



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑΣ

---

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΑΡΧΑΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΤΟ  
ΧΩΡΟ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ ΤΟ  
ΞΕΝΟΔΟΧΕΙΟΥ «ΣΑΜΑΡΙΑ».**

**ΓΙΑΛΙΤΑΚΗΣ ΜΑΡΙΟΣ**

**Επιτροπή εποπτείας**

Ηλίας Παπαδόπουλος  
Παντελής Σουπιός  
Γιώργος Χλουπης

**Οκτώβριος 2008**



TECHNOLOGICAL INSTITUTE OF CRETE  
DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES AND  
ENVIRONMENT  
LABORATORY OF GEOPHYSICS AND SEISMOLOGY

---

**Pre-Graduate Thesis**

**Geophysical Archaeological Study at Parking Lot of  
Samaria Hotel, Chania**

**MARIOS GIALITAKIS**

**Examining Comitee**

Hlias Papadopoulos  
Pantelis Soupis  
George Xloupis

**October 2008**





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Για την παρούσα πτυχιακή εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της πτυχιακής κ. Παπαδόπουλο Ηλία Εργ. Συνεργάτης του τομέα Γεωπεριβάλλοντος του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Τον ευχαριστώ θερμά για την ανάθεση του θέματος, την καθοδήγηση του αλλά και για τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και συμβουλές του για να υλοποιηθεί η εργασία αυτή.

Ευχαριστώ θερμά τον κ. Παντελεήμων Σουπιό, Επίκουρο Καθηγητή τομέα Γεωπεριβάλλοντος του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, για τη βοήθεια και καθοδήγηση του σε επιστημονικά θέματα καθώς και για τη συνεχή παρότρυνση κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κ. Γιώργο Χλούπη του τομέα Γεωπεριβάλλοντος για την βοήθεια του σε επιστημονικά θέματα κατά την επεξεργασία των μετρήσεων.

## **ΣΚΟΠΟΣ ΕΡΕΥΝΑΣ**

Σκοπός της πτυχιακής μου εργασίας, ήταν η γεωφυσική αρχαιομετρική διασκόπηση στο χώρο στάθμευσης του ξενοδοχείου Σαμαριά, ιδιοκτησίας Ν. Περογιάννη Α.Ε, για την μελέτη υπεδάφίων δομών σε όσο δυνατό μεγαλύτερο βάθος. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε το χρονικό διάστημα 20 - 24 Οκτωβρίου 2004, από εξειδικευμένη ερευνητική ομάδα που συνιστούσαν οι Δρ. Βασίλης Σάλτας, φυσικός, Γιώργος Χλούπης, ηλεκτρονικός μηχανικός – μηχανολόγος μηχανικός και Ηλίας Παπαδόπουλος, γεωφυσικός, με επιστημονικό υπεύθυνο τον Δρ. Ιωάννη Μακρή, Επίκουρο Ερευνητή του Τομέα Φυσικών Πόρων και Φυσικών Καταστροφών του Κ.Τ.Ε. Κρήτης.

Η ανάλυση, επεξεργασία και ερμηνεία των δεδομένων έγινε από εμένα στον χώρο του εργαστηρίου. Η πτυχιακή εργασία, παρουσιάζει συνοπτικά τη γεωφυσική μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας που χρησιμοποιήθηκε, λεπτομερή αναφορά των δεδομένων που ελήφθησαν ,και τέλος διεξοδικά τα αποτελέσματα των τομογραφιών σε δύο και τρεις διαστάσεις και αναλυτικά τα ερμηνευτικά συμπεράσματα της έρευνας.

## **Introduction**

The aim of this pre-graduate thesis was the analysis, processing and interpretation of geophysical study in the parking lot of Samaria Hotel, in Chania. The hotel belongs to Perogiannis A.E. The study was regarding archaeometric inquiry at the greatest depth possible. The field measurements were conducted at 20 – 24 October 2004, by a specialized crew, consisting by Dr. Vasilis Saltas, Physician, Mr. George Hloupis, electronic engineer, and Mr. Ilias Papadopoulos, geophysicist, with supervisor Dr. John Makris, geophysicist.

The analysis, processing and interpretation of electric tomography data was help by the writer inside the facilities of Laboratory of Geophysics and Seismology, in T.E.I. of Crete. The pre-graduate thesis presents in short the electric tomography method used, in detail the data taken during fieldwork, and at the end in great detail the results obtained in two and three dimensions.

### **ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ**

Η περιοχή έρευνας ορίζεται στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου, ο οποίος έχει σχήμα σχεδόν παραλληλογράμμου. Το έδαφος του χώρου αποτελείται από χαλίκι αναμεμειγμένο με άργιλο, και σε κάποια σημεία υπάρχει επίστρωση τσιμέντου. Λόγω του συμπαγούς στρώματος, κρίθηκε η χρήση διατρητικού μηχανήματος για την ευκολότερη εισαγωγή των ηλεκτροδίων στο έδαφος. Στη φωτογραφία 1 παρουσιάζεται η

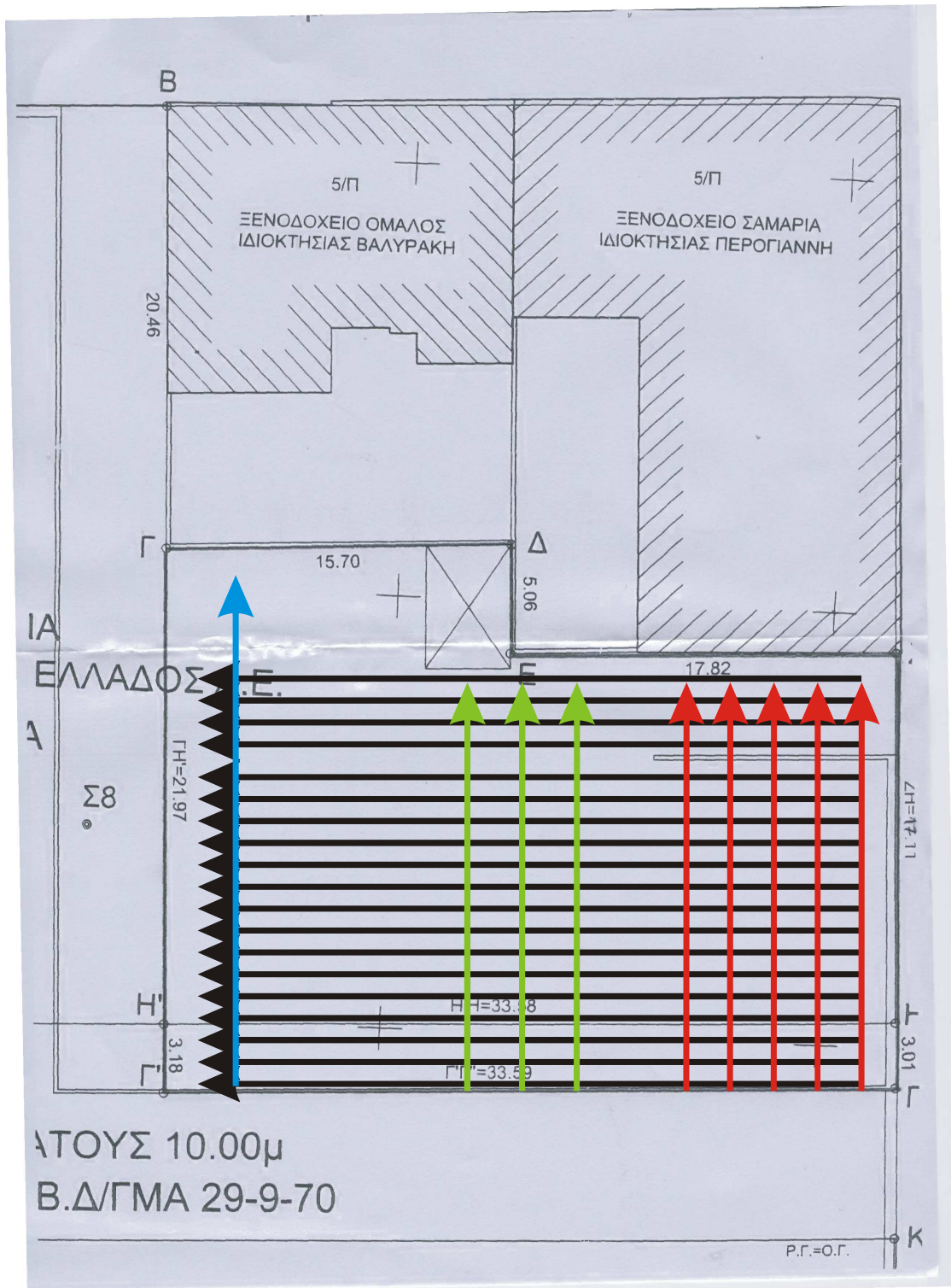


χρήση του μηχανήματος κατά τη διάνοιξη των οπών.

### **Φωτογραφία 1. Διάνοιξη οπών σε τσιμέντο για την εισαγωγή των ηλεκτροδίων.**

Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται τοπογραφικό σχήμα της περιοχής έρευνας, στο οποίο αποτυπώνονται οι τομές που διεξήχθησαν. Με μαύρο χρώμα παρουσιάζονται οι τομές 01 έως 19 με διεύθυνση  $278^{\circ} - 82^{\circ}$ , με κόκκινο οι τομές  $v_{01}$  έως  $v_{05}$  με διεύθυνση  $350^{\circ} - 10^{\circ}$ , με πράσινο οι τομές  $m_{01}$  έως  $m_{03}$  με διεύθυνση  $350^{\circ} - 10^{\circ}$ , και τέλος με μπλε η τομή  $ver\_bck$ , με διεύθυνση  $350^{\circ} - 10^{\circ}$ .





**Σχήμα 1.** Τοπογραφικό σχεδιάγραμμα της περιοχής έρευνας όπου παρουσιάζονται οι θέσεις των 28 τομογραφιών. Με μαύρο χρώμα παρουσιάζονται οι τομές 01 έως 19 με διεύθυνση  $278^{\circ} - 82^{\circ}$ , με κόκκινο οι τομές  $\nu_{01}$  έως  $\nu_{05}$  με διεύθυνση  $350^{\circ} - 10^{\circ}$ , με

**πράσινο οι τομές m\_01 έως m\_03 με διεύθυνση 350° -10°, και τέλος με μπλε η τομή ver\_bck, με διεύθυνση 350° -10°.**

### **ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

Στο παρελθόν στον χώρο έρευνας διεξήχθη γεωτεχνική μελέτη από την ανώνυμη τεχνική εταιρεία γεωτεχνικών ερευνών και μελετών ΓΕΩΓΝΩΣΗ Α.Ε., κατά την οποία έγιναν 3 γεωτρήσεις. Τα στοιχεία της μελέτης μας έγιναν γνωστά από τους ιδιοκτήτες του χώρου και χρησιμοποιήθηκαν για την ερμηνεία και την επιβεβαίωση της παρούσας έρευνας.

Από τα στοιχεία της γεωτεχνικής μελέτης προκύπτει πως το υπέδαφος της υπό έρευνα περιοχής αποτελείται από ανώτερο στρώμα πάχους 1.80 μέτρα περίπου, το οποίο αποτελείται από τεχνητές επιχώσεις αμμώδους κυρίως σύστασης με διάσπαρτα χαλίκια ασβεστιτικής προέλευσης και τεμάχια κροκαλοπαγούς. Βαθύτερα των 1.8 μέτρων και μέχρι βάθους 7.0 ή και 10.0 μέτρων περίπου από την επιφάνεια του εδάφους, το υπέδαφος συνίσταται από άργιλο έως αμμώδη άργιλο, καστανοκίτρινου έως γκριζοπράσινου χρώματος, χαμηλής πλαστικότητας, μέσης συνεκτικότητας με ενστρώσεις αμμώδους μαλακής ιλύος καθώς και ιλυώδους πυκνής άμμου με παρουσία ψαμιτομαργαϊκών συγκριμάτων και κατά θέσεις οργανικές προσμίξεις. Ακόμα, μας έγιναν διαθέσιμες φωτογραφίες του χώρου που δείχνουν την διαμόρφωση του κατά το παρελθόν.

Σε αυτές φαίνονται τοιχία που υπήρχαν κατά την εκμετάλλευση του χώρου από εταιρεία ελαιουργίας, καθώς και μια δεξαμενή διαμέτρου περίπου 5 μέτρων, η οποία ήταν κατασκευασμένη από τσιμέντο.



**Φωτογραφία 2.** Παλαιά φωτογραφία του χώρου έρευνας όπου φαίνεται η δεξαμενή ύδατος, καθώς και κτίρια που βρίσκονταν στο χώρο.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ2: ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΕΩΝ**

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής διασκόπησης. Εν συντομία αναλύεται το φυσικό υπόβαθρο της μεθόδου.

Παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους υλοποιούνται οι διατάξεις μέτρησης, τα όργανα που χρησιμοποιούνται και ο σχεδιασμός για την πραγματοποίηση της γεωφυσικής έρευνας.

## **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η γεωηλεκτρική μέθοδος παρουσιάζει μια ποικιλία έναντι των άλλων γεωφυσικών μεθόδων όπως η βαρυτική , η μαγνητική , η σεισμική και η ραδιομετρική. Μετρούνται συνήθως δυναμικά , ρεύματα ( εντάσεις και πυκνότητες ) και ηλεκτρομαγνητικά πεδία που παράγονται είτε από φυσικές είτε από τεχνητές πηγές. Με την εφαρμογή των ηλεκτρικών μεθόδων γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός της κατανομής των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της Γης, με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων στην επιφάνεια της Γης.

Σκοπός της γεωηλεκτρικής μεθόδου διασκόπησης είναι να μετρηθεί η διαφορά δυναμικού που προκαλείται από την εισαγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στην γη. Η μετρούμενη διαφορά δυναμικού αντικατοπτρίζει τη δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος, δίνοντας έτσι μια ένδειξη για την ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους. Διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν και διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις.

Η γνώση της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την έμμεση εύρεση της γεωλογικής δομής και δομών ενδιαφέροντος. Οι ηλεκτρικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται κυρίως στη χαρτογράφηση γεωλογικών στρωμάτων (Vandenberghe, 1982 Olesen et al., 1992 Griffiths and Barker, 1993), στην ανεύρεση και χαρτογράφηση υδάτινων πόρων (Van dam, 1976 Rijo et al., 1977 Aubert et al., 1984 Olayinka and Barker, 1990), στην τεχνική γεωλογία για την εύρεση του βάθους του μητρικού πετρώματος σε τοποθεσίες κατασκευής τεχνητών φραγμάτων (Habberjam, 1975 Smith, 1986 Butler and Llopis, 1990 Dahlin et al., 1994), στην ανίχνευση γεωθερμικών πεδίων (Wright et al., 1985 Thanassoulas and Tsokas, 1987), στην περιβαλλοντική γεωλογία για τον εντοπισμό μολυσμένων υπόγειων υδάτων (Rodgers and Kean, 1980) και διαρροών αποβλήτων (Van et al., 1992) καθώς και στην εύρεση στόχων αρχαιολογικού ενδιαφέροντος (Aitken, 1974 Hesse et al., 1986 Roka and Tsokas, 1987 Orlando et al., 1987 Szymanski et al., 1992).

## 2.2 ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

Οι μέθοδοι που εφαρμόζονται ανήκουν στην κατηγορία του τεχνητά παραγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο διαβιβάζεται στο έδαφος δια μέσου ενός ζεύγους ηλεκτροδίων και σε ένα δεύτερο ζεύγος ηλεκτροδίων όπου μετράτε η πτώση τάσης που προκαλείται (Σχήμα 2.1).

