

## ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟ ΟΡΟΠΕΔΙΟ ΤΟΥ ΟΜΑΛΟΥ, Ν. ΧΑΝΙΩΝ

Βαφειδής Α.<sup>1</sup>, Μανούσογλου Ε.<sup>2</sup>, Hamdan Η.<sup>1</sup>, Ανδρονικίδης Ν.<sup>1</sup>, Κουκαδάκη Μ.<sup>1</sup>, Κρητικάκης Γ.<sup>1</sup>, Οικονόμου Ν.<sup>1</sup> και Σπανουδάκης Ν.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 731 00 Χανιά, vafidis@mred.tuc.gr, mkoukad@mred.tuc.gr.

<sup>2</sup> Τομέας Γεωλογίας, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, 731 00 Χανιά, emanout@mred.tuc.gr.

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εξετάζονται και συγκρίνονται τα προκαταρκτικά αποτελέσματα γεωφυσικής διασκόπησης που πραγματοποιήθηκε στο οροπέδιο του Ομαλού στο νομό Χανίων, Κρήτης. Η γεωφυσική έρευνα περιελάμβανε μετρήσεις ηλεκτρικής τομογραφίας, ηλεκτρικής χαρτογράφησης, σεισμικής διάθλασης, γεωραντάρ, VLF, κινούμενου πομπού-δέκτη και τέλος βαρυτικής χαρτογράφησης. Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφόρων μεθοδολογιών που χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό και την απεικόνιση των καρστικών μορφών που συναντώνται στην περιοχή. Στην παρούσα μελέτη επομένως δίνεται έμφαση στη χρησιμότητα των γεωφυσικών μεθόδων στον εντοπισμό καρστικών δομών. Η επεξεργασία των δεδομένων επιτρέπει την αναγνώριση τριών γεωηλεκτρικών στρωμάτων που συνιστούν το γεωλογικό υπόβαθρο. Πρόκειται για το πρώτο στρώμα πολύ υψηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων, το οποίο χαρακτηρίζεται ως αλλουβιακές / διλλουβιακές αποθέσεις. Το δεύτερο στρώμα μειωμένων ηλεκτρικών αντιστάσεων που κατά κύριο λόγο αντικατοπτρίζει την ύπαρξη μαργών και τέλος το τρίτο γεωηλεκτρικό στρώμα, το οποίο με τη σειρά του οριοθετεί το ανθρακικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης. Ο συνδυασμός όλων των γεωφυσικών μεθόδων συγκλίνει στο ίδιο συμπέρασμα σχετικά με το πάχος των υπερκείμενων σχηματισμών του ανθρακικού υποβάθρου, το μέγιστο πάχος των οποίων είναι περίπου 115 m. Επίσης στο ανθρακικό υπόβαθρο εντοπίστηκαν δολίνες και καρστικά έγκοιλα σε ένα τμήμα του οροπεδίου του Ομαλού, όπου και πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική διασκόπηση.

### 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των γεωφυσικών μετρήσεων στο οροπέδιο του Ομαλού κατά τα έτη 2002 - 2003. Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να διαπιστωθεί κατά πόσο ο συνδυασμός των γεωφυσικών μεθόδων είναι σε θέση να εξάγει ορθά συμπεράσματα σχετικά με τους γεωλογικούς σχηματισμούς που δομούν το οροπέδιο. Οι γεωφυσικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν αποσκοπούσαν στον υπολογισμό του πάχους του εδαφικού καλύμματος και του συνόλου των κλαστικών σχηματισμών καθώς και στην απεικόνιση των δολίνων και καρστικών εγκοίλων τμήματος του οροπεδίου.

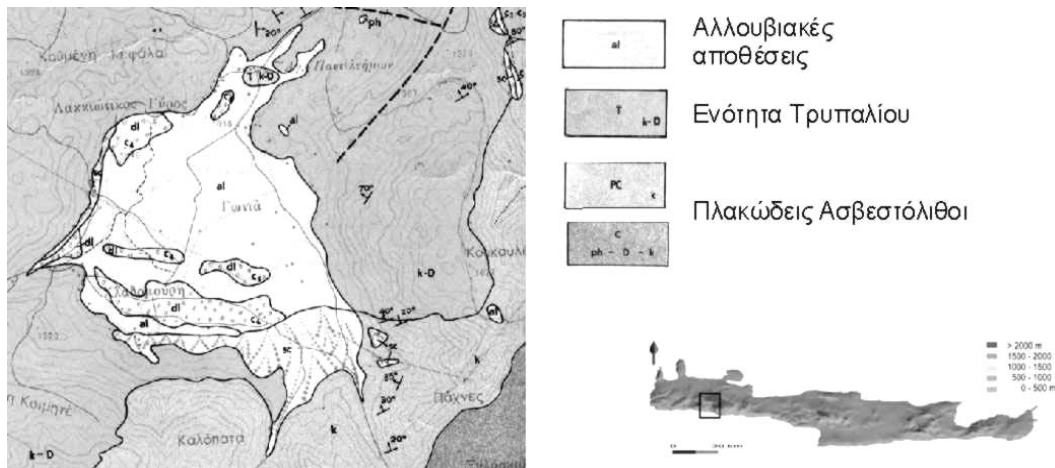
Η γεωφυσική διασκόπηση πραγματοποιήθηκε με τη συμβολή φοιτητών του Πολυτεχνείου Κρήτης, οι οποίοι αποκόμισαν σημαντική εμπειρία και εξοικειώθηκαν με το γεωφυσικό εξοπλισμό και τη συλλογή δεδομένων.

### 2 ΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η περιοχή μελέτης εντοπίζεται στο δυτικό τμήμα των Λευκών Ορέων. Το οροπέδιο του Ομαλού αποτελεί μία τυπική πόλγη που βρίσκεται στην περιοχή εξάπλωσης της ρηγματογενούς ζώνης μεταξύ του καλύμματος του Τρυπαλίου και των υποκείμενων ανθρακικών σχηματισμών.

