

Διερεύνηση της ανάπτυξης του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα της λεκάνης του Δέλτα Πηνειού Θεσσαλίας, με το συνδυασμό γεωφυσικών και υδρογεωλογικών στοιχείων

Αλεξόπουλος Δ. Ι.¹, Ματιάτος Ι.¹, Δίλαλος Σ.¹, Βασιλάκης Εμμ.¹, Παναγόπουλος Α.², Γκιώνης Γ.¹ και Πούλος Σ.¹

¹ Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Πανεπιστημιόπολη – Ζωγράφου, 15784, Αθήνα, (jalexopoulos@geol.uoa.gr)

² Ινστιτούτο Εργείων Βελτιώσεων, Ελληνικός Γεωργικός Οργανισμός - Δήμητρα, Σίνδος, 5740, Θεσσαλονίκη

Λέξεις – Κλειδιά: Γεωηλεκτρική μέθοδος, υδροχημικές μετρήσεις, φρεάτιος υδροφόρος.

Keywords: Geoelectrical soundings, hydrochemical measurements, phreatic

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη έχει ως στόχο να συμβάλλει στη γνώση του υδρογεωλογικού καθεστώτος που διέπει το φρεάτιο υδροφορέα, κυρίως ως προς τη χωρική του κατανομή, μέσα από τη συνδυαστική διαχείριση των προκαταρκτικών αποτελεσμάτων της εκτεταμένης γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιείται στην περιοχή και των υδρογεωλογικών στοιχείων που συγκεντρώθηκαν σε παράλληλες επιστημονικές δράσεις από προηγούμενους ερευνητές. Στα πλαίσια της επιστημονικής έρευνας που πραγματοποιείται στην περιοχή, διεξήχθησαν 37 γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις κατακόρυφης κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (διάταξη *Schlumberger*), τον Μάιο και τον Οκτώβριο του 2013. Επίσης, αξιοποιήθηκαν οι περιοδικές μετρήσεις της στάθμης του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα και υδροχημικές αναλύσεις για το διάστημα Οκτώβριος 2012-Σεπτέμβριος 2013. Από τα προκαταρκτικά αποτελέσματα της επεξεργασίας των γεωφυσικών δεδομένων προκύπτει ότι ο φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας δεν εντοπίζεται σε όλη την έκταση της δελταϊκής πεδιάδας αλλά εκτείνεται κυρίως στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της περιοχής. Στις περισσότερες θέσεις το πάχος του φαίνεται να περιορίζεται στα πρώτα 10 μέτρα, δεδομένου ότι εντοπίζεται υποκείμενος γεωηλεκτρικός σχηματισμός (20-40 ohm.m) που εκτιμάται ότι αποτελεί το αδιαπέρατο υπόβαθρό του. Τα υδρογεωλογικά δεδομένα επιβεβαιώνουν ότι το βάθος του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα είναι γενικά περιορισμένο αφού το βάθος της στάθμης δεν ξεπέρασε τα 4m. Παράλληλα, τα υδροχημικά στοιχεία καταδεικνύουν περιορισμένη θαλάσσια διείσδυση, η οποία φαίνεται να ελέγχεται από το υδραυλικό φορτίο εντός του υδροφόρου συστήματος και από την ιζηματολογική σύσταση του αμμοθινικού συστήματος της παράκτιας ζώνης, κάτι που επαληθεύεται και από τα γεωφυσικά αποτελέσματα.

Abstract

The present study aims to clarify the hydrogeological regime of the phreatic aquifer, primarily its spatial distribution, through a combined interpretation of the preliminary results of an extensive geophysical research conducted in the area and of the hydrogeological data collected in parallel scientific actions by previous researchers. In the context of the geophysical research that was carried out in the region, 37 Vertical Electrical Soundings, investigating the resistivity distribution (*Schlumberger* array), were performed during May and October 2013. Moreover, previous periodic measurements of the groundwater level of the phreatic aquifer and hydrochemical analysis were taken into consideration. The preliminary results of the geophysical data processing indicate that the phreatic aquifer is not detected throughout the whole deltaic plain but extends mainly in the central and northern parts of the region. Most of the investigated sites showed that the hosting formation's thickness is limited up to 10 meters, since the underlying geoelectrical formation (20-40 Ohm.m) is believed to be an impermeable formation. The literature-derived hydrogeological data also indicate that the depth of the phreatic aquifer is generally small. In particular, the groundwater monitoring showed that the water table did not exceed 4m in depth. Moreover, the hydrochemical data indicated a limited seawater intrusion, which seems to be controlled by the hydraulic head of

the groundwater and the sedimentological composition of the dune system covering the coastal zone, which is also indicated by the geophysical results.

Εισαγωγή

Το Δέλτα του ποταμού Πηνειού καταλαμβάνει μια έκταση περίπου 70 km² και αποτελείται από σύγχρονες δελταϊκές αποθέσεις οι οποίες χαρακτηρίζονται από ένα ήπιο γεωμορφολογικά ανάγλυφο με πολύ μικρές κλίσεις. Οι πλαγιές της Όσσας οριοθετούν το νότιο τμήμα της περιοχής και παρουσιάζουν σημαντικές τοπογραφικές κλίσεις που κυμαίνονται από 13% νότια του Κοινοτικού διαμερίσματος Ομολίου έως 21% στην περιοχή νότια του Στομίου. Οι πλαγιές του Κάτω Ολύμπου που οριοθετούν το βόρειο-βορειοδυτικό τμήμα της δελταϊκής περιοχής παρουσιάζουν ηπιότερες κλίσεις (έως 10% περίπου). Το ορεινό ανάγλυφο που οριοθετεί τον υδροκρίτη της λεκάνης του δέλτα παρουσιάζει υψόμετρα που κυμαίνονται από περίπου 900 m έως 1700 m.