Η διάδοση του ηλεκτρικού ρεύματος στην γη γίνεται με τους εξής τρεις τρόπους.

### 1. Ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα

Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσω των ιόντων αλάτων και ορυκτών που είναι διαλυμένα μέσα στο νερό που γεμίζει τους πόρους των γεωλογικών σχηματισμών.

### 2. Ηλεκτρονική αγωγιμότητα

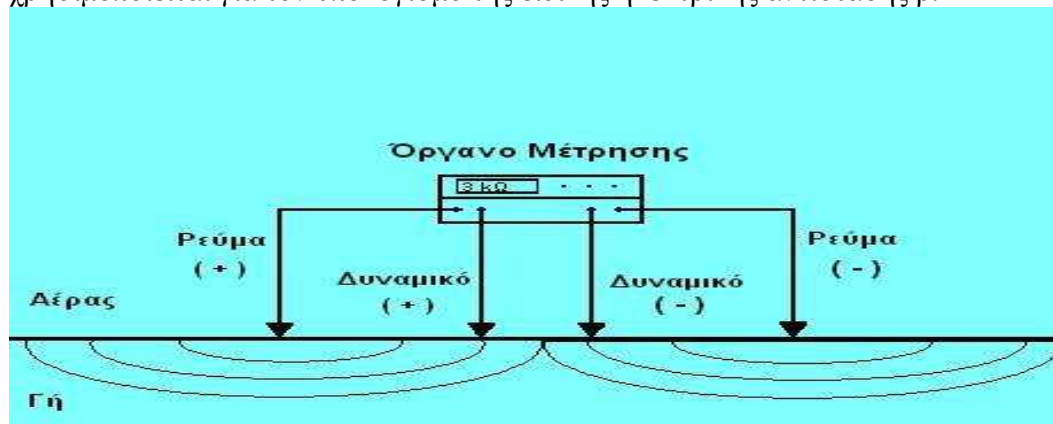
Το ηλεκτρικό ρεύμα διαδίδεται μέσω των ελεύθερων ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην κρυσταλλική δομή πετρωμάτων και ορυκτών ( κυρίως μεταλλικών )

### 3. Διηλεκτρική αγωγιμότητα

Το εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα προκαλεί κυκλική κίνηση στα ιόντα της κρυσταλλικής δομής κάποιων μονωτών. Η κίνηση αυτή προκαλεί δευτερεύων εναλλασσόμενο ρεύμα.

## 2.3 ΕΙΔΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Η ηλεκτρική αντίσταση που υπολογίζεται σαν το πηλίκο των δύο αυτών μεγεθών χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης  $\rho$ .



**Σχήμα 2.1. Η βασική διάταξη γεωηλεκτρικών μετρήσεων.**

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση  $\rho$  ενός στερεού σώματος κυλινδρικού σχήματος, διατομής  $S$  και μήκους  $L$ , που έχει ηλεκτρική αντίσταση  $R$ , ορίζεται από τη σχέση:

$$\rho = \frac{RS}{L} \quad (2.1.)$$

και αντικατοπτρίζει την δυσκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος στο σύστημα SI. Το  $R$  μετράται σε Ohms, το  $L$  σε μέτρα (m) και το  $S$  σε

τετραγωνικά μέτρα ( $m^2$ ). Μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι το  $Ohm \cdot m$ ..



### **Σχήμα 2.2 Ειδική ηλεκτρική αντίσταση**

Ένας άλλος όρος, που περιγράφει τη συμπεριφορά της Γης στη διέλευση του ρεύματος είναι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$ , η οποία αποτελεί το αντίστροφο της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης:

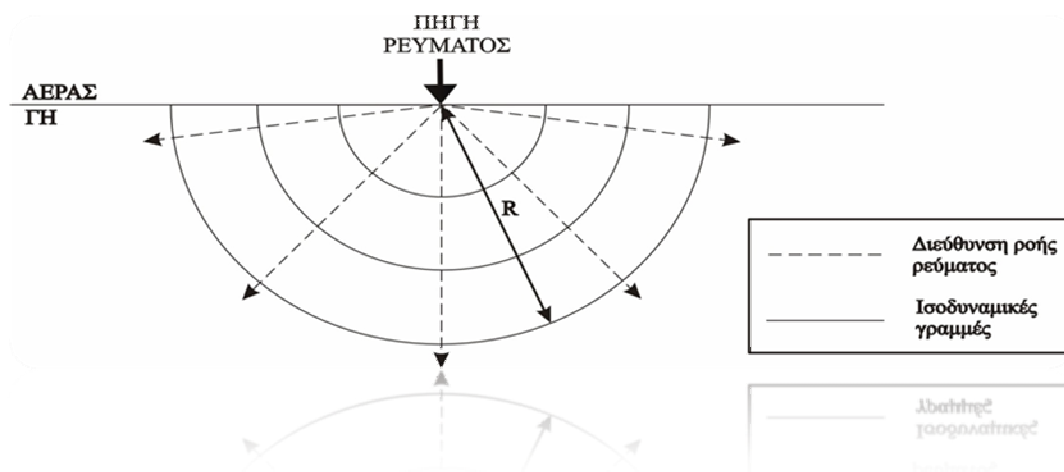
$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2.)$$

και αντικατοπτρίζει την ευκολία με την οποία το ηλεκτρικό ρεύμα ρέει μέσα στο υπέδαφος. Η μονάδα μέτρησης της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι το siemens ανά μέτρο ( $S/m$ ).

## 2.4 ΦΑΙΝΟΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ

Στην απλή περίπτωση, όπου το έδαφος είναι ομογενές και ισότροπο, το ρεύμα που εισέρχεται σε αυτό μέσω μιας σημειακής πηγής (ηλεκτροδίου), ρέει ακτινικά διερχόμενο από ένα ημισφαίριο εμβαδού  $S = 2\pi r^2$ , όπου  $r$  είναι η απόσταση της περιφέρειας του ημισφαιρίου από το σημείο εισαγωγής του ρεύματος. Οι ισοδυναμικές επιφάνειες έχουν σχήμα ημισφαιρίου και οι γραμμές του ρεύματος είναι κάθετες στις ισοδυναμικές επιφάνειες (σχήμα 2.3.). Σε αυτή την περίπτωση το δυναμικό δίνεται από τη σχέση:

$$V = \frac{\rho i}{2\pi r} \quad (2.3.)$$



**Σχήμα 2.3.** Οι ισοδυναμικές γραμμές και η κατεύθυνση του ρεύματος για μια σημειακή πηγή.

Στην πράξη χρειάζονται τέσσερα ηλεκτρόδια για να γίνει μέτρηση της αντίστασης ενός ημιχώρου. Τα δύο από αυτά χρησιμεύουν στην εισαγωγή και κυκλοφορία του ρεύματος και τα ονομάζουμε A και B, ενώ με τη βοήθεια των άλλων μετράμε τη διαφορά δυναμικού στα αντίστοιχα σημεία και τα ονομάζουμε M και N. Έστω ότι AM είναι η απόσταση του M από το θετικό ηλεκτρόδιο A, BM από το αρνητικό B και AN και BN οι αντίστοιχες αποστάσεις του N από τα ηλεκτρόδια του ρεύματος (σχήμα 2.4.).

Τότε, σύμφωνα με τη σχέση (2.3.), η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων A και B για έναν ομογενή ημιχώρο με αντίσταση  $\rho$  και για μια διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων, είναι:

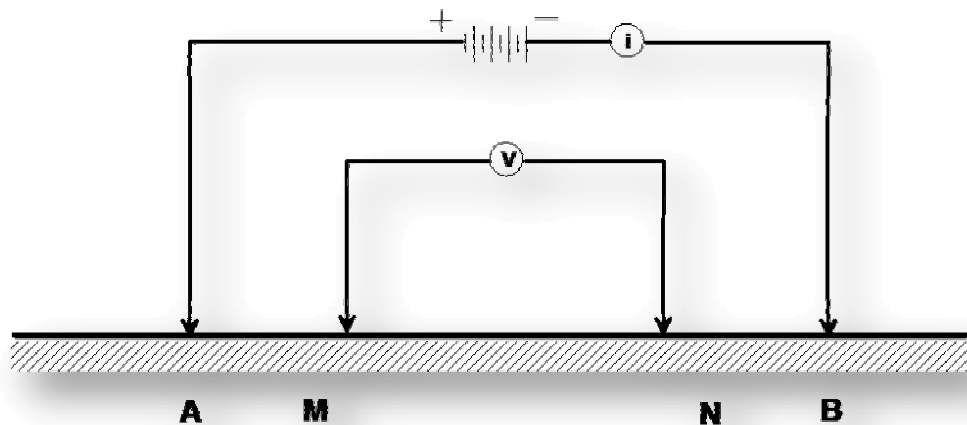
$$\Delta V = \frac{\rho i}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (2.4.)$$



Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται για τη μελέτη των διαφόρων διατάξεων. Επομένως, η αντίσταση του ημιχώρου μπορεί να βρεθεί από τη σχέση:

$$\rho = \frac{2\pi \Delta V}{K i} \quad (2.5)$$

όπου  $K$  είναι ο παράγοντας μέσα στην παρένθεση της σχέσης (2.4.), ο οποίος λέγεται γεωμετρικός παράγοντας και εξαρτάται από τη διάταξη των τεσσάρων ηλεκτροδίων. Στην περίπτωση ομογενούς και ισότροπου εδάφους και για οποιαδήποτε διάταξη ηλεκτροδίων, όταν ο γεωμετρικός παράγοντας πολλαπλασιάζεται με τη μετρούμενη αντίσταση, το αποτέλεσμα είναι η πραγματική αντίσταση του εδάφους.



**Σχήμα 2.4 Διάταξη τεσσάρων ηλεκτροδίων για τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού.**

Στην περίπτωση μη ομογενούς και ισότροπου χώρου, η σχέση (2.5.), ορίζει μια παράμετρο που ονομάζεται φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση του ημιχώρου  $\rho_a$ . Η παράμετρος αυτή εισάγεται για να ληφθεί υπόψη η γεωμετρία της μέτρησης, οι θέσεις δηλαδή των ηλεκτροδίων. Η φαινόμενη αντίσταση δεν είναι η πραγματική αντίσταση του υπεδάφους, αλλά μια φαινόμενη τιμή, η οποία είναι η αντίσταση που θα είχε το έδαφος εάν ήταν γεωηλεκτρικά ομογενές. Η τιμή αυτή ταυτίζεται με την πραγματική αντίσταση όταν πρόκειται για ομογενή γη.

Στην πράξη η φαινόμενη αντίσταση  $\rho_a$  αποτελεί ένα είδος μέσου όρου των ηλεκτρικών αντιστάσεων του ανομοιογενούς υπεδάφους. Επομένως, δε δίνει ακριβώς την πραγματική αλλά μια “παραμορφωμένη εικόνα” της γεωηλεκτρικής δομής του υπεδάφους. Για το λόγο αυτό, η απευθείας χρήση των μετρήσεων φαινόμενης αντίστασης για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι παρακινδυνευμένη. Η πραγματική αντίσταση μπορεί να βρεθεί μόνο μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Ο καθορισμός της πραγματικής αντίστασης από τις τιμές της φαινόμενης αντίστασης είναι η λύση του αντίστροφου προβλήματος, για το οποίο θα γίνει λόγος παρακάτω.

## **2.5 ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ**

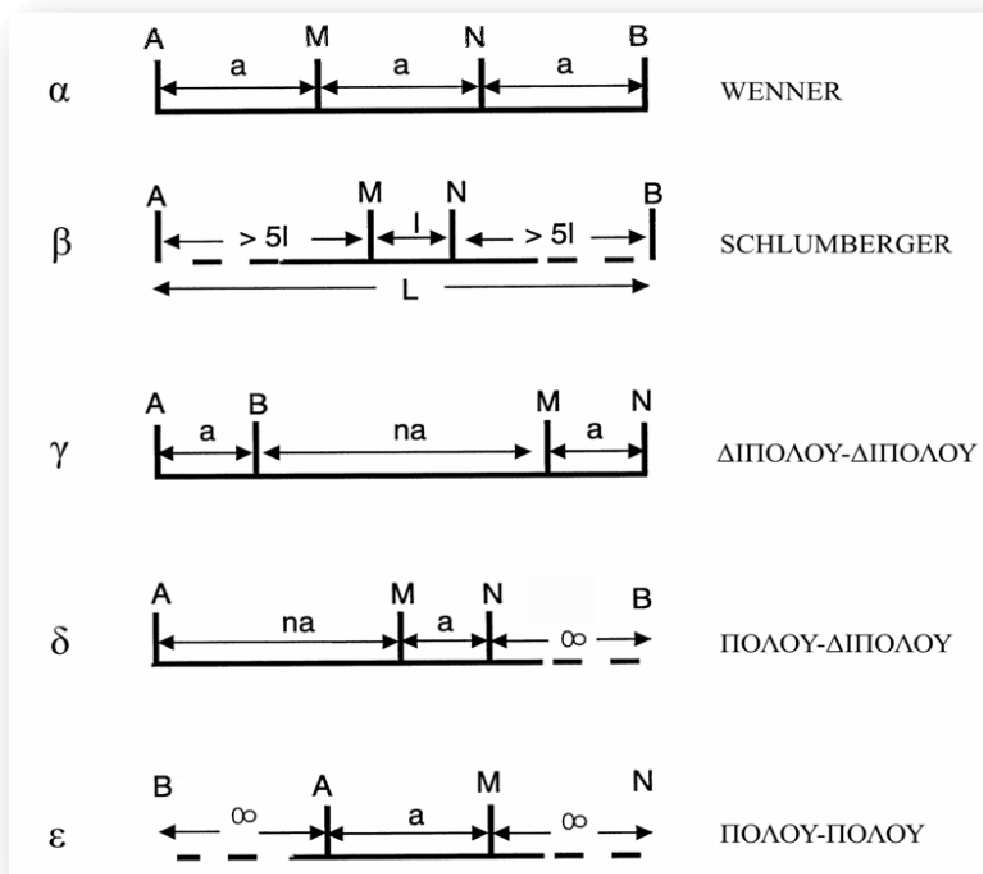
Η αντίσταση  $\rho$  κατά κύριο λόγο εξαρτάται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα δηλαδή είναι συνδυασμός παραγόντων που επηρεάζουν τη συγκέντρωση, σύσταση του νερού. Ειδικότερα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι οι υδρολογικές–υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης, η χημική σύσταση του νερού, το μέγεθος των πόρων των σχηματισμών, πιθανές διαρρήξεις, διακλάσεις ή ρήγματα των σχηματισμών, η θερμοκρασία και η πίεση που επικρατούν. Τα μεταμορφωμένα και τα πυριγενή πετρώματα έχουν υψηλές τιμές αντίστασης. Η αντίσταση αυτών των πετρωμάτων εξαρτάται από το βαθμό ρωγμάτωσής τους και από το ποσοστό του νερού που περιέχουν στους πόρους τους.

Τα ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία είναι συνήθως περισσότερο πορώδη και περιέχουν υψηλότερο ποσοστό νερού, έχουν χαμηλότερες αντιστάσεις. Η αντίσταση του νερού ποικίλει από 10 έως 100  $\Omega \cdot m$ , ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε διαλυμένα άλατα (Παπαζάχος, 1986).