Η πόλγη του Ομαλού χαρακτηρίζεται γεωλογικά από τρεις ενότητες: α) Νεογενείς – Τεταρογενείς αποθέσεις, β) Ενότητα Τρυπαλίου και γ) Ομάδα πλακωδών ασβεστολίθων.

Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ο γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής του οροπεδίου, στον οποίο διακρίνεται η έντονη παρουσία αλλουβιακών αποθέσεων εντός της πόλης με κατά τόπους εμφάνιση μαργών και κροκαλοπαγών πάνω στους καρστικοποιημένους ασβεστόλιθους. Η πόλη του Ομαλού αναπτύσσεται στην επαφή της ενότητας Τρυπαλίου και Πλακωδών ασβεστολίθων και κατά κύριο λόγο εντός των ασβεστολίθων του Τρυπαλίου.



Σχήμα 1. Γεωλογικός χάρτης του οροπεδίου του Ομαλού και τοπογραφικός χάρτης της Κρήτης.

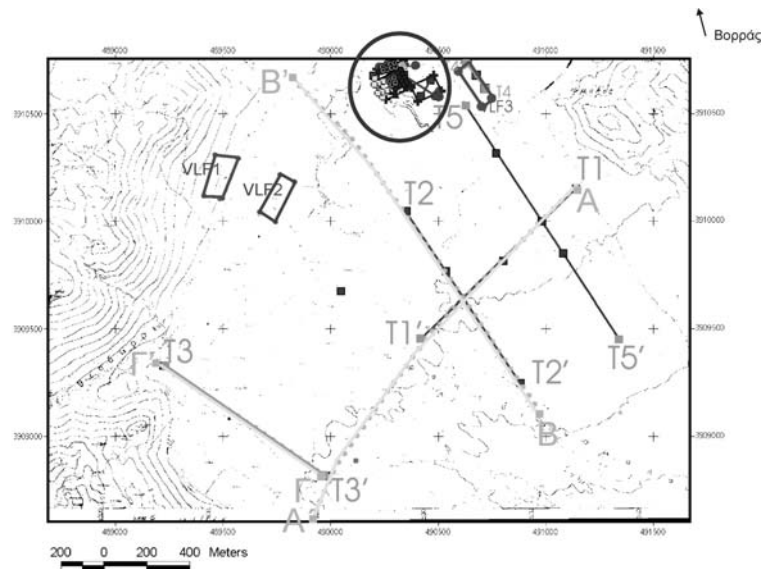
### 3 ΠΡΑΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

Η γεωφυσική διασκόπηση που αναφέρεται στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε σε προκαταρκτικό τμήμα της πόλης του Ομαλού διαστάσεων 3x2 km. Οι γεωφυσικές εντούτοις μέθοδοι που παρουσιάζονται στη συνέχεια, εκτός από δύο γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας T1 – T1' και T2 – T2' (βλ. §3.5), έχουν επικεντρωθεί σε ένα μικρότερο τμήμα της αρχικής έκτασης, διαστάσεων 350x250 m (κύκλος στο Σχ. 2). Η συγκεκριμένη περιοχή απεικονίζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στο Σχήμα 3.

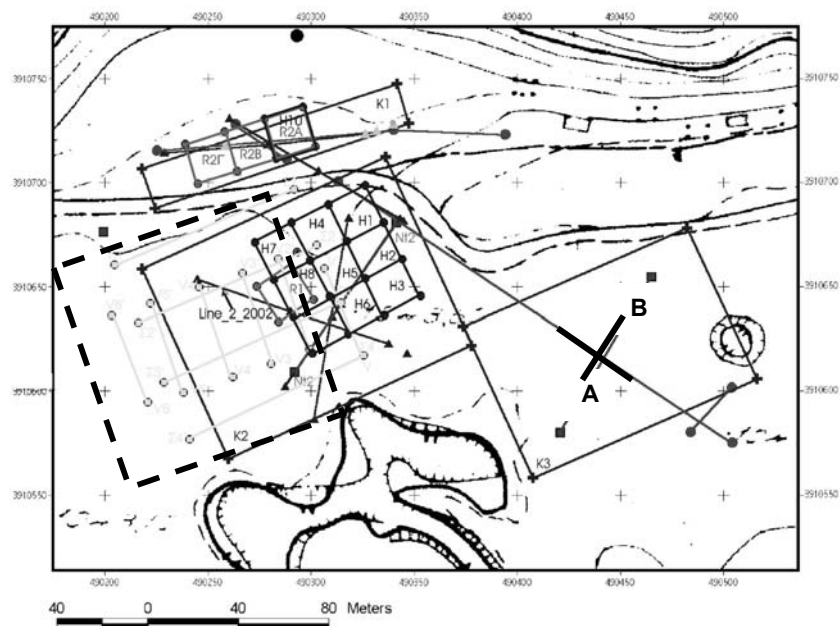
Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προέκυψαν κατόπιν επεξεργασίας των γεωφυσικών δεδομένων που ελήφθησαν κατά τις περιόδους 2002 - 2003 και αναφέρονται στη σύγκριση γεωφυσικών μεθόδων που πραγματοποιήθηκαν στην ίδια περιοχή ενδιαφέροντος.

Συγκεκριμένα, η γεωφυσική έρευνα περιελάμβανε:

- ✓ Ηλεκτρική χαρτογράφηση με τη διάταξη Wenner ( $a = 10$  m με ισαπόσταση γραμμών 10 m) σε 3 καννάβους συνολικής έκτασης 20.000 m<sup>2</sup>.
- ✓ Χαρτογράφηση με τη μέθοδο κινούμενου πομπού – δέκτη σε 3 καννάβους συνολικής έκτασης 4000 m<sup>2</sup>.
- ✓ Βαρυτική χαρτογράφηση σε 3 γραμμές μελέτης συνολικού μήκους 5000 m και με ισαπόσταση σταθμών 50 m.
- ✓ Σεισμική διάθλαση διαμήκων και εγκαρσίων κυμάτων σε 17 γραμμές μελέτης συνολικού μήκους 1200 m.
- ✓ Γεωραντάρ με κεραίες των 110 MHz σε 2 καννάβους έκτασης 1600 m<sup>2</sup> και 3 γραμμές συνολικού μήκους 430 m.
- ✓ Ηλεκτρική τομογραφία με τη διάταξη Wenner – Schlumberger σε 6 γραμμές μελέτης συνολικού μήκους 3320 m.
- ✓ Χαρτογράφηση με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο μέτρησης γωνίας κλίσης (VLF) σε 3 καννάβους συνολικής έκτασης 42.000 m<sup>2</sup> και 20 γραμμές μελέτης συνολικού μήκους 14.000 m.