Οι σύγχρονες δελταϊκές αποθέσεις του ποταμού εμφανίζουν τυπική τοξοειδή διατομή με ακτινωτή ανάπτυξη από την έξοδο της κοιλάδας των Τεμπών προς τη θάλασσα. Εξαιτίας της πρόσφατης γεωλογικά δημιουργίας των αποθέσεων και των πολύ ήπιων τοπογραφικών κλίσεων, ο ποταμός εμφανίζει πολυσχιδή διάταξη της κοίτης του. Έτσι παρουσιάζονται πολλαπλές κοίτες με ακτινωτή διάταξη, έντονος μαιανδρισμός και αποκομμένα τμήματα κοιτών (βρόγχοι) που λειτουργούν μόνο σε περίοδο πλημμυρικών φαινομένων.

Το γεωλογικό καθεστώς της περιοχής κατά τον πρόσφατο γεωλογικό χρόνο (Τεταρτογενές - Ολόκαινο), σε συνδυασμό με τις σύγχρονες ποτάμιες διεργασίες (διάβρωση - απόθεση), έχουν επηρεάσει ουσιαστικά τη γεωμορφολογική και την υδρογεωλογική εξέλιξη της περιοχής. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο τη διερεύνηση του υδρογεωλογικού καθεστώτος που διέπει το φρεάτιο υδροφορέα της περιοχής, κυρίως ως προς τη χωρική του κατανομή, μέσα από τη συνδυαστική ερμηνεία των προκαταρκτικών αποτελεσμάτων της εκτεταμένης γεωφυσικής έρευνας που πραγματοποιείται στην περιοχή και των υδρογεωλογικών στοιχείων που συγκεντρώθηκαν σε παράλληλες επιστημονικές δράσεις.

