

Εφαρμογή των γεωφυσικών μεθόδων του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής αντίστασης στην παλαιοντολογική έρευνα για το Δεινοθήριο Γιγάντιο της Κρήτης.

Ν.Γ. Παπαδόπουλος^{(1), (2)}, Α. Σαρρής⁽¹⁾, Χ. Φασουλάς⁽³⁾ και Ν. Πουλακάκης⁽³⁾

⁽¹⁾ Εργαστήριο Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης και Αρχαιοπεριβάλλοντος, Ινστιτούτο Μεσογειακών Σπουδών-Τόρμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Νικηφόρου Φωκά 130, Τ.Θ. 119, Ρέθυμνο.
⁽²⁾ Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Πανεπιστημίου, 54124, Θεσσαλονίκη.
⁽³⁾ Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης Πανεπιστήμιο Κρήτης, Α. Κνωσού, Ηράκλειο 71409.



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Απολιθωμένα τμήματα του *Δεινοθήριου γιγάντιου* (*Deinotherium giganteum*) εντοπίστηκαν για πρώτη φορά στην Κρήτη το 2002, κατά την διάρκεια ανασκαφών που πραγματοποιήθηκαν από το Μουσείο Φυσικής Ιστορίας Κρήτης. Στην περιοχή εντοπισμού των παραπάνω απολιθωμάτων οργανώθηκε και πραγματοποιήθηκε μία γεωφυσική έρευνα (Αύγουστος 2004 και Μάιος 2005) από το Εργαστήριο Γεωφυσικής-Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης & Αρχαιοπεριβάλλοντος.

Ο στόχος των γεωφυσικών διασκοπήσεων ήταν να εντοπιστούν οι πιθανές θέσεις που θα μπορούσαν να είναι θαμμένα τα μεγαλύτερα κόκαλα του Δεινοθήριου. Η συγκεκριμένη γεωφυσική έρευνα παρείχε και ένα επιπλέον κίνητρο, καθώς ήταν η πρώτη φορά που τέτοιες γεωφυσικές τεχνικές χρησιμοποιήθηκαν στην Ελλάδα για τον εντοπισμό θαμμένων απολιθωμάτων προϊστορικών ζώων.

Η μέθοδος του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της πρώτης φάσης, για την διερεύνηση μία περιοχής 44 τετρ. μέτρων. Επιπλέον σε ένα κάρναβο με διαστάσεις 13.5x6.5m², ο οποίος περιελάμβανε την περιοχή που διερευνήθηκε κατά την πρώτη φάση των γεωφυσικών ερευνών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της γεωηλεκτρικής τομογραφίας.

Οι γεωφυσικές έρευνες στην περιοχή Γκέλα βοήθησαν στον εντοπισμό θέσεων που θα μπορούσαν να βρίσκονται θαμμένα απολιθώματα του Δεινοθήριου. Το πρόγραμμα ανασκαφών του 2004 επιβεβαίωσε κάποιες από τις προτεινόμενες θέσεις, αναδεικνύοντας τον συμπληρωματικό ρόλο που θα μπορούσαν να έχουν οι γεωφυσικές τεχνικές στην παλαιοντολογική έρευνα.