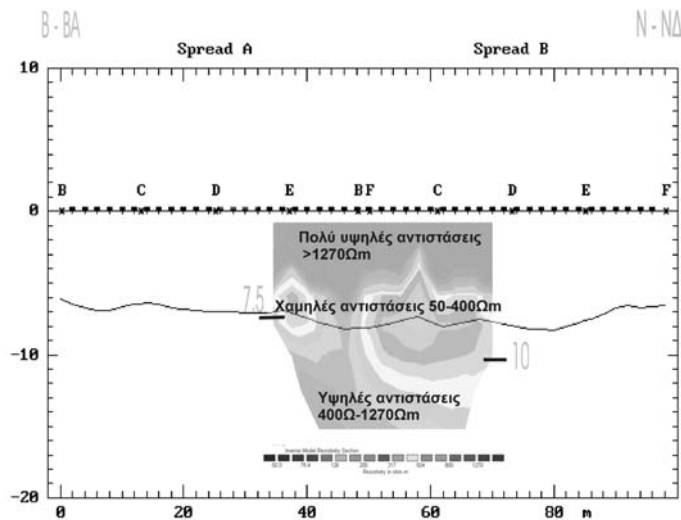
Σχήμα 2. Τοπογραφικός χάρτης ευρύτερης περιοχής γεωφυσικής διασκόπησης στο οροπέδιο. Παρουσιάζονται ενδεικτικές γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας (T1-T1', T2-T2'), κάρναβοι VLF καθώς και γραμμές βαρυτικής χαρτογράφησης (A-A', B-B', Γ-Γ'). Η κυκλική περιοχή υποδηλώνει το χώρο, όπου επικεντρώθηκε η γεωφυσική διασκόπηση και της οποίας τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Σχήμα 3. Τοπογραφικός χάρτης της περιοχής που επικεντρώθηκε η γεωφυσική διασκόπηση. Διακρίνονται οι κάρναβοι του γεωραντάρ (R2A, B, Γ) της μεθόδου κινούμενου πομπού-δέκτη (H1 -H10) και της ηλεκτρικής μεθόδου (K1, K2, K3). Η AB αντιστοιχεί σε γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας και η κάθετη σε αυτή σε γραμμή γεωραντάρ (βλ. §3.3). Το πλαίσιο με διακεκομμένη γραμμή τετραγώνου οριοθετεί την περιοχή που διασκοπήθηκε από τη σεισμική διάθλαση.

### 3.1 Συνδυασμός ηλεκτρικής τομογραφίας - σεισμικής διάθλασης

Σε ένα τμήμα της πόλης του Ομαλού πραγματοποιήθηκαν μία γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας μήκους 36 m και διεύθυνσης βόρεια – βορειανατολικά προς νότιο – νοτιοδυτικά καθώς και μία γραμμή σεισμικής διάθλασης μήκους 94 m και ίδιας διεύθυνσης.



Σχήμα 4. Υπέρθυση γραμμής σεισμικής διάθλασης πάνω στα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας. Διακρίνονται τα τρία γεωηλεκτρικά στρώματα που προέκυψαν από την ερμηνεία της τομογραφίας καθώς και οι δύο γεωλογικές ενότητες που οριοθετούν οι σεισμικές μετρήσεις. Στον οριζόντιο άξονα απεικονίζονται οι σταθμοί συλλογής των σεισμικών δεδομένων και στον κατακόρυφο το βάθος διασκόπησης (m).

Η ηλεκτρική τομογραφία πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τη διάταξη Wenner - Schlumberger κατά την οποία η απόσταση ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού αυξανόταν συμμετρικά ως προς το κέντρο της διάταξης με βήμα 3 m. Για την αντιστροφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο RES2DINV (Loke and Barker, 1994).

Η γεωηλεκτρική τομή απεικονίζει τη μεταβολή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος. Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης για την εν λόγω περιοχή κυμαίνονται από 50 - 1300 Ωm. Συγκεκριμένα διακρίνονται τρεις γεωηλεκτρικές ενότητες: 1) το πρώτο στρώμα εξαιρετικά υψηλών αντιστάσεων, με τιμές που ξεπερνούν τα 1270 Ωm, 2) ένα δεύτερο στρώμα, το οποίο χαρακτηρίζεται από μειωμένες τιμές 50 - 400 Ωm και τέλος 3) το τρίτο γεωηλεκτρικό στρώμα, το οποίο και χαρακτηρίζεται από αντιστάσεις της τάξης των 400 - 1270 Ωm (Σχ. 4). Οι ασυνήθιστα υψηλές τιμές που παρατηρούνται στο πρώτο στρώμα είναι δυνατόν να δικαιολογηθούν εάν ληφθεί υπόψη η εποχή κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η γεωφυσική διασκόπηση. Οι μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας συλλέχθηκαν στο τέλος του καλοκαιριού, με αποτέλεσμα το επιφανειακό στρώμα του υπεδάφους να είναι ιδιαίτερα ξηρό, με μηδαμινή παρουσία υγρασίας σε σχέση με τα κατώτερα στρώματα.

