών της περιοχής μελέτης, πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις 43 δειγμάτων υπόγειου νερού, τα οποία καλύπτουν ολόκληρη την περιοχή έρευνας (Σχήμα 9.1). Η δειγματοληψία καθώς και οι χημικές αναλύσεις έγιναν κατά το χρονικό διάστημα Αύγουστος-Σεπτέμβριος του 2005 στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. Ορισμένα από τα δείγματα συλλέχθηκαν και αναλύθηκαν κατά τη διάρκεια Ερευνητικού Προγράμματος του Εργαστηρίου στην ευρύτερη περιοχή.

Όπως είπαμε, συλλέχθηκαν συνολικά 43 δείγματα υπόγειου νερού, κυρίως από ιδιωτικές γεωτρήσεις. Έγινε προσπάθεια ώστε το δίκτυο δειγματοληψίας να είναι αντιπροσωπευτικό, καλύπτοντας όλη την έκταση της περιοχής με την ίδια πυκνότητα. Σε όλα τα δείγματα έγιναν επί τόπου μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας E.C. με τη συσκευή JENWAY 4071, καθώς και του pH με τη συσκευή HANNA Instruments HI 9024. Προσδιορίστηκαν τα κύρια ιόντα Na και K με φλογοφωτόμετρο, Ca, Cl και HCO₃ με τιτλοδότηση, SO₄ και NO₃ με φασματοφωτόμετρο. Ο προσδιορισμός των ιόντων Mg έγινε μέσω της ολικής σκληρότητας. Ο έλεγχος των αποτελεσμάτων έγινε με το ισοζύγιο ιόντων. Αν το σφάλμα υπέρβαινε κατά πολύ το 5% η ανάλυση επαναλαμβανόταν. Στον Πίνακα 9.2. παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων. Εκτός από τις συγκεντρώσεις των διαφόρων ιόντων (mg/l), δίνονται το pH, η ηλεκτρική αγωγιμότητα E.C. (μS/cm) καθώς και τα διαλυμένα στερεά συστατικά (T.D.S.). Στον Πίνακα 9.3. δίνονται οι συγκεντρώσεις των ιόντων εκφρασμένες σε meq/l, το T.D.S. (meq/l), καθώς και ο συντελεστής Revelle. Στον χάρτη του Σχήματος 9.1. απεικονίζονται οι θέσεις των δειγμάτων του υπόγειου νερού καθώς και οι θέσεις των υδροχημικών τομών.



Σχήμα 9.1. Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής μελέτης με τη θέση των σημείων δειγματοληψίας και των υδροχημικών τομών.

Πίνακας 9.2. Φυσικοχημικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης.

Κωδ. Δείγματος	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺²	Ca ⁺²	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	pH	E.C.	T.D.S.
Γ1	32	1.2	40.5	38.2	14	19	59.8	256	7.6	510	460,7
Γ10	12.1	3	13.8	42.4	14	16	10.2	163	7.47	280	274,5
Γ11	11.8	2.8	13.4	41.6	12	14	9.6	161	7.48	280	266,2
Γ12	12.5	2.9	13.2	40.4	16	20	5.7	158	7.33	280	268,7
Γ13	175	1	70.1	18.4	33	164	46.2	484	7.72	1060	991,7
Γ14	177	1.2	72	20.2	35	168	47	491	7.65	1080	1011,4
Γ15	45	1.5	23.7	27.2	17	22	10.6	222	8	400	369
Γ16	48	1.8	25	28	21	25	11.8	228	7.65	390	388,6
Γ17	42	1.3	23.5	26.8	16	20	10.3	219	7.7	410	358,9
Γ18	1650	3.5	115.3	179.2	1180	2200	5.7	130	7.35	6250	5463,7
Γ19	1620	3.1	104.7	168	1146	2140	7.4	134	7.42	6100	5323,2
Γ1A	786	2.8	112.4	91.8	868	1210	10.1	191	7.52	3620	3100,6
Γ2	59	1.4	40.8	32.5	38	18	24.4	307	7.45	590	521,1
Γ2A	71	.6	75.2	24	39	84	12	375	7.58	860	680,8
Γ3	45	2.2	66.5	42.2	53	77	17.9	324	7.38	710	627,8
Γ3A	156	1.8	39.8	11.2	21	178	16.3	337	7.66	790	761,1
Γ4	60	1.9	51.52	31.2	54	70	17.6	267	7.82	640	553,2
Γ5	98	1.7	35.9	34	73	120	13.6	238	7.69	690	614,2
Γ6	139	1.7	55.2	63.6	88	320	8.4	287	7.44	1100	962,9
Γ7	186	1.1	32.9	19.4	101	72	4.6	451	7.74	900	868
Γ8	189	1.3	33.7	21.2	104	74	4.8	456	7.7	920	884
Γ9	360	2.1	78.9	68.8	324	780	7.9	154	7.48	2200	1775,7
K1	14.1	3.5	13.2	47	22	12	7.8	167	7.66	300	286,6
K2	13.2	3.2	11.7	45.2	19	10	7.1	162	7.5	310	271,4
K3	13	4.3	10	44	10	21	5.7	153	7.3	290	261
K4	17	4.6	13	46	18	25	6.3	162	7.33	300	291,9
K5	11	4.1	8	41	8	20	5.5	151	7.55	290	248,6
K6	18	4.8	16	48	23	27	7.4	172	7.25	310	316,2
M1	977	2.4	182.3	148.6	1352	1458	26.4	167	7.47	472	4313,7
M2	79	.8	7	14	8	31	11.9	184	8.33	410	335,7
M4	123	.3	14.6	15.6	53	94	15	192	8.25	510	507,5
M6	58	.8	33.8	19.4	29	31	31.7	221	8.12	460	424,7
MΔ1	480	2.1	63	77.6	695	530	9.7	202	8.04	2650	2059,4
MΔ2	184	1.9	53.2	22	98	170	37.4	315	8.21	700	881,5
X1	60	2	48	52	18	112	54	283	7	680	629
X10	53	2.1	31.7	34	22.8	48	29.9	257	8.2	565	478,5
X11	63	1.6	33.8	22.5	23	49	23.3	254	8.22	546	470,2
X12	124	1.5	23	26.4	112	108	11.9	221	8.22	710	627,8
X14	85	1.3	36.1	21.2	10	84	19.8	262	8.2	590	519,4
X3	74	2.1	13.2	38.4	23.8	56	36.5	262	8.11	560	506
X4	52	1.6	26.6	40.4	19	18	38.3	268	7.73	530	463,9
X8	48	1.6	30.5	43.4	19	22	32.1	279	7.93	510	475,6
X9	47	2	34.2	23.5	23.5	34	25.1	232	8.1	410	421,3
μ	223,8	2	28,5	46,31	170,1	250,5	32	246,49	7,5	980,5	960,83488

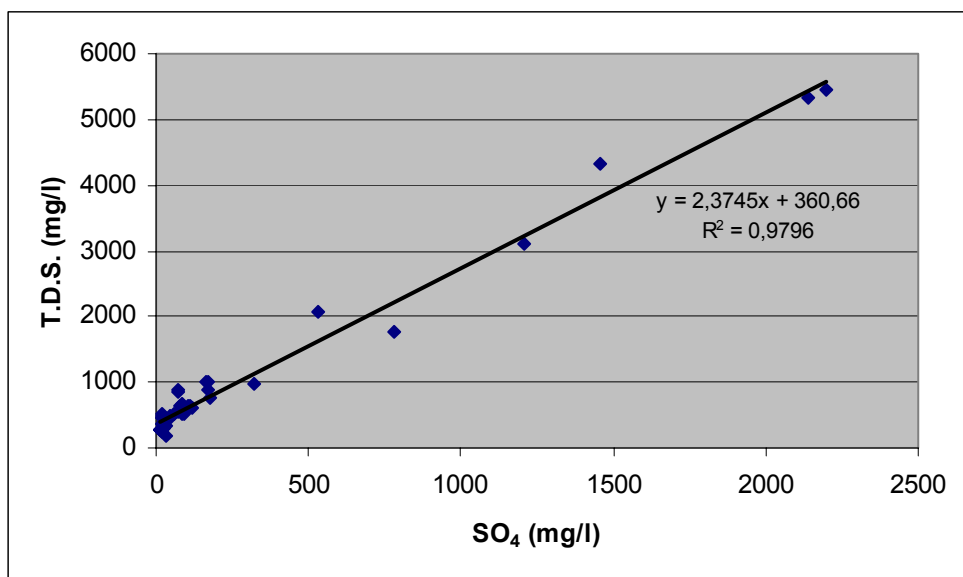
Πίνακας 9.3. Αποτελέσματα χημικών αναλύσεων εκφρασμένα σε meq/l.

Κωδ. Δείγματος	Na+	K+	Mg+2	Ca+2	Cl-	SO4-2	NO3-	HCO3-	T.D.S.	Revelle
Γ1	1,392	0,031	3,332	1,906	0,395	0,396	0,964	4,196	12,6	0,0941373
Γ10	0,526	0,077	1,135	2,116	0,395	0,333	0,165	2,672	7,4	0,1478293
Γ11	0,513	0,072	1,102	2,076	0,338	0,291	0,155	2,639	7,2	0,1280788
Γ12	0,544	0,074	1,086	2,016	0,451	0,416	0,092	2,59	7,3	0,1741313
Γ13	7,612	0,026	5,767	0,918	0,931	3,415	0,745	7,933	27,3	0,1173579
Γ14	7,699	0,031	5,923	1,008	0,987	3,498	0,758	8,048	28	0,1226392
Γ15	1,957	0,038	1,95	1,357	0,48	0,458	0,171	3,639	10,1	0,1319044
Γ16	2,088	0,046	2,057	1,397	0,592	0,521	0,19	3,737	10,6	0,1584158
Γ17	1,827	0,033	1,933	1,337	0,451	0,416	0,166	3,59	9,8	0,1256267
Γ18	71,77	0,09	9,486	8,942	33,284	45,807	0,092	2,131	171,6	15,618958
Γ19	70,465	0,079	8,614	8,383	32,324	44,557	0,119	2,196	166,7	14,71949
Γ1A	34,189	0,072	9,247	4,581	24,483	25,194	0,163	0,319	98,2	76,749216
Γ2	2,566	0,036	3,357	1,622	1,072	0,375	0,394	5,032	14,5	0,2130366
Γ2A	3,088	0,015	6,187	1,198	1,1	1,749	0,194	6,147	19,7	0,1789491
Γ3	1,957	0,056	5,471	2,106	1,495	1,603	0,289	5,311	18,3	0,2814912
Γ3A	6,786	0,046	3,274	0,559	0,592	3,706	0,263	5,524	20,8	0,1071687
Γ4	2,61	0,049	4,239	1,557	1,523	1,457	0,284	4,376	16,1	0,3480347
Γ5	4,263	0,043	2,954	1,697	2,059	2,499	0,219	3,901	17,6	0,5278134
Γ6	6,046	0,043	4,541	3,174	2,482	6,663	0,136	4,704	27,8	0,5276361
Γ7	8,09	0,028	2,707	0,968	2,849	1,499	0,074	7,392	23,6	0,3854167
Γ8	8,221	0,033	2,773	1,058	2,933	1,541	0,077	7,474	24,1	0,3924271
Γ9	15,659	0,054	6,491	3,433	9,139	16,241	0,127	2,524	53,7	3,6208399
K1	0,613	0,09	1,086	2,345	0,621	0,25	0,126	2,737	7,9	0,2268908
K2	0,574	0,082	0,963	2,255	0,536	0,208	0,115	2,655	7,4	0,2018832
K3	0,565	0,11	0,823	2,196	0,282	0,437	0,092	2,508	7	0,1124402
K4	0,739	0,118	1,07	2,295	0,508	0,521	0,102	2,655	8	0,1913371
K5	0,478	0,105	0,658	2,046	0,226	0,416	0,089	2,475	6,5	0,0913131
K6	0,783	0,123	1,316	2,395	0,649	0,562	0,119	2,819	8,8	0,2302235
M1	42,497	0,061	14,998	7,415	38,135	30,357	0,426	2,737	136,6	13,933138
M2	3,436	0,02	0,576	0,699	0,226	0,645	0,192	3,016	8,8	0,0749337
M4	5,35	0,008	1,201	0,778	1,495	1,957	0,242	3,147	14,2	0,4750556
M6	2,523	0,02	2,781	0,968	0,818	0,645	0,511	3,622	11,9	0,2258421
MΔ1	20,879	0,054	5,183	3,872	19,603	11,035	0,156	3,311	64,1	5,9205678
MΔ2	8,003	0,049	4,377	1,098	2,764	3,54	0,603	5,163	25,6	0,5353477
X1	2,61	0,051	3,949	2,595	0,508	2,332	0,871	4,639	17,6	0,1095064
X10	2,305	0,054	2,608	1,697	0,643	0,999	0,482	4,213	13	0,1526228
X11	2,74	0,041	2,781	1,123	0,649	1,02	0,376	4,163	12,9	0,1558972
X12	5,394	0,038	1,892	1,317	3,159	2,249	0,192	3,622	17,9	0,8721701
X14	3,697	0,033	2,97	1,058	0,282	1,749	0,319	4,295	14,4	0,0656577
X3	3,219	0,054	1,086	1,916	0,671	1,166	0,589	4,295	13	0,1562282
X4	2,262	0,041	2,188	2,016	0,536	0,375	0,618	4,393	12,4	0,1220123
X8	2,088	0,041	2,509	2,166	0,536	0,458	0,518	4,573	12,9	0,1172097
X9	2,044	0,051	2,814	1,173	0,663	0,708	0,405	3,803	11,7	0,1743361

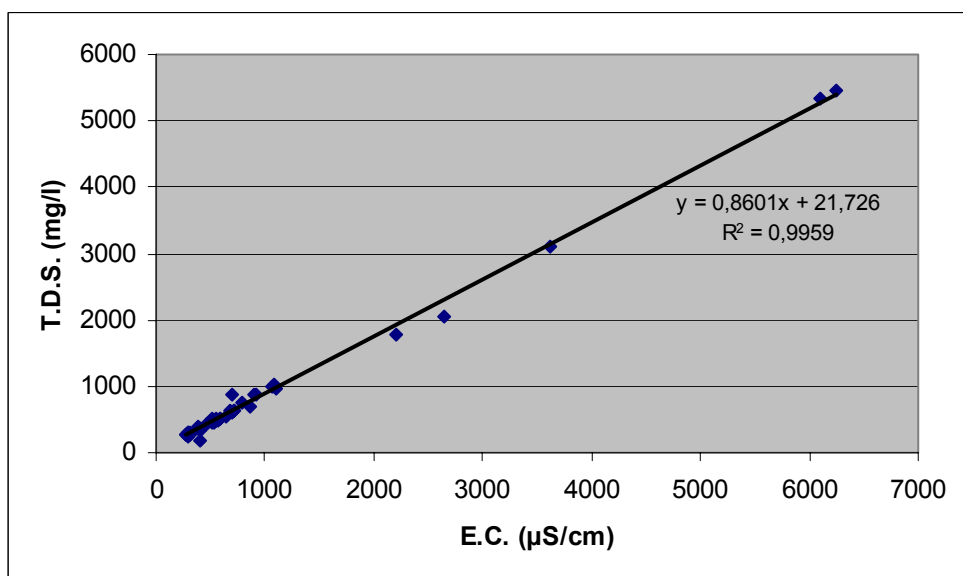
9.3. Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (T.D.S.) των νερών της περιοχής μελέτης.

Με βάση τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων, η πλειοψηφία των νερών της περιοχής ανήκει στην κατηγορία των «γλυκών νερών» τόσο σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Hem (1970) όσο και σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Davis and De Wiest (1966), αφού το Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (T.D.S.) στα περισσότερα δείγματα είναι μικρότερο των 1000 mg/l. Κατά τον Hem (1970), νερά με T.D.S. < 1000 mg/l χαρακτηρίζονται ως «γλυκά» ενώ με T.D.S. μεταξύ 3000 και 10000 mg/l χαρακτηρίζονται ως «μέτρια αλατούχα» νερά. Το ίδιο όριο των 1000 mg/l χρησιμοποιεί και ο Davis and De Wiest (1966), με τη διαφορά ότι ενώ θεωρεί ως «γλυκά» τα νερά με T.D.S. < 1000 mg/l, χαρακτηρίζει ως «μέτρια αλατούχα» τα νερά με T.D.S. μεταξύ 1000 και 10000 mg/l. Για την περιοχή μελέτης, τα δείγματα νερού που εμφανίζουν αυξημένες τιμές του T.D.S., μεγαλύτερες από 1000 mg/l, είναι το Γ14, Γ18, Γ19, Γ1Α, Γ9, Μ1 και ΜΔ1. Η μεγαλύτερη τιμή T.D.S. διαπιστώνεται στο δείγμα νερού Γ18 με τιμή 5463,7 mg/l. Τα νερά στις γεωτρήσεις με κωδικό Γ18, Γ19 και Μ1 μπορούν να χαρακτηριστούν ως «μέτρια αλατούχα». Στις άλλες περιπτώσεις η τιμή του T.D.S. κυμαίνεται από 1011,4 – 2059,4 mg/l. Αφού, λοιπόν, οι τιμές αυτές απέχουν λίγο από το όριο των 1000 mg/l, μπορούν και αυτά τα νερά να θεωρηθούν ως «γλυκά» με μικρή επιβάρυνση σε άλατα.

Τα διαγράμματα των Σχημάτων 9.2., και 9.3. παρουσιάζουν την συσχέτιση των SO_4^{2-} ιόντων και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με το T.D.S. Το T.D.S. παρουσιάζει πολύ υψηλή συσχέτιση με τα SO_4^{2-} ιόντα ($R^2=0,98$). Αντιθέτως πολύ μικρή συσχέτιση παρουσιάζει το T.D.S. με τα υπόλοιπα ιόντα. Φαίνεται δηλαδή ότι τα SO_4^{2-} ιόντα είναι αυτά που επηρεάζουν με την αύξηση της συγκέντρωσής τους την τιμή του T.D.S. Ακόμη, πάρα πολύ υψηλή συσχέτιση παρουσιάζει το T.D.S. με την ηλεκτρική αγωγιμότητα ($R^2= 0,98$) (Σούλιος, Γ., 2002).