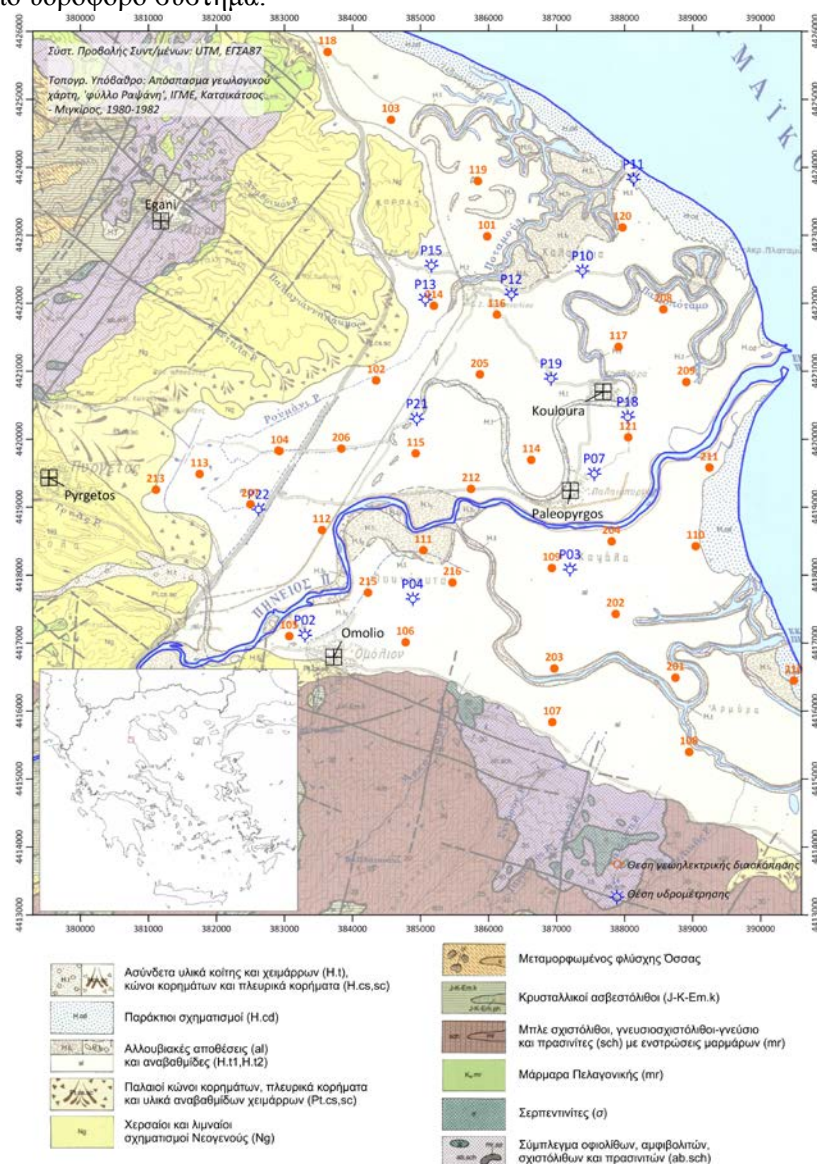
Γεωλογία-Υδρογεωλογία

Η ευρύτερη περιοχή της δελταϊκής πεδιάδας του Πηνειού δομείται lithολογικά από αλπικούς και μεταλπικούς σχηματισμούς (Κατσικάτσος και Μιγκίρος, 1982) (Εικ.1). Στους αλπικούς σχηματισμούς περιλαμβάνονται τα αλπικά πετρώματα της ενότητας Όσσας, τα οποία αποτελούνται από κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και δολομίτες στα ανώτερα τμήματα των οποίων απαντά μεταμορφωμένος φλύσχος. Η ενότητα Αμπελακίων υπόκειται εκείνης της Όσσας και συνίσταται από μεταμορφωμένους μπλε σχιστόλιθους, γνευσιοσχιστόλιθους και πρασινίτες με ενδιαστρώσεις κρυσταλλικών μάρμαρων. Η ενότητας Πελαγονικής, η οποία επίσης υπόκειται εκείνης της Όσσας χαρακτηρίζεται από ένα σύμπλεγμα οφιολίθων, αμφιβολιτών, σχιστολίθων και πρασινιτών το οποίο υπόκειται των μαρμάρων του Άνω Κρητιδικού. Στους μεταλπικούς σχηματισμούς ανήκουν οι νεογενείς αποθέσεις το πάχος των οποίων ξεπερνά τα 300 m. Στη βάση τους αποτελούνται από μάργες οι οποίες στα ανώτερα τμήματα μεταβαίνουν σε ψαμμίτες και κροκαλοπαγή με προοδευτική αύξηση του μεγέθους των κροκαλών και τελικά σε κοκκινοχώματα. Οι πλειστοκαινικές αποθέσεις οι οποίες υπέρκεινται εκείνες των νεογενών συνίστανται από παλαιούς κώνους κορημάτων, πλευρικά κορήματα και υλικά αναβαθμίδων χειμάρρων, το σύνολο των οποίων καταλαμβάνει κυρίως τα δυτικά και βόρεια κράσπεδα της δελταϊκής πεδιάδας.

Το μεγαλύτερο τμήμα του δέλτα καλύπτεται από αλλουβιακές αποθέσεις του Τεταρτογενούς, οι οποίες συνίστανται κυρίως από εναλλαγές άμμων και αργίλων ενώ στην παράκτια ζώνη απαντούν κυρίως αμμώδεις θίνες και παράκτιοι αμμώδεις και αργιλώδεις σχηματισμοί. Τέλος, στην περιοχή μελέτης απαντούν ασύνδετα σύγχρονα ιζήματα του Τεταρτογενούς στα οποία συμπεριλαμβάνονται πρόσφατες αποθέσεις της κοίτης του ποταμού και των αναβαθμίδων των χειμάρρων, κώνοι κορημάτων και πλευρικά κορήματα.

Η παρούσα εργασία διερευνά το φρεάτιο υδροφόρο σύστημα που φαίνεται να εντοπίζεται στις αλλουβιακές αποθέσεις της δελταϊκής πεδιάδας του ποταμού Πηνειού. Στο σημείο αυτό επισημαίνεται ότι έχει αναγνωριστεί και ένα δεύτερο βαθύτερο υδροφόρο σύστημα στην ευρύτερη περιοχή του δέλτα (Παναγόπουλος κ.ά. 2011). Το φρεάτιο υδροφόρο σύστημα είναι

μικρής δυναμικότητας, ρηχό (έως 10 m περίπου) και με μεγάλη λιθολογική ετερογένεια στην οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση (Matiatos *et al.* 2014). Συγκεκριμένα, οι αλλουβιακές αποθέσεις εκατέρωθεν του ποταμού είναι αδρομερείς και γίνονται περισσότερο λεπτομερείς στις εκβολές του δέλτα, όπου οι ταχύτητες ροής και στερεομεταφοράς είναι μικρότερες. Στην κατακόρυφη διεύθυνση, η παρουσία των αδρομερών υλικών ευνοεί την ανάπτυξη ενεργού πορώδους με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η κυκλοφορία του υπόγειου νερού, ενώ οι αργιλώδεις και ιλυώδεις ενστρώσεις, όπου αυτές εντοπίζονται, μειώνουν την υδραυλική αγωγιμότητα των αποθέσεων (Παναγόπουλος *κ.α.* 2011). Μέσα στις αλλουβιακές αποθέσεις αναμένεται να απαντούν αλληπάλληλα φρεάτια ή/και μερικώς υπό πίεση ή/και υπό πίεση υδροφόρα συστήματα. Ωστόσο, στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε και εξετάστηκε ένα ενιαίο ρηχό φρεάτιο υδροφόρο σύστημα.



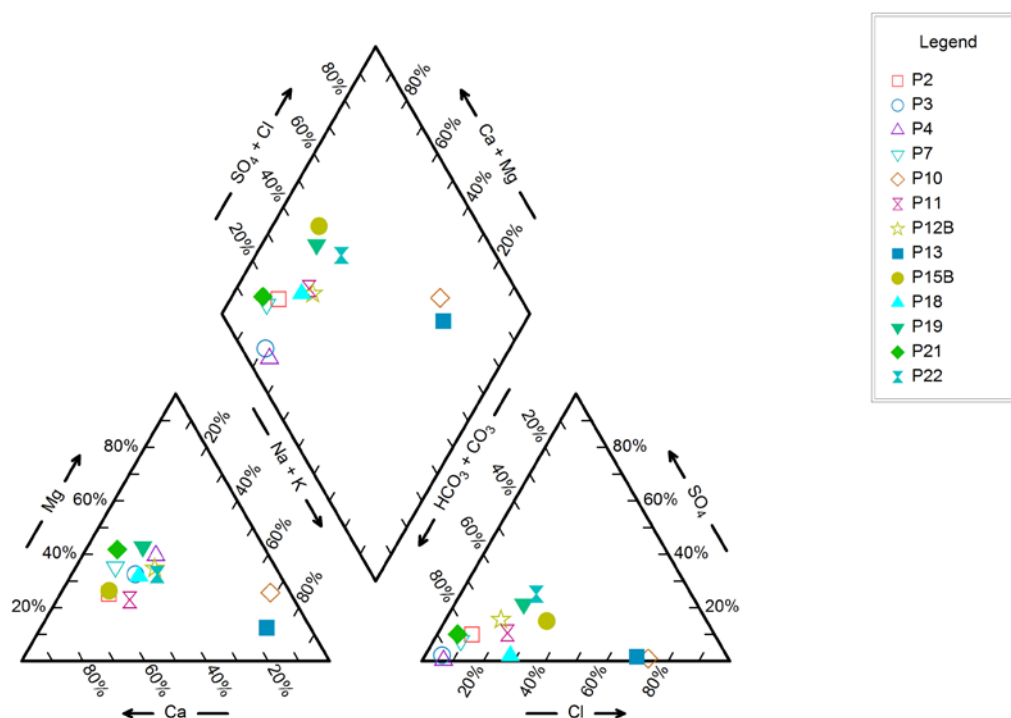
Εικόνα 1. Απόσπασμα Γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ (Φύλλο Χάρτη «Ραψάνη», Κατσικάτσος Γ. και Μιγκίρος Γ., 1982) περιοχής μελέτης, με τις θέσεις των γεωφυσικών βαθυσκοπήσεων (πορτοκαλί σύμβολο) και τις υδρογεωτρήσεις μικρού βάθους (μπλε σύμβολο).