## 2.6 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατά τους οποίους διατάσσονται τα ηλεκτρόδια του ρεύματος και του δυναμικού. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις αλλά και αυτές που εμείς χρησιμοποιήσαμε κατά την διάρκεια των μετρήσεων μας (σχήμα 2.4.). οι οποίες είναι : Wenner, Schlumberger, διπόλου – διπόλου , πόλου - διπόλου και πόλου-πόλου.

Το κύριο χαρακτηριστικό μιας διάταξης είναι ο γεωμετρικός της παράγοντας, ο οποίος σχετίζεται μονοσήμαντα με τις σχετικές αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων (Tsourlos, 1995).



**Σχήμα 2.4** Οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες διατάξεις ηλεκτροδίων (Tsourlos, 1995)

**ΔΙΑΤΑΞΗ WENNER.** Κατά τη διάταξη αυτή τα ηλεκτρόδια δυναμικού M,N τοποθετούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού A,B (σχήμα 2.4α.). Οι αποστάσεις μεταξύ των παρακείμενων ηλεκτροδίων είναι ίσες με  $a$ . Αντικαθιστώντας στη σχέση (2.4.) προκύπτει ότι:

$$K = \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{2a} - \frac{1}{2a} + \frac{1}{a} \right) = \frac{1}{a} \quad (2.6.)$$

και επομένως η φαινόμενη αντίσταση για τη διάταξη Wenner δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{i} \quad (2.7.)$$

**ΔΙΑΤΑΞΗ SCHLUMBERGER.** Η διάταξη αυτή είναι παρόμοια με τη διάταξη Wenner, αλλά τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι τοποθετημένα σε απόσταση πολύ μεγαλύτερη από την απόσταση των ηλεκτροδίων δυναμικού (σχήμα 2.4β). Αν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι  $2L$ , η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι  $2l$  και ισχύει  $L \geq 10l$ , τότε η φαινόμενη αντίσταση είναι:

$$\rho_a = \frac{\pi L^2}{2l} \cdot \frac{\Delta V}{i} \quad (2.8.)$$

## **2.7 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ**

Δύο μέθοδοι έρευνας είναι οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες για τον καθορισμό της αντίστασης. Με τη μέθοδο της βυθοσκόπησης (sounding) καθορίζεται η αντίσταση σε συνάρτηση με το βάθος. Το κέντρο της διάταξης παραμένει σταθερό και με τη συνεχή αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων ρεύματος, αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος και διαρρέονται βαθύτεροι σχηματισμοί. Με τη μέθοδο της όδευσης (profiling) εντοπίζονται πλευρικές μεταβολές της αντίστασης.

Αντίθετα με τη βυθοσκόπηση, οι αποστάσεις των ηλεκτροδίων παραμένουν σταθερές και λαμβάνεται μια σειρά μετρήσεων με πλευρική μετακίνηση της διάταξης των ηλεκτροδίων ως συνόλου με σταθερό βήμα.

Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας αποτελεί συνδυασμό των μεθόδων της βυθοσκόπησης και της όδευσης και παρέχει τη δυνατότητα λήψης πληροφοριών τόσο για την πλευρική όσο και για τη σε βάθος μεταβολή της αντίστασης. Η ηλεκτρική τομογραφία μπορεί να περιγραφεί ως μία σειρά από συνεχόμενες ηλεκτρικές βυθοσκοπήσεις κατά μήκος της γραμμής έρευνας ή ως μία σειρά από οδεύσεις πάνω από την ίδια περιοχή με διαδοχικά αυξανόμενες αποστάσεις ηλεκτροδίων. Με τον τρόπο αυτό παίρνουμε μια δυσδιάστατη εικόνα της περιοχής μελέτης.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι ότι, σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές, λαμβάνεται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός μετρήσεων (άρα και χρήσιμη πληροφορία). Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η διακριτική ικανότητα και ανάλυση της γεωηλεκτρικής μεθόδου. Παράλληλα όμως, λόγω του μεγάλου αριθμού τους, οι μετρήσεις είναι δύσκολο να ληφθούν με χειροκίνητη αλλαγή των ηλεκτροδίων, και γι' αυτό χρησιμοποιούνται συστήματα αυτοματοποιημένων πολυπλεκτών.

Πρόδρομος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι η μέθοδος της “ψευδοτομής” που έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην χαρτογράφηση μεταλλευμάτων (Edwards 1977) αλλά και σε διάφορες άλλες εφαρμογές (π.χ. υδρογεωλογικές, Griffiths et al. 1990). Στην διαδικασία της “ψευδοτομής” μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες διατάξεις ηλεκτροδίων (διπόλου-διπόλου, Wenner, πόλου-διπόλου). Η ηλεκτρική τομογραφία όμως είναι πιο γενικευμένος όρος που περιλαμβάνει και μετρήσεις με μη συμβατικές διατάξεις καθώς επίσης και μετρήσεις που λαμβάνονται με ηλεκτρόδια σε γεωτρήσεις (π.χ. Shima 1992).



### **2.7.1 ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ**

Η πλέον δημοφιλής τεχνική για την αποκατάσταση της πραγματικής εικόνας της γεωηλεκτρικής αντίστασης του υπεδάφους είναι αυτή της αντιστροφής. Σκοπός της αντιστροφής είναι να βρεθεί ένα μοντέλο αντίστασης που να δίνει μετρήσεις που είναι όσο το δυνατό πιο κοντά στις πραγματικές. Προϋπόθεση η ύπαρξη μεθόδου επίλυσης του ευθέως προβλήματος, δηλαδή, να βρεθούν οι μετρήσεις, δοθείσης της κατανομής της αντίστασης.

Αρχικά γίνεται μια αναφορά στην επίλυση του ευθέως προβλήματος, δηλαδή στον υπολογισμό της θεωρητικής απόκρισης του υπεδάφους σε μια διέγερση ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Παρουσιάζονται πολύ συνοπτικά οι διάφορες μέθοδοι επίλυσης, αριθμητικές ή αναλυτικές. Επίσης παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του Ιακωβιανού πίνακα  $A$  που χρησιμοποιείται στην επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος.

Παρουσιάζονται οι εξισώσεις που ισχύουν για την περίπτωση επίλυσης μη γραμμικών αντιστροφών προβλημάτων χωρίς περιορισμούς, και ακολουθεί μια αναφορά στα κριτήρια σύγκλισης και στη χρήση πινάκων στατιστικών βαρών στις εξισώσεις.

Ακολούθως αναφέρονται οι μέθοδοι επίλυσης των μη γραμμικών συστημάτων με περιορισμούς. Οι μέθοδοι αυτές είναι οι πλέον χρησιμοποιούμενες στην πράξη, καθώς χειρίζονται αποτελεσματικά το πρόβλημα της αστάθειας της αντιστροφής του γενικευμένου Ιακωβιανού. Τέλος παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα σχετικά μειονεκτήματα των μεθόδων, καθώς και οι λόγοι που μας οδήγησαν στην επιλογή μιας εξ αυτών για την εφαρμογή του αλγορίθμου που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

## **2.7.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΥ ΠΙΝΑΚΑ**

Η γενική διαδικασία αντιστροφής εμπεριέχει την έννοια της επαναληπτικής διαδικασίας, για την περίπτωση των μη-γραμμικών συστημάτων. Προσπαθούμε με διαδοχικές βελτιώσεις να βρούμε το μοντέλο  $m$  του υπεδάφους, εκείνο το οποίο επιλύοντας το ευθύ πρόβλημα θα μας δώσει συνθετικά δεδομένα  $f(m)$  τα οποία να βρίσκονται όσο το δυνατό πιο κοντά σε αυτά που μετρήθηκαν στο ύπαιθρο.

Δημιουργείται έτσι ένα σύστημα εξισώσεων της μορφής

$$d=f(m), \quad (2.9)$$

όπου  $d$  είναι το διάνυσα που περιέχει τα πειραματικά δεδομένα. Η λύση των γραμμικών εξισώσεων επιτρέπει να γραφεί η εξίσωση (3.1) στη μορφή  $m=f^{-1}(d)$ . Η αντιστροφή όμως της συνάρτησης  $f$  δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μη-γραμμικά συστήματα, όπως στην περίπτωση των προβλημάτων των TDEM. Η λύση δίνεται με συνεχείς προσεγγίσεις, όπου υπολογίζεται πρώτα η συνάρτηση  $f(m_j)$ , για κάθε επανάληψη  $j$ , και με διαδοχικές βελτιώσεις του θεωρητικού μοντέλου γίνεται προσπάθεια να πλησιάσει όσο το δυνατό περισσότερο το πειραματικό.

Η βελτίωση του μοντέλου  $m_j$  γίνεται εφαρμόζοντας μικρές διαταραχές  $dm_j$  στις παραμέτρους. Υπολογίζοντας πάλι την λύση του ευθέως προβλήματος για τις καινούργιες

παραμέτρους, συγκρίνονται οι θεωρητικές μετρήσεις με τις πραγματικές μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης που έχει τεθεί εξαρχής.

Αναπτύσσοντας την εξίσωση (2.9) σε σειρά Taylor και αγνοώντας όρους μεγαλύτερης τάξεως από του ενός,

$$f_i(m_j + dm_j) \approx f_i(m_j) + \frac{\partial f_i(m_j + dm_j)}{\partial (dm_j)} dm_j.$$

Οι μερικές παράγωγοι της απόκρισης του μοντέλου  $f(m)$  σε σχέση με τις παραμέτρους  $dm$  αποτελούν τα στοιχεία του πίνακα  $A$  που ονομάζεται Ιακωβιανός.

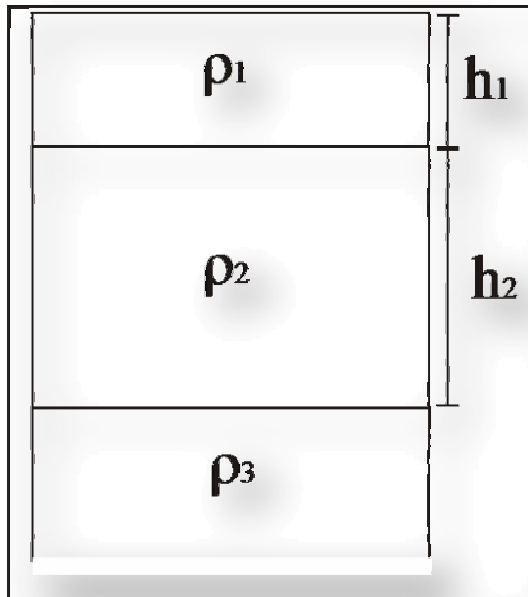
Άρα το στοιχείο  $ij$  του Ιακωβιανού πίνακα θα είναι

$$A_{ij} = \frac{\partial f_i(m_j + dm_j)}{\partial (dm_j)} \quad (2.10)$$

Ο υπολογισμός των στοιχείων  $A_{ij}$  μέσω του τύπου (2.10) είναι δύσκολος, καθώς είναι άγνωστη η αναλυτική μορφή της συνάρτησης  $f$ . Υπάρχουν αριθμητικές λύσεις για τον υπολογισμό των στοιχείων του Ιακωβιανού Πίνακα, οι οποίες όμως είναι δύσκολο να υλοποιηθούν σε αλγοριθμική μορφή. Ο δημοφιλέστερος τρόπος είναι με τη χρήση της μεθόδου των διαταραχών των στοιχείων (perturbation technique) βάσει της εξίσωσης

$$A_{ij} = \frac{\log(f_i(m_j + \delta)) - \log(f_i(m_j))}{\delta} \quad (2.11)$$

όπου  $\delta$  είναι η διαταραχή  $dm$  που εισάγεται για την βελτίωση του μοντέλου  $m_j$ . Δηλαδή, επιλύεται το ευθύ πρόβλημα μια φορά, και αλλάζουμε μια παράμετρο κατά ένα ποσοστό, π.χ. πέντε τοις εκατό, και επιλύεται δεύτερη φορά το ευθύ πρόβλημα για να υπολογιστεί η μεταβολή του συνθετικού μοντέλου εξαιτίας της διαταραχής της παραμέτρου. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε παράμετρο, έως ότου υπολογιστούν όλα τα στοιχεία του πίνακα  $A$ . Είναι φανερό ότι με την παραπάνω διαδικασία η μερική παράγωγος της εξίσωσης (2.10) υπολογίζεται προσεγγιστικά με τη χρήση των πεπερασμένων διαφορών (εξ.2.11).



**Σχήμα 2.5 Μοντέλο τριών στρωμάτων με αντιστάσεις  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  και πάχη  $h_1$  και  $h_2$ .**

Στο σχήμα (2.6) παρουσιάζεται ένα μοντέλο υπεδάφους τριών στρωμάτων, με αντιστάσεις  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  και πάχη  $h_1, h_2$  αντίστοιχα. Ο Ιακωβιανός πίνακας σε αυτό το παράδειγμα θα είναι τάξης  $(5 \times n)$  και θα έχει τη μορφή

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f(m_1)}{\partial \rho_1} & \frac{\partial f(m_2)}{\partial \rho_1} & \dots & \frac{\partial f(m_n)}{\partial \rho_1} \\ \frac{\partial f(m_1)}{\partial \rho_2} & \dots & \dots & \frac{\partial f(m_n)}{\partial \rho_2} \\ \frac{\partial f(m_1)}{\partial \rho_3} & \dots & \dots & \frac{\partial f(m_n)}{\partial \rho_3} \\ \frac{\partial f(m_1)}{\partial h_1} & \dots & \dots & \frac{\partial f(m_n)}{\partial h_1} \\ \frac{\partial f(m_1)}{\partial h_2} & \dots & \dots & \frac{\partial f(m_n)}{\partial h_2} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

όπου  $n$  ο αριθμός των μετρήσεων. Τα στοιχεία του πίνακα υπολογίζονται με βάση τον τύπο (2.11).

### **2.7.3 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ**

Το πρόβλημα της ερμηνείας των γεωφυσικών ηλεκτρομαγνητικών δεδομένων πάσχει από μια εγγενή αδυναμία, η οποία και είναι συνηθισμένη στις περισσότερες γεωφυσικές μεθόδους: η αντιστροφή του γενικευμένου Ιακωβιανού πίνακα είναι ασταθής, με αποτέλεσμα, εάν δεν υπάρχουν περιορισμοί, οι λύσεις που προκύπτουν από



την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος να είναι γεωλογικά απαρέδεκτες, παρόλο που μπορεί να είναι μαθηματικά ορθές.

Η διαδικασία της επίλυσης του ευθέος προβλήματος, μπορεί να γραφεί με την απλοποιημένη μορφή

$$f(m)=y, \quad (2.13)$$

όπου  $y$  είναι το διάνυσμα των πειραματικών δεδομένων, και  $f(m)$  η λύση που προκύπτει από την επίλυση του ευθέος προβλήματος και αντιστοιχεί στο μοντέλο  $m$ , που αποτελείται από πάχη και αντιστάσεις στρωμάτων.

Στην περίπτωση του μονοδιάστατου προβλήματος, υποθέτουμε στρωματομένη γη, δηλαδή τα στρώματα του υπεδάφους διατάσσονται οριζόντια, με συγκεκριμένα πάχη και αντιστάσεις. Άρα ο σκοπός της επίλυσης του αντιστρόφου προβλήματος είναι να μπορέσει να βρεθεί ένα μοντέλο στρωμάτων, το οποίο να έχει απόκριση που θα είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πειραματικές μετρήσεις.