Σχετικά με τη γεωλογική ερμηνεία της ηλεκτρικής τομογραφίας, οι τρεις γεωηλεκτρικές ενότητες μπορούν να ερμηνευτούν ως εξής: Το πρώτο στρώμα που παρατηρείται μπορεί να χαρακτηριστεί ως αλλουβιακές ή διλλουβιακές αποθέσεις. Στη συνέχεια ακολουθεί μία ενότητα, η οποία αποδίδεται σε μάργες ενώ το τελευταίο στρώμα είναι αυτό που οριοθετεί το ανθρακικό υπόβαθρο.

Παρατηρείται ότι ο γεωλογικός χαρακτηρισμός αυτού του τμήματος της πόλης, όπου και πραγματοποιήθηκε η διασκόπηση, βρίσκεται σε συμφωνία με το γεωλογικό χάρτη της περιοχής. Οι επιφανειακοί σχηματισμοί του Ομαλού χαρακτηρίζονται όντως ως σύγχρονες αλλουβιακές αποθέσεις, οι οποίες επικαθόνται πάνω στο ανθρακικό υπόβαθρο της περιοχής.

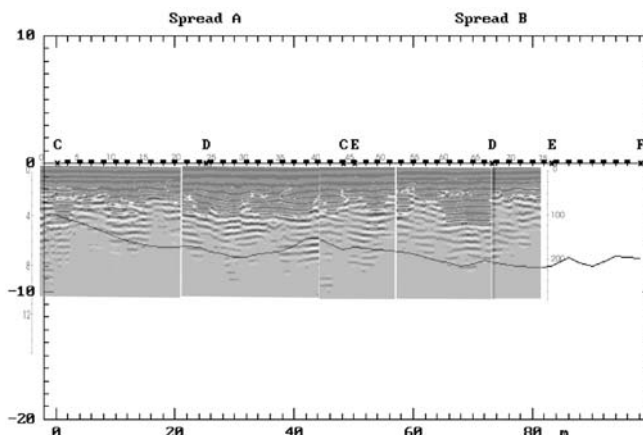
Όσον αφορά στη γραμμή της σεισμικής διάθλασης που πραγματοποιήθηκε στον ίδιο χώρο με τις μετρήσεις της ηλεκτρικής τομογραφίας, είχε συνολικό μήκος 94 m και ισαπόσταση στους σταθμούς γεωφώνων 2 m. Στην περίπτωση αυτή η σεισμική γραμμή οριοθετεί δύο γεωλογικά στρώμα-

τα. Το πρώτο στρώμα αντιστοιχεί σε αλλουβιακές – διλλουβιακές αποθέσεις και το δεύτερο στο ανθρακικό υπόβαθρο (Σχ 4). Οι σεισμικές ταχύτητες που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο συν – πλην (plus – minus) ήταν της τάξης των 530 m/sec και 2500m/sec για τα δύο στρώματα αντίστοιχα. Μία σύγκριση των αποτελεσμάτων της ηλεκτρικής τομογραφίας και της σεισμικής διάθλασης αποδεικνύει ότι κατά κύριο λόγο συμφωνούν, με τη διαφορά ότι η γεωλογική ερμηνεία με βάση την ειδική ηλεκτρική αντίσταση των σχηματισμών προσφέρει μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε σχέση με την ερμηνεία που προκύπτει από τη ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων.

### 3.2 Συνδυασμός γεωραντάρ - σεισμικής διάθλασης

Η γραμμή του γεωραντάρ που περιγράφεται είχε μήκος 75 m, διεύθυνση από δύση προς ανατολή και βάθος διεξόδου των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέχρι 10 m περίπου. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν με κεραίες 110 MHz, ενώ το βήμα δειγματοληψίας ήταν 0,5 m.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στις καταγραφές του γεωραντάρ παρατηρείται εξασθένηση αυτών με το βάθος. Ενώ αρχικά παρατηρείται έντονη διεξόδυση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέχρι βάθους 4 m περίπου, στη συνέχεια οι καταγραφές του γεωραντάρ παρουσιάζονται ιδιαίτερα εξασθενημένες μέχρι και τα 10 m (Σχ. 5). Η εξασθένηση αυτή πιθανότατα σχετίζεται με το δεύτερο γεωηλεκτρικό στρώμα που χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη μαργών. Η διάδοση επομένως των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων δυσχεραίνεται εξαιτίας της παρουσίας μάργας, με αποτέλεσμα το γεωραντάρ να μην είναι σε θέση να δώσει περισσότερες πληροφορίες σε μεγαλύτερα βάθη. Η διαχωριστική επιφάνεια ανάμεσα στις ισχυρές και λιγότερο ισχυρές καταγραφές οριοθετεί τη διεπιφάνεια ανάμεσα στο πρώτο και δεύτερο γεωηλεκτρικό στρώμα.



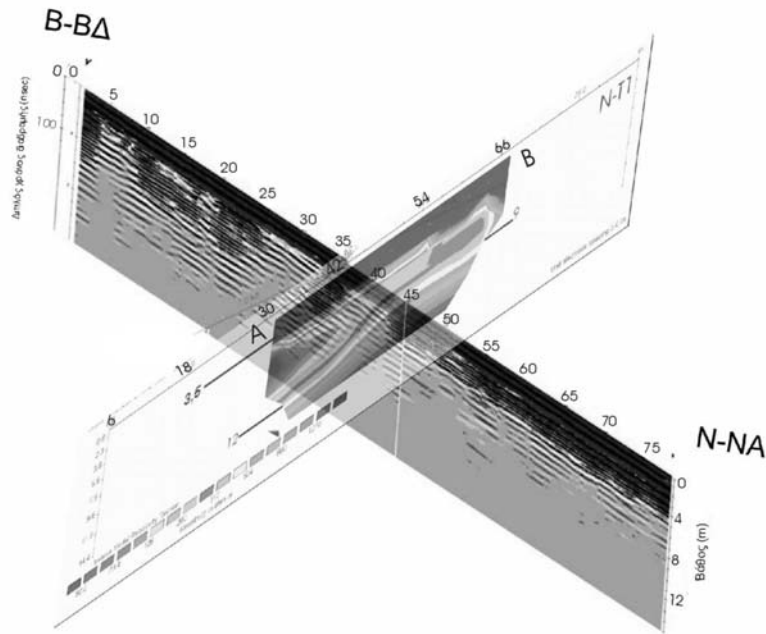
Σχήμα 5. Υπέρθωση του μοντέλου ταχυτήτων από τη σεισμική διάθλαση πάνω στις καταγραφές του γεωραντάρ.