Το υπόγειο νερό του εν λόγω υδροφόρου συστήματος είναι υπό εκμετάλλευση κυρίως για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών της περιοχής. Στο δέλτα έχουν ανορυχθεί πάνω από 100 υδροληπτικά έργα, τα περισσότερα από τα οποία είναι φρέατα ή αλλιώς «αρίδες» μικρής διαμέτρου και μικρού βάθους, τα οποία λειτουργούν με φυγόκεντρες αντλίες μικρής ισχύος (5-10 m³/h), εκμεταλλεζόμενα το ιδιαίτερα μικρό βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού.

Σύμφωνα με προηγούμενους ερευνητές εκτιμάται ότι υπάρχει υδραυλική επικοινωνία ανάμεσα στον ποταμό Πηνειό και το φρεάτιο υδροφόρο σύστημα (Παναγόπουλος, κ.α. 2011). Συγκεκριμένα, οι εν λόγω συγγραφείς θεωρούν ότι στο ανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης όπου ο ποταμός Πηνειός εισέρχεται στη δελταϊκή πεδιάδα, ο ποταμός τροφοδοτεί το υδροφόρο σύστημα, ενώ στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα θεωρούν ότι επικρατεί άλλοτε τροφοδοσία του υδροφόρου συστήματος από τον ποταμό και άλλοτε το αντίστροφο, ανάλογα με τη θέση, την εποχή και τη σχέση ανάμεσα στη στάθμη του ποταμού και τη στάθμη του υπόγειου νερού. Στην παρούσα εργασία δεν εξετάζεται η υδραυλική επικοινωνία ανάμεσα στα δύο υδάτινα σώματα. Κύρια ζώνη τροφοδοσίας φαίνεται να είναι η περιοχή των εκτεταμένων κώνων κορημάτων και πλευρικών κορημάτων στην έξοδο του Πηνειού από την κοιλάδα των Τεμπών.

Σύμφωνα με τους Matiatos *et al.* (2014), το υδραυλικό φορτίο, έτσι όπως αυτό καταγράφηκε για την περίοδο Οκτώβριος 2012 και Σεπτέμβριος 2013, μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους με τις μικρότερες τιμές να παρατηρούνται στο τέλος της ξηρής περιόδου και τις υψηλότερες στο τέλος της υγρής. Η γενική διεύθυνση ροής στο υδροφόρο σύστημα είναι από τις παρυφές της λεκάνης προς το Θερμαϊκό κόλπο. Παράλληλα, η ποιότητα του υπόγειου νερού στο μεγαλύτερο τμήμα του υδροφόρου διαπιστώθηκε ότι είναι καλή ως προς τα βασικά ιόντα. Τα περισσότερα δείγματα που ελήφθησαν από τα υδροληπτικά έργα της περιοχής (Εικ.1) κατατάσσονται στον υδροχημικό τύπο Ca-HCO_3 , σύμφωνα με την ταξινόμηση Piper (Εικ.2), με εξαίρεση μόνο δύο υδροληπτικά έργα το νερό των οποίων ήταν σχετικά υφάλμυρο με συγκεντρώσεις ιόντων χλωρίου της τάξης των 1000 mg/l. Παράλληλα, οι συγκεντρώσεις των νιτρικών ιόντων σε όλα τα υδροληπτικά έργα δεν ξεπέρασε τα 40 mg/l χαμηλότερα δηλαδή από το όριο ποσιμότητας των 50 mg/l (Οδηγία 98/83).

Η στάθμη του υπόγειου νερού καταγράφηκε χαμηλότερα (μερικά εκατοστά κάτω από τη στάθμη της θάλασσας) στην παράκτια ζώνη, χωρίς ωστόσο να αντανakλάται σε εκτεταμένη και έντονη διείσδυση του θαλασσινού νερού. Αυτό επαληθεύεται και από αντίστοιχες φυσικοχημικές μετρήσεις που έκαναν οι ίδιοι ερευνητές σε δείγματα υπόγειου νερού της περιοχής. Συγκεκριμένα, η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας έφθασε τα 9180 $\mu\text{S/cm}$ και η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου τα 1407 mg/l σε μια θέση δειγματοληψίας στο τέλος της ξηρής περιόδου. Παρ' όλα αυτά, οι τιμές και των δύο παραμέτρων μειώνονται αισθητά κατά την υγρή περίοδο στο ίδιο σημείο που σημαίνει ότι το σύστημα ανακάμπτει γρήγορα. Ταυτόχρονα, ο δείκτης *Revelle* (Cl/HCO_3) έδειξε ότι το 85% των δειγμάτων που συλλέχθηκαν δεν επηρεάζεται από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού, ενώ μόλις το 15% αυτών χαρακτηρίζεται ως ελαφρά υφάλμυρο.