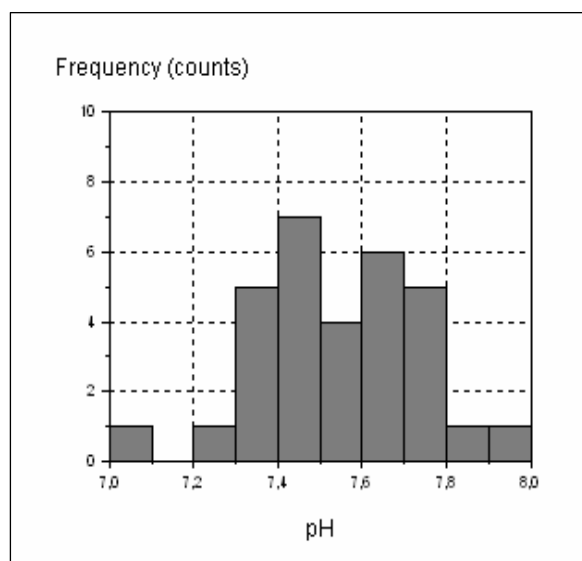
Σχήμα 9.2. Διάγραμμα συσχέτισης του T.D.S. (σε mg/l) με την συγκέντρωση των SO_4^{2-} (σε mg/l).



Σχήμα 9.3. Διάγραμμα συσχέτισης του T.D.S. (σε mg/l) με την ηλεκτρική αγωγιμότητα E.C. (σε μS/cm).

9.4. Το pH των νερών της περιοχής μελέτης.

Το pH των νερών της περιοχής μελέτης κυμαίνεται μεταξύ 7 και 8,33. Όταν το pH είναι μεγαλύτερο του 8,3 τότε τα HCO_3^- δίνουν ιόντα CO_3^{2-} , ενώ όταν το pH είναι μικρότερο του 8,3 κυριαρχούν τα HCO_3^- , ενώ τα CO_3^{2-} απουσιάζουν. Όλα τα δείγματα νερού της περιοχής έχουν $\text{pH} < 8,3$, εκτός από το δείγμα M2 του οποίου το pH είναι στο όριο σχεδόν 8,33. Περισσότερο αλκαλικά εμφανίζονται τα δείγματα Γ15, M2, M4, M6, MΔ1, MΔ2, X10, X11, X12, X14, X3 και X9 με $\text{pH} > 8,0$ και τα οποία είναι από το νότιο- νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Τα περισσότερα νερά έχουν pH μεταξύ 7 και 8 (ουδέτερα έως πολύ ελαφρά αλκαλικά). Στο Σχήμα 9.4. παρουσιάζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων για την τιμή του pH.



Σχήμα 9.4. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για την τιμή του pH.

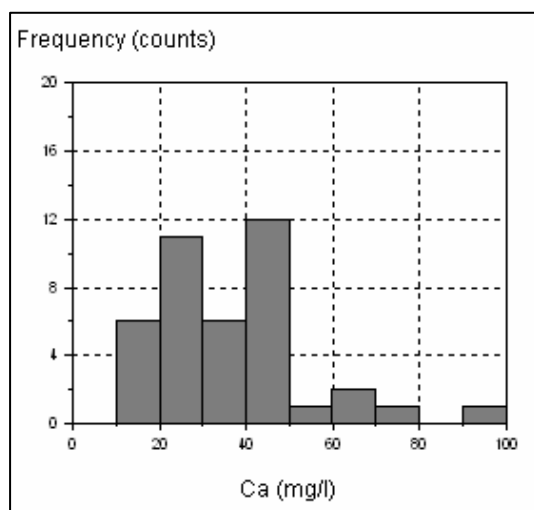
Ο κύριος παράγοντας, ο οποίος καθορίζει το χημισμό του νερού στα ιζηματογενή, γενικά, πετρώματα είναι η σειρά με την οποία το νερό διασχίζει τους διαφόρους γεωλογικούς σχηματισμούς κατά την κίνησή του (Καλλέργης, 1986). Το νερό κατά την κίνησή του μέσα σ' αυτούς μεταβάλλει το χημισμό του.

9.5. Ιστογράμματα συχνοτήτων για τις τιμές των κύριων ιόντων.

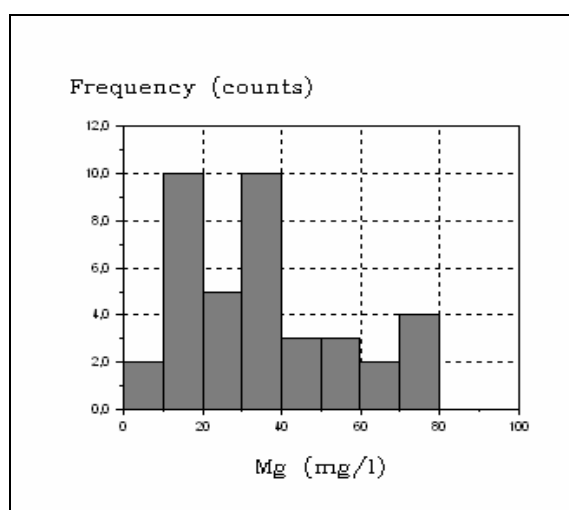
Στα παρακάτω σχήματα έχουμε τα Ιστογράμματα συχνοτήτων για τις περιεκτικότητες των κύριων ιόντων. Στον άξονα τον y είναι ο αριθμός των δειγμάτων για τα οποία παρατηρείται η αντίστοιχη συγκέντρωση. Από τα ιστογράμματα παρατηρούμε τα εξής:

Οι συγκεντρώσεις του Ca^{+2} για τα περισσότερα δείγματα της περιοχής κυμαίνονται από 40-50 mg/l (12 δείγματα) και από 20-30 mg/l (11 δείγματα) (Σχήμα 9.5.).

Οι συγκεντρώσεις του Mg^{+2} κυμαίνονται στα περισσότερα δείγματα από 10-20 mg/l (10 δείγματα) και από 30-40 mg/l (10 δείγματα) (Σχήμα 9.6.).



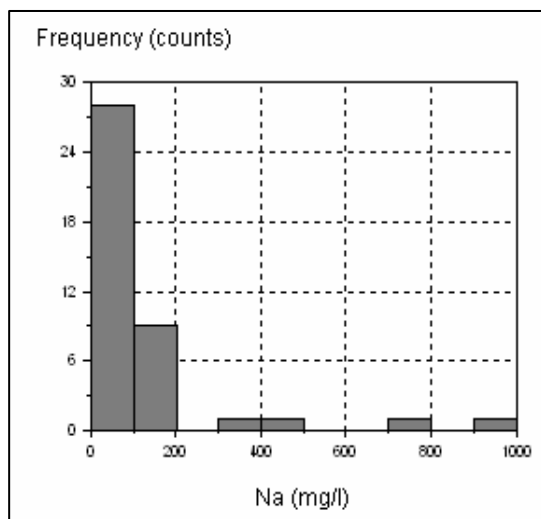
Σχήμα 9.5. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για την περιεκτικότητα Ca^{+2} .



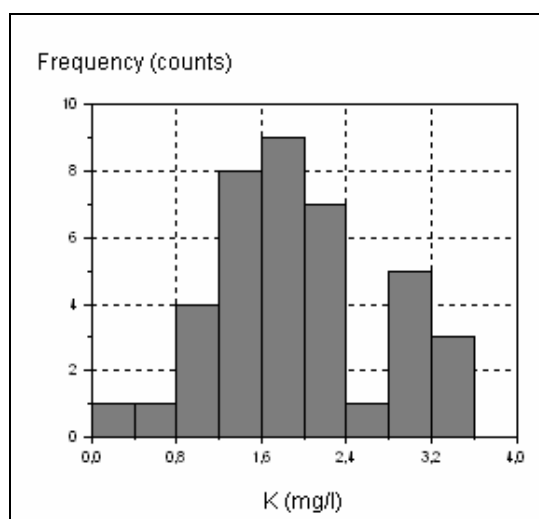
Σχήμα 9.6. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για την περιεκτικότητα Mg^{+2} .

Η πλειοψηφία των δειγμάτων (28 δείγματα) παρουσιάζουν συγκεντρώσεις Na^+ από 0-100 mg/l, ενώ άλλα 9 δείγματα από 100-200 mg/l (Σχήμα 9.7.).

Η συγκέντρωση του K^+ για τα περισσότερα δείγματα κυμαίνεται από 1,2-2,4 mg/l (Σχήμα 9.8.).



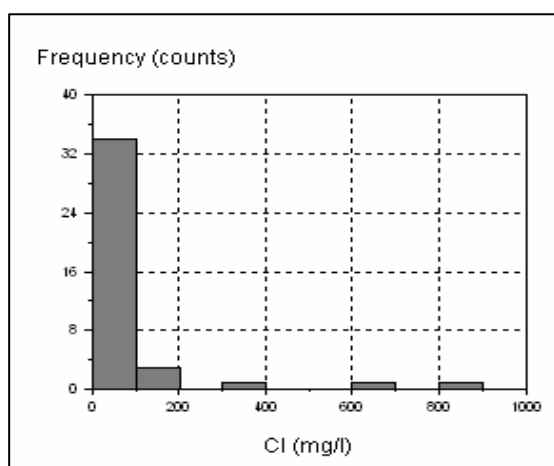
Σχήμα 9.7. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για την περιεκτικότητα Na^+ .



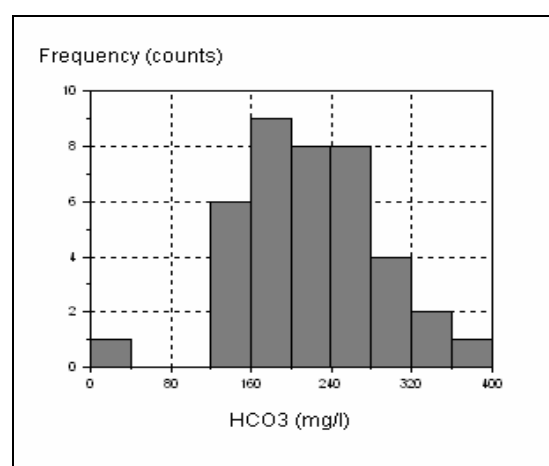
Σχήμα 9.8. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για την περιεκτικότητα K^+ .

Η συγκέντρωση του Cl^- για την πλειονηφία των δειγμάτων (34 δείγματα) κυμαίνεται μεταξύ 0-100 mg/l (Σχήμα 9.9.).

Η συγκέντρωση των HCO_3^- για τα περισσότερα δείγματα κυμαίνεται από 160-280 mg/l. Παρατηρούμε δηλαδή μια διασπορά των τιμών των HCO_3^- ιόντων (Σχήμα 9.10.).



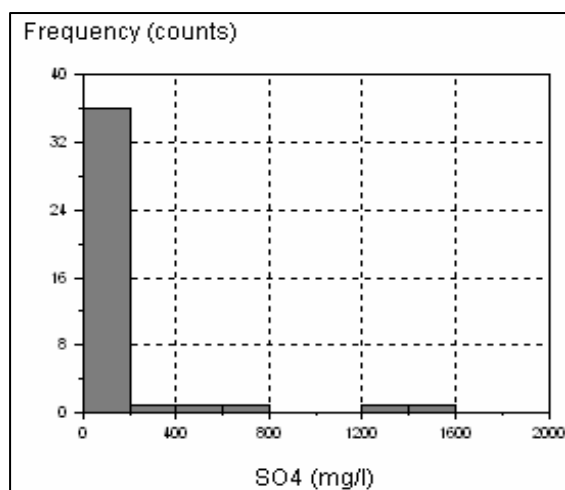
Σχήμα 9.9. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για την περιεκτικότητα Cl^- .



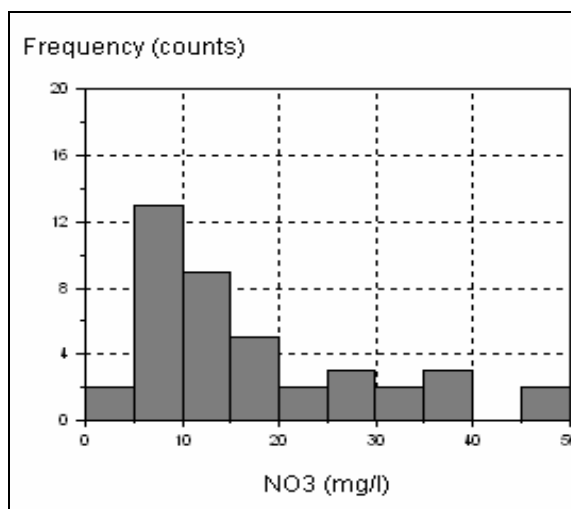
Σχήμα 9.10. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για την περιεκτικότητα HCO_3^- .

Η συγκέντρωση των SO_4^{2-} σε 36 δείγματα κυμαίνεται από 0-200 mg/l (Σχήμα 9.11.).

Όσον αφορά τα NO_3^- παρατηρείται μια διασπορά τιμών. Η συγκέντρωση των νιτρικών ιόντων για 13 δείγματα κυμαίνεται από 5-10 mg/l, ενώ για 9 δείγματα από 10-15 mg/l (Σχήμα 9.12.).



Σχήμα 9.11. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για την περιεκτικότητα SO_4^{2-} .



Σχήμα 9.12. Ιστόγραμμα συχνοτήτων για την περιεκτικότητα NO_3^- .

9.6. Ιοντικοί λόγοι.

Οι λόγοι των συγκεντρώσεων (εκφρασμένων σε meq/l) διαφόρων ιόντων μέσα στο νερό είναι ένα πολύ χρήσιμο στοιχείο για τον καθορισμό της προέλευσης του νερού (Λαμπράκης, 1991). Στον παρακάτω Πίνακα 9.4. δίνονται οι τιμές των λόγων Na^+/K^+ , $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$, $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$, $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ και Na^+/Cl^- . Οι τιμές των λόγων Na^+/K^+ , Na^+/Cl^- είναι οι ίδιες είτε τα ιόντα εκφράζονται σε meq/l είτε σε mmol/l, αφού πρόκειται για μονοσθενή ιόντα. Το ίδιο ισχύει και για τον λόγο $\text{Mg}^{+2}/\text{Ca}^{+2}$, αφού και τα δύο ιόντα είναι δισθενή.

Πίνακας 9.4. Τιμές των ιοντικών λόγων για τα νερά της περιοχής μελέτης.

Κωδ. Δείγματος	Na/K	Mg/Ca	(Ca+Mg)/(K+Na)	Cl/SO ₄	Na/Cl
Γ1	44,9032	1,7482	3,681	0,9975	3,5241
Γ10	6,8312	0,5364	5,3914	1,1862	1,3316
Γ11	7,125	0,5308	5,4325	1,1615	1,5178
Γ12	7,3514	0,5387	5,0194	1,0841	1,2062
Γ13	292,7692	6,2821	0,8752	0,2726	8,1762
Γ14	248,3548	5,876	0,8966	0,2822	7,8004
Γ15	51,5	1,437	1,6576	1,048	4,0771
Γ16	45,3913	1,4724	1,6186	1,1363	3,527
Γ17	55,3636	1,4458	1,7581	1,0841	4,051
Γ18	797,4444	1,0608	0,2564	0,7266	2,1563
Γ19	891,962	1,0276	0,2409	0,7255	2,18
Γ1A	474,8472	2,0186	0,4036	0,9718	1,396
Γ2	71,2778	2,0697	1,9135	2,8587	2,394
Γ2A	205,8667	5,1644	2,38	0,6289	2,807
Γ3	34,9464	2,5978	3,764	0,9326	1,309
Γ3A	147,5217	5,8569	0,561	0,1597	11,456
Γ4	53,2653	2,7225	2,1798	1,0453	1,713
Γ5	99,1395	1,7407	1,0801	0,8239	2,07
Γ6	140,6047	1,4307	1,267	0,3725	2,436
Γ7	288,9286	2,7965	0,4527	1,9006	2,84
Γ8	249,1212	2,621	0,4641	1,9033	2,802
Γ9	289,9815	1,8908	0,6316	0,5627	1,713
K1	6,8111	0,4631	4,8805	2,484	0,988
K2	7	0,4271	4,9055	2,5769	1,071
K3	5,1364	0,3748	4,4726	0,6453	2,005
K4	6,2627	0,4662	3,9265	0,975	1,456
K5	4,5524	0,3216	4,6381	0,5433	2,12
K6	6,3659	0,5495	4,096	1,1548	1,207
M1	696,6721	2,0227	0,5266	1,2562	1,114
M2	171,8	0,824	0,3689	0,3504	15,228
M4	668,75	1,5437	0,3694	0,7639	3,579
M6	126,15	2,8729	1,4742	1,2682	3,084
MΔ1	386,6481	1,3386	0,4326	1,7764	1,065
MΔ2	163,3265	3,9863	0,68	0,7808	2,895
X1	51,1765	1,5218	2,4592	0,2178	5,14
X10	42,6852	1,5368	1,8249	0,6436	3,585
X11	66,8293	2,4764	1,4038	0,6363	4,224
X12	141,9474	1,4366	0,5908	1,4046	1,707
X14	112,0303	2,8072	1,0799	0,1612	13,108
X3	59,6111	0,5668	0,9172	0,5755	4,795
X4	55,1707	1,0853	1,8254	1,4293	4,22
X8	50,9268	1,1584	2,1959	1,1703	3,896
X9	40,0784	2,399	1,9031	0,9364	3,084

➤ Λόγος rNa^+/rK^+ .

Ο λόγος rNa^+/rK^+ μας δίνει πληροφορίες για την τροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων. Εάν οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 15-25 τότε το υδροφόρο στρώμα χαρακτηρίζεται από συνεχή τροφοδοσία. Στα κατάντη τμήματα των υδροφόρων παίρνει τιμές από 50-70 λόγω προσρόφησης Na^+ . Όταν οι τιμές του λόγου είναι μικρότερες του 10 τότε πρόκειται για νερό

βρόχινης προέλευσης, ενώ όταν παίρνει τιμές ίσες περίπου με 47 τότε υποδηλώνει πως το νερό είναι θαλάσσιας προέλευσης (Λαμπράκης, 1991, Καλλέργης, 1986).