Τα σεισμικά δεδομένα συμπληρώνουν τις καταγραφές του γεωραντάρ προσφέροντας πληροφορίες για το ανθρακικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης. Συγκεκριμένα η γραμμή της σεισμικής διάθλασης φαίνεται να οριοθετεί την οροφή του ανθρακικού υποβάθρου.

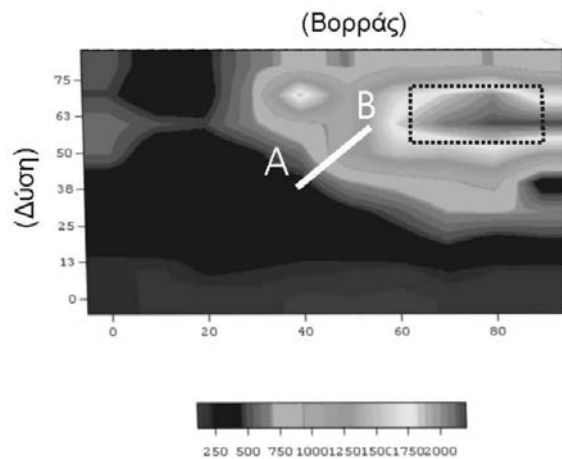
### 3.3 Συνδυασμός ηλεκτρικής τομογραφίας - γεωραντάρ - ηλεκτρικής χαρτογράφησης

Η γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας AB είχε συνολικό μήκος 36 m, βήμα διασκόπησης 3 m και διεύθυνση νότιο – νοτιοδυτικά προς βόρεια – βορειανατολικά (βλ. διακεκομμένες γραμμές στο Σχ.3). Η επιφάνεια του έδαφους στην εν λόγω περιοχή ήταν οριζόντια και δε χρειάστηκε να γίνουν τοπογραφικές διορθώσεις. Η γεωλογική ερμηνεία της συγκεκριμένης τομογραφίας ήταν σε πλήρη συμφωνία με το γεωλογικό μοντέλο που προέκυψε από προηγούμενες ηλεκτρικές μετρήσεις (βλ. §3.1). Αξίζει να σημειωθεί ότι στη γεωηλεκτρική τομή AB παρατηρείται μείωση του πάχους των υπερκείμενων σχηματισμών του ανθρακικού υποβάθρου, καθώς κατευθυνόμαστε προς τα βορειοανατολικά της περιοχής (Σχ. 6).

Την ηλεκτρική τομογραφία συμπλήρωσαν μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο του γεωραντάρ. Οι γραμμές του γεωραντάρ είχαν μήκος 75 m, διεύθυνση βόρεια – βορειοδυτικά προς νότιο – νοτιοανατολικά και έτεμναν σχεδόν κάθετα τη γραμμή της ηλεκτρικής τομογραφίας. Ακόμη και στην περίπτωση αυτή, οι καταγραφές εμφανίζουν έντονη εξασθένιση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων μέσα στο στρώμα των μαργών (Σχ. 6).



Σχήμα 6. Συνδυασμός ηλεκτρικής τομογραφίας (AB) και γεωραντάρ (βλ. Σχ. 3). Είναι εμφανής η ταύπιση του πρώτου στρώματος πολύ υψηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων με τις ισχυρές καταγραφές του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο γεωραντάρ. Η τομή του γεωραντάρ έχει συνολικό μήκος 75 m και βάθος 15 m. Η ηλεκτρική τομή έχει μήκος 36 m, βάθος 14,5 m και εύρος ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων 50 έως 1300 Ωm.

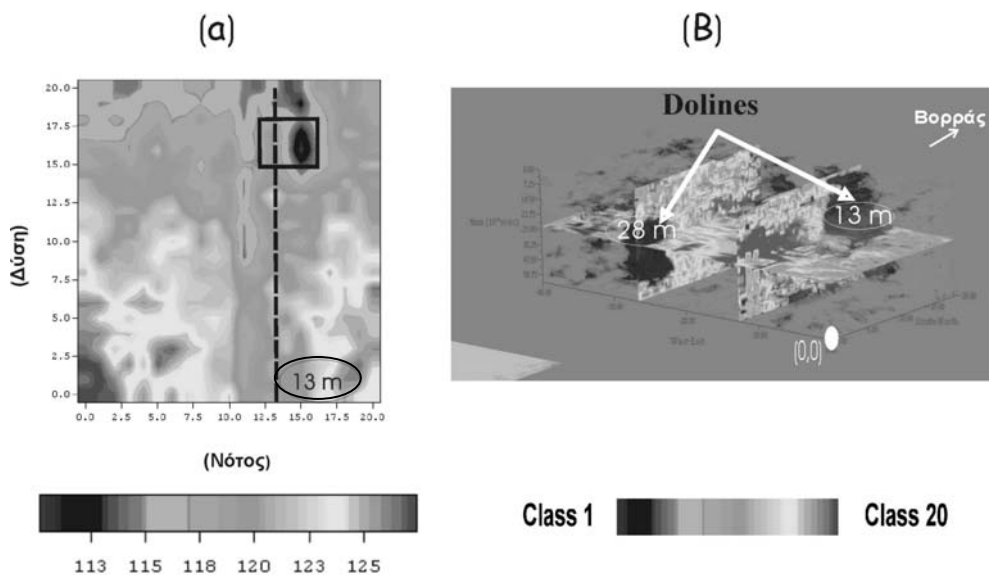


Σχήμα 7. Χάρτης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης και γραμμή ηλεκτρικής τομογραφίας AB. Η χαρτογράφηση πραγματοποιήθηκε με τη διάταξη Wenner με  $a = 10$  m και ισαπόσταση γραμμών 10 m. Το τετράγωνο αντιστοιχεί στην περιοχή υψηλής φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Σχετικά με τα δεδομένα της ηλεκτρικής χαρτογράφησης (βλ. κάρναβο K3 στο Σχ.3), η οποία διεξήχθη στον ίδιο χώρο με αυτό των προηγούμενων μεθόδων η επεξεργασία των μετρήσεων υπέδειξε μία περιοχή αυξημένης φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προς τα βορειοανατολικά της περιοχής μελέτης (τετράγωνο στο Σχ. 7). Η διαπίστωση αυτή συμφωνεί με την αρχική επισήμανση στα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας και αιτιολογείται αν ληφθεί υπόψη ότι κατευθυνόμαστε προς το όριο της πόλινγς του Ομαλού.