Εικόνα 2. Διάγραμμα *Piper* στο οποίο απεικονίζεται η υδροχημική ταξινόμηση των δειγμάτων υπόγειου νερού στην περιοχή του δέλτα. (Matiatos *et al.* 2014)

Γεωφυσική έρευνα

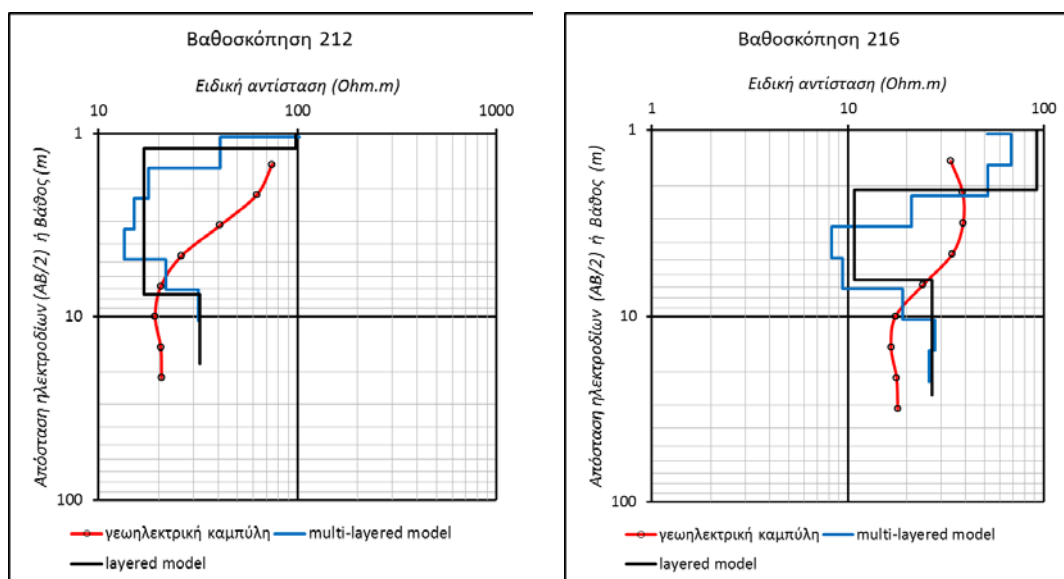
Η γεωηλεκτρική μέθοδος που υλοποιήθηκε, θεωρείται μια από τις πλέον κατάλληλες προκαταρκτικές γεωφυσικές τεχνικές στην υδρογεωλογική έρευνα και στην έρευνα υποβάθρου, ιδιαίτερα σε πεδία ιζηματογενών λεκανών με επάλληλες λιθολογίες (Αλεξόπουλος 1998; Alexopoulos *et al.* 2007; Αλεξόπουλος κ.ά. 2008; Papadopoulos *et al.* 2008; Δίλαλος 2009; Alexopoulos and Dilalos S. 2010; Alexopoulos *et al.* 2013). Το Μάιο και τον Οκτώβριο του 2013 αναπτύχθηκαν στην περιοχή του Δέλτα του Πηνειού Θεσσαλίας, τριάντα επτά (37) γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις διερεύνησης της κατακόρυφης κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, με διάταξη *Schlumberger*, στο πλαίσιο προκαταρκτικής γεωφυσικής έρευνας της διερεύνησης του φρεατίου υδροφόρου συστήματος, με στόχο τον καθορισμό της έκτασης και του πάχους του στη δελταϊκή πεδιάδα. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις υπολογισθείσες τιμές της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της ποιότητας του φρεατίου ύδατος. Τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας συσχετίστηκαν με τα υδρογεωλογικά στοιχεία προηγούμενων ερευνητών (Παναγόπουλος κ.α. 2011; Matiatos *et al.* 2014).

Στην παρούσα εργασία αξιοποιούνται και παρουσιάζονται τα γεωφυσικά αποτελέσματα για μικρά βάθη (10-15 μέτρα) διερεύνησης, όπου και αναπτύσσεται το ρηχό φρεάτιο υδροφόρο σύστημα. Είναι γνωστή άλλωστε η υψηλή διακριτική ικανότητα της τεχνικής που χρησιμοποιήθηκε για μικρά βάθη, γεγονός που ενισχύει την ακρίβεια του στόχου.

Στην προκαταρκτική αυτή φάση καταβλήθηκε προσπάθεια για την μεγαλύτερη δυνατή χωρική κάλυψη του Δελταϊκού πεδίου, προκειμένου να αναδειχθούν τα προκαταρκτικά συμπεράσματα για την χωρική ανάπτυξη του φρεατίου υδροφόρου συστήματος.

Η επεξεργασία των γεωηλεκτρικών δεδομένων πραγματοποιήθηκε κυρίως με το λογισμικό *ATO* (Zohdy, 1989). Είναι μια πολύ αξιόπιστη μέθοδος επεξεργασίας, κυρίως για περιβάλλοντα ιζηματογενών λεκανών (Yungul, 1996). Από την επεξεργασία των γεωφυσικών δεδομένων προέκυψαν γραφήματα, όπως αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 3 για δύο τυχαίες βαθυσκοπήσεις (212 και 216). Σε αυτά απεικονίζεται η γεωηλεκτρική καμπύλη, την επεξεργασία της όπως αυτή προέκυψε με το λογισμικό *ATO* (multi-layered model) και την