Στην περιοχή μελέτης ο λόγος rNa^+/rK^+ παρουσιάζει πολύ μεγάλο εύρος τιμών, μεταξύ 4,552 και 797,44. Τα δείγματα Γ10, Γ11, Γ12, Κ1, Κ2, Κ3, Κ4, Κ5, Κ6 έχουν τιμές μικρότερες του 10, δηλαδή το νερό είναι βρόχινης προέλευσης. Στα δείγματα ΜΔ1, Μ1, Γ9, Γ1Α, Γ19, Γ18, ο λόγος παίρνει πολύ υψηλές τιμές. Σε συνδυασμό με τις υψηλές τιμές του συντελεστή Revelle στα δείγματα αυτά, μπορούμε να πούμε ότι πρόκειται για παλιές θαμμένες αλμύρες εγκλωβισμένες στις λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις. Οι αυξημένες τιμές του λόγου στα υπόλοιπα δείγματα αποτελούν ένδειξη προσρόφησης Na^+ καθώς και από την επίδραση νατριούχων λιπασμάτων.

➤ Λόγος rMg^{+2}/rCa^{+2} .

Ο λόγος rMg^{+2}/rCa^{+2} μας δίνει πληροφορίες για την προέλευση του υπόγειου νερού. Όταν ο λόγος λαμβάνει τιμές μεταξύ 0,5 και 0,7 αυτό δηλώνει την παρουσία ασβεστολιθικών υδροφόρων, ενώ για τιμές 0,7-0,9 υποδηλώνεται η παρουσία δολομιτικών υδροφόρων. Τέλος όταν ο λόγος rMg^{+2}/rCa^{+2} είναι μεγαλύτερος από 0,9 αυτό σημαίνει την ύπαρξη υδροφόρων σε πυριτικά πετρώματα (Καλλέργης, 1986, Λαμπράκης, 1994). Η πλειονηφία των δειγμάτων, στην περιοχή μελέτης, παρουσιάζει τιμές μεγαλύτερες του 0,9, γεγονός που υποδηλώνει την κυκλοφορία του νερού σε ιζήματα πλούσια σε Mg. Το Mg στην περιοχή μελέτης προέρχεται από την αποσάθρωση και διάβρωση των οφειολιθικών σχηματισμών που συναντώνται ανατολικά της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Τα δείγματα Γ10, Γ11, Γ12, Κ6, Χ3 παρουσιάζουν τιμές του λόγου από 0,5-0,7 και συνεπώς τα νερά αυτά προέρχονται από ιζήματα πλούσια σε Ca^{+2} ή με ασβεστιτική ύλη. Τιμές μικρότερες του 0,5 εμφανίζουν τα δείγματα Κ1, Κ2, Κ3, Κ4 και Κ5 και φαίνεται να προέρχονται από πλούσιους σε ορυκτά του Ca^{+2} υδροφόρους.

➤ Λόγος $r(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/r(\text{Na}^{+} + \text{K}^{+})$.

Στις περιοχές εμπλουτισμού των υδροφόρων ο λόγος αυτός παρουσιάζει τιμές υψηλότερες της μονάδας, ενώ στις περιοχές χαμηλού εμπλουτισμού ο λόγος αυτός λαμβάνει τιμή μικρότερη της μονάδας. Στην περιοχή μελέτης η πλειοψηφία των δειγμάτων έχει λόγο μεγαλύτερο της μονάδας. Οι μεγαλύτερες τιμές παρουσιάζονται στο βόρειο και ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, όπου στις περιοχές αυτές οι υδροφόροι εμπλουτίζονται από τα νερά του αρδευτικού δικτύου του Πηνειού ποταμού, ενώ οι μικρότερες τιμές εμφανίζονται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής.

➤ Λόγος $r\text{Cl}^{-}/r\text{SO}_4^{-2}$.

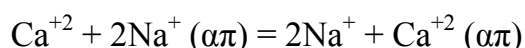
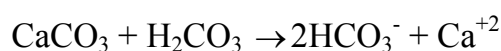
Στο θαλασσινό νερό ο λόγος $r\text{Cl}^{-}/r\text{SO}_4^{-2}$ λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη του 10, ενώ όταν είναι μεγαλύτερη του 5, τότε το νερό χαρακτηρίζεται ως χλωριούχο. Για τιμές του λόγου μεταξύ 1 και 5 το νερό χαρακτηρίζεται ως χλωριοθειϊκό ενώ για τιμές από 0,2 μέχρι 1 χαρακτηρίζεται ως θεικό-χλωριούχο. Τέλος, για τιμές μικρότερες του 0,2 το νερό είναι θεικό (Λαμπράκης, 1994). Στην περιοχή μελέτης μόνο τα δείγματα X14 και Γ3Α είναι «θεικά» με τιμές του λόγου μικρότερες του 0,2. Τα δείγματα Γ10, Γ11, Γ12, Γ15, Γ16, Γ17, Γ2, Γ4, Γ7, Γ8, Κ1, Κ2, Κ6, Μ1, Μ6, ΜΔ1, Χ12, Χ4 και Χ8 θεωρούνται ως «χλωριοθειικά», ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηρίζονται ως «θεικοχλωριούχα», αφού οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0,2 και 1,0.

➤ Λόγος $r\text{Na}^{+}/r\text{Cl}^{-}$.

Στα κανονικά νερά η ιοντική σχέση $r\text{Na}^{+}/r\text{Cl}^{-}$ είναι $0,876 \pm 10\%$. Όταν η σχέση $r\text{Na}^{+}/r\text{Cl}^{-} > 1,0$ τότε θεωρείται ότι το νερό προέρχεται από υδροφόρους αλκαλικών μαγματικών ή μεταμορφωμένων πετρωμάτων (ιοντική ανταλλαγή Ca^{+2} και Mg^{+2} με Na^{+}). Στην περιοχή μελέτης όλα τα δείγματα παρουσιάζουν τιμές μεγαλύτερες του 1. Όμως, οι υψηλές τιμές του συντελεστή Revelle στα δείγματα Γ18, Γ19, Γ1Α, Μ1, ΜΔ1, αποτελούν ένδειξη κάποιας επίδρασης από παλιές εγκλωβισμένες αλμύρες που βρίσκονται βαθιά στις λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις.

9.7. Προέλευση των ιόντων στα νερά της περιοχής μελέτης.

Τα ιζήματα, τα οποία φιλοξενούν μετεωρικά νερά, αποτελούνται κυρίως από αργιλικά ορυκτά, (CaCO_3), αστρίους (KAlSi_3O_8 , $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) και μαρμαρυγίες ($\text{KAl}_2(\text{OH})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$ – $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}$). Έτσι, οι χημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στα ιζήματα είναι (Καλλέργης, 1986): (α) η υδρόλυση των ανθρακικών ορυκτών, που επηρεάζει την ιοντική συγκέντρωση στο νερό και (β) η υδρόλυση των αργιλικών ορυκτών, αστρίων και μαρμαρυγιών. Έτσι, λοιπόν, τα νερά της περιοχής μελέτης με τις αυξημένες συγκεντρώσεις ιόντων Na^+ δημιουργούνται από τη συνδυασμένη δράση της υδρόλυσης ασβεστίτη και της ιοντικής ανταλλαγής Ca^{+2} με Na^+ , κατά τις αντιδράσεις (Freeze and Cheny, 1979, Καλλέργης, 1986):



όπου (απ) σημαίνει κατιόντα απορροφημένα από αργίλους.

Όταν το νερό κυκλοφορεί στα ιζήματα είναι σύνηθες να είναι (Λαμπράκης, 1994):

$$\text{Cl}^- (\text{meq/l}) \approx \text{Na}^+ (\text{meq/l}) + \text{K}^+ (\text{meq/l})$$

Όταν η ισορροπία διαταράσσεται με την ανταλλαγή των γεωαλκαλίων (Ca^{+2} , Mg^{+2}) από αλκάλια (Na^+ , K^+) που προέρχονται από τα ιζηματογενή πετρώματα, τότε το άθροισμα ισοδυναμίας ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) θα γίνει μεγαλύτερο του Cl^- (δηλαδή $\text{Na}^+ + \text{K}^+ > \text{Cl}^-$). Τότε ο δείκτης ιοντοανταλλαγής

$$I_{\text{BA}} = \frac{\text{Cl}^- - (\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\text{SO}_4^{-2} + \text{HCO}_3^- + \text{NO}_3^-} \text{ γίνεται αρνητικός.}$$

Σε όλα τα δείγματα της περιοχής μελέτης ο δείκτης ιοντοανταλλαγής I_{BA} είναι αρνητικός. Συνεπώς, η αυξημένη συγκέντρωση ιόντων Na^+ μπορεί να αποδοθεί σε φαινόμενα ιοντοανταλλαγής. Προς την κατεύθυνση αυτή συνηγορεί και η μικρή συγκέντρωση ιόντων K^+ στα νερά αυτά παρά την αυξημένη περιεκτικότητά τους σε Na^+ .

Ως πηγές προέλευσης του K^+ μπορεί να θεωρηθούν καλιούχοι άστριοι, μερικοί μαρμαρυγίες και αργιλικά ορυκτά. Η συνηθισμένη συγκέντρωση του K^+ σε υπόγεια νερά δεν υπερβαίνει τα 10 mg/l (Καλλέργης, 1986). Τα νερά της περιοχής μελέτης περιέχουν 0,3-4,8 mg/l K^+ και συνεπώς βρίσκονται μέσα στα φυσιολογικά πλαίσια των κοινών υπόγειων νερών.

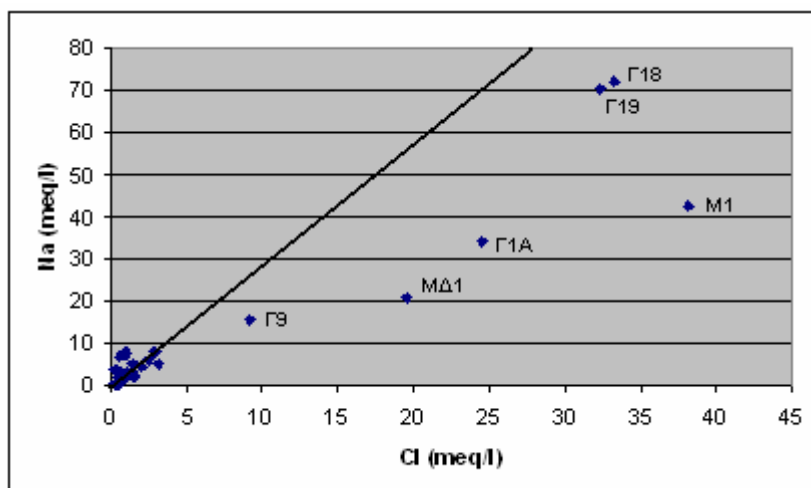
Επίσης, τα νερά είναι εμπλουτισμένα σε ιόντα Ca^{+2} και Mg^{+2} , εξαιτίας της προέλευσής τους από τους αλλουβιακούς υδροφόρους, οι οποίοι συνίστανται από άμμους, ψαμμίτες και κροκάλες. Η αυξημένη παρουσία ιόντων Ca^{+2} και Mg^{+2} μπορεί να αποδοθεί στη διαλυτοποίηση ανθρακικών ορυκτών, τα οποία αποτελούν κυρίως το συνδετικό υλικό των ιζηματογενών σχηματισμών (Τσιραμπίδης, 1996).

Οι συγκεντρώσεις των HCO_3^- , των οποίων η πηγή προέλευσης όπως είναι γνωστό είναι οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες, κυμαίνονται μεταξύ 130 και 491 mg/l. Η χαμηλότερη τιμή εμφανίζεται στο δείγμα Γ18, ενώ η υψηλότερη στο Γ14.

Οι συγκεντρώσεις των ανιόντων Cl^- στην περιοχή κυμαίνονται μεταξύ 8-1352 mg/l. Για τον εντοπισμό της προέλευσης των χλωριόντων χρησιμοποιήθηκε ο χημικός δείκτης Na^+/Cl^- .

Όπως αναφέραμε, όταν το νερό κυκλοφορεί στα ιζήματα ισχύει: $rCl^- = rNa^+ + rK^+$. Απόκλιση από αυτή τη σχέση αποτελεί ένδειξη ιοντοανταλλαγής. Η σχέση rNa^+/rCl^- στο θαλασσινό νερό είναι $0,86 \pm 10\%$. Στο Σχήμα 9.13. παρουσιάζεται το διάγραμμα $rNa^+ - rCl^-$ καθώς και η τυπική ευθεία που αντιστοιχεί στην αναλογία του θαλασσινού νερού.

Οι υψηλές περιεκτικότητες σε Cl^- των δειγμάτων Γ18, Γ19, Γ1Α, Γ9, Μ1 και ΜΔ1 οφείλονται στο γεγονός ότι οι γεωτρήσεις, από τις οποίες συλλέχθηκαν τα δείγματα, φτάνουν σε βάθος >200m, όπου εκεί βρίσκονται βαθιά απολιθωμένα-αλμυρά νερά σε λιμνοθαλάσσια ιζήματα.



Σχήμα 9.13. Διάγραμμα περιεκτικότητας ιόντων Na^+ και Cl^- .

Τα σημεία αυτά που βρίσκονται κάτω από την τυπική ευθεία υποδηλώνουν έλλειμμα Na^+ , λόγω ιοντικής ανταλλαγής (το Na^+ αντικαθιστά το Ca^{+2} στο κρυσταλλικό πλέγμα των ορυκτών) που έχει συμβεί με το πέρασμα των χρόνων. Λόγω αυτής της ιοντικής ανταλλαγής πιθανόν να οφείλονται και οι υψηλές περιεκτικότητες σε Ca^{+2} στις περιοχές όπου βρίσκονται οι γεωτρήσεις αυτές (βλέπε χάρτη Σχήματος 9.27.)

Τα υπόλοιπα σημεία του διαγράμματος βρίσκονται κοντά στην αρχή των αξόνων, πλησίον της ευθείας και δηλώνουν γλυκά νερά.

Όσον αφορά τις υψηλές συγκεντρώσεις των SO_4^{-2} σε πολλά δείγματα, ο Λαμπράκης (1994) αναφέρει ότι νερά που έρχονται σε επαφή με αργιλικά πετρώματα – αργιλομαργαϊκά ιζήματα, όπως αυτά της περιοχής μελέτης, είναι περισσότερο φορτισμένα σε SO_4^{-2} και Cl^- . Επίσης υψηλές τιμές είναι δυνατόν να οφείλονται και στην χρήση λιπασμάτων.

Τα νιτρικά ιόντα (NO_3^-) αποτελούν δείκτες ανθρώπινης δραστηριότητας και προέρχονται τόσο από την ατμόσφαιρα όσο και από λαχανικά, υπολείμματα χλωρίδας, ζωικά περιττώματα (Καλλέργης, 1986) και κυρίως από την χρήση λιπασμάτων. Στην περιοχή μελέτης οι υψηλότερες τιμές νιτρικών εμφανίζονται στα δείγματα Γ1, Γ13, Γ14, Μ6, ΜΔ2 και Χ4.

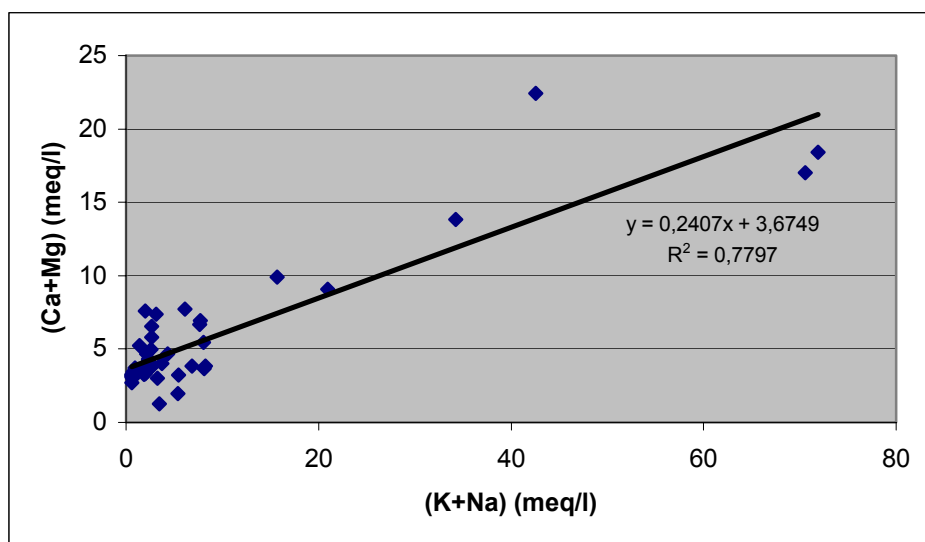
Στο σημείο αυτό θα πρέπει να υπογραμμισθεί η διαφορά χημισμού σε νερά γεωτρήσεων που μπορεί μεν να βρίσκονται σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, όμως το βάθος της γεώτρησης και η κατασκευή της σωλήνωσης διαφέρει, με

αποτέλεσμα να τροφοδοτούνται από διαφορετικούς υδροφόρους. Αυτό φαίνεται στις γεωτρήσεις Γ1Α και Γ2Α καθώς και στις ΜΔ1 και ΜΔ2. Λόγω του μεγάλου βάθους των γεωτρήσεων Γ1Α και ΜΔ1 πιθανότατα αυτές να εντοπίζουν παλιά αλμυρά νερά σε θαλάσσια ιζήματα με αποτέλεσμα τις αυξημένες συγκεντρώσεις ιόντων Cl^- σε αυτές σε σχέση με τις γεωτρήσεις Γ2Α και ΜΔ2.

9.8. Συσχετίσεις μεταξύ των ιόντων.