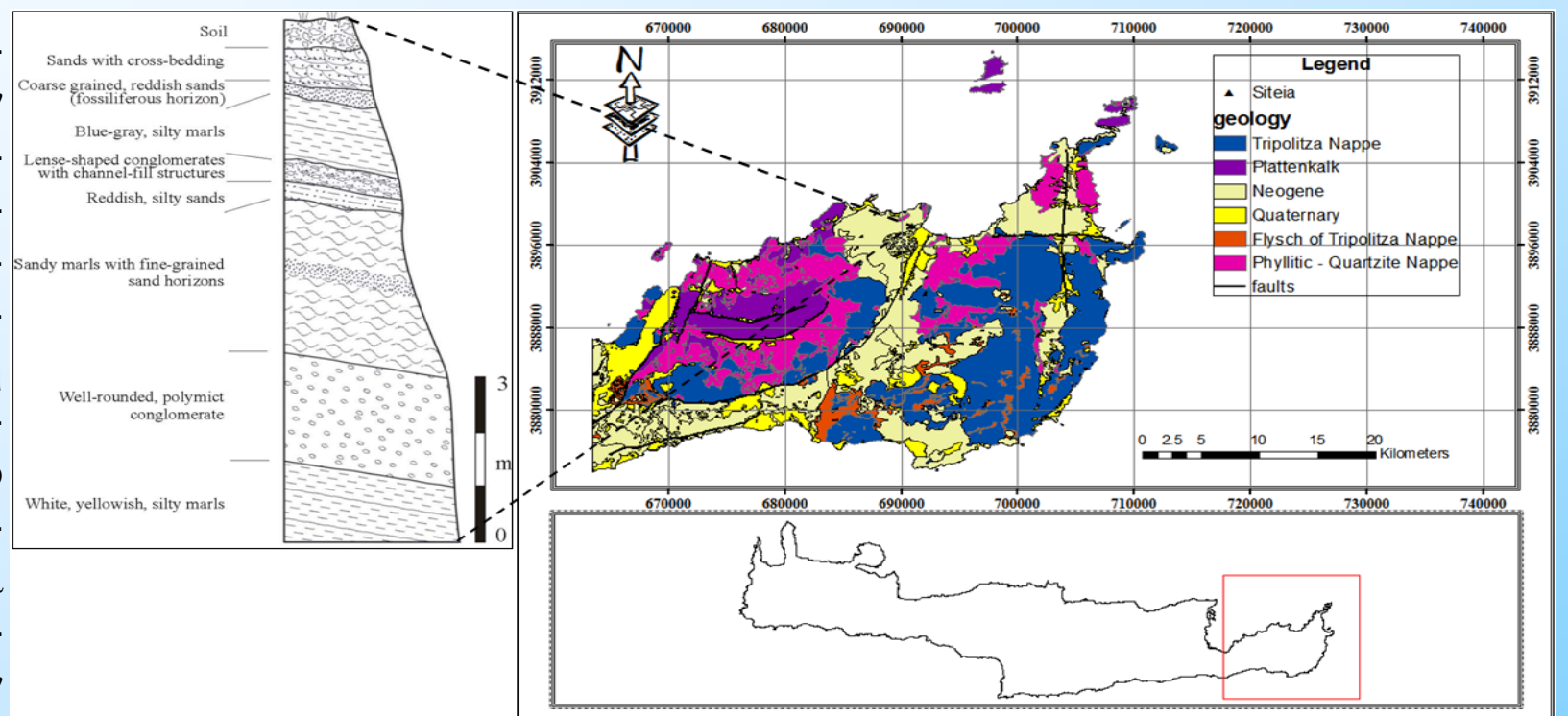
ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από γεωλογικής άποψης ο κόλπος της Σητείας αποτελεί ένα νεοτεκτονικό βύθισμα, που διαμορφώθηκε από τη δράση δύο κβέτων συστημάτων ρηγμάτων. Το τεκτονικό κάλυμμα της Φυλλιτικής-Χαλαζιτικής σειράς αποτελεί το δυτικό υπόβαθρο ευρύτερης περιοχής, ενώ το ανθρωπικό κάλυμμα της Ζώνης Γρίτολης, που επικαλύπτει στην Φυλλιτική-Χαλαζιτική σειρά, καταλαμβάνει το νότιο και ανατολικό μέρος της (Εικ. 1). Η ανασκαφή που άρχισε στην περιοχή Γκέλα το 2002 από την ερευνητική ομάδα του Μουσείου Φυσικής Ιστορίας Κρήτης, έφερε στο φως ένα σημαντικό σκελετικό υλικό, το οποίο αναγνωρίστηκε ότι ανήκε στο *Δεινοθήριο γιγάντιο*. Η αποκάλυψη αυτή είχε μία επιπλέον επιστημονική σημασία, δεδομένου ότι αντιπροσωπεύει την πρώτη εμφάνιση αυτού του μεγάλου θηλαστικού στην περιοχή της Κρήτης και δίνει επιπρόσθετα στοιχεία για την κατανομή του ζώου στην Ελλάδα αλλά και την Ευρώπη.

Δύο πλευρικά κόκαλα, ένας ατλαντάς, μια κερκίδα, σπόνδυλοι, επτά δόντια και ένας κοπτήρας του Δεινοθήριου, αποκαλύφθηκαν μέσα στα Μεσο-μειοκαινικά ιζήματα της Γκέλας. Τα απολιθώματα βρέθηκαν σε κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Η διασπορά αυτή βοήθησε τους παλαιοντολόγους να υποθέσουν ότι τα μεγαλύτερα κόκαλα του ζώου, όπως αυτά των μηρών, δεν θα μπορούσαν να είναι πολύ μακριά από την ανασκαμμένη περιοχή.

Για τον παραπάνω λόγο, μια γεωφυσική έρευνα πραγματοποιήθηκε πειραματικά στην περιοχή ενδιαφέροντος με σκοπό τη χαρτογράφηση του υπεδάφους. Η μέθοδος του γεωραντάρ και της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκαν για την διερεύνηση του υπεδάφους σε μία έκταση 88 τετρ. μέτρων σε δύο διαφορετικές φάσεις. Ο σκοπός των γεωφυσικών ερευνών ήταν να υποδειχθούν συγκεκριμένες θέσεις όπου θα μπορούσαν να βρεθούν θαμμένα απολιθώματα του Δεινοθήριου.