Σκοπός λοιπόν της αντιστροφής είναι να καταλήξει σε μια σχέση της μορφής  $y=f^{-1}(m)$ .

$$(2.14)$$

Επειδή το πρόβλημα είναι μη γραμμικό, δε μπορεί να επιλυθεί απευθείας, αλλά μπορεί να αντικατασταθεί με την επίλυση επιμέρους «μικρότερων» γραμμικών προβλημάτων. Εάν η συνάρτηση  $f(m)$  αναπτυχθεί σε σειρά Taylor γύρω από μια πολύ μικρή μεταβολή του  $dm$ , και αγνοώντας τους όρους μεγαλύτερης τάξης από την πρώτη, προκύπτει ότι

$$f(m + dm) \approx f(m) + \frac{\partial f(m)}{\partial m} dm = y, \quad (2.15)$$

όπου  $\frac{\partial f(m)}{\partial m}$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας, που εκφράζει τις μερικές παραγώγους της  $f(m)$

σε σχέση με τη μεταβολή του μοντέλου  $m$ .

Με απλές πράξεις προκύπτει ότι

$$\frac{\partial f(m)}{\partial m} = y - f(m) = dy,$$

όπου  $dy$  η διαφορά μεταξύ πραγματικών και συνθετικών δεδομένων. Έτσι, η επίλυση του αρχικού μη γραμμικού προβλήματος έχει αντικατασταθεί με την επίλυση πολλών επιμέρους γραμμικών προβλημάτων.

Για την περίπτωση γραμμικών προβλημάτων, η λύση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει από την ελαχιστοποίηση του τετραγώνου του σφάλματος μεταξύ των πειραματικών και θεωρητικών δεδομένων, δηλαδή,

$$q = dy^T dy = (y - f(m))^T (y - f(m)). \quad (2.16)$$

Θέτοντας την παράγωγο του  $q$  ως προς  $dm$  ίση με μηδέν, καταλήγουμε στις κανονικές εξισώσεις του συστήματος,

$$A^T A dm = A^T dy \quad (2.17)$$

και η τελική λύση του συστήματος είναι

$$dm = (A^T A)^{-1} A^T dy \quad (2.18)$$

όπου ο πίνακας  $A^T A$  ονομάζεται γενικευμένος Ιακωβιανός.

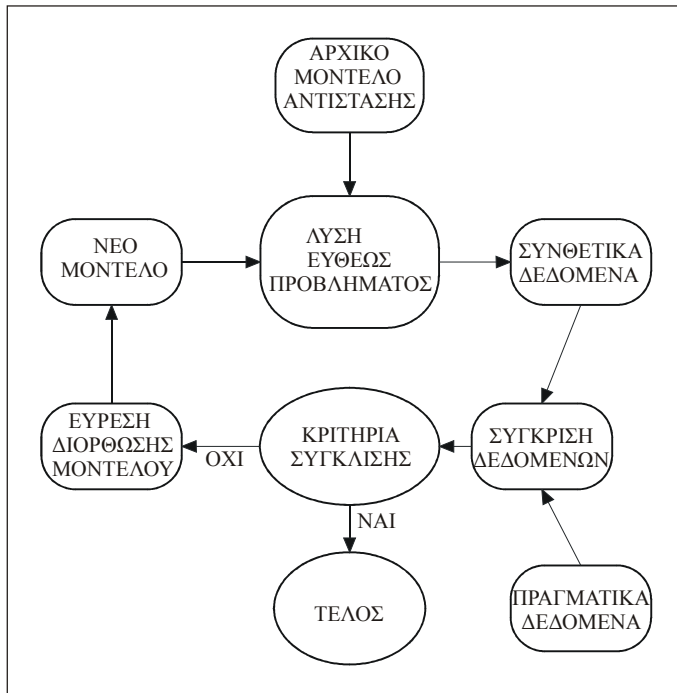
Βάσει της εξ.(2.17) μπορούμε να ορίσουμε τον αλγόριθμο επίλυσης του μη γραμμικού προβλήματος. Είναι μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία, σε κάθε επανάληψη  $k$ , η διόρθωση του μοντέλου δίνεται από τη σχέση

$$dm_k = (A_k^T A_k)^{-1} A_k^T dy_k \quad (2.19)$$

όπου  $A_k$  είναι ο Ιακωβιανός πίνακας για την  $k$  επανάληψη,  $dy_k = [y - f(m_{k-1})]$ , και το νέο μοντέλο προκύπτει από την πρόσθεση της διόρθωσης στο προηγούμενο, δηλαδή,

$$m_{k+1} = m_k + dm_k \quad (2.20)$$

Στο σχήμα (2.7) παριστάνεται σχηματικά η διαδικασία της μη γραμμικής αντιστροφής.



Σχήμα 2.7 Διάγραμμα ροής του αντιστρόφου μη γραμμικού προβλήματος.

### 2.7.3.1 ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΣΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΤΟΥ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΟΥ ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΥ

Στην πράξη η αντιστροφή του γενικευμένου Ιακωβιανού είναι μαθηματικά ασταθής. Αυτό οφείλεται στους φυσικούς περιορισμούς της μεθόδου. Όσο η πληροφορία έρχεται από μεγαλύτερα βάθη, τόσο μειώνεται η διακριτική ικανότητα και κυρίως η ευαισθησία της μεθόδου. Άρα η μεταβολή μιας παραμέτρου που αντιστοιχεί σε μεγάλο βάθος, αναμένεται να επηρεάσει πολύ λίγο τις μετρήσεις μας. Αντίστροφα, μια μικρή αλλαγή σε κάποια μέτρηση μπορεί να επιφέρει τεράστια μεταβολή σε κάποιες από τις παραμέτρους του μοντέλου.

Άρα η επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος έχει εγγενή αδυναμία, και η ύπαρξη σφαλμάτων στις μετρήσεις μας κάνει ακόμα πιο ασταθές το σύστημα (Lanczos 1961, Jackson 1972). Επομένως, καθώς προσπαθούμε να βρούμε ένα μοντέλο που να ταιριάζει στα πειραματικά δεδομένα που έχουμε συλλέξει, καταλήγουμε σε μια πλειάδα μοντέλων που μπορεί να ικανοποιούν μαθηματικά, ή ακόμα και φυσικά, τους όρους σύγκλισης μεταξύ πειραματικών και θεωρητικών μετρήσεων.

Απαιτείται έτσι η χρήση διαφόρων τεχνικών ώστε αφενός να κάνουμε την αντιστροφή μαθηματικά σταθερή, και αφετέρου να μπορέσουμε να διακρίνουμε ποιο από όλα τα μοντέλα που ικανοποιούν μαθηματικά τις εξισώσεις του συστήματος είναι αυτό που είναι πιο κοντά στο πραγματικό.

### 2.7.3.2 ΧΡΗΣΗ ΛΟΓΑΡΙΘΜΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Στις μεθόδους αντιστροφής των γεωφυσικών προβλημάτων συχνή είναι η χρησιμοποίηση λογαριθμικής κλίμακας. Δύο είναι οι κύριες αιτίες. Η χρήση λογαρίθμων υποχρεώνει τις παραμέτρους να αποκτούν μόνο θετικές τιμές, αποφεύγοντας έτσι τιμές που δεν έχουν φυσικό νόημα (Sasaki 1982). Δεύτερον, λόγω του μεγάλου δυναμικού εύρους των τιμών που μπορεί να έχουν οι παράμετροι (ιδιαίτερα οι ηλεκτρικές αντιστάσεις), η χρήση λογαρίθμων δύναται να επιταχύνει το ρυθμό σύγκλισης του επαναληπτικού αλγορίθμου (Park και Van, 1991).

Το τετράγωνο του σφάλματος των ελαχίστων τετραγώνων, στην περίπτωση χρήσης λογαρίθμων, γίνεται  $q' = dy'^T dy'$ , όπου  $dy' = \ln y - \ln f(m)$ .

Το διάνυσμα των παραμέτρων  $m$  γίνεται  $p_i$ , όπου  $p_i = e^{x_i}$ , και  $i=1,n$ . Η λύση του συστήματος είναι

$$dp = (A'^T A')^{-1} A'^T dy \quad (2.21)$$

όπου ο  $A'$  έχει στοιχεία  $A'_{ij} = \frac{\partial \ln y_i}{\partial p_j}$  (Tsourlos, 1995).

### **2.7.3.3 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ- ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ**

Η διαδικασία της αντιστροφής θα ήταν ημιτελής χωρίς ανάλυση των σφαλμάτων του διανύσματος των λύσεων. Καθώς τα δεδομένα έχουν εγγενή σφάλματα, είναι επόμενο να υπάρχουν σφάλματα και στη λύση που προκύπτει από τη μη γραμμική αντιστροφή του συστήματος. Ο έλεγχος των σφαλμάτων γίνεται με χρήση στατιστικών όρων (Press et all 1992).

Όπως και στην επίλυση γραμμικών συστημάτων, ο μέσος όρος του τετραγώνου των σφαλμάτων υπολογίζεται ως

$$RMS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{(d_i^{ob} - d_i^{th})^2}{(d_i^{ob})^2}}, \quad (2.22)$$

όπου  $N$  ο αριθμός των δεδομένων,  $d^{ob}$  τα πειραματικά δεδομένα και  $d^{th}$  τα θεωρητικά δεδομένα.

Με τη χρήση του RMS ως κριτήριο σύγκλισης, το διάνυσμα των λύσεων είναι ευαίσθητο σε μεγάλα σφάλματα, γι αυτό στην πράξη χρησιμοποιείται ο όρος του αναγόμενου  $\chi$ -τετράγωνο (Rijo 1977), που ορίζεται ως

$$\chi^2 = \frac{1}{N-M} \sum_{i=1}^N (d_i^{ob} - d_i^{th})^2, \quad (2.23)$$

όπου  $M$  ο αριθμός των παραμέτρων. Η χρήση αυτού του στατιστικού όρου κάνει τη λύση του συστήματος πιο ανεκτική σε μεγάλα σφάλματα.

Παίρνοντας την τετραγωνική ρίζα του όρου  $\chi$ -τετράγωνο υπολογίζεται ο όρος του επί τοις εκατό μέσου σφάλματος των δεδομένων, που στην περίπτωση χρήσης λογαριθμικής κλίμακας δίνεται από τη σχέση

$$\% \varepsilon = (10^{\sqrt{\chi^2}} - 1) \times 100\%, \quad (2.24)$$

και είναι αυτός που χρησιμοποιείται στην σταθερή αντιστροφή, όπως θα δούμε παρακάτω.

Ο ρυθμός σύγκλισης μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων (C.R), ορίζεται ως

$$C.R. = \frac{|\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i|}{\varepsilon_{i+1}} \quad (2.25)$$

Πέρα από τα σφάλματα των μετρήσεων, το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας αντιστροφής πρέπει να ελεγχθεί αν βρίσκεται μεταξύ των ορίων εμπιστοσύνης. Ο έλεγχος γίνεται βρίσκοντας τα σφάλματα του διανύσματος των λύσεων. Το σφάλμα της  $i$  παραμέτρου ορίζεται ως

$$S_{p_i} = \sqrt{\chi^2} \sqrt{(A^T A)^{-1}_{ii}}, \quad (2.26)$$

όπου  $(A^T A)_{ii}$  είναι το στοιχείο του αντιστρόφου γενικευμένου Ιακωβιανού. Στην περίπτωση αυτή η παράμετρος  $p_i$  θα βρίσκεται μεταξύ των ορίων  $p_i \pm S_{p_i}$ .

### **ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΒΑΡΩΝ**

Καθώς η αναπόφευκτη ύπαρξη σφαλμάτων στις μετρήσεις επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της αντιστροφής, ένας πολύ χρήσιμος τρόπος για τον έλεγχο τους είναι η εισαγωγή πινάκων στις εξισώσεις του συστήματος που να δίνουν μεγαλύτερη ή μικρότερη βαρύτητα στις μετρήσεις ανάλογα με την ποιότητα τους.

Εάν  $m$  είναι οι μετρήσεις, ορίζεται ένας διαγώνιος πίνακας  $(m \times m)$ , που ονομάζεται πίνακας στατιστικών βαρών, του οποίου τα στοιχεία της διαγωνίου ορίζονται ως

$$W_{ii} = \frac{1}{\sigma_i} \quad (2.27)$$

όπου  $\sigma_i$  είναι το σφάλμα της  $i$  μέτρησης. Η τιμή του σφάλματος δίνεται είτε από το όργανο μέτρησης κατά τη διάρκεια της έρευνας, είτε από τον χρήστη ανάλογα με τις εκτιμήσεις του για την ποιότητα των στοιχείων που συνέλεξε.

Η φυσική έννοια της χρήσης των πινάκων  $W$  είναι πως αν κάποια μέτρηση έχει μεγάλο σφάλμα, το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα θα έχει πολύ μικρή τιμή.

Ο πίνακας αυτός πολλαπλασιάζεται και με τα δύο μέλη της εξίσωσης (2.13), οπότε  $Wf(m) = Wg$ , (2.28)

και καταλήγουμε στην εξίσωση

$$dm_k = (A_k^T W^T W A_k)^{-1} A_k^T W dy_k. \quad (2.29)$$

Το τελικό αποτέλεσμα είναι η αντίστοιχη εξίσωση του συστήματος να λαμβάνεται λιγότερο υπόψη κατά τη διάρκεια της αντιστροφής, επηρεάζοντας έτσι το διάνυσμα των λύσεων λιγότερο από τις υπόλοιπες εξισώσεις του συστήματος.

### **2.7.3.5 ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ SVD ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΑΣΤΑΘΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

Ένας τρόπος επίλυσης συστημάτων που ο πίνακας  $A$  είναι ασταθής είναι με τη χρήση της μεθόδου SVD (Lanczos 1961, Golub και Reinsch 1970, Lawson και Hanson 1974). Ο πίνακας  $A$  διαστάσεων  $(m \times n)$  αναλύεται σε τρεις πίνακες,

$$A = U\Lambda V, \quad (2.30)$$

όπου, ο πίνακας  $U$  είναι διαστάσεων  $(m \times n)$ , ο  $\Lambda$  είναι διαγώνιος  $(n \times n)$  και ο  $V$  είναι διαστάσεων  $(n \times n)$ . Ο αντίστροφος γενικευμένος Ιακωβιανός είναι  $A_g^{-1} = V\Lambda^{-1}U^T$ .

Ο πίνακας  $\Lambda$  είναι ο πίνακας των ιδιοτιμών του συστήματος. Από την ανάλυση του πίνακα  $\Lambda$ , μπορούμε να καταλάβουμε το πόσο ασταθές είναι το σύστημα. Τα στοιχεία του πίνακα είναι

$$\Lambda = \begin{vmatrix} \frac{1}{\lambda_1} & & & & 0 \\ & \frac{1}{\lambda_2} & & & 0 \\ 0 & & \frac{1}{\lambda_3} & \dots & \\ & & & & \frac{1}{\lambda_n} \\ 0 & 0 & & & \end{vmatrix} \quad (2.31)$$

όπου,  $\lambda_i$  είναι οι ιδιοτιμές του συστήματος. Όταν οι ιδιοτιμές  $\lambda_i$  είναι πολύ μικρές (κοντά στο μηδέν), το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα  $A$  αποκτά πολύ μεγάλη τιμή και η συνεισφορά του στο διάνυσμα των λύσεων του συστήματος είναι μεγάλη.