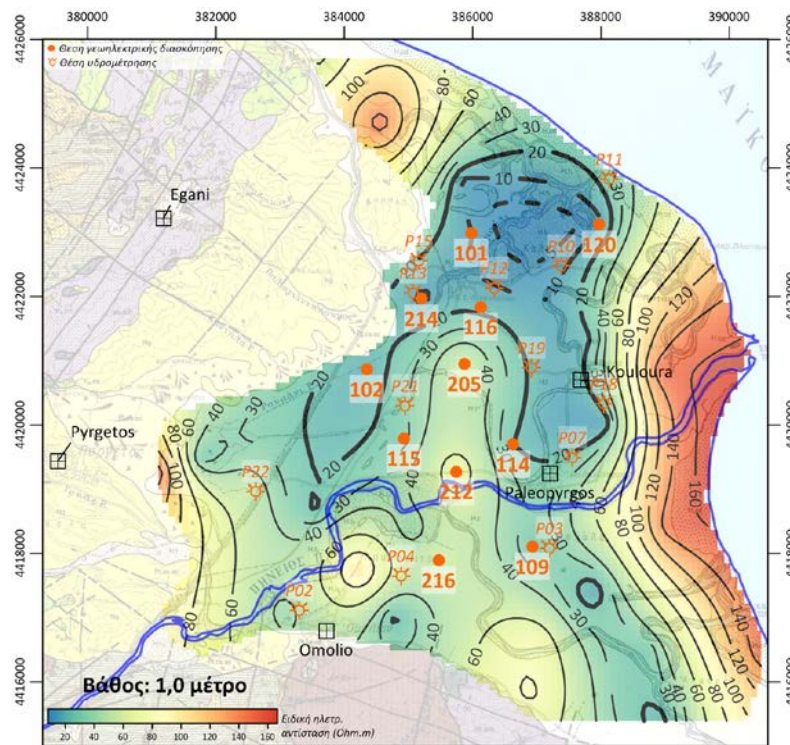
επεξεργασία της που προέκυψε από το λογισμικό IX (layered model). Και στις δύο αυτές θέσεις χαρακτηριστικά εντοπίζεται ένα αγωγίμο (11-17 Ohm.m) γεωηλεκτρικό στρώμα να υπέρκειται ενός αντιστατικότερου (>25 Ohm.m) γεωηλεκτρικού σχηματισμού.



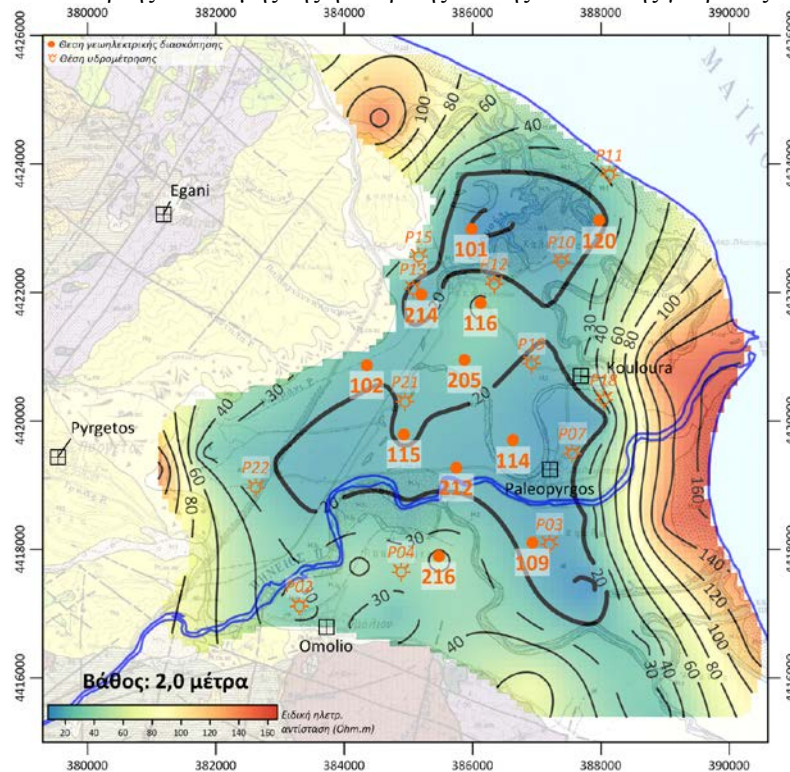
Εικόνα 3. Γραφήματα γεωηλεκτρικών καμπύλων με τα multi-layer και layered γεωηλεκτρικά μοντέλα επεξεργασίας.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν (τροποποιημένες) ρουτίνες, προκειμένου να εξαχθούν να κατασκευαστούν οριζοντιογραφίες κατανομής της ειδικής αντίστασης (Zohdy & Bisdorf 1989 & 1990), που παρέχει τιμές της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης για συγκεκριμένα βάθη. Με αυτόν τον τρόπο, κατασκευάστηκαν χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης με το βάθος. Εκείνες οι οποίες παρουσιάζουν μία συστηματικότητα στην κατανομή των αγωγίμων ζωνών είναι αυτές των 1,0 μ., 2,0 μ., 3,0 μ., οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω (Εικ. 4 α, β και γ).

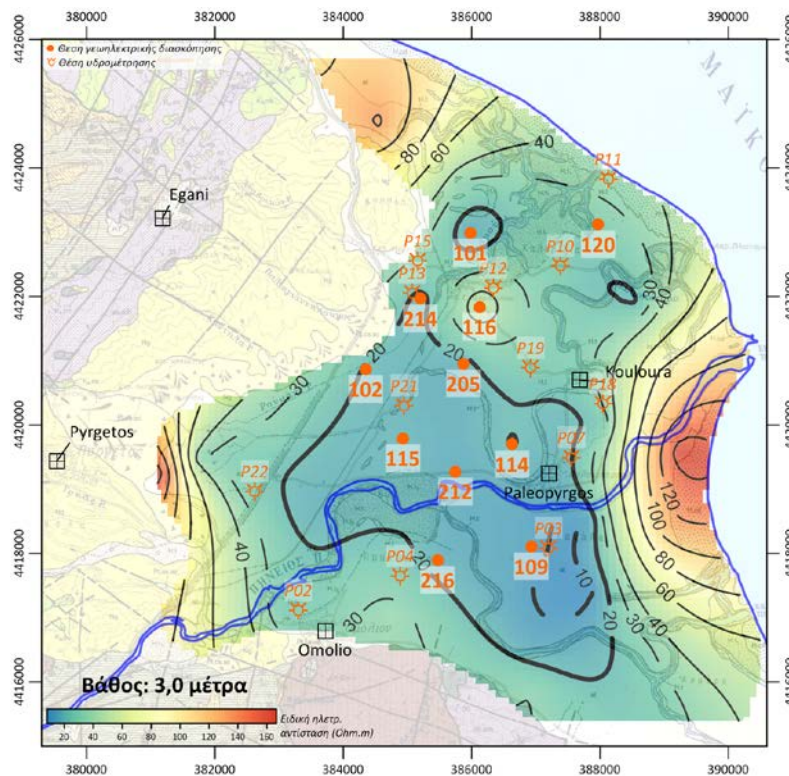
Με τον τρόπο αυτό, οριοθετήθηκε η περιοχή (βλ. Εικ. 4) όπου φαίνεται με βεβαιότητα να εντοπίζεται ο φρεάτιος υδροφόρος και ταυτόχρονα παρέχεται η δυνατότητα να ποσοτικοποιηθεί η διακύμανση του πάχους του από τα αποτελέσματα επεξεργασίας των αντίστοιχων βαθοσκοπήσεων.