Η τεχνική της χαρτογράφησης της ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε ώστε να καταγραφούν οι πλευρικές μεταβολές της ειδικής αντίστασης σε ένα συγκεκριμένο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Η ηλεκτρική τομογραφία και η μέθοδος του γεωραντάρ χρησιμοποιήθηκαν για να καταγραφεί η στρωματογραφική διαδοχή των σχηματισμών στην περιοχή.



Εικόνα 1. Γεωλογικός χάρτης της ανατολικής Κρήτης (δεξιά) και μία κατακόρυφη γεωλογική τομή δέκα μέτρων στην περιοχή Γκέλα (αριστερά).

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Οι γεωφυσικές έρευνες πραγματοποιήθηκαν σε δύο διαφορετικές φάσεις κατά την διάρκεια του 2004 και του 2005. Το μέγιστο βάθος διασκοπήσης δεν ξεπέρασε τα 2 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους, σύμφωνα με τα στοιχεία που δόθηκαν από τους παλαιοντολόγους.

Το όργανο μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης RM15, ο πολυλέκτης MPX15 και το πλαίσιο PAS, συναρμολογήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε να μετρηθεί η φαινόμενη αντίσταση του υπεδάφους σε δύο διαφορετικά βάθη, κατά μήκος εννέα παράλληλων γραμμών διεύθυνσης Δ-Α. Έγινε χρήση της μεθόδου του Διόδμου Ηλεκτροδίου (Εικ. 2). Το βήμα δειγματοληψίας κατά μήκος και των δύο αξόνων ήταν ίσο με 0.5m. Η απόσταση μεταξύ των κινητών ηλεκτροδίων (ένα ρεύματος και ένα δυναμικού) τέθηκε ίση με 0.5 και 1 μέτρο αντίστοιχα, ενώ τα απομακρυσμένα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν περίπου 30 μέτρα μακριά από την περιοχή των μετρήσεων.

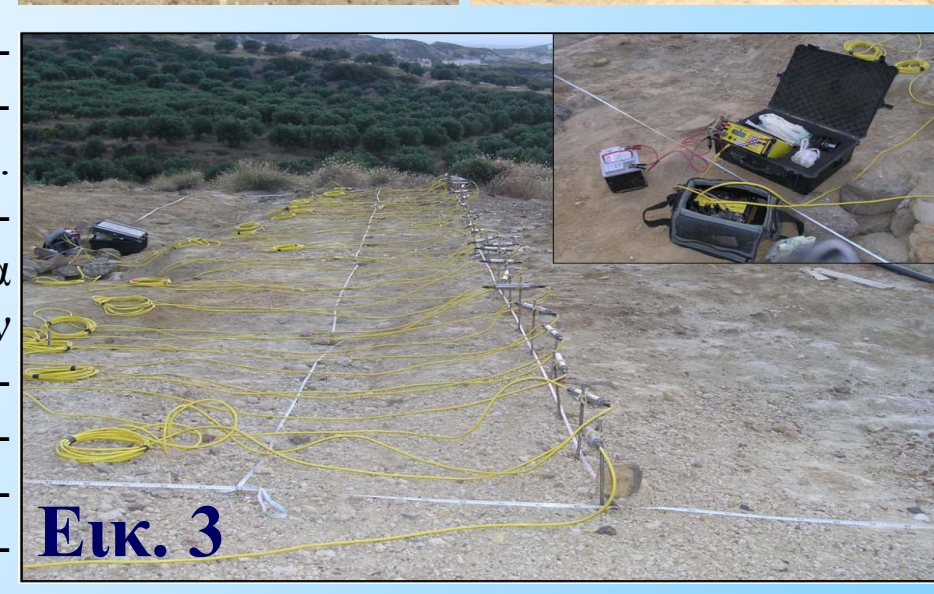
Το γεωραντάρ ΕΚΚΟ 1000 μαζί με τις κεραίες συχνότητας των 225MHz χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό πιθανών ανακλάσεων μέσα στο υπεδάφος (Εικ. 2). Η απόσταση μεταξύ των παράλληλων γραμμών και το βήμα δειγματοληψίας κατά μήκος των γραμμών ήταν 0.5 και 0.1 μέτρα αντίστοιχα.

Τον Μάιο του 2005 οι γεωφυσικές έρευνες αφιερώθηκαν μόνο στην εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας, έτσι ώστε να μελετηθεί τόσο η οριζόντια όσο και η κατακόρυφη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης. Πραγματοποιήθηκαν δεκατέσσερις παράλληλες ηλεκτρικές τομογραφίες με το όργανο Sting R1, εφαρμόζοντας την διάταξη-διπόλου (Εικ. 3). Εικοσι οκτώ ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν κατά μήκος κάθε γραμμής, ανά 0.5 μέτρο, οι οποίες απείχαν μεταξύ τους 0.5 μέτρο. Διερευνήθηκε μία περιοχή με έκταση 13.5x6.5 m², η οποία περιελάμβανε την περιοχή που είχε μελετηθεί κατά την πρώτη φάση το 2004.