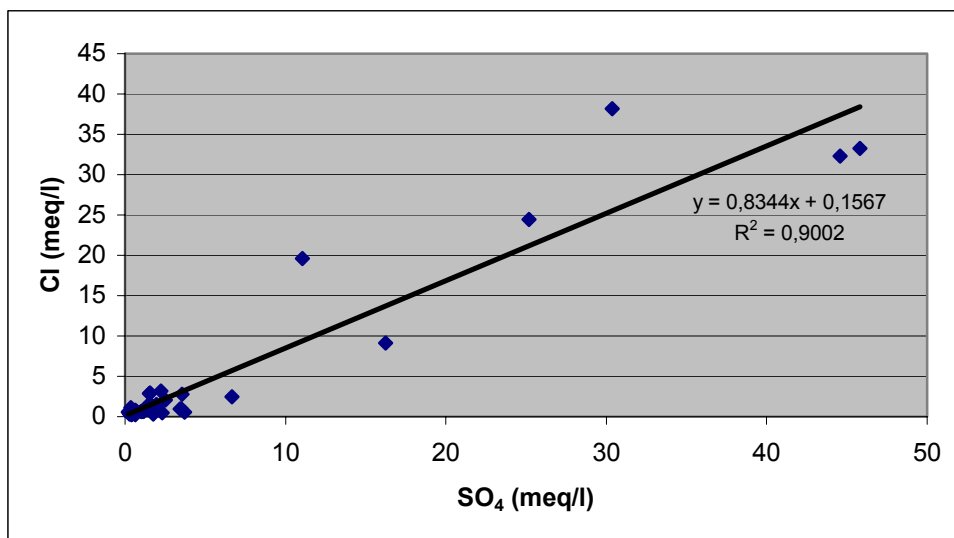
Για τον προσδιορισμό των όποιων σχέσεων μεταξύ των ιόντων κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα συσχέτισης αυτών, ο πίνακας των συντελεστών συσχέτισης (correlation coefficient matrix) των αρχικών μεταβλητών, καθώς υπολογίστηκε και η γραμμική συσχέτιση της μορφής $y=ax+\beta$ μεταξύ των κύριων ιόντων.

Στο Σχήμα 9.14. έχουμε το διάγραμμα συσχέτισης $(\text{Ca}^+ + \text{Mg}^{+2})-(\text{K}^+ + \text{Na}^+)$. Η συσχέτιση μεταξύ του αθροίσματος των ιόντων του Ca^+ και του Mg^{+2} σε σχέση με το άθροισμα των ιόντων Na^+ και K^+ είναι αρκετά καλή ($R^2=0,9$).



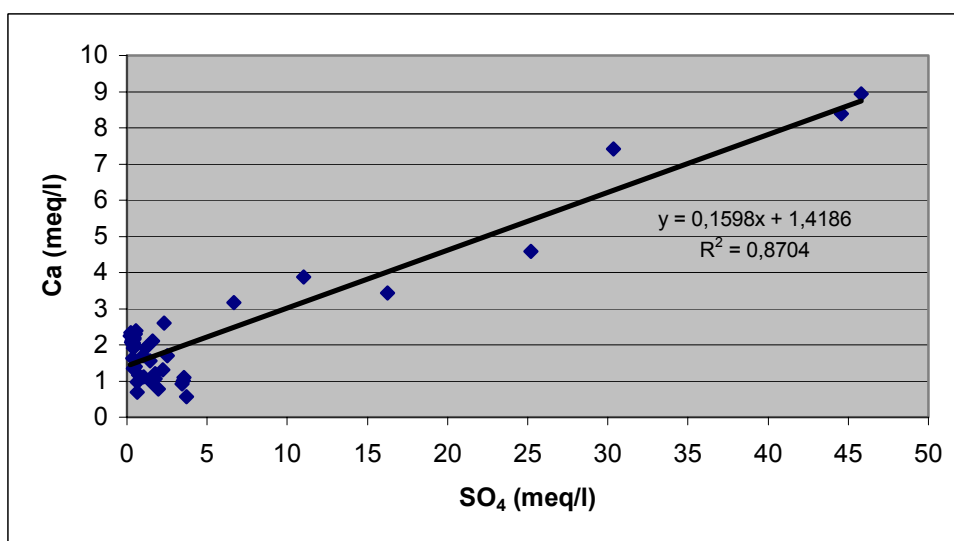
Σχήμα 9.14. Διάγραμμα συσχέτισης $(\text{Ca}^+ + \text{Mg}^{+2})-(\text{K}^+ + \text{Na}^+)$.

Στο Σχήμα 9.15. έχουμε το διάγραμμα συσχέτισης $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{-2}$. Από το διάγραμμα προκύπτει ότι υπάρχει υψηλή συσχέτιση μεταξύ των ιόντων Cl^- και των SO_4^{-2} ιόντων ($R^2=0,9$).

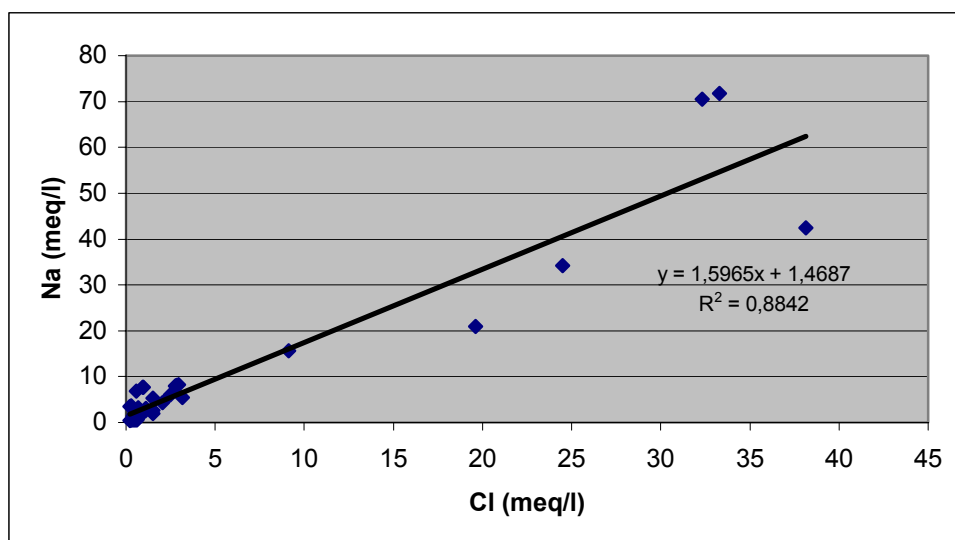


Σχήμα 9.15. Διάγραμμα συσχέτισης Cl^- - SO_4^{2-} .

Υψηλές συσχετίσεις παρουσιάζονται ακόμη μεταξύ των ιόντων Ca^{+2} και των SO_4^{2-} ιόντων ($R^2 = 0,87$) καθώς και μεταξύ των ιόντων Na^+ και Cl^- ($R^2 = 0,88$), όπως φαίνεται και στα αντίστοιχα διαγράμματα συσχέτισης των Σχημάτων 9.16. και 9.17.

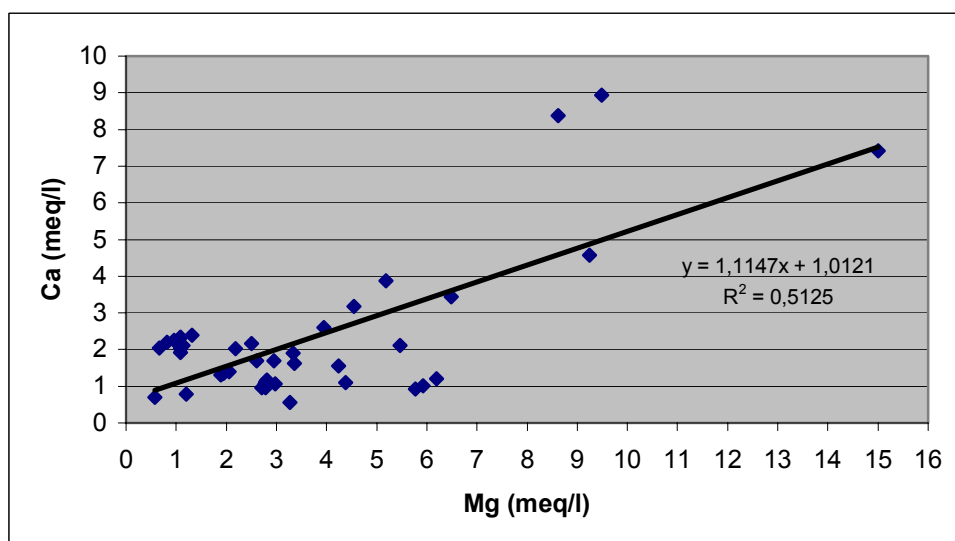


Σχήμα 9.16. Διάγραμμα συσχέτισης Ca^{+2} - SO_4^{2-} .



Σχήμα 9.17. Διάγραμμα συσχέτισης Na^+ - Cl^- .

Επίσης, καλή συσχέτιση ($R^2 = 0,51$) παρατηρείται μεταξύ των ιόντων Ca^{+2} και Mg^{+2} , όπως φαίνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα συσχέτισης του Σχήματος 9.18.



Σχήμα 9.18. Διάγραμμα συσχέτισης Ca^{+2} - Mg^{+2} .

Στον παρακάτω Πίνακα 9.5. δίνονται οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των κύριων ιόντων, του pH και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, για τα δείγματα της περιοχής μελέτης.

Πίνακας 9.5. Πίνακας συντελεστών συσχέτισης για τα δείγματα της περιοχής μελέτης.

	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	pH	Cond
Ca ⁺²	1,0	0,716	0,908	0,433	0,919	0,933	-0,485	-0,195	-0,424	0,792
Mg ⁺²		1,0	0,765	-0,057	0,841	0,787	-0,012	0,128	-0,237	0,604
Na ⁺			1,0	0,189	0,94	0,989	-0,295	-0,166	-0,206	0,916
K ⁺				1,0	0,214	0,228	-0,58	-0,411	-0,561	0,167
Cl ⁻					1,0	0,949	-0,379	-0,173	-0,209	0,784
SO ₄ ⁻²						1,0	-0,36	-0,175	-0,261	0,9
HCO ₃ ⁻							1,0	0,43	0,153	-0,255
NO ₃ ⁻								1,0	0,16	-0,196
pH									1,0	-0,199
Cond										1,0

Από τον Πίνακα 9.5. βλέπουμε ότι υψηλές τιμές του συντελεστή συσχέτισης παρατηρείται μεταξύ των ιόντων Ca⁺² - Mg⁺² (r= 0,71), Ca⁺²- Na⁺ (r=0,908), Ca⁺²-Cl⁻ (r=0,92), Ca⁺²-SO₄⁻² (r=0,93), Mg⁺²-Na⁺ (r=0,77), Mg⁺²-Cl⁻ (r=0,84), Mg⁺²-SO₄⁻² (r=0,8), Na⁺-Cl⁻ (r=0,94), Na⁺-SO₄⁻² (r=0,99), Cl⁻-SO₄⁻² (r=0,95). Τα HCO₃⁻ και τα NO₃⁻ ιόντα δεν συσχετίζονται με κανένα ιόν. Μάλιστα οι συντελεστές συσχέτισης που προέκυψαν είναι αρνητικοί. Το pH επίσης δεν συσχετίζεται με κανένα ιόν, ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση με το Ca⁺² (r=0,79), το Na⁺ (r=0,92), το Cl⁻ (r=0,78) και τα SO₄⁻² (r=0,9).

Τέλος, στον Πίνακα 9.6. δίνονται οι γραμμικές συσχετίσεις, μεταξύ των κύριων ιόντων, καθώς και αυτών με την ηλεκτρική αγωγιμότητα, με την μορφή $y = ax + \beta$. Οι κλίσεις των ευθειών παλινδρόμησης στις γραμμικές συσχετίσεις των NO₃⁻ και HCO₃⁻ ιόντων με τα άλλα ιόντα, είναι αρνητικές.

Πίνακας 9.6. Γραμμικές συσχετίσεις της μορφής $y = ax + \beta$ για τα δείγματα της περιοχής μελέτης.

$\text{Ca}^{+2} = 0,676 \text{ Mg}^{+2} + 12,3$	$\text{Na}^{+} = -7,8 \cdot 10^{-2} \text{ HCO}_3^{-} + 258,12$
$\text{Ca}^{+2} = 9,08 \text{ Na}^{+} - 210,72$	$\text{Na}^{+} = -6,4 \cdot 10^{-3} \text{ NO}_3^{-} + 19,99$
$\text{Ca}^{+2} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{+} + 1,55$	$\text{Na}^{+} = 3,25 \text{ E.C.} + 333,68$
$\text{Ca}^{+2} = 8,35 \text{ Cl}^{-} - 216,84$	$\text{K}^{+} = 68,06 \text{ Cl}^{-} + 16,6$
$\text{Ca}^{+2} = 13,06 \text{ SO}_4^{-2} - 338,69$	$\text{K}^{+} = 111,53 \text{ SO}_4^{-2} + 15,75$
$\text{Ca}^{+2} = -1,29 \text{ HCO}_3^{-} + 300,72$	$\text{K}^{+} = -53,9 \text{ HCO}_3^{-} + 355,94$
$\text{Ca}^{+2} = -7,6 \cdot 10^{-2} \text{ NO}_3^{-} + 22,12$	$\text{K}^{+} = -5,55 \cdot 10^{-2} \text{ NO}_3^{-} + 30,4$
$\text{Ca}^{+2} = 28,07 \text{ E.C.} - 286,25$	$\text{K}^{+} = 206,3 \text{ E.C.} + 546,35$
$\text{Mg}^{+2} = 8,1 \text{ Na}^{+} - 147,7$	$\text{Cl}^{-} = 1,46 \text{ SO}_4^{-2} + 16,89$
$\text{Mg}^{+2} = -1,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{+} + 2,18$	$\text{Cl}^{-} = -0,111 \text{ HCO}_3^{-} + 260,25$
$\text{Mg}^{+2} = 8,09 \text{ Cl}^{-} - 186,33$	$\text{Cl}^{-} = -7,4 \cdot 10^{-3} \text{ NO}_3^{-} + 19,89$
$\text{Mg}^{+2} = 11,82 \text{ SO}_4^{-2} - 255,39$	$\text{Cl}^{-} = 3,06 \text{ E.C.} + 491,25$
$\text{Mg}^{+2} = -3,3 \cdot 10^{-2} \text{ HCO}_3^{-} + 243,89$	$\text{SO}_4^{-2} = -6,9 \cdot 10^{-2} \text{ HCO}_3^{-} + 259,67$
$\text{Mg}^{+2} = 5,3 \cdot 10^{-2} \text{ NO}_3^{-} + 16,47$	$\text{SO}_4^{-2} = -4,8 \cdot 10^{-3} \text{ NO}_3^{-} + 19,93$
$\text{Mg}^{+2} = 22,67 \text{ E.C.} + 9,77$	$\text{SO}_4^{-2} = 2,28 \text{ E.C.} + 409,1$
$\text{Na}^{+} = 5,4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{+} + 2,0$	$\text{HCO}_3^{-} = 6,2 \cdot 10^{-2} \text{ NO}_3^{-} + 3,57$
$\text{Na}^{+} = 0,854 \text{ Cl}^{-} - 10,33$	$\text{HCO}_3^{-} = -3,4 \text{ E.C.} + 1,8 \cdot 10^3$
$\text{Na}^{+} = 1,38 \text{ SO}_4^{-2} - 25,1$	$\text{NO}_3^{-} = -17,92 \text{ E.C.} + 1,3 \cdot 10^3$

9.9. Ανάλυση κυρίων συνιστωσών.

Η ανάλυση κυρίων συνιστωσών είναι μια τεχνική που μειώνει τις διαστάσεις (αριθμός μεταβλητών) ενός αρχείου δεδομένων. Αντικειμενικός στόχος της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες είναι να εκφρασθεί το μεγαλύτερο ποσοστό της ολικής διακύμανσης με ένα μικρό αριθμό συνιστωσών. Συνεπώς μειώνεται η διαστατικότητα του προβλήματος από τον αριθμό των αρχικών μεταβλητών σε μικρότερο αριθμό κυρίων συνιστωσών. Αυτό μπορεί να συμβεί στην περίπτωση που οι συσχετίσεις μεταξύ μεταβλητών εκφράζονται από τα αποτελέσματα υδροχημικών διαδικασιών. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι κύριες συνιστώσες είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, κάνοντας έτσι εύκολη την ανάλυση των δεδομένων.

Έτσι μέσω των κυρίων συνιστωσών κάθε μία από τις n αρχικές υδροχημικές παραμέτρους-μεταβλητές (Z) εκφράζεται γραμμικά με K ($K=j$, $j < n$) ασυσχέτιστες κύριες συνιστώσες, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$Z_i = a_{i1}K_1 + a_{i2}K_2 + a_{i3}K_3 + \dots + a_{in}K_j \quad (i=1, 2, 3, \dots, j)$$

Όπου a_{i1} είναι η τιμή του φορτίου της μεταβλητής i στην κύρια συνιστώσα j .

Προϋπόθεση εφαρμογής της μεθόδου είναι (Βουδούρης, Κ., 2004):

- Οι αρχικές μεταβλητές να έχουν μεγάλο συντελεστή συσχέτισης, γι' αυτό πριν την εφαρμογή της μεθόδου ελέγχεται ο πίνακας συντελεστών συσχέτισης.
- Ο αριθμός των μεταβλητών να είναι σχετικά μεγάλος. Αν ο αριθμός είναι μικρός (<4) δεν ενδείκνυται η εφαρμογή της μεθόδου.

Η μέθοδος σε υδροχημικά δεδομένα εφαρμόζεται ακολουθώντας τα κάτωθι βήματα:

α) Διευθέτηση των αρχικών μεταβλητών-υδροχημικών παραμέτρων υπό μορφή πίνακα

β) Υπολογισμός του πίνακα διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων (variance-covariance matrix) των δεδομένων ή του πίνακα των συντελεστών συσχέτισης (correlation coefficient matrix) των αρχικών μεταβλητών.

Ο συντελεστής συσχέτισης δύο μεταβλητών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$r = \frac{\sum_i (x_i - x_m)(y_i - y_m)}{\left\{ \left[\sum_i (x_i - x_m)^2 \right] \left[\sum_i (y_i - y_m)^2 \right] \right\}^{1/2}}$$

Όπου: x και y είναι η i -οστή τιμή των μεταβλητών x και y

x_m , y_m είναι οι μέσες τιμές τους.