Εικόνα 4α. Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης για βάθος 1 μέτρο.



Εικόνα 4β. Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης για βάθος 2 μέτρα.



Εικόνα 4γ. Χάρτης κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης για βάθος 3 μέτρα.

Συζήτηση

Από την αξιολόγηση των γεωφυσικών δεδομένων, το αγωγίμο (11-17 Ohm.m) γεωηλεκτρικό στρώμα που εντοπίζεται μόνο στις καμπύλες των βαθυσκοπήσεων των Εικόνων 4 α, β και γ, αντιστοιχεί στο φρεάτιο υδροφόρο σύστημα. Ο σχηματισμός αυτός υπέρκειται ενός υψηλότερης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (>25 Ohm.m) γεωηλεκτρικού σχηματισμού που εκτιμάται ότι αντιστοιχεί σε έναν εκτεταμένο μαργαϊκό αδιαπέρατο σχηματισμό, ο οποίος αποτελεί και τη βάση του φρεάτιου υδροφόρου.

Στους χάρτες οριζόντιας κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, σκιαγραφούνται και αναδεικνύονται χωρικά οι αγωγίμες περιοχές – ζώνες, οι οποίες συνδέονται με την φρεατία υδροφορία.

Τα αποτελέσματα των γεωφυσικών διασκοπήσεων φαίνεται να συμφωνούν με τα υδρογεωλογικά δεδομένα προηγούμενων ερευνητών. Συγκεκριμένα, το μικρό βάθος του φρεάτιου υδροφόρου συστήματος, όπως αυτό προέκυψε από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις, επιβεβαιώνεται από το μικρό απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του φρεάτιου υδροφορέα, όπως αυτό προέκυψε από τις μετρήσεις στάθμης στα υδροληπτικά έργα της περιοχής από τους Matiatos *et al.* (2014). Αυτό συνάδει με τον μεγάλο αριθμό «αρίδων» που έχουν ανορυχθεί στην περιοχή μελέτης.

Η ύπαρξη μη υφάλμυρου νερού στη μεγαλύτερη έκταση του υδροφορέα, όπως αυτή αποτυπώνεται στα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας συμφωνεί με τα υδροχημικά δεδομένα προηγούμενων μελετών (Παναγόπουλος *κ.α.*, 2011; Matiatos *et al.*, 2014), όπου τόσο η ηλεκτρική αγωγιμότητα (της τάξης των 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ κατά μέσο όρο) όσο και η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου (< 100 mg/l κατά μέσο όρο) είναι αρκετά χαμηλές.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας, στην παράκτια ζώνη η εκτεταμένη εμφάνιση του πολύ συνεκτικού πεδίου αμμοθινών με αυξημένο ποσοστό αργιλικού υλικού, φαίνεται να εμποδίζει τη διείσδυση του θαλασσινού νερού και κατά συνέπεια να αποτρέπει την υφαλμύριση του. Έτσι, η ζώνη του υφάλμυρου νερού φαίνεται να περιορίζεται κυρίως στο βόρειο-ανατολικό τμήμα της περιοχής του δέλτα, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τα υδροχημικά δεδομένα (Matiatos *et al.*, 2014). Συγκεκριμένα, ο δείκτης Revelle είναι μεγαλύτερος στα υδροληπτικά έργα που βρίσκονται πλησιέστερα στην παράκτια ζώνη (π.χ.

σημείο P10), χωρίς ωστόσο το φαινόμενο να είναι ιδιαίτερα έντονο και μόνιμο καθώς το σύστημα ανακάμπτει γρήγορα μετά το πέρας της αρδευτικής περιόδου.

Συμπεράσματα

Από τα προκαταρκτικά αποτελέσματα της επεξεργασίας των γεωφυσικών δεδομένων προκύπτει ότι το φρεάτιο υδροφόρο σύστημα δεν εντοπίζεται σε όλη την έκταση της δελταϊκής πεδιάδας και εκτείνεται κυρίως στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της περιοχής. Στις περισσότερες θέσεις το πάχος του φαίνεται να περιορίζεται τελικά στα πρώτα 5-10 μέτρα βάθος, δεδομένου ότι εντοπίζεται υποκείμενος γεωηλεκτρικός σχηματισμός (20-40 Ohm.m) που εκτιμάται ότι αποτελεί το αδιαπέρατο υπόβαθρό του. Αυτό συμφωνεί με προηγούμενους ερευνητές (Παναγόπουλος κ.α., 2001), οι οποίοι αναφέρουν ότι το βάθος του φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα είναι γενικά περιορισμένο με το βάθος της στάθμης να μην ξεπερνά τα 4 μέτρα για όλο το διάστημα Οκτώβριος 2012 – Σεπτέμβριος 2013 στα σημεία στα οποία έγιναν μετρήσεις (Matiatos *et al.*, 2014). Επίσης, τα αποτελέσματα της γεωφυσικής έρευνας ανέδειξαν την ύπαρξη γλυκού νερού στη μεγαλύτερη έκταση του υδροφορέα και περιορισμένη θαλάσσια διείσδυση στην παράκτια ζώνη, η οποία φαίνεται να ελέγχεται από το υδραυλικό φορτίο εντός του υδροφόρου συστήματος και από την ιζηματολογική σύσταση του αμμοθινικού συστήματος. Η διαπίστωση αυτή συμφωνεί με τα προηγούμενα υδροχημικά δεδομένα (Matiatos *et al.*, 2014) τα οποία καταδεικνύουν ότι οι υψηλότερες τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας και συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου της τάξης των 1000 mg/l καταγράφηκαν στη ζώνη αυτή.