### 3.4 Συνδυασμός γεωραντάρ - ηλεκτρομαγνητικής χαρτογράφησης

Το έτος 2003 διεξήχθη συνδυασμένη διασκόπηση ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων (μέθοδοι κινούμενου πομπού – δέκτη και γεωραντάρ). Αν και ο κάρναβος του γεωραντάρ ήταν 20x40m, η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε σε κοινό κάρναβο διαστάσεων 20x20m καθώς ο κάρναβος της ηλεκτρομαγνητικής διασκόπησης ήταν 20x20m. Οι γραμμές και για τις δύο μεθόδους είχαν διεύθυνση από νότο προς βορρά.



Σχήμα 8. Συνδυασμός ηλεκτρομαγνητικής μεθόδου κινούμενου πομπού – δέκτη (α) και γεωραντάρ (β). Στο χάρτη της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης (α) και στον ταξινομημένο όγκο των καταγραφών του γεωραντάρ (β) παρατηρείται μία πιθανή δολίνη στο βόρειο τμήμα του κάρναβου (13 m). Στο τρισδιάστατο σχήμα (β) ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί σε χρόνο (0-540 nsec) και οι δύο οριζόντιοι σε απόσταση (0-40 m και 0-20 m).

Στη μέθοδο κινούμενου πομπού – δέκτη υπολογίζονται απευθείας με βήμα διασκόπησης 1 m η πραγματική και φανταστική συνιστώσα του δευτερεύοντος ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και στη συνέχεια η φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Το βάθος διασκόπησης με το όργανο EM – 31 έφτανε μέχρι τα 6 m περίπου (Σχήμα 8α).

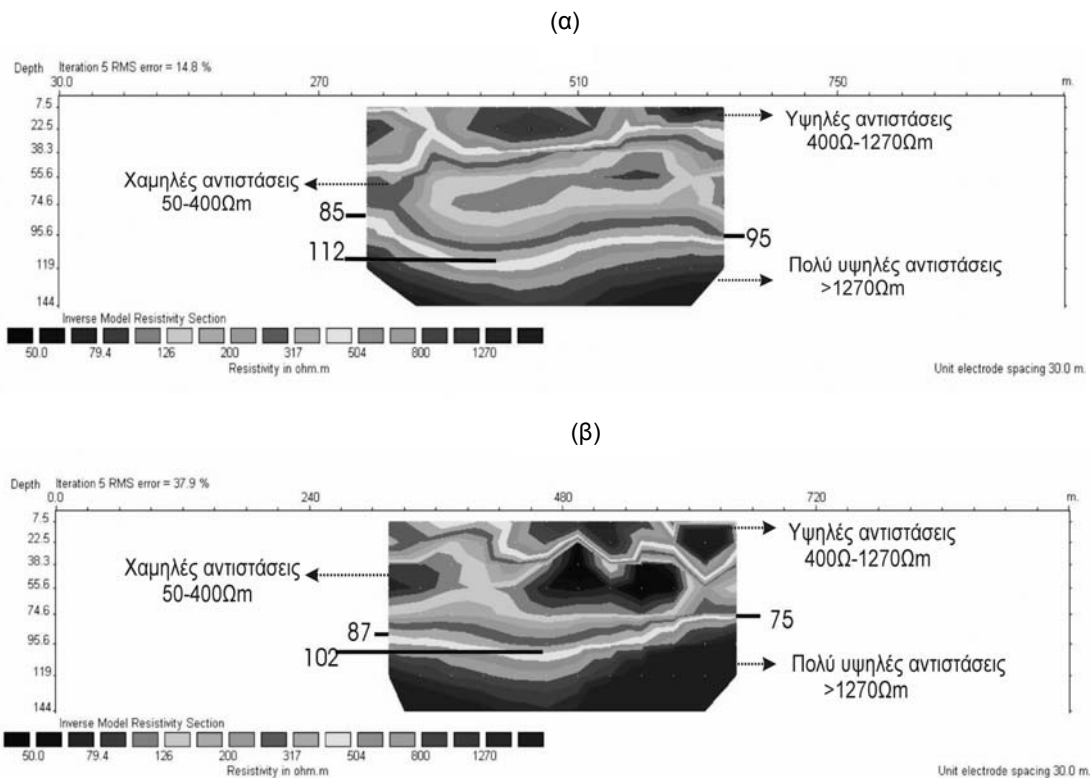
Σχετικά με τον κάρναβο του γεωραντάρ, οι γραμμές απείχαν ισάποσταση 1 m, το βήμα διασκόπησης ήταν 0,5 m και χρησιμοποιήθηκαν πάλι κεραίες των 110 MHz. Στην περίπτωση αυτή στα δεδομένα του γεωραντάρ εφαρμόστηκαν μέθοδοι ταξινόμησης. Η λογική της ταξινόμησης στηρίζεται στο γεγονός ότι όλες οι μετρήσεις του γεωραντάρ έχουν κάποιες ιδιότητες, οι οποίες άλλοτε είναι κοινές και άλλοτε διαφέρουν κατά πολύ από μέτρηση σε μέτρηση. Ανάλογα επομένως με τα χαρακτηριστικά τους (attributes), τα δεδομένα ταξινομήθηκαν σε ομάδες – τάξεις. Δεδομένα με παρόμοια χαρακτηριστικά εμφανίζονται με ίδιο χρωματισμό και αντιστοιχούν σε ανάλογες γεωλογικές μορφές (Taner et. al., 2001). Από τα ταξινομημένα πλέον δεδομένα, διαπιστώθηκε ότι οι περιοχές στα 13 και 28 m αντίστοιχα προς δυσμάς ανήκουν στην ίδια τάξη (Σχ. 8β). Τα βάθη στα οποία εντοπίστηκαν οι ανωμαλίες προέκυψαν έπειτα από αντιστοιχία της ταχύτητας διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων (0,1 m/sec) και του μονού χρόνου διαδρομής κύματος (130 nsec για την ανωμαλία των 13 m).