Ο πίνακας συσχέτισης παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο 9.7.

γ) Επίλυση του πίνακα συσχέτισης και υπολογισμός των ιδιοτιμών (eigenvalues), των αντίστοιχων ιδιοδιανυσμάτων (eigenvectors), των κυρίων

συνιστωσών (principal components) και των αντίστοιχων φορτίων (component loadings) (Πίνακας 9.7).

Πίνακας 9.7. Ιδιοτιμές και ολικές διακύμανσεις.

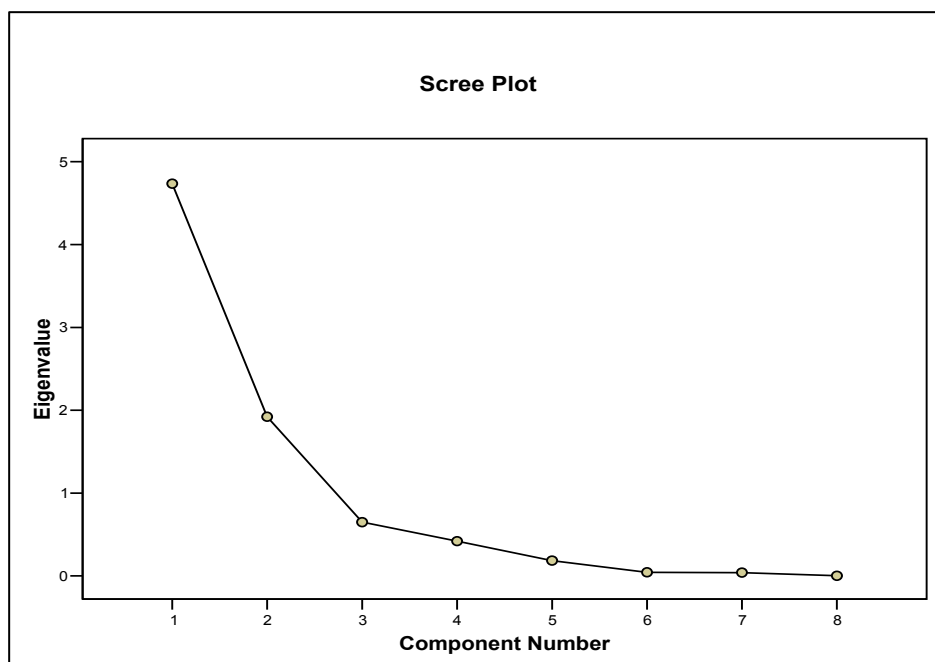
Παράγοντες	Αρχικές ιδιοτιμές			Τετραγωνικά φορτία		
	Ιδιοτιμές	Διακύμανση %	Αθροιστική %	Ιδιοτιμές	Διακύμανση %	Αθροιστική %
1	4,735	59,187	59,187	4,735	59,187	59,1867
2	1,922	24,024	83,211	1,922	24,024	83,211
3	0,649	8,118	91,329			
4	0,420	5,253	96,582			
5	0,185	2,318	98,9			
6	0,044	0,553	99,453			
7	0,041	0,514	99,967			
8	0,0026	0,0328	100			

Οι τιμές των ιδιοτιμών εμφανίζονται κατά φθίνουσα σειρά μεγέθους, βοηθώντας την επιλογή των κύριων συνιστωσών. Τα κριτήρια για την επιλογή των κύριων συνιστωσών είναι (Βουδούρης, Κ., 2004):

- Το ποσοστό της ολικής διακύμανσης. Αν κάποιες κύριες συνιστώσες εξηγούν υψηλό ποσοστό της ολικής διακύμανσης επιλέγονται οι συνιστώσες αυτές.

- Η επιλογή των κυρίων συνιστωσών που σχετίζονται με ιδιοτιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Αν μια κύρια συνιστώσα αντιστοιχεί σε μικρή τιμή ιδιοτιμής τότε μπορεί να παραληφθεί.

- Το κριτήριο "Cattell's Scree-test". Αν παραστήσουμε τον αριθμό των κύριων συνιστωσών στον άξονα Χ και των αντίστοιχων ιδιοτιμών στον άξονα Ψ, εμφανίζεται ένα «σπάσιμο» της ευθείας. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό επιλέγονται οι συνιστώσες που αντιστοιχούν στις μεγαλύτερες ιδιοτιμές και βρίσκονται πριν το σπάσιμο (Σχήμα 9.19).



Σχήμα 9.19. Εφαρμογή του κριτηρίου "Cattell's Scree-test" για τα δείγματα της περιοχής μελέτης.

Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε ο πίνακας συντελεστών συσχέτισης (Πίνακας 9.5.). Από τον Πίνακα 9.7. φαίνονται αρχικά οι ισάριθμες με τις μεταβλητές κύριες συνιστώσες (8). Όπως προκύπτει από το διάγραμμα Scree-plot μόνο δύο (2) κύριες συνιστώσες έχουν ιδιοτιμή μεγαλύτερη από την μονάδα και αντιπροσωπεύουν συνολικά το 83,2 % της ολικής διακύμανσης. Η πρώτη συνιστώσα εκφράζει το 59,19 % και η δεύτερη το 24,02%

Στον Πίνακα 9.8. με τη διατήρηση των 2 κυρίων συνιστωσών φαίνονται τα φορτία, που προκύπτουν για καθεμιά μεταβλητή ($>0,65$).

Πίνακας 9.8. Παραγοντικά φορτία ($>0,65$) των 2 κυρίων συνιστωσών.

Παράμετροι	Παράγοντες	
	K_1	K_2
Na	0.957	
K		-0.751
Mg	0.788	
Ca	0.972	
Cl	0.972	
SO₄	0.997	
NO₃		0.691
HCO₃		0.746

Η πρώτη συνιστώσα εκφράζει το 59,19% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων. Παρουσιάζει υψηλά φορτία στις μεταβλητές Na (0.96), Mg (0.79), Ca (0.97), Cl (0.97), SO₄ (0.99). Η συνιστώσα αυτή συνδέεται με την ύπαρξη θαμμένων αλμύρων στις λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις, που αυξάνει τις τιμές των ανωτέρω παραμέτρων στον υδροφόρο ορίζοντα. Επιπλέον, συνδέεται με φαινόμενα ιοντοανταλλαγής, λόγω του υψηλού φορτίου του Na, καθώς και με την χρήση λιπασμάτων.

Η δεύτερη συνιστώσα εκφράζει το 24,2% της ολικής διακύμανσης των δεδομένων και παρουσιάζει υψηλά φορτία στις μεταβλητές K (-0.75), NO₃ (0.69) και HCO₃ (0.75). Η συνιστώσα αυτή συνδέεται με την διάλυση ανθρακικών ορυκτών, καθώς και με την χρήση λιπασμάτων (νιτρορύπανση γεωργικής προέλευσης).

9.10. Ταξινόμηση των υπόγειων νερών.

9.10.1. Γενικά.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων σε πίνακες δεν είναι εποπτική. Για να είναι πιο εύκολη η σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων συνήθως χρησιμοποιείται κάποιο από τα υδροχημικά διαγράμματα που έχουν επικρατήσει.

Με τα υδροχημικά διαγράμματα είναι δυνατόν να γίνουν συγκρίσεις και συσχετισμοί που επιδέχονται ερμηνεία. Επιπλέον με αυτά μπορεί να αναγνωρισθεί η ανάμιξη νερών διαφορετικής προέλευσης και σύνθεσης, καθώς και η διεργασία που λαμβάνει χώρα κατά την κίνηση του νερού.

Υπάρχουν πολλών ειδών διαγράμματα που χρησιμοποιούνται και διαφόρων ειδών ταξινομήσεις του νερού που χρησιμοποιούν διαφορετικά κριτήρια η κάθε μία. Διαγράμματα ανυσματικά, ραβδοδιαγράμματα, κυκλικά και ακτινωτά, πολυγωνικά, ημιλογαριθμικά και τριγωνικά κ.τ.λ. και πάνω σε αυτά τα διαγράμματα έχουν προταθεί κατατάξεις της ποιότητας του νερού (π.χ. Piper, Piper – De Wiest, Durov, Schoeller).

Για την ταξινόμηση των υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης χρησιμοποιούνται παρακάτω τα τριγωνικά διαγράμματα και η ταξινόμηση κατά Piper – De Wiest, το διάγραμμα Durov, το διάγραμμα S.A.R., η ταξινόμηση κατά Schoeller και η ταξινόμηση κατά Wilcox.

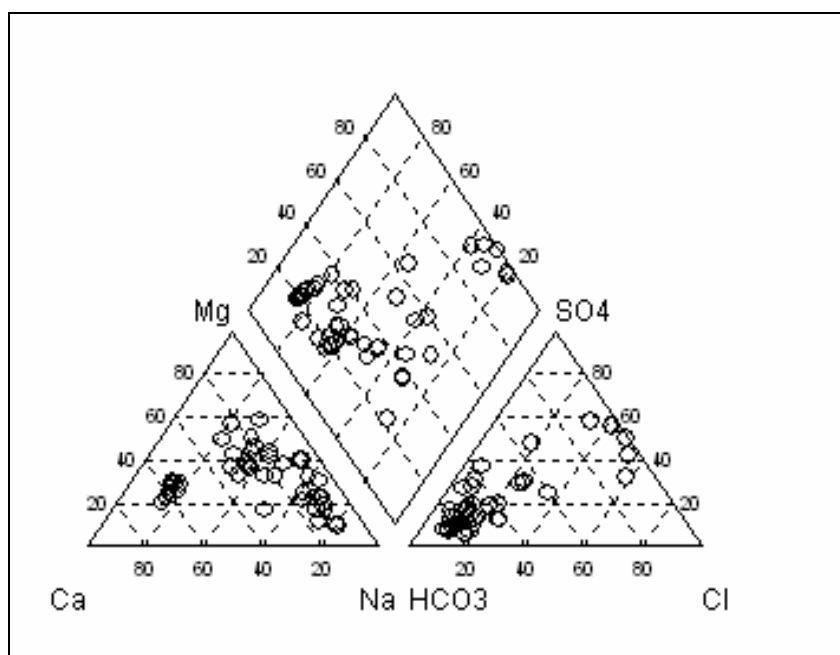
9.10.2. Διάγραμμα Piper – De Wiest.

Το τριγραμμικό διάγραμμα Piper (1944) είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο και ίσως το πιο εύχρηστο. Παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι είναι άμεση η αναγνώριση των ομοιοτήτων και των διαφορών που παρουσιάζουν διάφορα δείγματα νερού, καθώς και της ανάμιξης δύο διαφορετικών νερών (Καλλέργης, 1986).

Στα τριγραμμικά διαγράμματα, τα κατιόντα, εκφρασμένα επί τοις εκατό του συνόλου των κατιόντων σε meq/l, προβάλλονται σαν ένα σημείο στο αριστερό τρίγωνο, ενώ τα ανιόντα, εκφρασμένα επίσης επί τοις εκατό του συνόλου των ανιόντων, εμφανίζονται σαν ένα σημείο στο δεξιό τρίγωνο. Τα δύο αυτά

σημεία, προβάλλονται, στη συνέχεια, στον κεντρικό ρόμβο, παράλληλα προς τις δύο πάνω πλευρές του.

Με βάση λοιπόν τις χημικές αναλύσεις των στοιχείων κατασκευάστηκε το διάγραμμα Piper του Σχήματος 9.20. Όπως προκύπτει από το διάγραμμα εμφανίζονται οι εξής υδροχημικοί τύποι: ο ασβεστούχος-μαγνησιούχος-οξυανθρακικός (Ca-Mg-HCO_3), σε νερά που δεν έχουν επηρεασθεί από ρύπανση κοντά στις ζώνες τροφοδοσίας, ο νατριο-ασβεστούχος-οξυανθρακικός (Na-HCO_3), όπου η μεγάλη τιμή του Na^+ οφείλεται σε διαδικασίες ιοντοανταλλαγής, καθώς και μερικά νατριο-χλωριούχα (Na-Cl) νερά, λόγω της ύπαρξης θαμμένων αλμύρων στις λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις. Τέλος, εμφανίζονται και μερικά νερά, που απεικονίζονται στο κέντρο του ρόμβου, όπου δεν υπάρχουν επικρατούντα ιόντα και προέρχονται από ανάμειξη.

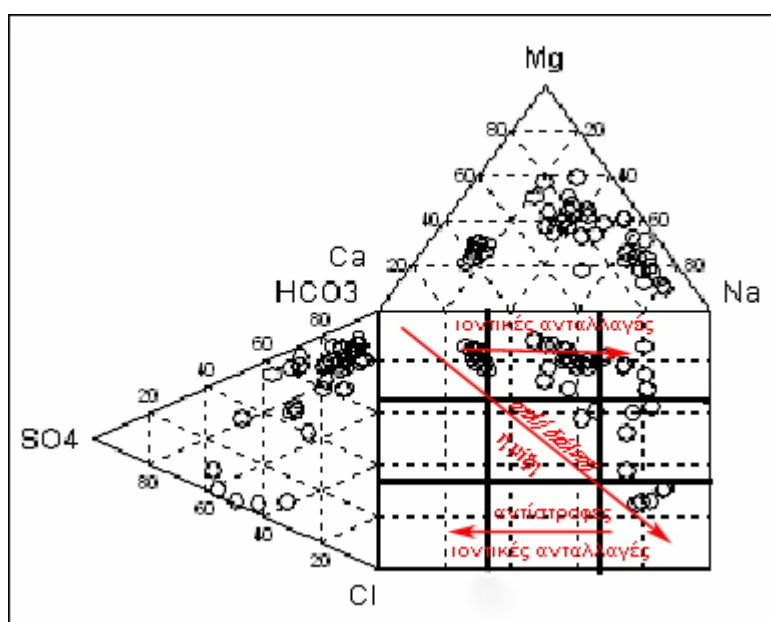


Σχήμα 9.20. Τριγωνικό διάγραμμα των κυριότερων ιόντων (A. Piper, 1944).

9.10.3. Διάγραμμα Durov.

Για την κατασκευή του διαγράμματος Durov, προβάλλονται, σε χωριστά τρίγωνα, τα ανιόντα και κατιόντα σε meq %, όπως και στο διάγραμμα Piper.

Στη συνέχεια η προέκταση των καθέτων στις βάσεις των ισοπλευρών τριγώνων, που ξεκινούν από τα σημεία, που παριστάνουν την επί τοις εκατό περιεκτικότητα (σε meq) του νερού σε ανιόντα και κατιόντα, τέμνονται σε ένα σημείο, που παριστάνει την κύρια ιοντική συγκέντρωση % στο νερό. Τα 9 τετράγωνα στο διάγραμμα Durov αντιστοιχούν σε κατηγορίες νερού, αλλά και σε περιοχές που συμβαίνουν στο νερό διάφορες υδροχημικές διαδικασίες. Όπως βλέπουμε από το διάγραμμα στα περισσότερα νερά συμβαίνουν ιοντικές ανταλλαγές, ενώ και μερικά νερά προέρχονται από απλή διάλυση ή μίξη. Επίσης προκύπτει πως τα νερά της περιοχής μελέτης είναι ασβεστούχα-μαγνησιούχα-οξυανθρακικά, νατριούχα- οξυανθρακικά, μερικά νατριο-χλωριούχα, ενώ μερικά προέρχονται και από ανάμειξη.



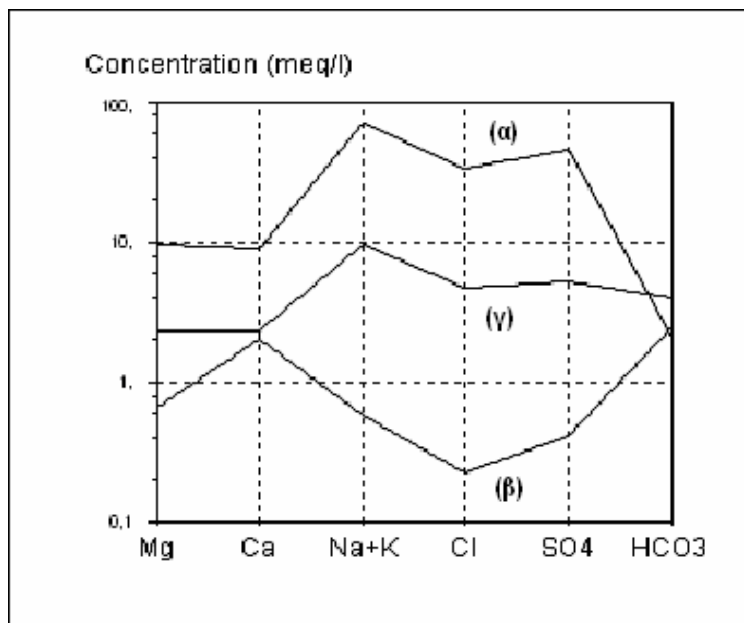
Σχήμα 9.21. Διάγραμμα Durov (Lloyd, J. W., Heathcote, J.A., 1985).

9.10.4. Διάγραμμα Schoeller.

Το διάγραμμα αυτό προτάθηκε από τον H.Schoeller (1948, 1962, 1967) και έχει ευρεία χρήση γιατί επιτυγχάνει να απεικονίσει με σαφή τρόπο τους διάφορους τύπους του υπόγειου νερού. Επίσης είναι εύκολη η σύγκριση των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων. Τα ημιλογαριθμικά διαγράμματα Schoeller χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ποσιμότητας του νερού. Στον άξονα των τετμημένων τοποθετούνται σε κανονικά διαστήματα από τα αριστερά προς τα δεξιά το δέκατο της συγκέντρωσης των ιόντων εκφρασμένες σε meq/l και στον άξονα των τεταγμένων, που είναι βαθμολογημένος σε μια λογαριθμική κλίμακα, τοποθετείται ο αριθμός των meq/l των παραπάνω ιόντων (Λαμπράκης, 1991). Τα σημεία τομής που προκύπτουν ενώνονται μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα. Το πλεονέκτημα με αυτό τον τρόπο απεικόνισης, είναι ότι εκτός της άμεσης σύγκρισης των αποτελεσμάτων των χημικών αναλύσεων είναι δυνατή και η σύγκριση των κυριότερων ιοντικών λόγων, οι οποίοι ορίζονται από τις κλίσεις των ευθύγραμμων τμημάτων.