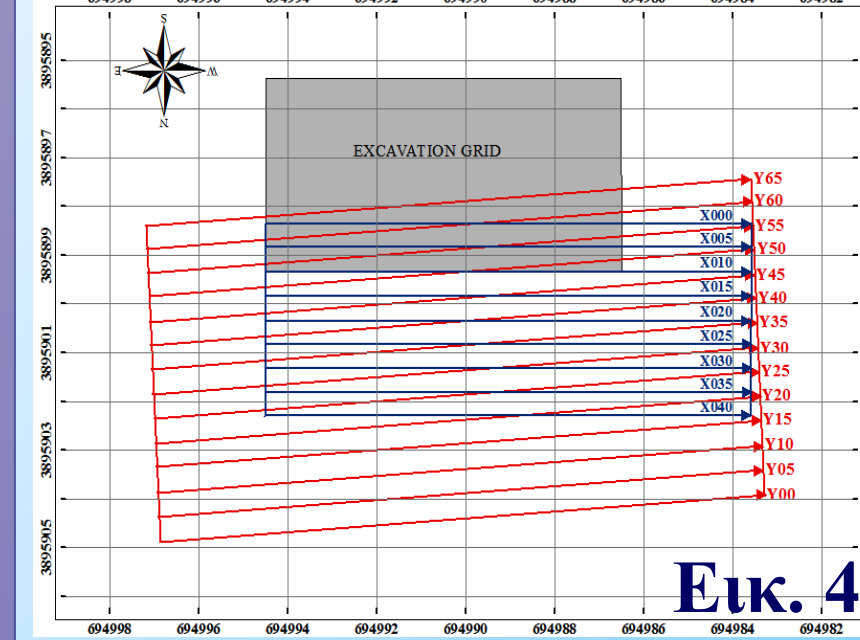
Η εικόνα 4 δείχνει τις παράλληλες γραμμές που μετρήθηκαν με τις τρεις διαφορετικές γεωφυσικές τεχνικές