Ευχαριστίες

Η ερευνητική εργασία υποστηρίχθηκε οικονομικά από το Ερευνητικό Έργο ΘΑΛΗΣ-DAPHNE (MIS375908) με τίτλο “ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΤΗΣ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗΣ ΑΛΛΑΓΗΣ ΣΤΑ ΠΟΤΑΜΙΑ ΔΕΛΤΑ. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΔΕΛΤΑ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΠΗΝΕΙΟΥ (ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ)” που συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο – ΕΚΤ) και από Εθνικούς Πόρους στα πλαίσια του ΕΣΠΑ 2007-2013 και οι συγγραφείς ευχαριστούν τους συνάδελφους Μιχελιουδάκη Δημήτριο και Γιαννούλη Δήμητρα-Ηλιάννα για τη συμμετοχή τους στις εργασίες υπαίθρου.

Βιβλιογραφία

- Alexopoulos J.D., Tomara V., Vassilakis EM., Papadopoulos T.D., Dassenakis M., Poulos S., Voulgaris N., Dilalos S., Ghionis G., Goumas G., Pirlis E., 2007. Environmental research of the Korissia coastal wetland (Corfu Isl., Greece), with the application of combined geological and geophysical methods supported by Geographic Information Systems. 11th International Congress of the Geological Society of Greece, Bulletin of Geological Society of Greece, XXXX (4), 1892-1903.
- Alexopoulos J.D., Dilalos S., 2010. Geophysical research for geological structure determination in the region of South Mesogheia (Attica). 12th International Congress of the Geological Society of Greece, Bulletin of the Geological Society of Greece, Patras, XLIII (4), 1898-1906.
- Alexopoulos J., Vassilakis Em., Dilalos S., Pantelis Ch., Papadopoulos T., 2013. Identification of buried active structures with preliminary geophysical and morphotectonic analysis, at eastern Thessaly basin, Greece. 4th International INQUA Meeting on Paleoseismology, Active Tectonics and Archeoseismology (PATA), 4p., Aachen, Germany.
- Elango L. and Kannan R., 2007. Rock-water interaction and its control on chemical composition of groundwater, In: Sarkar, D, Datta, R. and Hannigan, R., Concepts and applications in environmental geochemistry, Elsevier, Italy, 229-243.
- Matiatos I., Paraskevopoulou V., Dassenakis M., Alexopoulos J.D., Panagopoulos A., Lazogiannis K., Poulos S., Arampatzis G., Ghionis G., Kotsopoulos S., Botsou F., Teou X., Sakellari A., Diamantis V., 2014. Groundwater flow regime and quality

- assessment of the alluvial aquifer in the deltaic environment of River Pinios (Thessaly). 10th International Hydrogeological Congress of Greece (*in press*).
- Panagopoulos A., Kotsopoulos S., Kalfountzos D., Alexiou I., Evangelopoulos A. and Belesis A., 2001. Supplementary environmental acts of Reg. 2078/92/EU-Study of natural resources and factors influencing the yield and the quality characteristics of agricultural areas in Thessaly. National Agricultural Research Foundation (N.A.G.R.E.F.).
- Papadopoulos T.D., Alexopoulos J.D., Dilalos S., Pippidis M.J, 2008. Resistivity and VLF measurements for spring mechanism determination at NE Chios Isl. 8th International Hydrogeological Congress of Greece & 3rd MEM Workshop on fissured rocks Hydrology, I, 421-430.
- Zohdy A.A.R., 1989. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner soundings curves. *Geophysics*, 54 (2), 245-253.
- Zohdy A. A. R. and Bisdorf R., 1989. A program for automatic processing and interpretation of Schlumberger sounding curves in Quick Basic 4.0. U. S. Geological Survey open - file report, 89-137.
- Zohdy A. A., & Bisdorf R. J., 1990. Schlumberger soundings near Medicine Lake, California. *Geophysics*, 55 (8), 956-964.
- Yungul S.H., 1996. *Electrical Methods in Geophysical Exploration of Deep Sedimentary Basin*. Chapman & Hall, 197p.
- Αλεξόπουλος Ι., 1998. Συμβολή των γεωφυσικών μεθόδων στη διερεύνηση των υδρογεωλογικών συνθηκών του οροπεδίου της Τρίπολης. Διδακτορική διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Αθήνα, σ. 283.
- Αλεξόπουλος Δ.Ι., Βασιλάκης ΕΜΜ., Δίλαλος Σ., Παπαδόπουλος Δ.Τ., 2008. Συμβολή της γεωφυσικής έρευνας στην οριοθέτηση υπόγειας υδάτινης ροής σε λιμνοθαλάσσιο περιβάλλον. 8th International Hydrogeological Congress of Greece & 3rd MEM Workshop on fissured rocks Hydrology, I, 421-430.
- Δίλαλος Σ., 2009. Διερεύνηση υδρογεωλογικών και περιβαλλοντικών συνθηκών με γεωφυσικές μεθόδους, σε επιλεγμένες θέσεις της νήσου Χίου. Μεταπτυχιακή διατριβή. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Αθήνα, σ. 188.
- Κατσικάτσος Γ. και Μιγκίρος Γ. (1982). Φύλλο Ραψάνη – Γεωλογικός χάρτης κλίμακας 1:50000. ΙΓΜΕ, Αθήνα.