Στο Σχήμα 9.22. δίνεται η εφαρμογή του διαγράμματος Schoeller για τρία διαφορετικά δείγματα: α) για το δείγμα νερού το οποίο παρουσιάζει την μεγαλύτερη τιμή T.D.S. β) για το δείγμα νερού το οποίο παρουσιάζει την μικρότερη τιμή T.D.S. και γ) για την μέση τιμή των ιόντων απ' όλα τα δείγματα της περιοχής.

Είναι σαφές ότι όταν η καμπύλη αυτή έχει το κυρτό μέρος προς τα επάνω έχουμε υφάλμυρο νερό, ενώ όταν έχουμε το κοίλο είναι γλυκό νερό. Ακόμη όσο πιο «πάνω» βρίσκεται αυτή τόσο πιο μεγάλη είναι η συνολική περιεκτικότητα σε ιόντα.



Σχήμα 9.22. Ημιλογαριθμικό διάγραμμα Schoeller.

9.10.5. Διάγραμμα S.A.R.

Το διάγραμμα S.A.R. χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας του νερού για άρδευση. Η καταλληλότητα του νερού για άρδευση εξετάζεται σε σχέση με δύο παράγοντες.

α) Τον κίνδυνο αλκαλίωσης.

Το Na^+ δημιουργεί αποκροκύδωση του εδάφους, κατά την ανταλλαγή ιόντων του με ιόντα Ca^{+2} , και έτσι προκαλεί μείωση του αερισμού και της περατότητας του εδάφους. Η έκταση της ανταλλαγής ιόντων μπορεί να προσδιοριστεί από το δείκτη προσρόφησης Νατρίου (S.A.R.).

$$S.A.R. = rNa / \sqrt{\frac{r(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})}{2}}$$

β) Τον κίνδυνο αλατότητας.

Σε εδάφη που κυριαρχούν τα αργιλικά υλικά, η δυνατότητα απόπλυσης των αλάτων που υπάρχουν σε περίσσεια είναι μειωμένη λόγω της μικρής περατότητας και της χαμηλής δυνατότητας αποστράγγισης. Ο κίνδυνος αλατότητας μπορεί να εκτιμηθεί από την ηλεκτρική αγωγιμότητα.

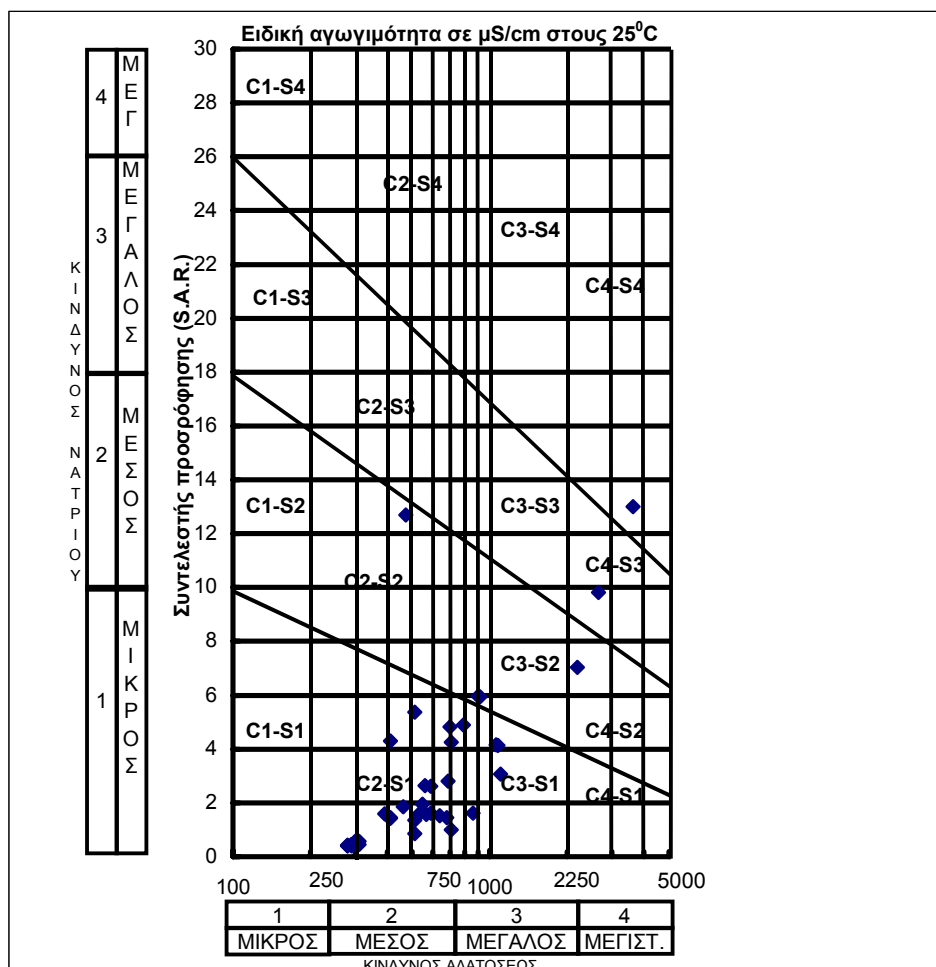
Με βάση λοιπόν τα παραπάνω υπολογίστηκε ο δείκτης S.A.R. για όλα τα δείγματα (Πίνακας 9.9.) και οι τιμές αυτές τοποθετήθηκαν στο διάγραμμα κατάταξης αρδευτικού νερού κατά USDA (Richards, 1954, Wilcox, 1955), όπως φαίνεται στο Σχήμα 9.23.

Πίνακας 9.9. Τιμές του δείκτη S.A.R. και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Κωδ. Δείγματος	C(μS/cm)	S.A.R.	Κωδ. Δείγματος	C(μS/cm)	S.A.R.
Γ1	510	0,860	Κ1	300	0,468
Γ10	280	0,413	Κ2	310	0,453
Γ11	280	0,407	Κ3	290	0,460
Γ12	280	0,437	Κ4	300	0,570
Γ13	1060	4,164	Κ5	290	0,411
Γ14	1080	4,136	Κ6	310	0,575
Γ15	400	1,522	Μ1	472	12,695
Γ16	390	1,589	Μ2	410	4,303
Γ17	410	1,429	Μ4	510	5,378
Γ18	6250	23,644	Μ6	460	1,843
Γ19	6100	24,171	ΜΔ1	2650	9,813
Γ1Α	3620	13,002	ΜΔ2	700	4,837
Γ2	590	1,626	Χ1	680	1,443
Γ2Α	860	1,607	Χ10	565	1,571
Γ3	710	1,005	Χ11	546	1,961
Γ3Α	790	4,902	Χ12	710	4,258
Γ4	640	1,533	Χ14	590	2,605
Γ5	690	2,795	Χ3	560	2,627
Γ6	1100	3,078	Χ4	530	1,560
Γ7	900	5,968	Χ8	510	1,366
Γ8	920	5,940	Χ9	410	1,448
Γ9	2200	7,030			

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, τα περισσότερα νερά της περιοχής μελέτης, ανήκουν στην κατηγορία C2- S1, δηλαδή είναι νερά με μέσο κίνδυνο αλατόσεως και μικρό κίνδυνο νατρίου. Τα νερά αυτά θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με προφύλαξη σε εδάφη που δεν αποστραγγίζονται καλά και για ευαίσθητα φυτά. Επίσης 2 δείγματα ανήκουν στην κατηγορία C2-S2 (μέσος κίνδυνος αλατόσεως-μέσος κίνδυνος νατρίου), 1 δείγμα στην κατηγορία C4-S2 (μέγιστος κίνδυνος αλατόσεως-μέσος κίνδυνος νατρίου), 1 δείγμα στην κατηγορία C4-S3 (μέγιστος κίνδυνος αλατόσεως-μεγάλος κίνδυνος νατρίου) και ένα δείγμα τέλος ανήκει στην κατηγορία C4-S4 (μέγιστος κίνδυνος αλατόσεως-μέγιστος κίνδυνος νατρίου). Το νερό των τελευταίων 3 δειγμάτων που ανήκουν στην τάξη C4, είναι ακατάλληλο για άρδευση κάτω από

συνηθισμένες συνθήκες. Είναι χρησιμοποιήσιμο μόνο σε ειδικές συνθήκες, σε εδάφη πολύ περατά με πολύ καλή στράγγιση.

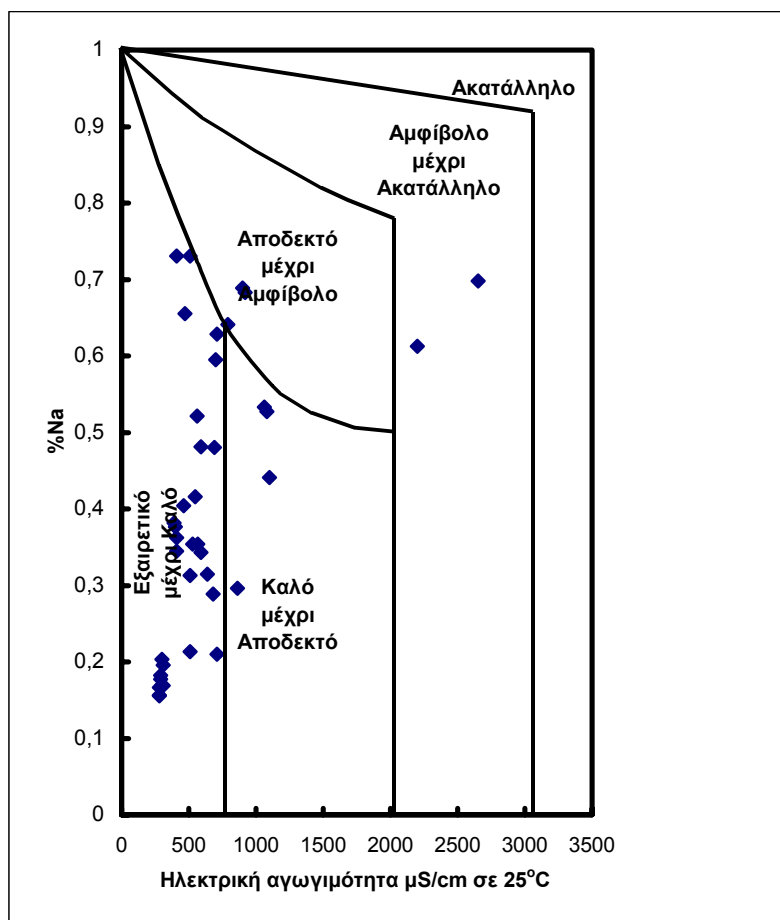


Σχήμα 9.23. Κατάταξη των νερών άρδευσης συναρτήσει της ειδικής αγωγιμότητας και της σχέσης S.A.R.

9.10.6. Διάγραμμα Wilcox.

Το διάγραμμα Wilcox (1955) χρησιμοποιείται και αυτό για την ταξινόμηση του αρδευτικού νερού. Λαμβάνει υπόψη του την ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού και την επί τοις εκατό περιεκτικότητα του σε Na^+ σε σχέση με το σύνολο των αλκαλίων. Στο Σχήμα 9.24. που ακολουθεί παρουσιάζεται η εφαρμογή του διαγράμματος Wilcox για τα νερά της περιοχής μελέτης.

Από το διάγραμμα φαίνεται ότι το νερό των περισσότερων δειγμάτων μπορεί να χαρακτηριστεί ως εξαιρετικό μέχρι καλό, ενώ το νερό 4 δειγμάτων είναι καλό μέχρι και αποδεκτό. Το νερό 2 δειγμάτων χαρακτηρίζεται από αποδεκτό μέχρι αμφίβολο, ενώ τέλος το νερό 2 άλλων δειγμάτων θεωρείται από αμφίβολο μέχρι ακατάλληλο.



Σχήμα 9.24. Διάγραμμα κατάταξης αρδευτικών νερών κατά Wilcox.

9.11. Υδροχημικοί χάρτες – Υδροχημικές τομές.

Με βάση τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων (Πίνακας 9.2) κατασκευάστηκαν οι υδροχημικοί χάρτες κατανομής των χλωριόντων, των νιτρικών και του ασβεστίου. Το υπόβαθρο του χάρτη σχεδιάστηκε με την χρήση του προγράμματος MapInfo Professional 6.5, ενώ οι καμπύλες ισοκατανομής $\text{Cl}^- - \text{NO}_3^- - \text{Ca}^{+2}$ σχεδιάστηκαν με το πρόγραμμα Surfer 8.0.

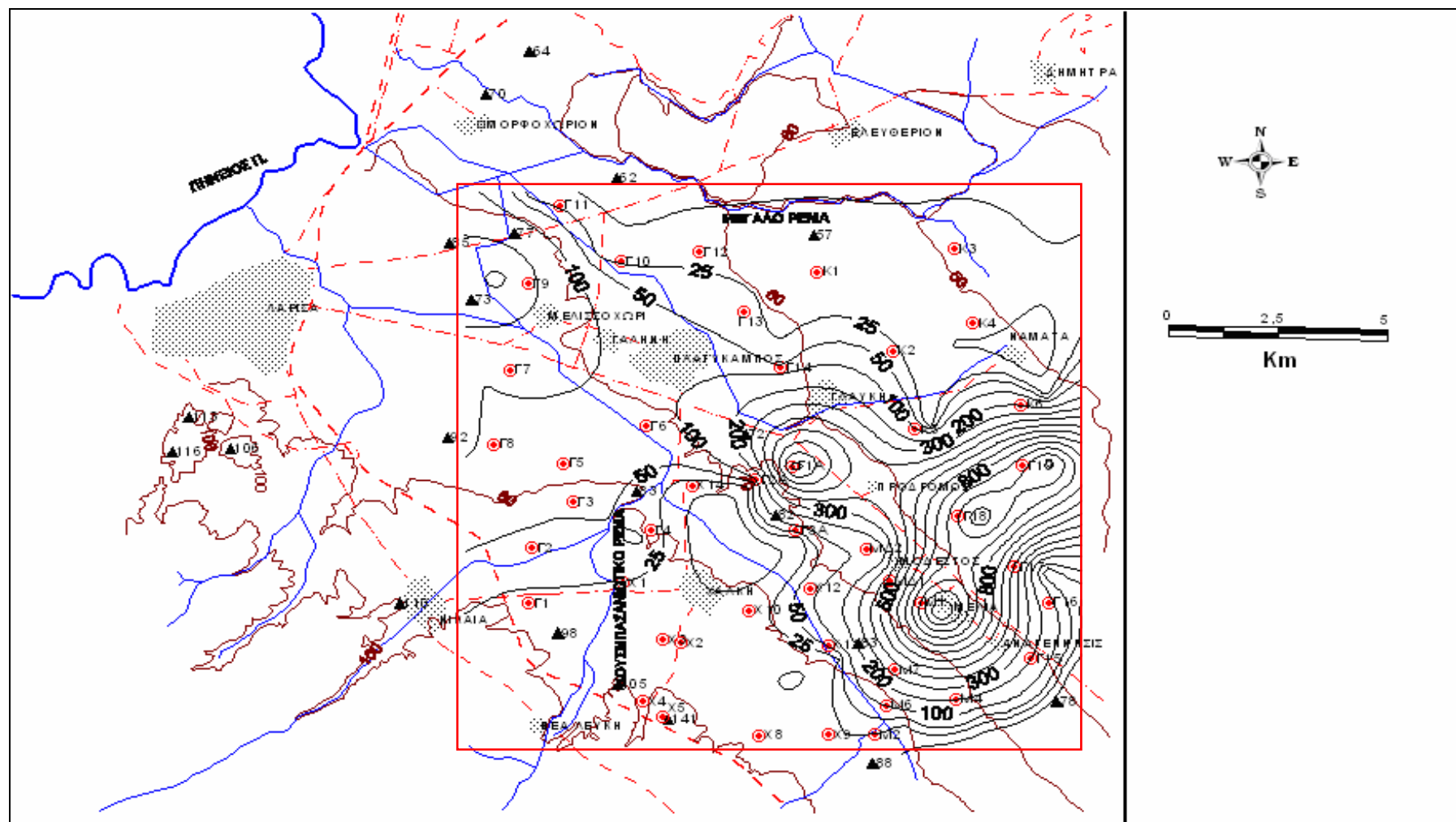
Στον χάρτη του Σχήματος 9.25. έχουμε την κατανομή των χλωριόντων σε mg/l στην περιοχή μελέτης. Υψηλές τιμές (άνω των 300 mg/l) παρατηρούνται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα κοντά στους οικισμούς Μελία και Μόδεστο. Στις περιοχές αυτές υπάρχουν

γεωτρήσεις βαθιές που φτάνουν σε βάθη >200 m, όπου και συναντούν ιζήματα λιμνοθαλάσσιας προέλευσης στα οποία υπάρχουν παλιές αλμύρες.