Εικ. 2



Εικ. 3

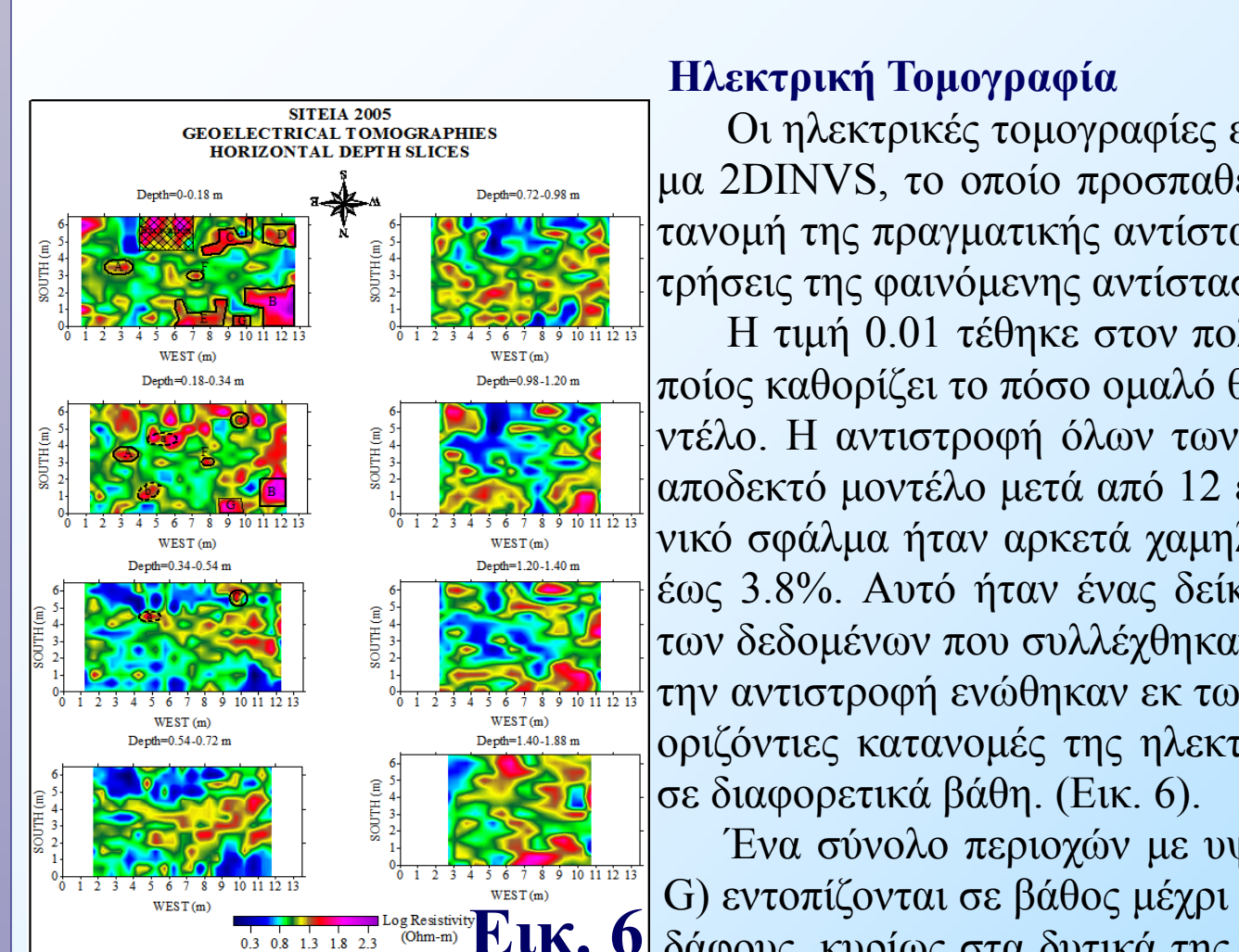


Εικ. 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μέθοδος Διόδμου Ηλεκτροδίου

Οι χάρτες, για $a=0.5$ και $a=1m$ (α είναι απόσταση των κινητών ηλεκτροδίων), που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου του Διόδμου Ηλεκτροδίου φαίνονται στην Εικόνα 5. Μετρήθηκαν εννιά γραμμές διεύθυνσης Α-Δ (X00 to X040) (Εικ. 4) και καλύφθηκε μία έκταση ίση με 44 m². Η κατανομή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης από τα δύο διαφορετικά βάθη παρουσιάζει μία σειρά από περιοχές με μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με το περιβάλλον. Αυτές οι περιοχές εντοπίζονται κυρίως στο κεντρικό, δυτικό και βορειο-δυτικό μέρος της περιοχής και είναι πιθανό να υποδηλώνουν την ύπαρξη των μεγάλων οστών του Δεινοθήριου.



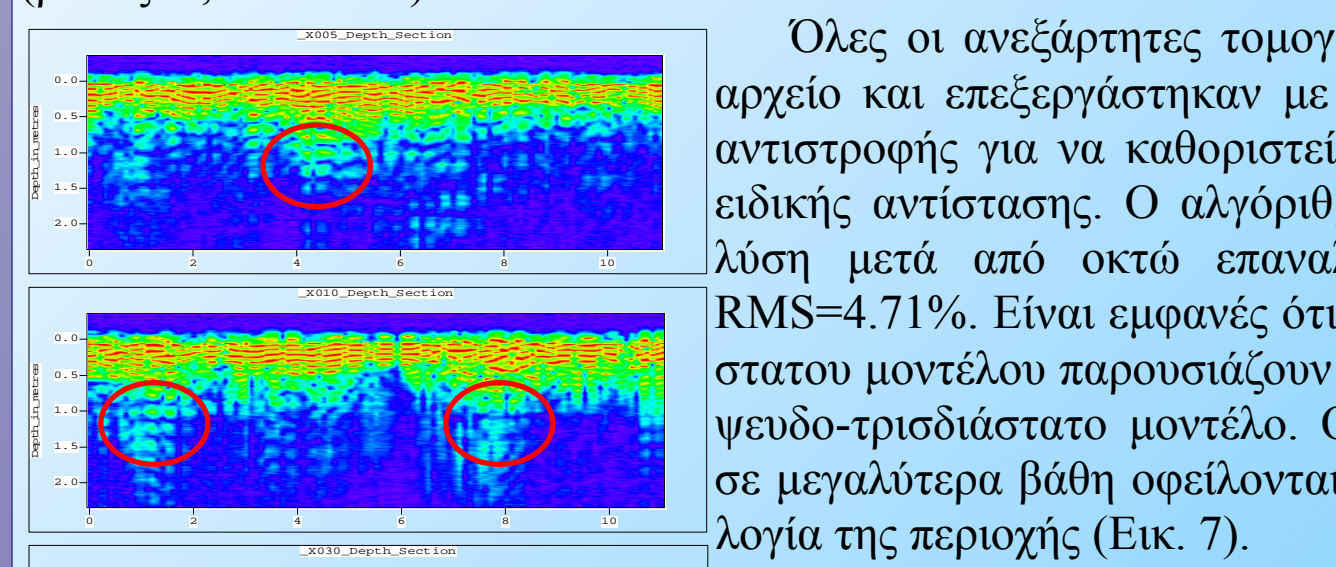
Εικ. 5

Ηλεκτρική Τομογραφία

Οι ηλεκτρικές τομογραφίες επεξεργάστηκαν με το πρόγραμμα 2DINVS, το οποίο προσπαθεί να ανακατασκευάσει την κατανομή της πραγματικής αντίστασης του υπεδάφους από τις μετρήσεις της φαινόμενης αντίστασης.