Είναι δυνατό μέσω της ανάλυσης που επιτυγχάνεται με τη χρήση της SVD να εντοπιστούν οι πολύ μικρές ιδιοτιμές του συστήματος και να αποκοπούν. Εφαρμόζεται ένα κατώφλι κάτω από το οποίο τα στοιχεία του πίνακα  $A$  μηδενίζονται, και οι ιδιοτιμές αυτές δεν λαμβάνονται υπόψη κατά τη διαδικασία της αντιστροφής. Η τεχνική χρησιμοποιήθηκε ευρύτατα στις αρχές της δεκαετίας του 1980 για την επίλυση των ασταθών συστημάτων στο αντίστροφο γεωφυσικό πρόβλημα.

Το πρόβλημα είναι πως η επιλογή της τιμής που θα έχει το κατώφλι είναι αυθαίρετη, και εξαρτάται από το χρήστη, παρόλο που υπάρχουν διάφορες τεχνικές για τον ορισμό της τιμής αυτής (Press et al 1992). Αν δεν γίνει σωστός ορισμός της τιμής που θα έχει το κατώφλι, είτε θα αποκοπούν ιδιοτιμές που περιέχουν χρήσιμες πληροφορίες για το σύστημα που επιλύεται, είτε θα παραμείνουν ιδιοτιμές που θα «παραμορφώσουν» τη λύση του συστήματος. Η δυσκολία να οριστεί το κατώφλι είναι και ο λόγος που η χρήση της SVD είναι περιορισμένη στην αντιστροφή γεωφυσικών προβλημάτων. Υπάρχουν άλλες μέθοδοι, που με πιο αποτελεσματικό τρόπο απομακρύνουν τις ιδιοτιμές αυτές, χωρίς τον κίνδυνο να χαθούν πληροφορίες του συστήματος, όπως θα δούμε παρακάτω.

### 2.7.3.6 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Μια άλλη κατηγορία μεθόδων, ιδιαίτερα δημοφιλής και αποτελεσματική στην επίλυση του αντίστροφου γεωφυσικού προβλήματος, είναι η εισαγωγή περιορισμών στη λύση του συστήματος. Οι περιορισμοί μπορεί να προέρχονται από προϋπάρχουσες πληροφορίες για το πραγματικό μοντέλο, ή από εκτιμήσεις γύρω από αυτό. Η κύρια φιλοσοφία αυτών των μεθόδων είναι ότι οι τιμές των διορθώσεων σε κάθε επανάληψη της αντιστροφής, δεν πρέπει να αφήνονται να κινούνται ανεξέλεγκτα. Περιορίζεται έτσι το βήμα των διορθώσεων σε περιοχή εμπιστοσύνης ώστε να αποφευχθούν λύσεις οι οποίες είναι μεν μαθηματικά σωστές, αλλά είναι φυσικά (γεωλογικά) απαράδεκτες.

### 2.7.3.7 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΛΑΧΙΣΤΩΝ ΤΕΤΡΑΓΩΝΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

Μια από τις πιο δημοφιλείς μεθόδους για την επίλυση ασταθών αντίστροφων προβλημάτων είναι η τεχνική των ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης, που προτάθηκε από τον Levenberg (1944). Η σταθεροποίηση της αντιστροφής επιτυγχάνεται με την πρόσθεση μιας σταθεράς στα διαγώνια στοιχεία του  $A^T A$ .

Αργότερα ο Marquardt (1963, 1970) χρησιμοποίησε αυτή την ιδέα για να αναπτύξει ένα πολύ χρήσιμο αλγόριθμο. Η μέθοδος ονομάστηκε Levenberg-Marquardt και είναι αυτή που χρησιμοποιείται κατά κόρον στη Γεωφυσική. Η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στη μονοδιάστατη αντιστροφή των δεδομένων της μεθόδου των TDEM.

Η μέθοδος εκτός από τη συνθήκη για περιορισμό του σφάλματος  $q = dy^T dy = (y - f(m))^T (y - f(m))$ , εισάγει ένα ακόμα περιορισμό, την προϋπόθεση η λύση να βρίσκεται μέσα στο χώρο εμπιστοσύνης που εξαρχής ορίζεται από το χρήστη. Μαθηματικά ο περιορισμός αυτός ορίζεται ως

$$dm^T dm < ct, \quad (2.32)$$

όπου  $ct$  είναι μια θετική σταθερά που αντικατοπτρίζει το ποσοστό του θορύβου που έχουν τα δεδομένα. Έτσι προκύπτει μια καινούργια συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση, η  $\phi = q_1 + \lambda q_2 = dy^T dy + \lambda(m^T m - L_0^2)$ .

Στην εξίσωση (2.33), η συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση είναι ο γραμμικός συνδυασμός του τετραγώνου των σφαλμάτων και του μεγέθους των λύσεων, και τίθεται ένα ανώτερο επιτρεπτό όριο στο μέγεθος των αλλαγών των παραμέτρων. Ο παράγοντας  $\lambda$  ονομάζεται πολλαπλασιαστής Lagrange ή παράγοντας απόσβεσης και μένει να καθορισθεί.

Ακολουθώντας παρόμοια στρατηγική όπως στην περίπτωση χωρίς περιορισμούς, καταλήγουμε στις κανονικές εξισώσεις, που για το γραμμικό πρόβλημα είναι,

$$(A^T A + \lambda I)m = A^T y \quad (2.34)$$

Για το μη γραμμικό πρόβλημα, η διόρθωση του μοντέλου, για κάθε επανάληψη  $k$ , είναι

$$dm_k = [A_k^T A_k + \lambda_k I]^{-1} A_k^T dy_k \quad (2.35)$$

και το νέο μοντέλο δίνεται από τη σχέση

$$m_{k+1} = m_k + dm_k. \quad (2.36)$$

Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν πίνακες στατιστικών βαρών, η εξίσωση (2.35) μετατρέπεται στην

$$dm_k = [A_k^T W^T W A_k + \lambda_k I]^{-1} A_k^T W d y_k. \quad (2.37)$$

Αναλύοντας τον πίνακα  $A$  με τη χρήση της SVD και επιλύοντας το σύστημα,

$$m = (V \Lambda U^T U \Lambda V^T + \lambda I)^{-1} V \Lambda U^T y = V \text{diag}\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_i^2 + \lambda}\right) U^T y. \quad (2.38)$$

Ο πίνακας  $\text{diag}\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_i^2 + \lambda}\right)$  έχει τη μορφή

$$\begin{array}{cccc} \frac{\lambda_1}{\lambda_1^2 + \lambda} & & & 0 \\ & \frac{\lambda_2}{\lambda_2^2 + \lambda} & & 0 \\ 0 & & \frac{\lambda_3}{\lambda_3^2 + \lambda} & \dots \\ 0 & 0 & & \frac{\lambda_n}{\lambda_n^2 + \lambda} \end{array}. \quad (2.39)$$

Αν η ιδιοτιμή  $\lambda_i$  είναι μεγάλη, τότε η πρόσθεση του  $\lambda$  στο κλάσμα δεν επιφέρει καμία αλλαγή. Αν όμως το  $\lambda_i$  είναι μικρό, η πρόσθεση του  $\lambda$  δίνει μια πολύ μικρή τιμή στο κλάσμα, και κάνει το στοιχείο του πίνακα  $A$  να έχει πολύ μικρή συνεισφορά στο διάλυμα των λύσεων (Jupp και Vozoff 1975).

Σε σύγκριση με την εξίσωση (2.19) που προκύπτει από την χωρίς περιορισμούς λύση, γίνεται φανερό από την ανάλυση της SVD πως η εξίσωση (2.35) μπορεί να διαχειριστεί αποτελεσματικά την περίπτωση που υπάρχουν ιδιάζουσες τιμές του πίνακα  $A^T A$ . Ο Marquardt (1970) έδειξε πως η μέθοδος είναι ίδια με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για  $\lambda \rightarrow 0$ , και με τη γενικευμένη αντιστροφή του Penrose<sup>(\*)</sup> (1955).

Για τον προσδιορισμό του παράγοντα απόσβεσης, ο Marquardt πρότεινε να δίνεται μια μεγάλη τιμή αρχικά στο  $\lambda$  κατά την πρώτη επανάληψη. Αν από τη σύγκριση των θεωρητικών και πραγματικών δεδομένων διαπιστωθεί σύγκλιση, τότε η τιμή του παράγοντα απόσβεσης στην επόμενη επανάληψη υποδεκαπλασιάζεται, και επαναλαμβάνεται η διαδικασία. Διαφορετικά, σε περίπτωση απόκλισης δηλαδή, η τιμή του  $\lambda$  δεκαπλασιάζεται.

Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως μειονέκτημα της μεθόδου, η ισχυρή εξάρτηση από την επιλογή του αρχικού μοντέλου  $m_0$  (Meju 1994, Draper και Smith 1981), με αποτέλεσμα

(\*) (Η γενικευμένη αντιστροφή που πρότεινε ο Penrose (1955) ονομάζεται και μέθοδος της απότομης μεταβολής, όπου το αρχικό μοντέλο διορθώνεται κατά τη διεύθυνση της αρνητικής παραγώγου της συνάρτησης σφάλματος, δηλαδή

$$m = -k \left\{ \frac{\partial q}{\partial m} \right\}, \text{ όπου } k \text{ είναι μια θετική σταθερά.}$$



πολλές φορές οι λύσεις που δίνονται να είναι μαθηματικά μεν ορθές, αλλά φυσικά (γεωλογικά) μη αποδεκτές (Smith και Shanno 1971), ειδικά στην περίπτωση που τα δεδομένα περιέχουν σφάλματα.

### **2.7.3.8 ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΞΟΜΑΛΥΣΜΕΝΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ**

Ένας άλλος τρόπος επίλυσης ασταθών προβλημάτων αντιστροφής είναι να εισαχθεί ένας περιορισμός εξομάλυνσης. Η χρήση τέτοιου περιορισμού για την σταθεροποίηση των προβλημάτων αντιστροφής ανήκει σε μια γενικότερη κατηγορία μεθόδων «κανονικοποίησης» που πρώτος εισήγαγε ο Tikhonov (Tikhonov 1963, Tikhonov και Glasko 1965).

Ένας αλγόριθμος αντιστροφής αυτού του τύπου, που είναι πολύ δημοφιλής στη γεωφυσική, είναι η μέθοδος Occam (Constable et al. 1987). Η βασική ιδέα πίσω από τη μέθοδο έγκειται στην προσπάθεια εξεύρεσης της πιο απλής λύσης ελλείπει πληροφοριών για το μοντέλο που αναζητείται. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται συντηρητικά, με την έννοια πως δεν ψάχνουμε την ακριβή αναπαράσταση της πραγματικότητας, αλλά ένα μοντέλο, ανάμεσα στα πολλά που ικανοποιούν μαθηματικά τα δεδομένα, που θα είναι το απλούστερο δυνατό.

Η αρχική υπόθεση που γίνεται είναι ότι οι άγνωστες παράμετροι του μοντέλου είναι ένας αριθμός στρωμάτων, π.χ. ίσος με τον αριθμό των μετρήσεων, γνωστού πάχους και άγνωστης αντίστασης (DeGroot-Hedlin και Constable, 1990). Έτσι, οι άγνωστοι είναι μόνο οι αντιστάσεις των στρωμάτων. Ο Constable έθεσε τα πάχη των στρωμάτων ίσα, λαμβάνοντας όμως υπόψη το γεγονός ότι η ευαισθησία της μεθόδου μειώνεται με το βάθος, θα μπορούσαν τα πάχη των στρωμάτων να αυξάνονται με το βάθος. Ο αρχικός περιορισμός που εισάγεται είναι το μέτρο της διαφοράς μεταξύ των πραγματικών και θεωρητικών μετρήσεων να είναι μικρότερο από το επίπεδο του θορύβου των δεδομένων, δηλαδή,

$$\|f(m) - d\| \leq \varepsilon. \quad (2.40)$$

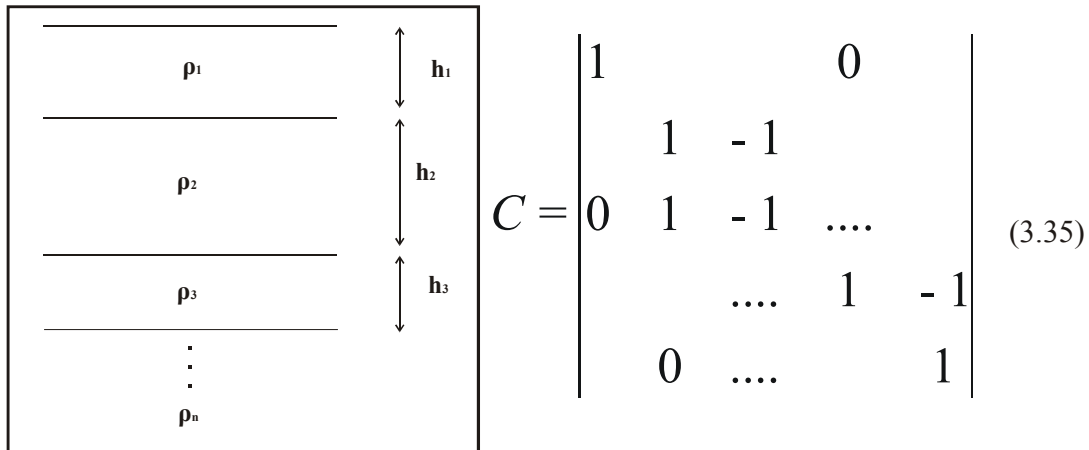
Το σφάλμα του συστήματος, η συνάρτηση δηλαδή προς ελαχιστοποίηση, είναι η

$$q = (Wd - WAm)^T (Wd - WAm). \quad (2.41)$$

Επιπλέον, εισάγεται στο σύστημα ένας πίνακας τραχύτητας  $R$ , ο οποίος δείχνει τον τύπο της εξομάλυνσης. Ο πίνακας  $R$  μπορεί να γραφεί με τη μορφή

$$R = \|Cm\|^2 \quad (2.42)$$

και υποδηλώνει την εξάρτηση των παραμέτρων μεταξύ τους, δηλαδή των αντιστάσεων των στρωμάτων γνωστού πάχους. Η  $i$  γραμμή του πίνακα δίνει πληροφορίες για την  $i$  παράμετρο-αντίσταση του συστήματος, και την εξομάλυνση που υφίσταται σε σχέση με τις γειτονικές παραμέτρους. Αν το πραγματικό μοντέλο αποτελείται από  $n$  στρώματα, με πάχη  $(n-1)$ , προσπαθούμε να βρούμε ένα θεωρητικό μοντέλο με  $N$  στρώματα (όσες και οι μετρήσεις), και ο πίνακας  $C$  είναι  $(NxN)$  τάξεως, της μορφής



$$C = \begin{vmatrix} 1 & & & & 0 \\ & 1 & -1 & & \\ 0 & & 1 & -1 & \dots \\ & & & \dots & 1 & -1 \\ & 0 & & & & 1 \end{vmatrix} \quad (3.35)$$

Μαθηματικά, το πρόβλημα τίθεται ως εξής: ελαχιστοποίηση του σφάλματος  $q$  υπό τη συνθήκη η τραχύτητα  $R$  του μοντέλου να είναι ελάχιστη.

Από την ελαχιστοποίηση με τη μέθοδο των πολλαπλασιαστών Lagrange προκύπτει η εξίσωση

$$((AW)^T AW + \lambda R)m = (WA)^T Wy. \quad (2.43)$$

Επομένως, η λύση του συστήματος για το μη γραμμικό πρόβλημα είναι

$$dm_k = ((A_k W)^T A_k W + \lambda_k C^T C)^{-1} (WA_k)^T W dy_k \quad (2.44)$$

και το νέο μοντέλο

$$m_{k+1} = m_k + dm_k. \quad (2.45)$$

Όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του  $\lambda$ , τόσο πιο εξομαλυσμένες είναι οι λύσεις, άρα μικρό εύρος διορθώσεων. Αντίστροφα, μικρή τιμή του  $\lambda$  συνεπάγεται μεγάλο εύρος διορθώσεων.