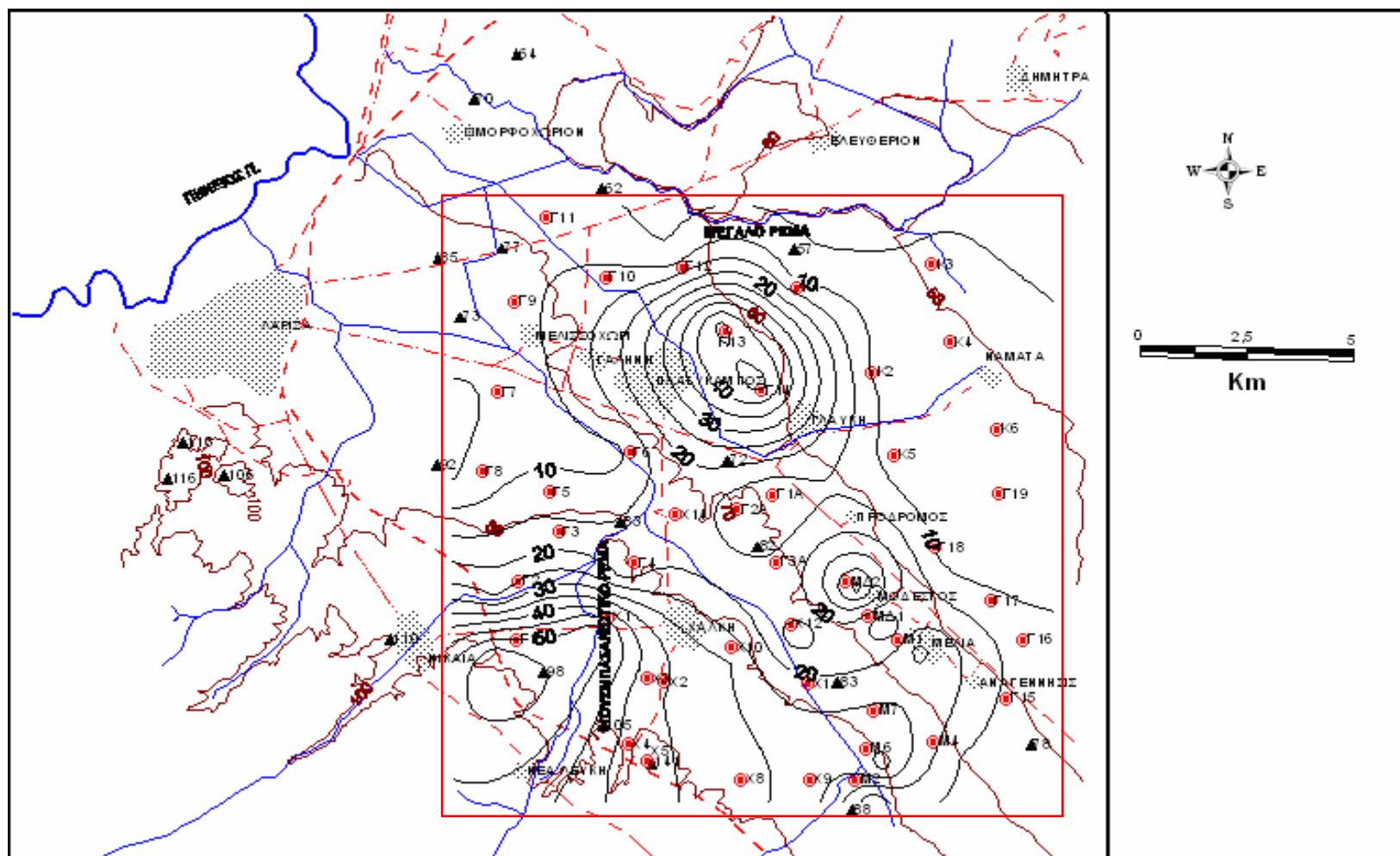
Στον χάρτη του Σχήματος 9.26. έχουμε την κατανομή των νιτρικών στην περιοχή μελέτης. Υψηλές τιμές νιτρικών παρουσιάζονται νοτιοδυτικά της Χάλκης (μέχρι και 55 mg/l, πάνω από το αποδεκτό όριο), καθώς και ανατολικά του οικισμού του Πλατύκαμπου. Οι μεγάλες συγκεντρώσεις νιτρικών στην περιοχή της Χάλκης οφείλονται στην έντονη καλλιεργητική δραστηριότητα καθώς και στα επιβαρημένα νερά του υδατορέματος Κουσμπασανιώτη από νιτρικά καθ' όσον η λεκάνη απορροής είναι λοφώδης με καλλιεργήσιμη σχεδόν όλη την έκταση. Έτσι συνεπάγεται μεγάλη αποστράγγιση και με επιβάρυνση του νερού των πλημμυρικών παροχών από μεγάλο φορτίο γεωργικών ρύπων (Ευαγγελόπουλος, 2004).

Στον χάρτη του Σχήματος 9.27. βλέπουμε την κατανομή του ασβεστίου στην περιοχή μελέτης. Υψηλές τιμές αυτού (>90 mg/l) εμφανίζονται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής, στους οικισμούς Μόδεστο και Μελία. Επίσης, στο Σχήμα 9.28. βλέπουμε την κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σε $\mu\text{S}/\text{cm}$) στην περιοχή μελέτης. Υψηλές τιμές παρουσιάζονται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής, αφού, όπως αναφέραμε, οι συγκεντρώσεις των ιόντων Na^+ , Cl^- , Ca^{+2} στο υπόγειο νερό, στην περιοχή εκείνη, είναι μεγάλες.

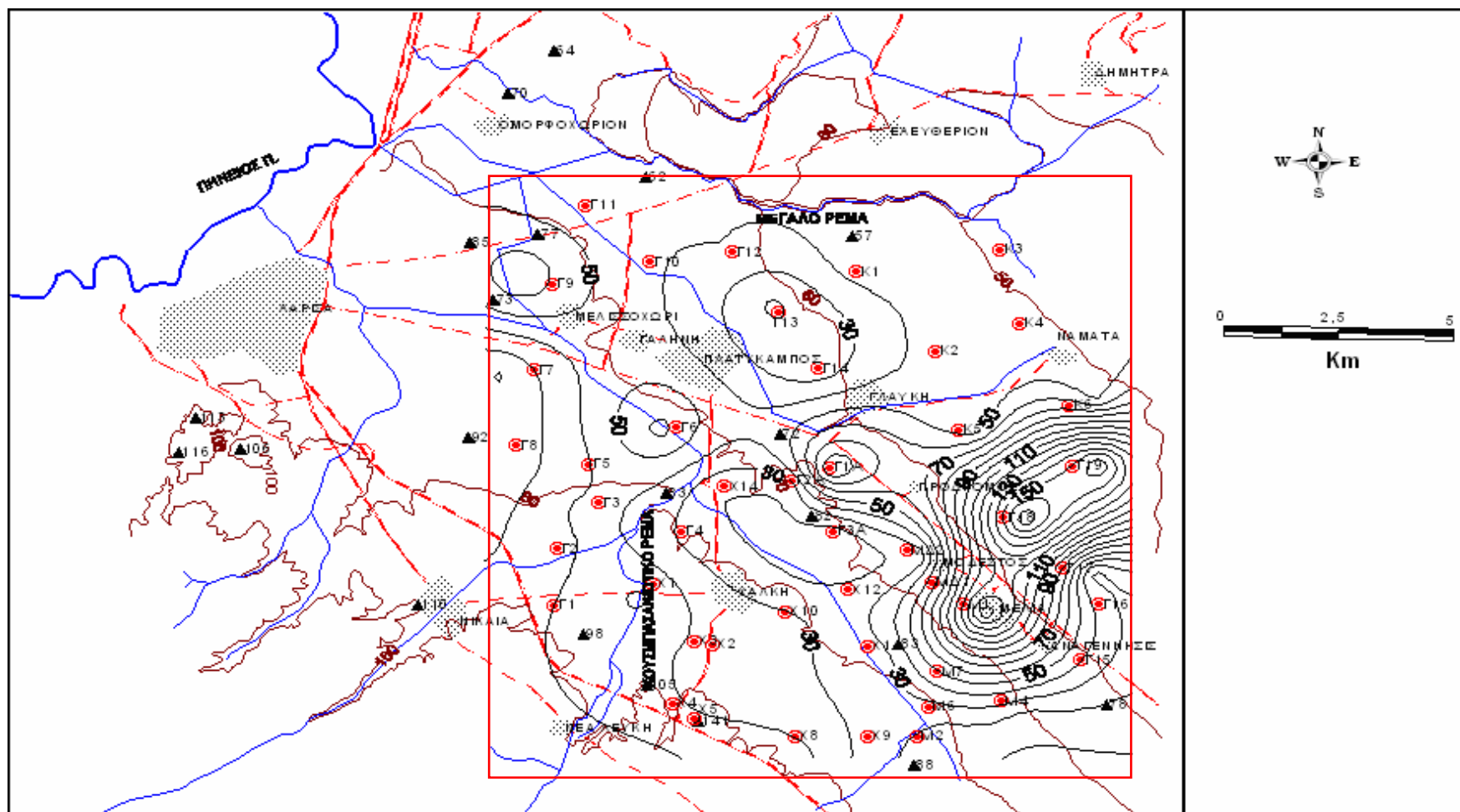
Στα Σχήματα 9.29. και 9.30. παρουσιάζονται 2 υδροχημικές τομές με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ και Ν-Β αντίστοιχα. Οι θέσεις των τομών φαίνονται στο Σχήμα 9.1. Από τις υδροχημικές τομές παρατηρούμε μία μείωση των νιτρικών ιόντων προς τα ΒΑ και Β της περιοχής. Από την διακύμανση των άλλων παραμέτρων δεν προκύπτει κάποιο ουσιαστικό συμπέρασμα. Η ύπαρξη γεωτρήσεων, σε μερικά σημεία, οι οποίες αντλούν παλιά υφάλμυρα νερά από μεγάλα βάθη έχουν ως αποτέλεσμα την ανοδική πορεία της καμπύλης του διαγράμματος σε μερικά σημεία της υδροχημικής τομής και την επαναφορά της έπειτα στα ίδια κανονικά επίπεδα τιμών.



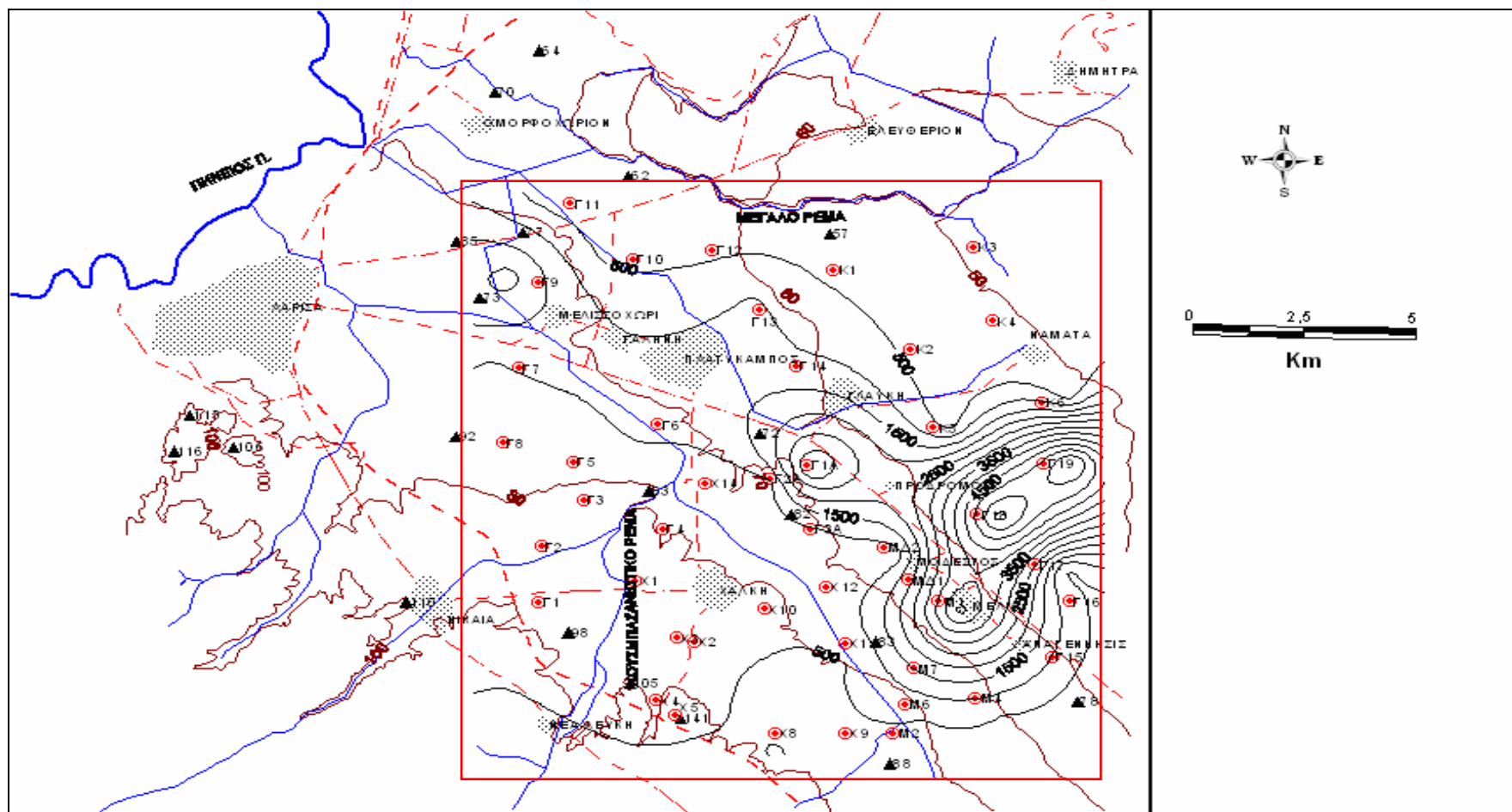
Σχήμα 9.25. Χάρτης κατανομής χλωριόντων (σε mg/l) (Αύγουστος 2005).



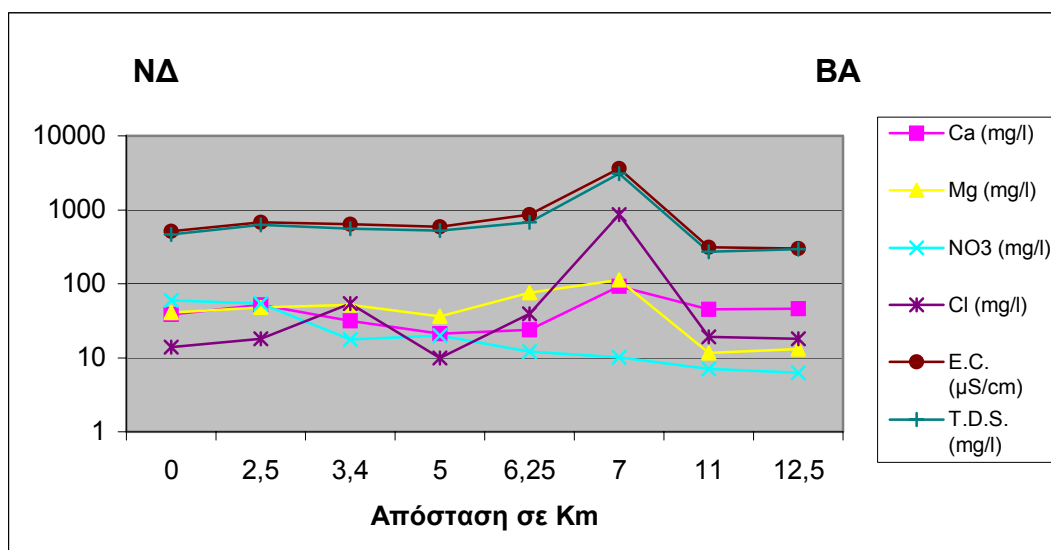
Σχήμα 9.26. Χάρτης κατανομής νιτρικών (σε mg/l) (Αύγουστος 2005).



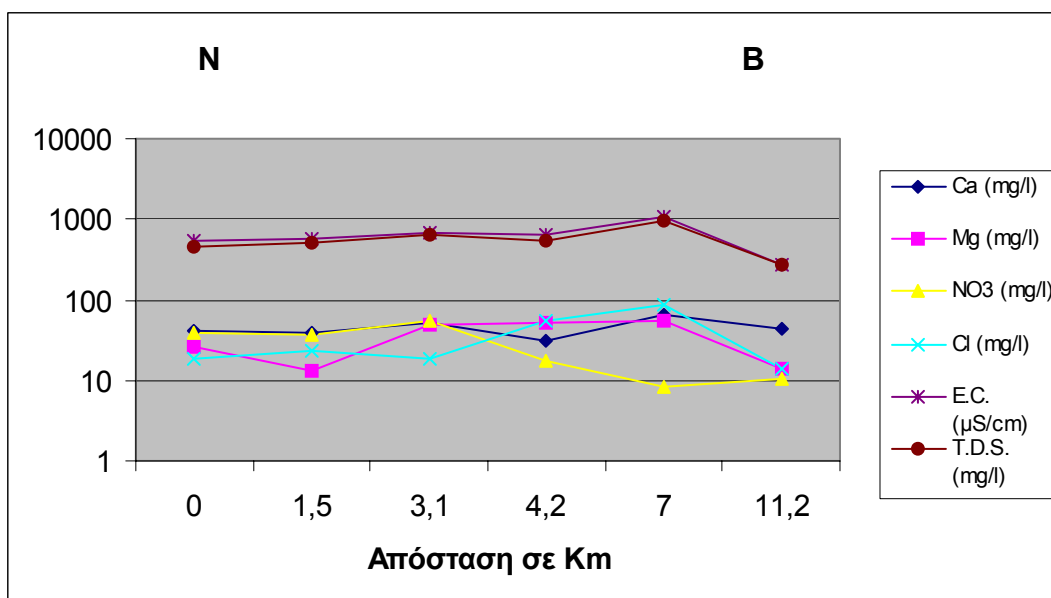
Σχήμα 9.27. Χάρτης κατανομής ασβεστίου (σε mg/l) (Αύγουστος 2005).



Σχήμα 9.28. Χάρτης κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας (σε $\mu S/cm$) (Αύγουστος 2005).



Σχήμα 9.29. Υδροχημική τομή με διεύθυνση ΝΔ-ΒΑ.



Σχήμα 9.30. Υδροχημική τομή με διεύθυνση Ν-Β.

Υδροχημικά στοιχεία.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη διατριβή αυτή μελετήθηκε η εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων κατά τα τελευταία 30 έτη στην περιοχή του Πλατυκάμπου Λάρισας, αλλά και γενικότερα μελετήθηκαν οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Παρακάτω δίνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την διατριβή αυτή.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται ανατολικά – νοτιοανατολικά της πόλης της Λάρισας και καλύπτει έκταση 210 Km². Διοικητικά ανήκει στους Δήμους Πλατυκάμπου και Νίκαιας. Διακρίνεται από ομαλό ανάγλυφο και από πολύ μικρές κλίσεις, μικρότερες του 1%. Το υδρογραφικό δίκτυο εμφανίζεται καλά ανεπτυγμένο στο ημιλοφώδες νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής και είναι δενδριτικής μορφής. Το κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης διαρρέεται από το Κουσμπασανιώτικο ρέμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από μη συνεχόμενη ροή νερού.