Η τιμή 0.01 τέθηκε στον πολλαπλασιαστή Lagrangian, ο οποίος καθορίζει το πόσο ομαλό θα είναι το τελικό ηλεκτρικό μοντέλο. Η αντιστροφή όλων των τομογραφιών συγκλίνει σε ένα αποδεκτό μοντέλο μετά από 12 επαναλήψεις. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ήταν αρκετά χαμηλό και κυμάνθηκε μεταξύ 1.8% έως 3.8%. Αυτό ήταν ένας δείκτης της πολύ καλής ποιότητας των δεδομένων που συλλέχθηκαν. Οι τομές που προέκυψαν από την αντιστροφή ενόθησαν εκ των υστέρων για να σχηματιστούν οριζόντιες κατανομές της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους σε διαφορετικά βάθη (Εικ. 6).

Ένα σύνολο περιοχών με υψηλή αντίσταση (B, C, D, E, F, G) εντοπίζονται σε βάθος μέχρι 0.54m από την επιφάνεια του εδάφους, κυρίως στα δυτικά της περιοχής. Αυτές οι περιοχές είναι πιθανό να συσχετίζονται με τα μεγάλα οστά του Δεινοθήριου. Επιπλέον, μία ακόμα αρκετά υποσχόμενη γεωφυσική ανωμαλία (Στόχος Α) εμφανίζεται στα ανατολικά του γεωφυσικού καναβού (βάθος: 0.00-0.34 m).