Η διαφορά της εξίσωσης (2.43) από την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης (εξ.2.36), είναι η προσθήκη του πίνακα  $R$ , που δίνει στο μοντέλο την εξομαλυσμένη μορφή, επιτρέπει δηλαδή στο μοντέλο να αποκλίνει από την απλούστερη μορφή τόσο, όσο χρειάζεται για να πλησιάσουν οι θεωρητικές μετρήσεις τις πραγματικές.

Ο Constable προτείνει μια διαδικασία καθορισμού της τιμής του  $\lambda$  με μεθόδους βελτιστοποίησης. Αρχικά ορίζεται ένα πολύ μεγάλο διάστημα μέσα στο οποίο αναμένεται να βρίσκεται η τιμή του  $\lambda$  (από  $10^{-3}$  έως  $10^6$ ). Ερευνώντας σε όλο το διάστημα ορίζεται ένα μικρότερο διάστημα, μέσα στο οποίο βρίσκεται ένα τοπικό ελάχιστο. Αν η τιμή της συνάρτησης  $q$ , για αυτή την τιμή του  $\lambda$ , είναι μικρότερη από κατώφλι θορύβου που έχει οριστεί, τότε ο αλγόριθμος αναζητά την τιμή εκείνη του  $\lambda$  για την οποία η τιμή της συνάρτησης  $q$  γίνεται ίση με το επίπεδο του θορύβου. Η τιμή αυτή του  $\lambda$  θεωρείται πως είναι η βέλτιστη για τη συγκεκριμένη επανάληψη.

## 2.8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο υποκεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ των κυριότερων μεθόδων αντιστροφής σε μια διάσταση για τη μέθοδο της ηλεκτρικής τομογραφίας που μελετήθηκαν παραπάνω, δηλαδή της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης, της μεθόδου της εξομαλυσμένης αντιστροφής.

### **2.8.1 ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ-ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ**

Στη μέθοδο της εξομαλυσμένης αντιστροφής, ο περιορισμός τίθεται από φυσική σκοπιά. Η στρωμάτωση του υπεδάφους δεν αναμένεται να έχει απότομες μεταβολές όσο αφορά τις αντιστάσεις, και έτσι το τελικό μοντέλο αποκλίνει από τον ομογενή ημιχώρο τόσο, όσο ώστε οι θεωρητικές μετρήσεις να συγκλίνουν με τα πειραματικά δεδομένα.

Ο περιορισμός που τίθεται στην υβριδική αντιστροφή είναι διαφορετικός από τη μέθοδο της εξομαλυσμένης αντιστροφής. Περιορίζεται το εύρος διόρθωσης του μοντέλου όσο αφορά τις αντιστάσεις των στρωμάτων, όμως τα πάχη αφήνονται να μεταβάλλονται ανεξέλεγκτα. Ο περιορισμός αυτός έχει φυσική έννοια, καθώς επιδιώκουμε να πάρουμε ένα τελικό μοντέλο με διακριτά στρώματα, όμως υπάρχει εξάρτηση μεταξύ των αντιστάσεων, υπό την έννοια πως δεν αναμένονται τρομερά απότομες αλλαγές των αντιστάσεων μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων.

### **2.8.2 ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ-ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ**

Η ύπαρξη σφαλμάτων στα δεδομένα θα πρέπει να θεωρείται εκ των προτέρων δεδομένη. Στην περίπτωση που τα σφάλματα είναι τυχαία και έχουν κανονική κατανομή, αποδείχτηκε πειραματικά πως όλες οι μέθοδοι αποκρίνονται ικανοποιητικά. Με τη χρήση των πινάκων στατιστικών βαρών, οι μέθοδοι απομονώνουν τις μετρήσεις εκείνες που έχουν πολύ μεγάλα σφάλματα, δίνοντας τους πολύ μικρό βάρος κατά τη διαδικασία της αντιστροφής.

### **2.8.3 ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΡΧΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ**

Στην περίπτωση της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης και της υβριδικής αντιστροφής, η επιλογή του αρχικού μοντέλου είναι σημαντική. Ο χρήστης απαιτείται να εισάγει όχι μόνο το σωστό αριθμό στρωμάτων, αλλά και να επιλέξει τις τιμές των παραμέτρων του αρχικού μοντέλου έτσι ώστε να είναι αρκετά κοντά στις πραγματικές. Στην περίπτωση που υπάρχει πρότερη γνώση της δομής του υπεδάφους αυτό είναι σχετικά εύκολο, αλλά πολλές φορές ο χρήστης πρέπει να δοκιμάζει πολλά μοντέλα με διαφορετικό αριθμό στρωμάτων έως ότου να καταλήξει σε αυτό που έχει τη μεγαλύτερη σύγκλιση με τις πειραματικές μετρήσεις.

Αν δεν υπάρχει καμία πληροφορία για το μοντέλο του υπεδάφους, τότε η μέθοδος της εξομαλυσμένης αντιστροφής είναι αυτή που μπορεί να παρέχει τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, καθώς δεν απαιτείται προσδιορισμός του αριθμού των στρωμάτων. Ο χρήστης εισάγει μόνο τη μέση αντίσταση του υπεδάφους και το σταθερό πάχος των στρωμάτων, και ο αλγόριθμος προσπαθεί να μεταβάλλει τις αντιστάσεις των στρωμάτων ώστε να υπάρξει σύγκλιση μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών μετρήσεων.

## ΣΑΦΗΝΕΙΑ ΣΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Είθισται στη Γεωφυσική να αναπαριστούμε τα μοντέλα του υπεδάφους χρησιμοποιώντας διακριτές ασυνέχειες μεταξύ των στρωμάτων, ιδιαίτερα όσο αφορά τις αντιστάσεις τους. Π.χ. μοντέλο δύο στρωμάτων με ανώτερο στρώμα πάχους 100 μέτρων και αντίσταση 10 Ohm-m, υπερκείμενο ημιχώρου 100 Ohm-m.

Η μέθοδος της εξομαλυσμένης αντιστροφής, εξαιτίας ακριβώς του περιορισμού που εισάγεται μέσω του πίνακα τραχύτητας  $R$ , επιτρέπει στις αντιστάσεις μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων να μεταβάλλονται βαθμιαία μεταξύ τους. Επιπλέον, ο αριθμός των στρωμάτων ορίζεται ίσος με τον αριθμό των μετρήσεων. Το τελικό μοντέλο αποτελείται έτσι από πολλά μικρά στρώματα, και δεν ορίζονται σαφή πάχη μεταξύ στρωμάτων με απότομες μεταβολές στην αντίσταση, αλλά υπάρχει μια ομαλή μεταβολή μεταξύ ακραίων τιμών.

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων απόσβεσης δεν εισάγει κανενός είδους περιορισμό, και τα πάχη των στρωμάτων ορίζονται σαφώς, καθώς αφήνονται να κινούνται ανεξέλεγκτα μεταξύ τους.

Στην υβριδική αντιστροφή, ο περιορισμός που τίθεται είναι οι αντιστάσεις μεταξύ διαδοχικών στρωμάτων να μην κινούνται ανεξέλεγκτα μεταξύ τους. Δεν υπάρχει κανένας περιορισμός όσο αφορά τα πάχη των στρωμάτων, τα οποία μπορούν να μεταβάλλονται ελεύθερα. Έτσι και σε αυτή τη μέθοδο τα πάχη ορίζονται σαφώς.

Συμπερασματικά, από την ανάλυση που έγινε παραπάνω, αλλά κυρίως από τις δοκιμές που έγιναν με διάφορα θεωρητικά μοντέλα καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως η υβριδική μέθοδος αντιστροφής είναι αυτή που παρουσιάζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα από όλες τις μεθόδους που εξετάστηκαν. Είναι σταθερή, λαμβάνει υπόψη της τα μεγέθη των σφαλμάτων των μετρήσεων, δίνει με σαφήνεια το πάχος των στρωμάτων του μοντέλου, και το τελικό μοντέλο προκύπτει ως αποτέλεσμα φυσικών και όχι αυθαίρετων μαθηματικών περιορισμών. Επίσης εμφανίζει τα περισσότερα πλεονεκτήματα μεταξύ των μεθόδων που εξετάστηκαν. Τη μέθοδο αυτή επιλέξαμε για την εφαρμογή του αλγορίθμου σταθερής αντιστροφής που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Όλα τα παραπάνω, συνοψίζονται στον πίνακα (Π3.1), όπου με ([]) συμβολίζονται τα πλεονεκτήματα ή οι απαιτήσεις και με (-) τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου.

Μέθοδος	Είναι Σταθερή η Αντιστροφή ;	Προέλευση Περιορισμών ;	Αρχικό Μοντέλο ;	Διακριτά Στρώματα ;	Συμπεριλαμβάνεται Τυχαίος Θόρυβος ;
Ελάχιστα Τετράγωνα	-	-	[	[	[
Ελ. Τετράγωνα Απόσβεσης	[	Μαθηματικό Μοντέλο	[	[	[
Εξομαλυσμένη αντιστροφή	[	Φυσικό Μοντέλο	-	-	[

**Πίνακας Π3.1 Συγκεντρωτικά τα συμπεράσματα για τις μεθόδους αντιστροφής του μονοδιάστατου προβλήματος της ηλεκτρικής τομογραφίας.**

## **ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ**

Για την εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων υπαίθρου χρησιμοποιήθηκαν τα κάτωθι επιστημονικά όργανα:

SYSCAL Jr. Switch 48 (v. 11.4++) (σχήμα 2.5). Ένα αυτόματο πολυκαναλικό σύστημα (48 καναλιών) μέτρησης αντιστάσεων με εσωτερικό επιλογήα καναλιών (πολυπλέκτης 48 θέσεων) της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS

2 πολύκλινα καλώδια (26 κλώνων) μεταφοράς του σήματος με 24 εξόδους το καθένα ανά 5 μέτρα.

48 πάσσαλοι και 48 καλώδια σύνδεσης αυτών με τα καλώδια μεταφοράς του σήματος.

1 μπαταρία 12V και 143Ah για μεγάλη αυτονομία στο ύπαιθρο.

Καλώδιο RS232 για μεταφορά των δεδομένων από το σύστημα καταγραφής στον υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία. Το όργανο μέτρησης χρησιμοποιεί τόσο εσωτερικές (12Volt) όσο και εξωτερικές μπαταρίες και παρουσιάζεται στο σχήμα (2.5.). Η μπαταρία που χρησιμοποιήσαμε εμείς σαν εξωτερική ήταν μπαταρία αυτοκινήτου τάσης 12 Volt.



**Σχήμα 2.5. Όργανο λήψης ηλεκτρικών μετρήσεων SYSCAL Jr. Switch 48 (v. 11.4++) της εταιρείας IRIS INSTRUMENTS.**

## **5. Επεξεργασία δεδομένων γεωηλεκτρικής τομογραφίας**

Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με ένα αλγόριθμο αντιστροφής (Loke, 2000, 2002). Ο αλγόριθμος αυτός είναι δυσδιάστατης μη γραμμικής αντιστροφής και εκτελεί επαναληπτική βελτιστοποίηση βασισμένος σε ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης με πεπερασμένα στοιχεία. Ο αλγόριθμος είναι τελείως αυτοματοποιημένος και χρησιμοποιεί το σχήμα της αντιστροφής Occam (Constable et al. 1991). Η διαδικασία αντιστροφής μπορεί να επιταχυνθεί με τη χρήση τεχνικών Quasi-Newton για την ενημέρωση του Ιακωβιανού πίνακα.

Όλες οι αντιστροφές παρουσίασαν σχετικά μικρό σφάλμα (R.M.S. 1.45-25%) δεδομένης της έντονης υπεδάφειας ανομοιογένειας της περιοχής έρευνας. Η έντονη μεταβολή του r.m.s σχετίζεται με τη μεγάλη μεταβλητότητα των τιμών της υπεδάφειας ηλεκτρικής αντίστασης που μεταβάλλεται από τα 1-10 Ohm.m της αργίλου, τα 30-150 Ohm.m των μαργαϊκών μέχρι τα 1800 Ohm.m των κροκάλων και πιθανών δομών. Έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι τα αποτελέσματα της αντιστροφής που παρουσιάζονται στις επόμενες σελίδες, δίνουν καλή προσέγγιση της πραγματικής αντίστασης του εδάφους, εάν λάβουμε υπόψη το εύρος μεταβολής των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

### **5.1 Εξοπλισμός**

Για την εκτέλεση των γεωφυσικών μετρήσεων υπαίθρου χρησιμοποιήθηκαν τα κάτωθι επιστημονικά όργανα:

SYSCAL Jr. Switch 48 (v. 11.4++), Ένα αυτόματο πολυκαναλικό σύστημα (48 καναλιών) μέτρησης αντιστάσεων με εσωτερικό επιλογέα καναλιών (πολυπλέκτης 48 θέσεων).

2 πολύκλωνα καλώδια (26 κλώνων) μεταφοράς του σήματος με 24 εξόδους το καθένα ανά 5 μέτρα.

48 ατσάλινοι πάσσαλοι και 48 καλώδια σύνδεσης αυτών με τα καλώδια μεταφοράς του σήματος.

1 μπαταρία 12V και 143Ah για μεγάλη αυτονομία στο ύπαιθρο.

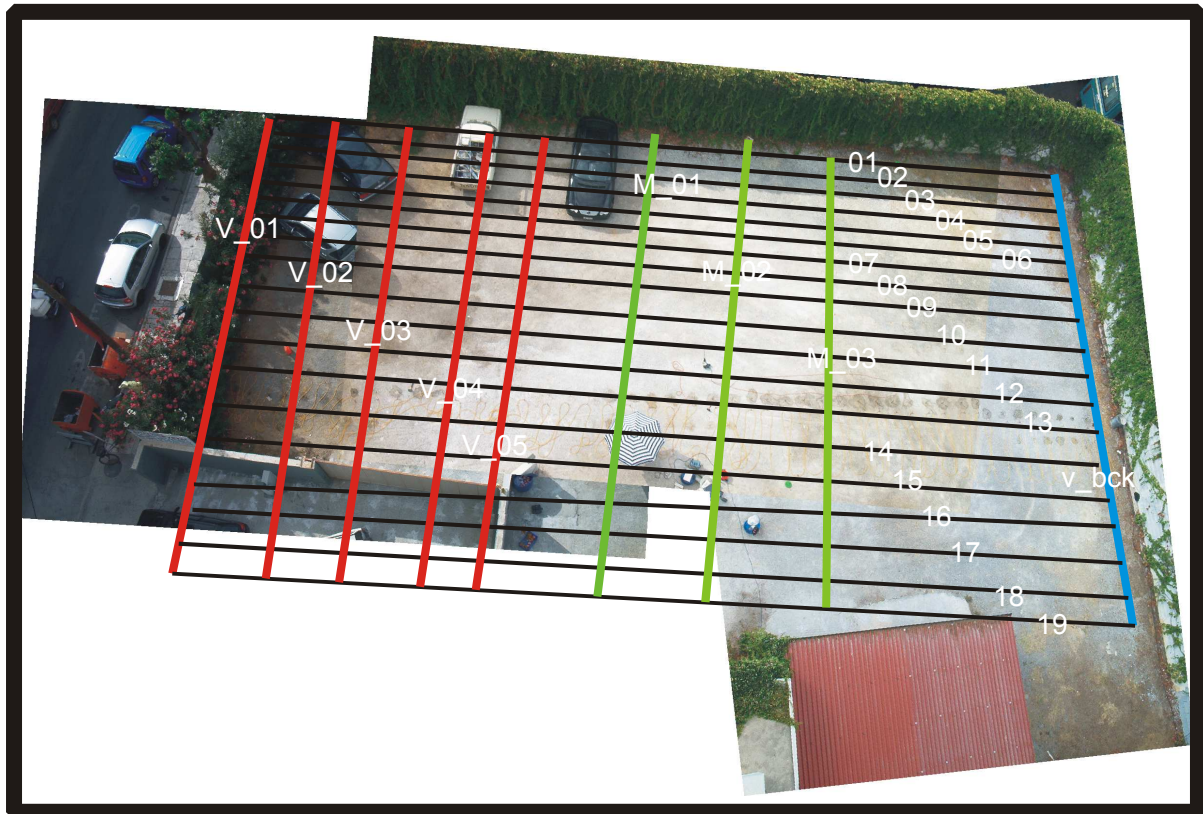
Καλώδιο RS232 για μεταφορά των δεδομένων από το σύστημα καταγραφής στον υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.