Η μέθοδος του κινούμενου πομπού – δέκτη εμφάνισε με τη σειρά της περιοχή χαμηλών ειδικών ηλεκτρικών αντιστάσεων στα βόρεια του κοινού καννάβου. Συγκεκριμένα αυτή η ανωμαλία παρατηρείται όντως σε μία από τις δύο περιοχές που είχαν επισημανθεί από τα ταξινομημένα δεδομένα του γεωραντάρ (τετράγωνο στο Σχ. 8α). Οι δύο μέθοδοι επομένως φαίνεται να συμφωνούν μεταξύ τους, οριοθετώντας μία πιθανή δολίνη.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι οι χαμηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που αποδίδονται στη δολίνη. Η παραπάνω διαπίστωση δεν μπορεί να γενικευτεί ως κανόνας για όλα τα καρστικά έγκοιλα. Οι τιμές επομένως της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που μπορούν να αποδοθούν σε καρσική δομή δεν είναι αποκλειστικά υψηλές ή χαμηλές, αλλά εξαρτώνται πάντοτε από τις συνθήκες του περιβάλλοντα χώρου.

### 3.5 Ηλεκτρική τομογραφία (γραμμές T1 – T1' και T2 – T2')

Στην περίπτωση αυτή παρουσιάζονται δύο γραμμές ηλεκτρικής τομογραφίας μήκους 330 m έκαστη και με βήμα διασκόπησης 30 m στο κέντρο περίπου της πόλγης του Ομαλού (βλ. Σχ. 2). Ο σκοπός των συγκεκριμένων μετρήσεων ήταν να διαπιστωθεί κατά πόσο είναι έντονο το ανάγλυφο της οροφής των ανθρακικών σχηματισμών στη πόλγη του Ομαλού.



Σχήμα 9. Ηλεκτρικές τομογραφίες κατά μήκος των γραμμών μελέτης T1 – T1' (α) και T2 – T2' (β) που απεικονίζουν την εναλλαγή των τριών στρωμάτων και την έντονη διακύμανση της οροφής του ανθρακικού υποβάθρου.

Πράγματι οι ηλεκτρικές τομογραφίες οριοθέτησαν τα τρία γεωηλεκτρικά στρώματα των αλλουβιακών αποθέσεων, της μάργας και του ανθρακικού υποβάθρου. Σχετικά με το τελευταίο, παρατηρείται μία έντονη διακύμανση στο βάθος της οροφής του με τιμές που κυμαίνονται από 75 – 115 m. Διαπιστώνεται επομένως ότι το ανάγλυφο της οροφής των ασβεστολιθικών σχηματισμών της πόλγης δεν είναι ομαλό (Σχ. 9).

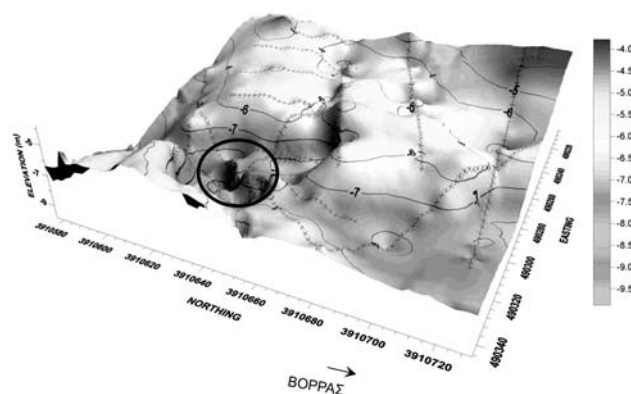
Οι διαπιστώσεις των γραμμών ηλεκτρικής τομογραφίας επιβεβαιώθηκαν από γεώτρηση που βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα της πόλγης του Ομαλού. Σύμφωνα με τη γεώτρηση εμφανίζονται



αλλουβιακές προσχώσεις (χάλικες, 'terra rosa'), στρώμα μάργας με άμμους, και τέλος το ανθρακικό υπόβαθρο.

### 3.6 Τρισδιάστατη απεικόνιση της οροφής του ανθρακικού υποβάθρου

Η τρισδιάστατη απεικόνιση της οροφής του ανθρακικού υποβάθρου προέκυψε από τη συνδυασμένη ερμηνεία όλων των γραμμών σεισμικής διάθλασης που διεξήχθησαν σε τμήμα του Ομαλού (βλ. κύκλος στο Σχ. 2). Στην τρισδιάστατη εικόνα εμφανίζεται βύθιση του ανθρακικού υποβάθρου στα νοτιοανατολικά της περιοχής μελέτης (κύκλος στο Σχ. 10). Στη συγκεκριμένη θέση το βάθος της οροφής μειώνεται από τα 4-5 m στα 9 m.



Σχήμα 10. Τρισδιάστατη απεικόνιση της οροφής του ανθρακικού υποβάθρου. Οι σταυροί αντιστοιχούν στις θέσεις των γεωφώνων σε κάθε σεισμική γραμμή μελέτης. Με πιο σκούρο χρώμα απεικονίζονται τα βαθύτερα σημεία από την επιφάνεια του εδάφους.