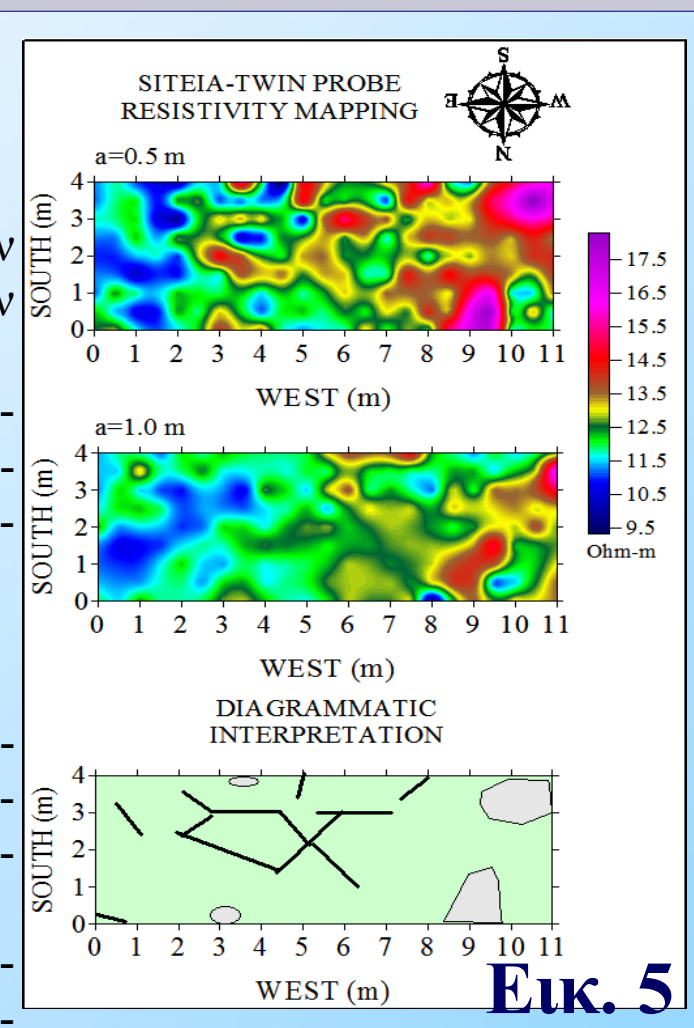


Εικ. 6

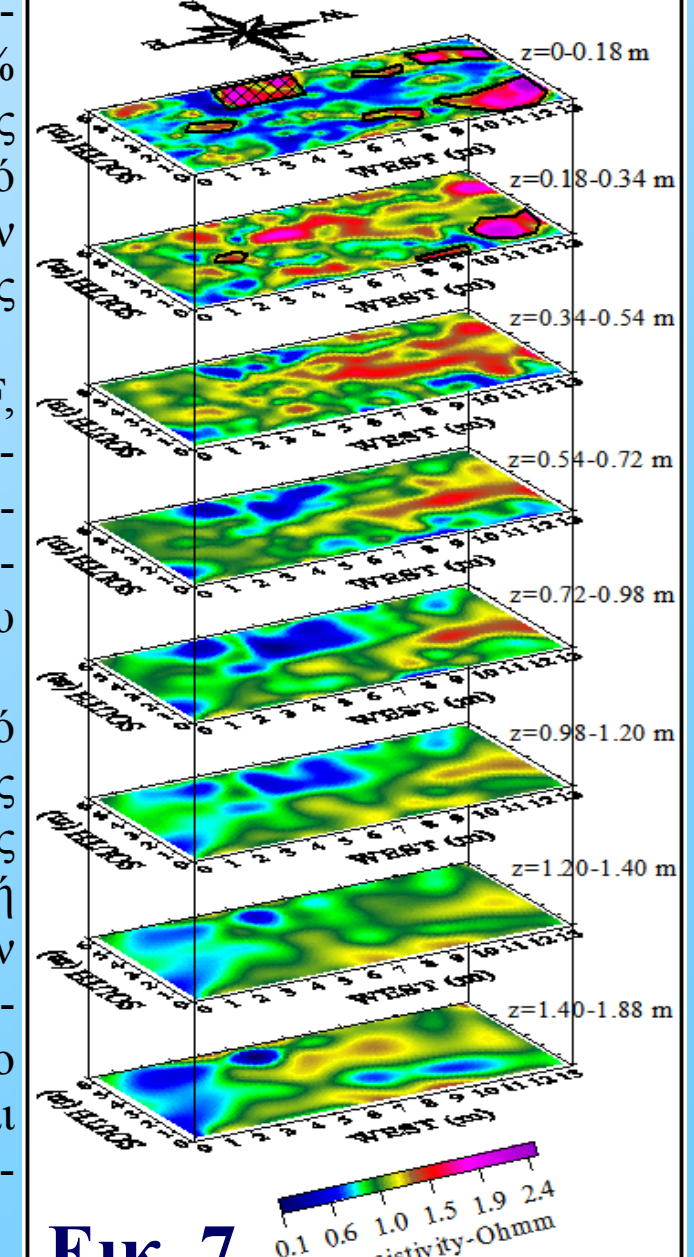
Γεωραντάρ

Οι χάρτες που προέκυψαν από την εφαρμογή του γεωραντάρ υπέδειξαν κάποιες υποσχόμενες ανακλάσεις οι οποίες θα μπορούσαν να συσχετιστούν με την ύπαρξη θαμμένων οστών (Εικ. 8).

Εικ. 8



Εικ. 7



Εικ. 8

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Τα δεδομένα της ηλεκτρικής αντίστασης που συλλέχθηκαν με το όργανο RM15 υπέστησαν στατιστική επεξεργασία με σκοπό την ενίσχυση του σήματος και την εξομάλυνση του θορύβου. Εφαρμόστηκαν ένα φίλτρο αποκοπής των πολύ ακραίων τιμών της αντίστασης που οφειλόταν κυρίως σε κακή επαφή των ηλεκτροδίων με το έδαφος, καθώς και ένα φίλτρο εξισορρόπησης των γραμμών με σκοπό να να εξομαλυνθεί η τελική εικόνα.

Τα δεδομένα της ηλεκτρικής τομογραφίας επεξεργάστηκαν σε κάθε μία γραμμή ξεχωριστά χρησιμοποιώντας έναν 2D μη-γραμμικό αλγόριθμο αντιστροφής. Οι διαδοχικές τομές που προέκυψαν ενόθησαν μεταξύ τους εκ των υστέρων για να παραχθεί το ψευδο-3D γεωηλεκτρικό μοντέλο της περιοχής. Στο τελικό στάδιο, τα δεδομένα των παράλληλων γεωηλεκτρικών τομογραφιών ενόθησαν σε ένα αρχείο και επεξεργάστηκαν με έναν 3D αλγόριθμο αντιστροφής.

Τα μη εμπορικά προγράμματα 2DINVS και 3DINV χρησιμοποιήθηκαν για την αντιστροφή των ηλεκτρικών τομογραφικών δεδομένων. Τα προγράμματα εκτελούν μία εξομαλυνμένη αντιστροφή και η απόκριση των μοντέλων υπολογίζεται με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων. Στόχος της γεωηλεκτρικής αντιστροφής αποτελεί ο καθορισμός ενός γεωηλεκτρικού μοντέλου για το οποίο η διαφορά μεταξύ των παρατηρούμενων και των υπολογιζόμενων δεδομένων να είναι ελάχιστη.

Για τις τομές του γεωραντάρ καθορίστηκε η πρώτη απόκριση για κάθε διαφορετική γραμμή βασιζόμενοι στο ποσοστό της έντασης του πρώτου ανακλώμενου κύματος. Στην συνέχεια, η εξισορρόπηση των γραμμών έφερε τις πρώτες ανακλάσεις κάθε γραμμής σε κοινό χρόνο εκκίνησης. Η εφαρμογή συγκεκριμένων φίλτρων (AGC, Dewon, Dshift) ενίσχυσε το σήμα και απομάκρυνε τον θόρυβο που είχαν τα αρχικά δεδομένα. Στο τελικό στάδιο της επεξεργασίας δημιουργήθηκαν οριζόντιες τομές αξονομένου του βάθους.