Η περιοχή μελέτης εντάσσεται γεωτεκτονικά στην Πελαγονική ζώνη. Οι σχηματισμοί που κυριαρχούν είναι οι αλουβιακές αποθέσεις του Τεταρτογενούς καθώς και Νεογενή ιζήματα (ερυθροστρώματα και λιμναίες αποθέσεις). Στην ευρύτερη περιοχή έρευνας εμφανίζονται σχιστόλιθοι του Παλαιοζωικού, οφειολιθικά πετρώματα και κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι Κρητιδικής ηλικίας. Συναντώνται δύο κύρια συστήματα ρηγμάτων. Το πρώτο, ηλικίας Α. Μειόκαινο – Κ. Πλειόκαινο, έχει διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ. Το δεύτερο, ηλικίας Μ.-Α. Πλειστόκαινο, έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ έως Α-Δ.

Αναφορικά με τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν, τα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα της ευρύτερης περιοχής χαρακτηρίζονται ως αδιαπέρατοι σχηματισμοί, ενώ οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι αποτελούν τα κατ' εξοχήν υδροπερατά πετρώματα της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Οι υπόλοιποι χαλαροί σχηματισμοί (Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις) χαρακτηρίζονται ως ημιπερατοί. Η κύρια υδροφορία στην περιοχή αναπτύσσεται σε στρώματα άμμων και χαλικιών που εναλλάσσονται με αργίλους.

Το κλίμα στην περιοχή μελέτης μπορεί να χαρακτηριστεί ως ηπειρωτικό ημίξηρο χαρακτηριζόμενο από θερμό και ξηρό Καλοκαίρι και ψυχρό και υγρό Χειμώνα. Σύμφωνα με την κλιματική κατάταξη του Korpen, το κλίμα της περιοχής ανήκει στον τύπο Csa.

Αναφορικά με τις υδρολογικές συνθήκες της περιοχής, με βάση τα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της Λάρισας υπολογίστηκε ότι, η μέση βροχόπτωση και η μέση θερμοκρασία στην περιοχή για την περίοδο 1956-1997 είναι 425,2 mm και 15,7°C αντίστοιχα.

Υπολογίστηκε η τιμή της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ($E_{\Delta}=869,7$ mm) με τη μέθοδο Thornthwaite, ενώ για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι των Turc, Coutagne και Thornthwaite-Mather. Πιο αξιόπιστα θεωρήθηκαν τα αποτελέσματα της τελευταίας μεθόδου με το συντελεστή της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής να είναι ίσος με 89%. Η ολική απορροή αντιστοιχεί στο 11% των κατακρημνισμάτων. Το μεγαλύτερο μέρος απ' αυτό το ποσοστό αντιστοιχεί στην κατείσδυση.

Όσον αφορά την εξέλιξη της στάθμης των υδροφόρων στρωμάτων στην περιοχή μελέτης, η ανάγκη για άρδευση των καλλιεργειών έχει οδηγήσει στην υπεράντληση των υδροφόρων στρωμάτων, με αποτέλεσμα την συνεχή πτώση της στάθμης. Από τα διαγράμματα διακύμανσης της στάθμης φαίνεται καθαρά η πτωτική πορεία αυτής. Η πτώση αυτή δείχνει να είναι πιο έντονη μετά το 1987. Έγινε προσπάθεια να συσχετιστεί η μέση άνοδος της στάθμης κατά την περίοδο Οκτωβρίου-Μαρτίου κάθε υδρολογικού έτους με την αντίστοιχη βροχόπτωση της ίδιας περιόδου. Η συσχέτιση που προέκυψε ήταν σημαντική για τα έτη μετά το 1989, όπου γινόταν υπεράντληση του υπόγειου νερού.

Οι μεγαλύτερες τιμές πτώσης στάθμης παρατηρούνται στο δυτικό και νότιο τμήμα της περιοχής μελέτης. Οι περιοχές αυτές αρδεύονται επί το πλείστον από ιδιωτικές και δημοτικές γεωτρήσεις. Οι μικρότερες τιμές πτώσης στάθμης παρατηρούνται στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης, αφού στις περιοχές αυτές η άρδευση των καλλιεργειών γίνεται εκτός από γεωτρήσεις και από το αρδευτικό δίκτυο του Πηνειού ποταμού.

Από τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων προκύπτει ότι η πλειοψηφία των νερών της περιοχής ανήκει στην κατηγορία των «γλυκών νερών» τόσο με την ταξινόμηση κατά Hem όσο και με την ταξινόμηση κατά Davis and De Wiest. Το Σύνολο Διαλυμένων Αλάτων (T.D.S.) παρουσιάζει υψηλή συσχέτιση μόνο με τα SO_4^{-2} ιόντα. Τα περισσότερα νερά έχουν pH μεταξύ 7 και 8 (ουδέτερα έως πολύ ελαφρά αλκαλικά).

Οι αυξημένες συγκεντρώσεις του λόγου rNa^+/rK^+ στα περισσότερα νερά αποτελούν ένδειξη προσρόφησης Na^+ . Επίσης, η πλειοψηφία των δειγμάτων παρουσιάζει τιμές του λόγου $\text{rMg}^{+2}/\text{rCa}^{+2}$ μεγαλύτερες του 0,9, γεγονός που υποδηλώνει την κυκλοφορία του νερού σε ιζήματα πλούσια σε Mg^{+2} . Από τον λόγο $\text{r}(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})/\text{r}(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ φαίνεται ότι οι υδροφόροι εμπλουτίζονται, ενώ με βάση τον λόγο $\text{rCl}^-/\text{rSO}_4^{-2}$ τα νερά της περιοχής χαρακτηρίζονται ως «χλωριοθειικά» και «θειοχλωριούχα».

Υψηλή συσχέτιση παρουσιάζεται μεταξύ των ιόντων $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})$ - $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$, $\text{Ca}^{+2} - \text{Mg}^{+2}$, $\text{Ca}^{+2} - \text{Na}^+$, $\text{Ca}^{+2} - \text{Cl}^-$, $\text{Ca}^{+2} - \text{SO}_4^{-2}$, $\text{Mg}^{+2} - \text{Na}^+$, $\text{Mg}^{+2} - \text{Cl}^-$, $\text{Mg}^{+2} - \text{SO}_4^{-2}$, $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$, $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{-2}$ και $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{-2}$.

Με βάση την ταξινόμηση κατά Piper – De Wiest τα νερά της περιοχής είναι ασβεστούχα-μαγνησιούχα-οξυανθρακικά, καθώς και νατριο-ασβεστούχα-οξυανθρακικά. Υπάρχουν μερικά νάτριο-χλωριούχα νερά, λόγω της ύπαρξης θαμμένων αλμύρων στις λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις καθώς και μερικά που προέρχονται από ανάμειξη.

Από το διάγραμμα Schoeller φαίνεται ότι οι ιοντικοί λόγοι δεν παραμένουν σταθεροί αλλά μεταβάλλονται. Από πλευράς ποσιμότητας τα περισσότερα νερά είναι καλής ποιότητας, ενώ ορισμένα λόγω της υψηλής συγκέντρωσης Na^+ και Cl^- χαρακτηρίζονται ως κακής ποιότητας νερά.

Με βάση το διάγραμμα S.A.R., τα περισσότερα νερά της περιοχής ανήκουν στην κατηγορία C2-S1, δηλαδή είναι νερά με μέσο κίνδυνο αλατόσεως και μικρό κίνδυνο νατρίου. Υπάρχουν όμως και μερικά τα οποία είναι ακατάλληλα για άρδευση κάτω από συνηθισμένες συνθήκες.

Από το διάγραμμα Wilcox φαίνεται ότι το νερό των περισσότερων δειγμάτων μπορεί να χαρακτηριστεί ως εξαιρετικό μέχρι καλό, ενώ το νερό 4

δειγμάτων είναι καλό μέχρι και αποδεκτό. Το νερό 2 δειγμάτων χαρακτηρίζεται από αποδεκτό μέχρι αμφίβολο, ενώ τέλος το νερό 2 άλλων δειγμάτων θεωρείται από αμφίβολο μέχρι ακατάλληλο.

Από τους υδροχημικούς χάρτες βλέπουμε ότι υψηλές τιμές Cl^- (άνω των 300 mg/l) παρατηρούνται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης και συγκεκριμένα κοντά στους οικισμούς Μελία και Μόδεστο. Υψηλές τιμές νιτρικών παρουσιάζονται νοτιοδυτικά της Χάλκης (μέχρι και 55 mg/l, πάνω από το αποδεκτό όριο), καθώς και ανατολικά του οικισμού του Πλατύκαμπου. Τέλος, υψηλές τιμές Ca^{+2} (>90 mg/l), καθώς και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, παρατηρούνται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής, στους οικισμούς Μόδεστο και Μελία.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Aubouin, J., (1957): «Contribution a l'étude géologique de la Grèce septentrionale» : Les confins de l'Epire et de la Thessalie », Ann. Geol. Des Pays Hell. Vol. X., Athènes, 1-484.

Βαφειάδης, Π., (1983): «Υδρογεωλογική μελέτη της λεκάνης Καστοριάς», Διδ. Διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, σελ.130.

Βουδούρης, Κ., (1995): «Υδρογεωλογικές συνθήκες του ΒΔ/κού τμήματος του Ν. Αχαΐας», Διδ. διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Βουδούρης, Κ., (2004): «Στατιστική ανάλυση δεδομένων στην Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία», Εκδόσεις Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας Α.Π.Θ., 106 σελ.

Brunn, J., (1956) : «Contribution a l' etude géologique du Pinde septentrional et d'une partie de la Macédoine occidentale». Ann. Geol. des Pays Hell. 7.

Clark, W.E., (1967): « Computing the barometric efficiency of a well», Jour. Hydraulics Div., Amer. Soc.Civil Engrs., v.93,no. HY4, pp.93-98,.

Coutagne, A., (1954): «Etude de quelques correlations hydrometeorologiques régionales et leur interprétation algébrique», La Houille blanche, 3 journées de l hydraulique de la Soc. Hydrot. De France, Paris, pp. 220 - 226.

Davis S.N. & De Wiest R.J.M., (1966) : « Hydrogeology » John Wiley & Sons, New York, 463 pp.

Δημόπουλος, Γ., (1983): «Εφαρμοσμένη Γεωλογία», Τόμος 1^{ος}, Υδρογεωλογία, Θεσσαλονίκη, σελ 428.

Δημόπουλος, Γ., (1985): « Έρευνα και Διαχείριση υδατικών πόρων», Θεσσαλονίκη, σελ 217.

Doutsos, TH., (1979): « Zur Plio-Pleistozänen tectonik Ost-Thessaliens». Ann.Géol-pays Hell., Tome hors série, fasc. I, 333-343.

Εθνική Στατιστική Υπηρεσία (2001):«Στοιχεία απογραφής πληθυσμού 1999», Αθήνα.

Ευαγγελόπουλος, Α., (2004): «Ποσοτική και ποιοτική κατάσταση υπόγειου υδάτινου δυναμικού λεκάνης ανατολικής Θεσσαλίας» Δ.Ε.Β. Λάρισας.

Freeze, R.A. & Cherry J. (1979): «Groundwater», Prentice – Hall Inc. Englewood Cliffs, pp.383-462.

Hem, J.D., (1970): «Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water», 2nd ed. U.S. Geological Survey Water – Supply paper 1473, 363 pp.

Ι.Γ.Μ.Ε., (1981): Γεωλογικοί χάρτες φύλλα Λάρισα, Πλατύκαμπος, κλίμακας 1:50000.

Καλλέργης Γ., Παπανικολάου Ν., (1979): «Γεωλογική και Γεωφυσική έρευνα επί της στεγανότητας της λεκάνης Κάρλας». Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΙΓΜΕ). Αθήνα.

Καλλέργης, Γ., (2001): «Εφαρμοσμένη-Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία», 2nd edition, Α, Β, Γ τόμοι, Εκδόσεις Τ.Ε.Ε., Αθήνα.

Καλλέργης, Γ., (1986): «Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία», Τόμος Α, Τ.Ε.Ε., Αθήνα..

Gilliland, J.A., (1969): «A rigid plate model of the barometric effect», Jour. Hydrology, v. 7, pp.233-245,.

Koppen, W., Geiger, R., (1936): «Handbuch der Klimatologie», Berlin.

Λαμπράκης, Ν., (1994): «Εισαγωγή στην υδροχημεία», Πανεπιστήμιο Πατρών, σελ. 158.

Lloyd, J.W., Heathcote, J.A., (1985): «Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. An introduction», Oxford.

- Μουντράκης, Δ., (1985):** «Γεωλογία Ελλάδος», University Studio Press, Θεσσαλονίκη, σελ. 207.
- Μπαμπατζιμόπουλος, Χ., Αντωνόπουλος, Β., (1990):** «Υδρολογικά στοιχεία της τέως λίμνης Κάρλας. Προστασία και διαχείριση των Ελληνικών υγροτόπων». Πρακτικά Συνάντησης Εργασίας για τους Ελληνικούς Υγροτόπους, σελ. 476-502.
- Piper, A., (1944):** «A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis», Trausam, Geophysical Union, 25/914-928, New York.
- Razack, M., Drogue, C, Romariz, C., Almeida, C. (1980):** «Etude de l'effet de mare océanique sur mi aquifère CARBONATE COXIER (Miocene de l' Algarve-Portiigal)». Journal of Hydrology. 45, p. 57-69.
- Ράπτη, Δ., (1995):** «Υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής Σκύδρας - Επισκοπής (Μακεδονία). Εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης των υδροφόρων στρωμάτων», Διδ. Διατριβή, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Richards, I.A., (1954):** «Diagnosis and improvement of saline and alkaline soils», U.S. Depart. Agric., Washington, pp. 160.
- Robinson, E.S., Bell, R.J. (1971):** «Tides in confined well-aquifer systems». J. Geophys. Res., v. 76, p. 1857-1869.
- Robinson, J.W. (1939):** «Earth-tides shown by fluctuations of water-levels in wells in New Mexico and Iowa». Trans. Amer. Geophysical Union, v. 20, p. 656-666.
- Schneider, R., (1961):** «Correlation of ground-water levels and air temperatures in the winter and spring in Minnesota», U-S. Geological Survey Water-Supply Paper 1539-D, 14 pp..

Schoeller, H., (1948): «Le régime hydrologique des calcaires éocènes du synclinal du DyrEl Kef (Tunisie)», Bull. Sco. Geol. Gr., ser. 5, Vol. 28, Paris, pp. 167-180.

Schoeller, H., (1962): «Les eaux souterraines», Ed. Masson, Paris, pp. 642.

Schoeller, H., (1967): «Hydrodynamique dans le karst (écoulement et emmagasinement)», Cornique d' Hydrogéologie, no 10, éditions B.R.G.B. Orléans (France), pp. 7-21.

Σούλιος, Γ., (1986): «Γενική Υδρογεωλογία», Πρώτος Τόμος, University Studio Press.

Σούλιος, Γ., Δημόπουλος, Γ., Μουντράκης, Δ., Ψιλοβίκος, Α., Πέννας, Π., (1989): «Έρευνα πάνω στο Υδρολογικό ισοζύγιο λεκανών απορροής του Ελληνικού χώρου (Παράδειγμα από τη λεκάνη Σκλήθρου Φλώρινας», Δελτίο Ελλ. Γεωλ. Εταιρίας, Τόμος XXVI, pp.129-153.

Σούλιος, Γ., Σωτηριάδης, Μ., Κακλής, Τ., Μάττας, Χ., (2002): «Διακύμανση των χημικών χαρακτηριστικών του υπόγειου νερού στην περιοχή του ποταμού Άρδα (Ν. Έβρου)», Πρακτικά 6^{ου} Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ξάνθη, Νοέμβριος 2002, σελ. 177-190.

Σούλιος, Γ., (2004): «Γενική Υδρογεωλογία». Τρίτος τόμος, Εκδόσεις Αφοί Κυριακίδη, Θεσσαλονίκη.

Soulis, G., Toubektsi, M., Tzevelekis, G., Ezeigbo, H., (1991): «Water Balance of Basins in Central Greece: Comparison with Other Circum-Mediterranean Basins and Validity of Empirical Methods», Environ. Geol. Water Sci., Vol. 18, No. 2, pp. 85-94.

Thornthwaite, C., (1944): «Report of the committee on transpiration and evaporation», Am. Geoph. Union, vol. 25.

Thornthwaite, C. Mather, J., (1955): «The water Balance», Climatology, vol. VIII, No 1, New Jersey, pp. 1-37.

- Todd, D.K., (1980):** «Groundwater Hydrology». John Wiley and Sons, 2nd ed. New York, 535 p.
- Turc, L., (1954):** «Le bilan d eau de sols; Relation entre les précipitations, l' évaporation et l' écoulement», Ibid., pp. 36-44.
- Τσιραμπίδης Α., (1996):** «Πετρολογία ιζηματογενών πετρωμάτων», Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 244 σελ.
- Vorhis, R.C., (1964):** Earthquake-induced water-level fluctuations from a well in Dawson County, Georgia, Sismological Soc. Amer. Bull., v.54, pp.1023-1133,
- Vorhis, R.C., (1955):** «Interpretation of hydrologic data resulting from earthquakes», Geologische Rundschau, v. 43, pp. 47- 52,.
- White, W.N. (1932):** «A method of estimating ground-water supplies based on discharge by plants and evaporation from soil». U.S. Geological Survey Water-Supply, paper 659, p. 1-105.
- Wilcox, L.V., (1955):** «Classification and use of irrigation waters», U. S. Depart. Agric. Circ. 969, Washington, pp. 19.
- Ψιλοβίκος Α., Μουντράκης Δ., Παυλίδης Σ., (1988):** «Μορφολογικές και τεκτονικές συσχετίσεις στο χώρο του Πελαγονικού τεμάχους». Πρακτικά 4^{ου} συνεδρίου. Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τομ. XXIII/1, σελ. 271-278. Αθήνα.

Από το διαδίκτυο

www.ntua.gr:

www.GoogleEarth.com