Ψηφιακή φωτογραφική μηχανή HP450 για την αποτύπωση των θέσεων και τη συλλογή φωτογραφικού υλικού.

GPS Garmin 12XL για την αποτύπωση των γραμμών μέτρησης.

### **5.2 Προγραμματισμός και Λήψη μετρήσεων γεωηλεκτρικών τομογραφιών**

Στο σχήμα 6 παρουσιάζεται σκαρίφημα της περιοχής του έργου όπου πραγματοποιήθηκε και η γεωφυσική έρευνα. Η μετρήσεις υπαίθρου ξεκίνησαν από την τομή 01. Στην περιοχή εκτελέστηκαν 28 τομογραφίες των 48 ηλεκτροδίων, συνολικού μήκους 754.35 μέτρων. Οι μετρήσεις με διεύθυνση 278° - 82° (τομές 01-19) ελήφθησαν σε κάρναβο με αποστάσεις μεταξύ των γραμμών περί το 1 μέτρο. Στη συνέχεια και βασιζόμενοι στην ερμηνεία των πρώτων 19 τομογραφιών, ελήφθησαν 5 τομογραφίες σε κάθετη διεύθυνση, με 2 μέτρα απόσταση μεταξύ τους (τομές v\_01-v\_05). Για την καλύτερη κάλυψη της περιοχής, πραγματοποιήθηκε μια τομογραφία με απόσταση ηλεκτροδίων 0.5 μέτρα με αρχή της το σημείο (27.85,0.0). Τέλος, τρεις ακόμα τομογραφίες πραγματοποιήθηκαν στο μέσο της περιοχής, με απόσταση μεταξύ τους 2.70 μέτρα, ύστερα από ερμηνεία των παραπάνω τομογραφιών και την παρουσία ειδικού ενδιαφέροντος στο σημείο εκείνο.



Σχήμα 6. Φωτογραφία του χώρου έρευνας με αποτυπωμένο το σκαρίφημα όλων των τομών.

Στη συνέχεια θα αναλυθούν τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων και θα παρουσιασθούν ανά τομή όπως αυτή ορίζεται στο σχήμα.



### **5.3 Ερμηνεία μετρήσεων γεωηλεκτρικών τομογραφιών**

Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με το λογισμικό Res2Dinv και η συνολική ερμηνεία για την περιοχή παρουσιάζεται στα σχήματα 07 έως 40.

#### **5.3.1. Τομές 01-19:**

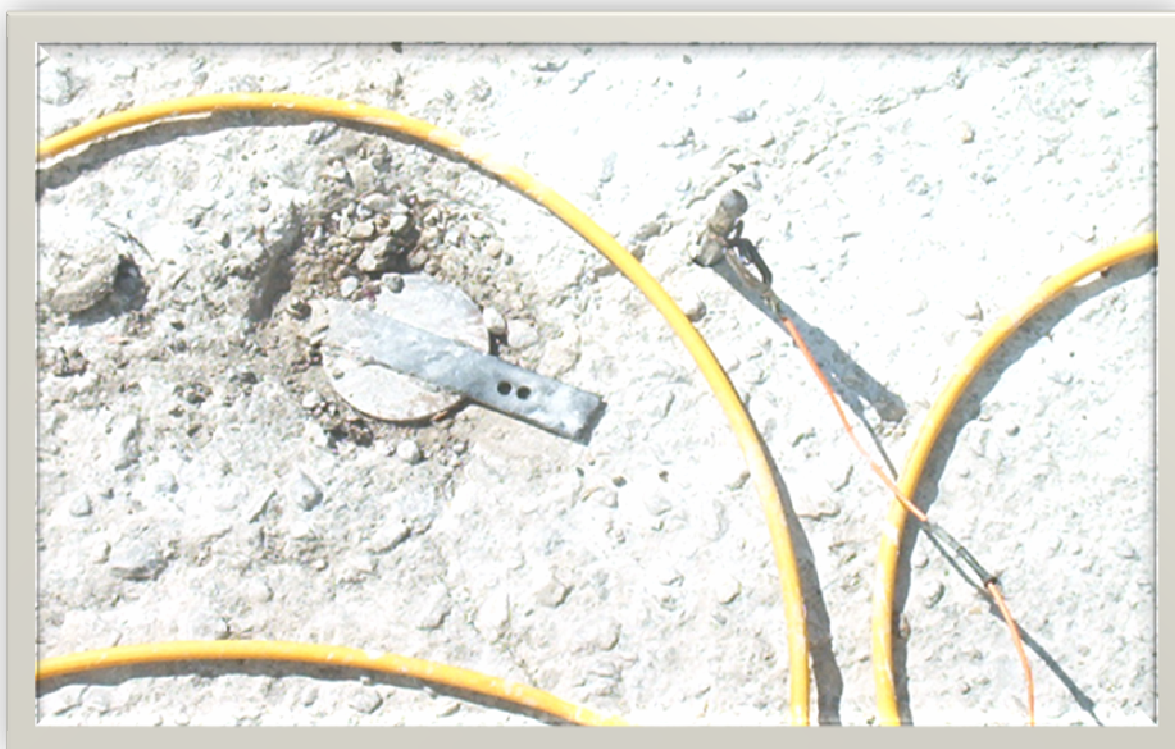
Οι τομές 01 έως 19 πραγματοποιήθηκαν με απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων 0.65 μέτρα (φωτογραφία 3). Το μέγιστο βάθος διασκόπησης ξεπέρασε τα 4.20 μέτρα, με υψηλότερη ευκρίνεια στα βάθη 1.5 έως 4.0 μέτρα. Στα σχήματα 07 έως 25 παρουσιάζονται οι τομές κάθε μια ξεχωριστά. Στο πάνω μέρος του κάθε σχήματος απεικονίζονται οι μετρήσεις που πάρθηκαν, στο μέσο η ψευδοτομή που δημιουργείται και στο κάτω μέρος το αποτέλεσμα της αντιστροφής.

Η τομή 18 περνάει ακριβώς πάνω από τη γεωτεχνική γεώτρηση Γ2 προηγούμενης γεωτεχνικής μελέτης, και ειδικότερα το 9ο ηλεκτρόδιο (5.20 μέτρα από την αρχή της τομής) απέχει μόλις 0.10 μέτρα από τη γεώτρηση, όπως φαίνεται και στη φωτογραφία 4. Η στάθμη



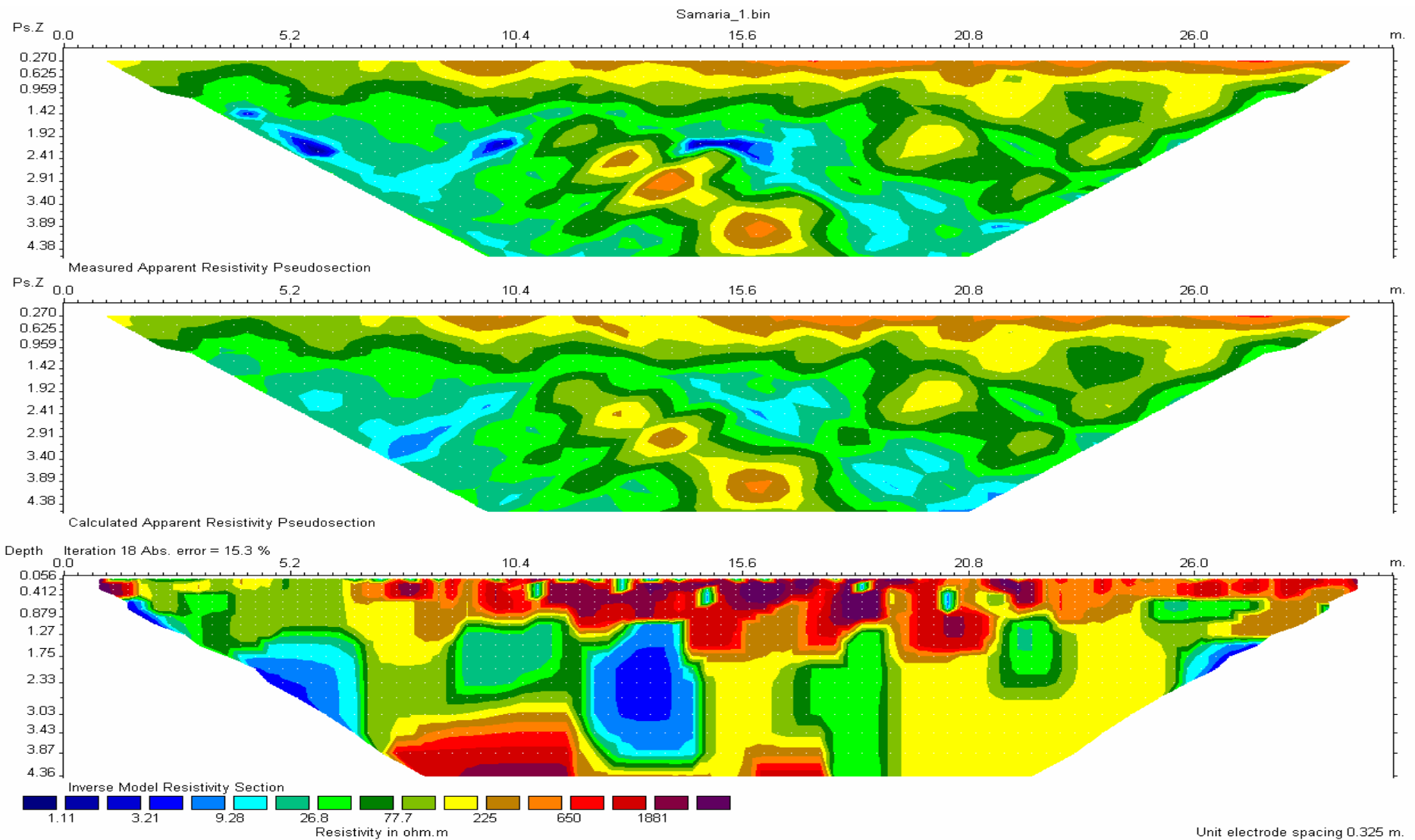
του ύδατος στη γεώτρηση την περίοδο που έγιναν οι μετρήσεις βρισκόταν περίπου στα 11.50 μέτρα.

**Φωτογραφία 3. Παράδειγμα τομής κατά τη διεύθυνση 82° -262°.**



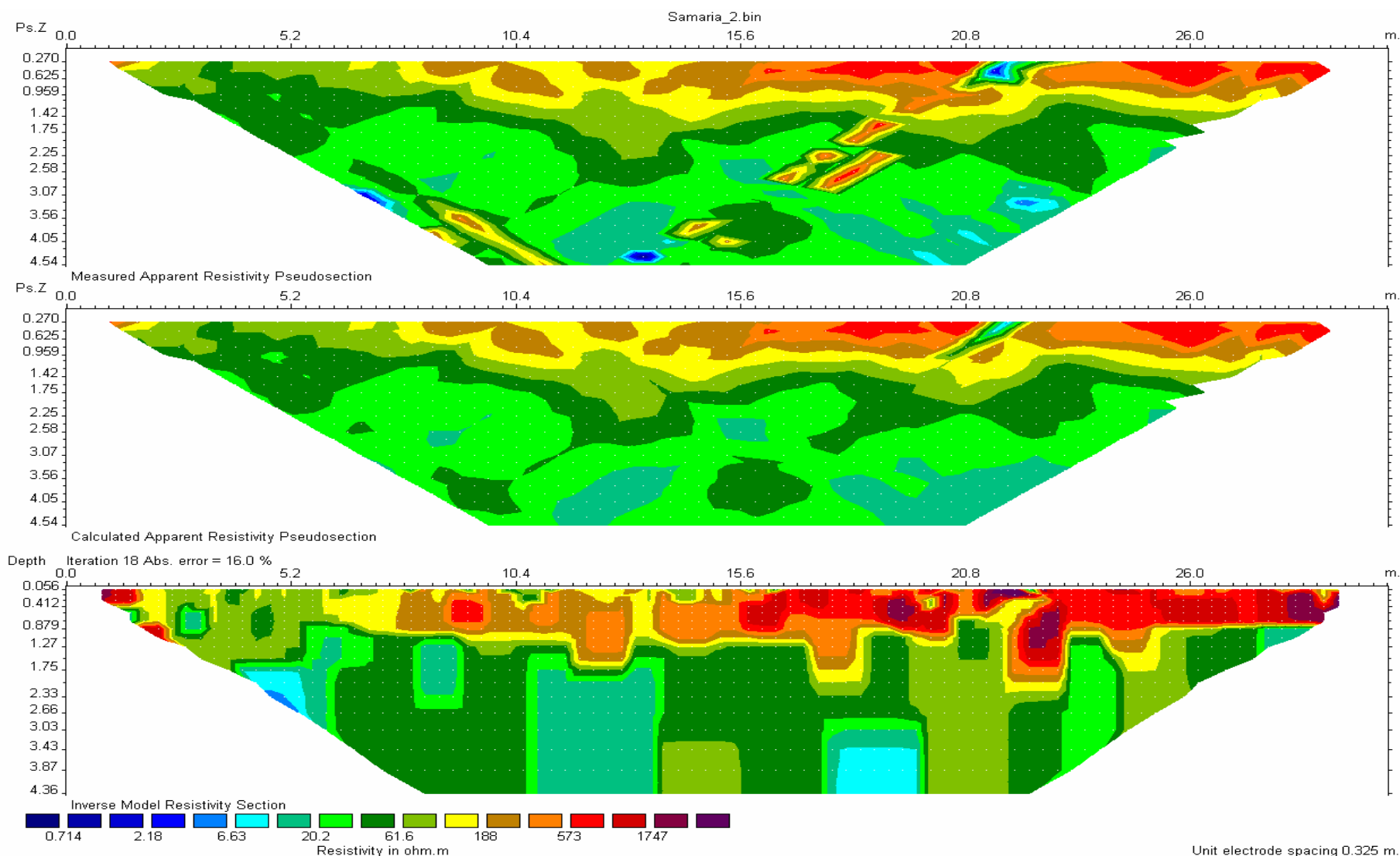
Φωτογραφία 4. Το 9<sup>ο</sup> ηλεκτρόδιο της τομής 18 είναι παραπλεύρως της γεώτρησης Γ2.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η χρωματική κλίμακα μεταξύ των διαφορετικών τομών είναι σχετική. Με ψυχρά χρώματα αποτυπώνονται οι χαμηλές αντιστάσεις, και με ζεστά οι υψηλές.