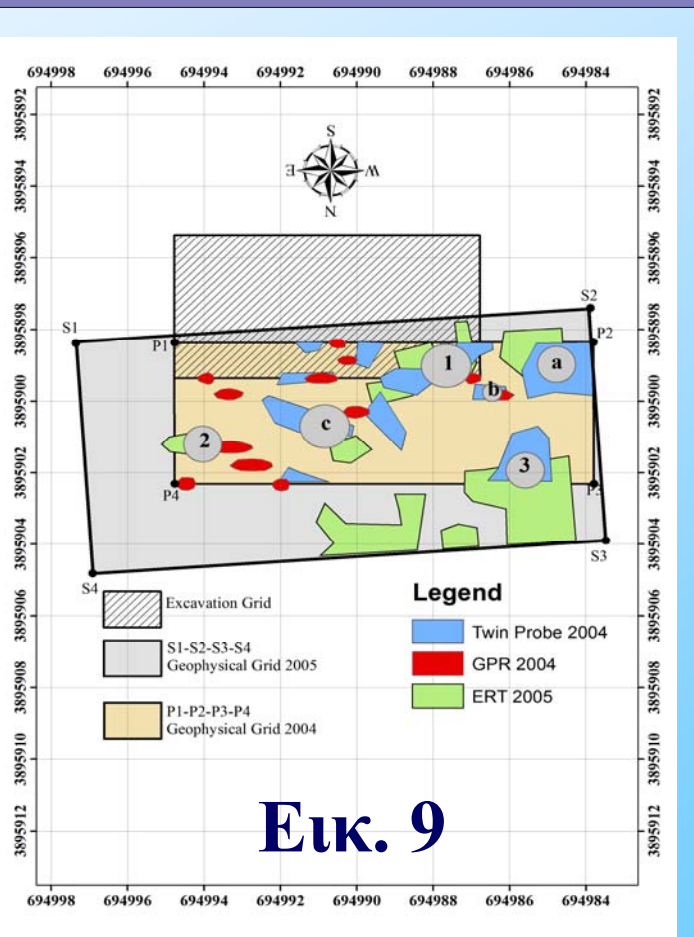
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι αντίστοιχοι γεωφυσικοί χάρτες εισήχθησαν σε μία πλατφόρμα GIS και η αλληλο-επικάλυψή τους συνέσφερε στην καλύτερη συσχέτιση και ερμηνεία των καταγεγραμμένων γεωφυσικών ανωμαλιών.

Στην εικόνα 9 παρουσιάζονται τα σχέδια των περιοχών της ανασκαφής και των γεωφυσικών καναβών καθώς και οι υποσχόμενοι υπεδάφιοι στόχοι. Είναι προφανές ότι οι ανωμαλίες που προέκυψαν από την μέθοδο της χαρτογράφησης της ηλεκτρικής αντίστασης και της ηλεκτρικής τομογραφίας παρουσιάζουν μία πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ τους. Αυτές οι ανωμαλίες βρίσκονται διασκορπισμένες κυρίως στα κεντρικά και στα δυτικά της περιοχής. Οι μετρήσεις με το γεωραντάρ υπέδειξαν κάποιους επιπλέον στόχους στα ανατολικά του καναβού των γεωφυσικών μετρήσεων του 2004. Οι κωδικοί υποδηλώνουν τις περιοχές που παρουσιάζουν το πιο αυξημένο ενδιαφέρον όσον αφορά την ύπαρξη θαμμένων οστών.

Στο τέλος του καλοκαιριού του 2004, οι μελετητές του Μουσείου Φυσικής Ιστορίας Κρήτης διεξήγαγαν μία ανασκαφή, στηριζόμενοι στα παλαιοντολογικά και στα γεωφυσικά ευρήματα. Ανασκάφηκε μία σχετικά μικρή περιοχή σε σχέση με αυτή που ερευνηθήκε με τις γεωφυσικές μεθόδους και αποκαλύφθηκαν ένας σημαντικός αριθμός σκελετικών οστών. Οι ανωμαλίες που καταγράφηκαν με το ραντάρ και την μέθοδο του Διόδμου Ηλεκτροδίου στο τετράγωνο με συντεταγμένες Α=694994-694992 m, Β=3895900-3895898 m, οφείλονται σε δόντια και πλευρικά οστά του Δεινοθήριου.

Σε γενικές γραμμές οι γεωφυσικές διασκοπήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή Γκέλα της Σητείας, βοήθησαν σημαντικά στον καθορισμό ενός σημαντικού αριθμού γεωφυσικών ανωμαλιών, που πιθανό να οφείλονται σε σκελετικά μέρη του Δεινοθήριου γιγάντιου. Το πρόγραμμα ανασκαφής του 2004 επιβεβαίωσε τον επισκοπικό ρόλο που μπορούν να έχουν οι γεωφυσικές τεχνικές στην παλαιοντολογική έρευνα.



Εικ. 9