Συμπερασματικά αποδεικνύεται ότι η μέθοδος της σεισμικής διάθλασης είναι σε θέση να χαρτογραφήσει με λεπτομέρεια το ανθρακικό υπόβαθρο, το οποίο εμφανίζεται αρκετά έντονο. Η επιτυχής εφαρμογή αυτής της μεθόδου στο συγκεκριμένο τμήμα της πόλγης υποδεικνύει τη συνέχιση της διασκόπησης σε ολόκληρη πλέον την πόλγη του Ομαλού.

## 4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η προκαταρκτική γεωφυσική διασκόπηση που πραγματοποιήθηκε σε τμήμα του οροπεδίου του Ομαλού επέτρεψε την απεικόνιση σπηλαιώσεων και δολίνων κατά μήκος του υφιστάμενου επαρχιακού δρόμου. Σχετικά με τη γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής, εντοπίστηκαν τρία γεωηλεκτρικά στρώματα, τα οποία αντιστοιχούν σε αλλουβιακές – διλουβιακές αποθέσεις, σε ένα στρώμα μάργας και τέλος στο ανθρακικό υπόβαθρο του χώρου μελέτης. Η συνδυασμένη ερμηνεία των γραμμών σεισμικής διάθλασης καθώς και δύο γραμμών ηλεκτρικής τομογραφίας επέτρεψε την τρισδιάστατη απεικόνιση της οροφής του ανθρακικού υποβάθρου. Παράλληλα αναδεικνύονται βυθίσεις του ανθρακικού υποβάθρου, οι οποίες συνδέονται με υπαρκτές δολίνες της περιοχής.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφόρων γεωφυσικών μεθόδων, προέκυψε ότι η ηλεκτρική τομογραφία είναι η πλέον κατάλληλη για τον εντοπισμό των διαφόρων στρωμάτων του υπεδάφους και την απεικόνιση των ζητούμενων καρστικών μορφών. Με τη μέθοδο του γεωραντάρ και την εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων ταξινόμησης απεικονίστηκαν με υψηλή πλέον ανάλυση οι δολίνες και τα καρστικά έγκοιλα, τα οποία επιβεβαιώθηκαν από τη διεξαγωγή χαρτογράφησης με την ηλεκτρομαγνητική μέθοδο κινούμενου πομπού – δέκτη. Με τη σεισμική τέλος διάθλαση, προσδιορίστηκαν οι ταχύτητες διάδοσης των διαμήκων και εγκάρσιων κυμάτων, τόσο στους υπερκείμενους κλαστικούς σχηματισμούς όσο και στα μεταμορφωμένα ανθρακικά πετρώματα της ενότητας

του Τρυπαλίου. Δύο γεωηλεκτρικές τομές στο κέντρο της πόλης υπέδειξαν ότι το υπόβαθρο παρουσιάζει αρκετά έντονο ανάγλυφο, με διακυμάνσεις στο βάθος της οροφής των ανθρακικών σχηματισμών από 75 – 115 m.

Η παρούσα μελέτη απέδειξε ότι η συνδυασμένη εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων, με τη συμβολή πάντα της γεωλογίας, είναι σε θέση να εξάγει ορθά συμπεράσματα σχετικά με τις γεωλογικές μορφές στην περιοχή του Ομαλού και την ανάδειξη επιμέρους ανωμαλιών και περιοχών ενδιαφέροντος. Τα αποτελέσματα ωστόσο που παρατέθηκαν στην παρούσα εργασία, αποτελούν μόνον το προκαταρκτικό στάδιο της γεωφυσικής διασκόπησης στο οροπέδιο του Ομαλού, καθώς η περιοχή αποτελεί αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ενός οικιστικού και τουριστικού χώρου που έχει αναπτυχθεί πάνω σε ενεργά καρστικά πεδία και αξίζει να μελετηθεί λεπτομερέστερα.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Palmer D. 1981, An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation, *Geophysics* 46, pp. 1508-1518.
- Pipan M, Finetti 1, and Ferigo F. 1996, Multi-fold GPR techniques with applications to high-resolution studies: two case histories, *Eur. Journ. of Envir. and Eng. Geoph.* 1, pp. 83-103.
- Loke, M. H., and Barker, R. D., 1994. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections: Extended Abstracts of Papers 5616 FACE Meeting Vienna, Austria 6-10 Juno 1994, p. 1802.
- Taner, M.T., Walls, J.D., Smith, M., Taylor, G., Carr, M.B., Dumas, D., 2001, Reservoir characterization by calibration of self-organized map clusters, Extended Abstracts, SEG International Exposition and Annual Meeting, San Antonio, Texas.

## ABSTRACT

### **GEOPHYSICAL SURVEY AT THE OMALOS PLATEAU, CHANIA, CRETE**

Vafidis A.<sup>1</sup>, Manoutsoglou M.<sup>2</sup>, Hamdan H.<sup>1</sup>, Andronikidis N.<sup>1</sup>, Koukadaki M.<sup>1</sup>, Kritikakis G.<sup>1</sup>, Oikonomou N.<sup>1</sup> και Spanoudakis N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Applied Geophysics Lab, Department of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, 73100, Polytechnioupolis, Chania, vafidis@mred.tuc.gr, mkoukad@mred.tuc.gr.*

<sup>2</sup> *Geology Lab, Department of Mineral Resources Engineering, Technical University of Crete, 73100, Polytechnioupolis, Chania, emanout@mred.tuc.gr.*

This paper discusses the preliminary results of a geophysical survey that was carried out at the Omalos plateau in Chania, Crete. The geophysical survey included measurements of electrical tomography, electrical mapping, seismic refraction, georadar, VLF and gravity. The aim of this survey is to compare the results from different geophysical methods used in imaging dolines and karstic features. The processing of the measurements indicates three geoelectrical layers. The first layer of extremely high electrical resistivity is attributed to alluvial – diluvial deposits. The second layer of very low electrical resistivity reflects mainly the presence of marls. Finally, the third geoelectrical layer outlines the carbonate bedrock, whose relief appears highly irregular. The comparison of all geophysical methods leads to the same results, concerning the detection of dolines and karstic anomalies at the Omalos plateau.