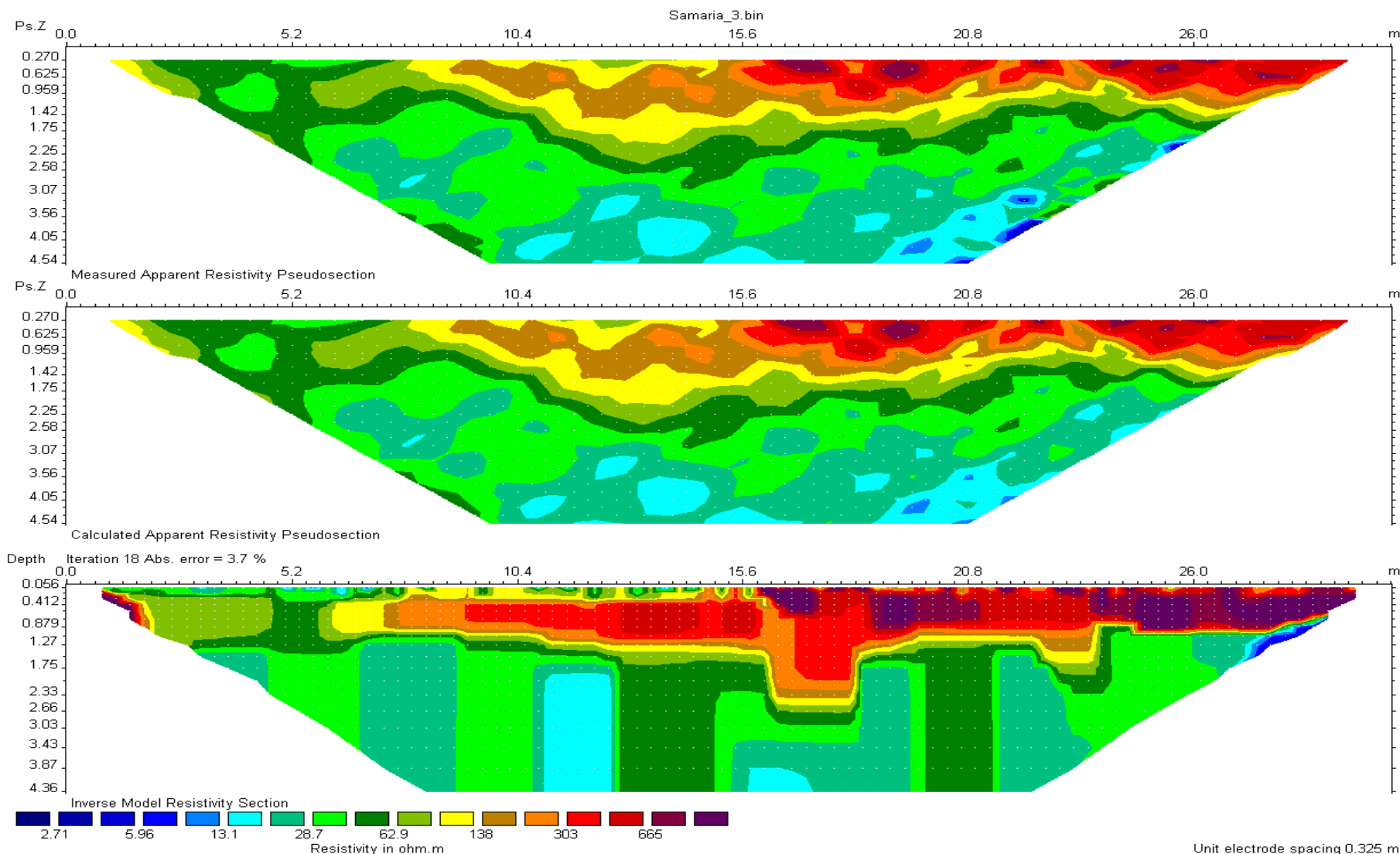
Σχήμα 07. Τομή 01

Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



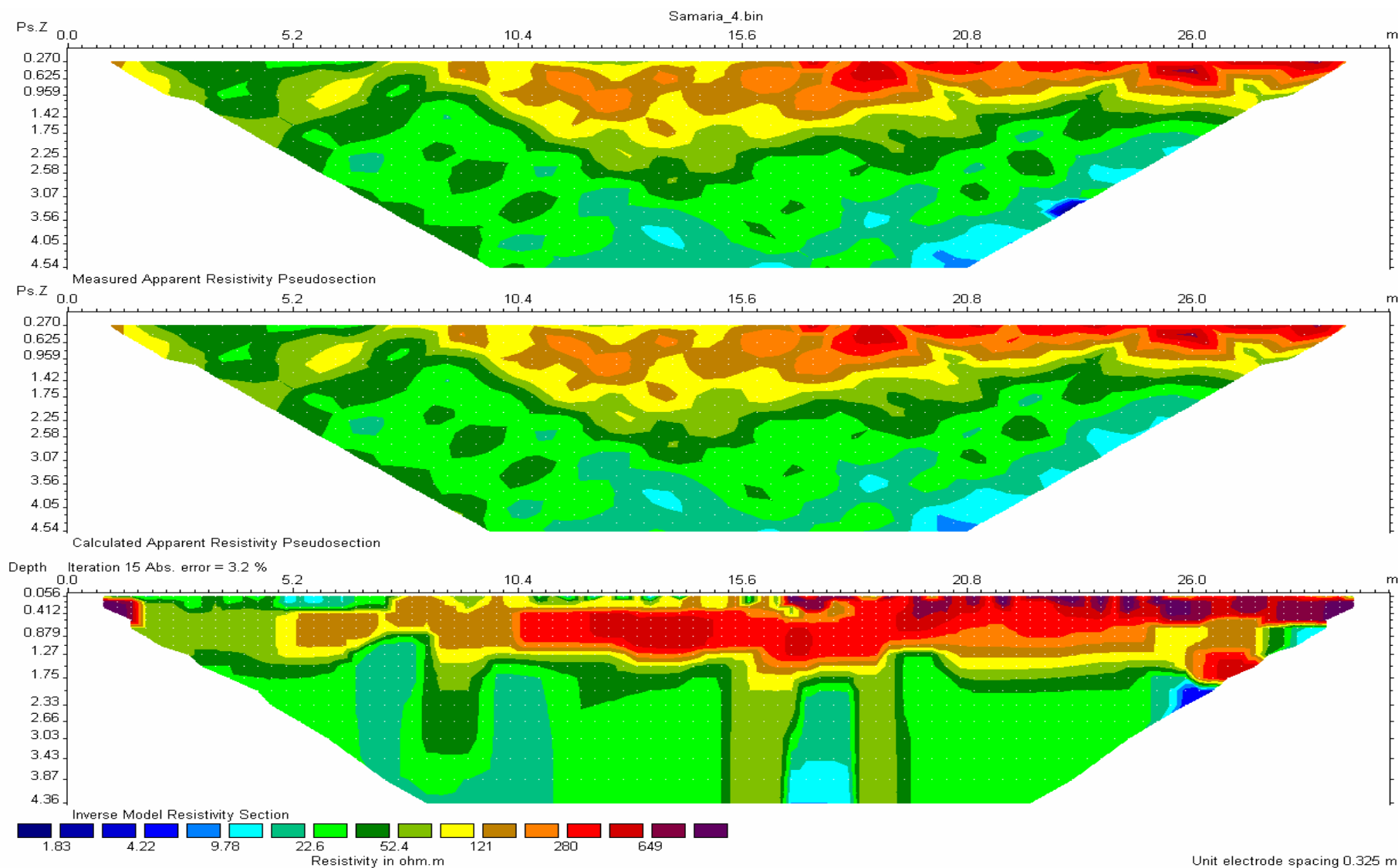
Σχήμα 08. Τομή 02

**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



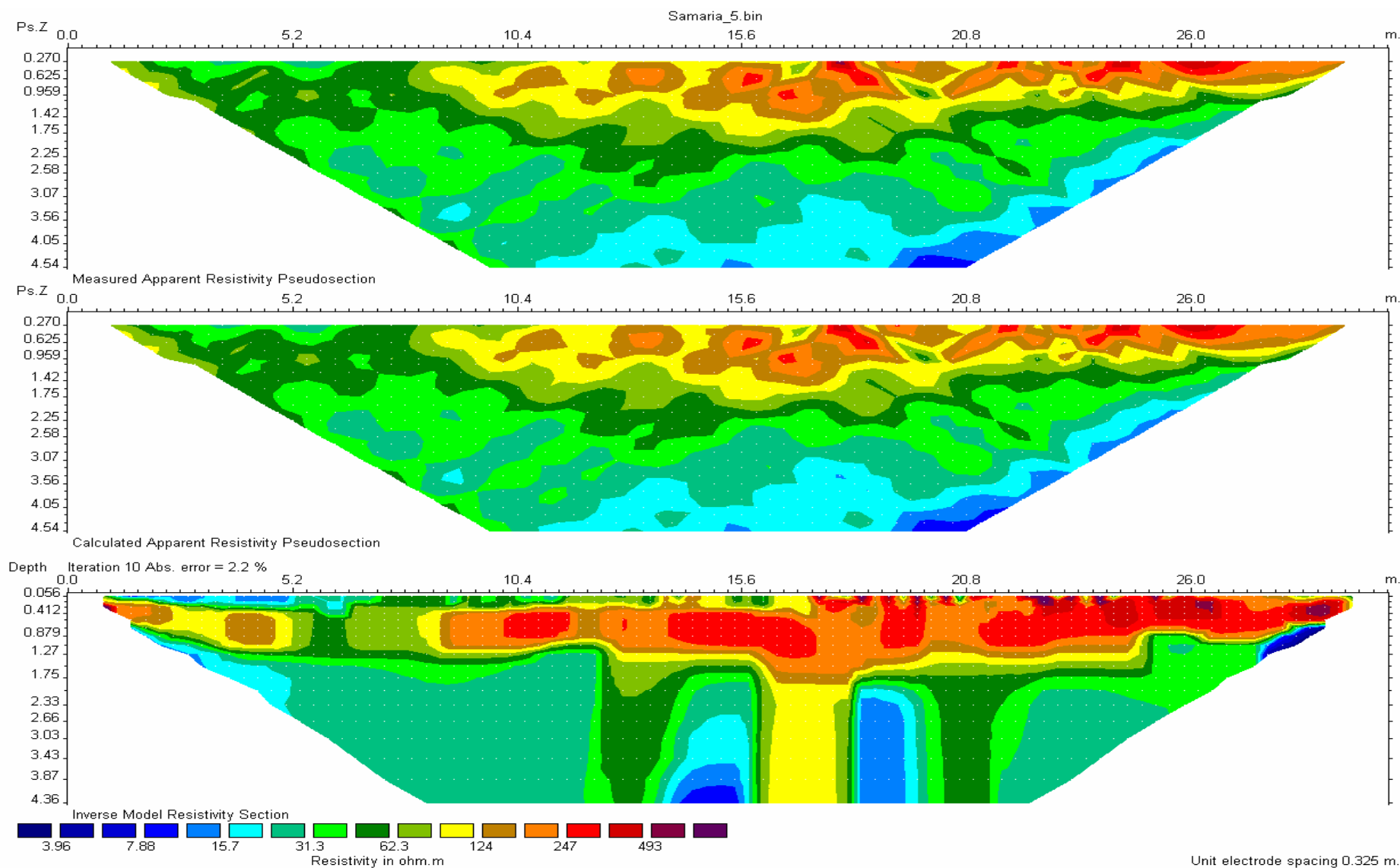
Σχήμα 09. Τομή 03

**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



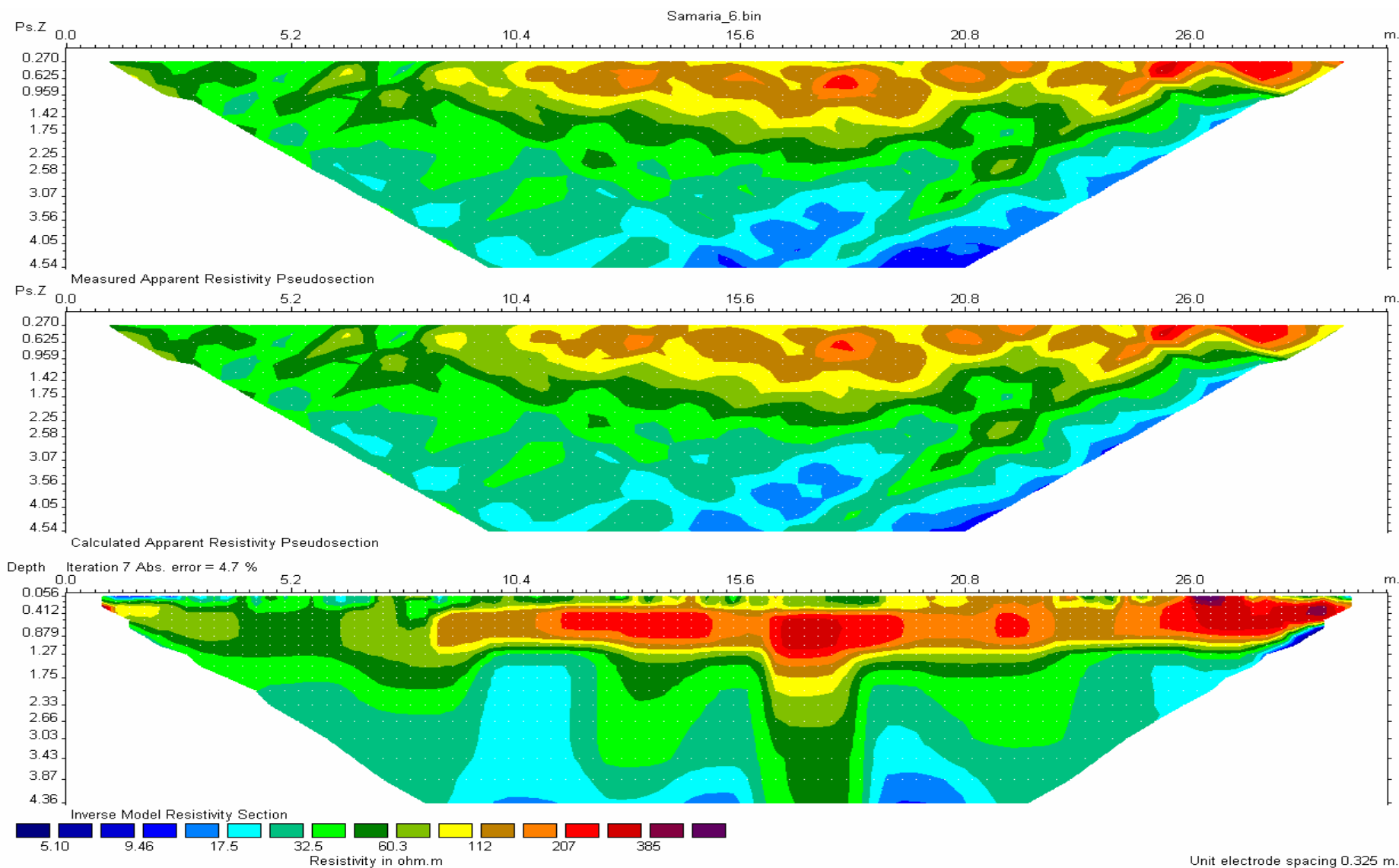
Σχήμα 10. Τομή 04

**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



Σχήμα 11. Τομή 05

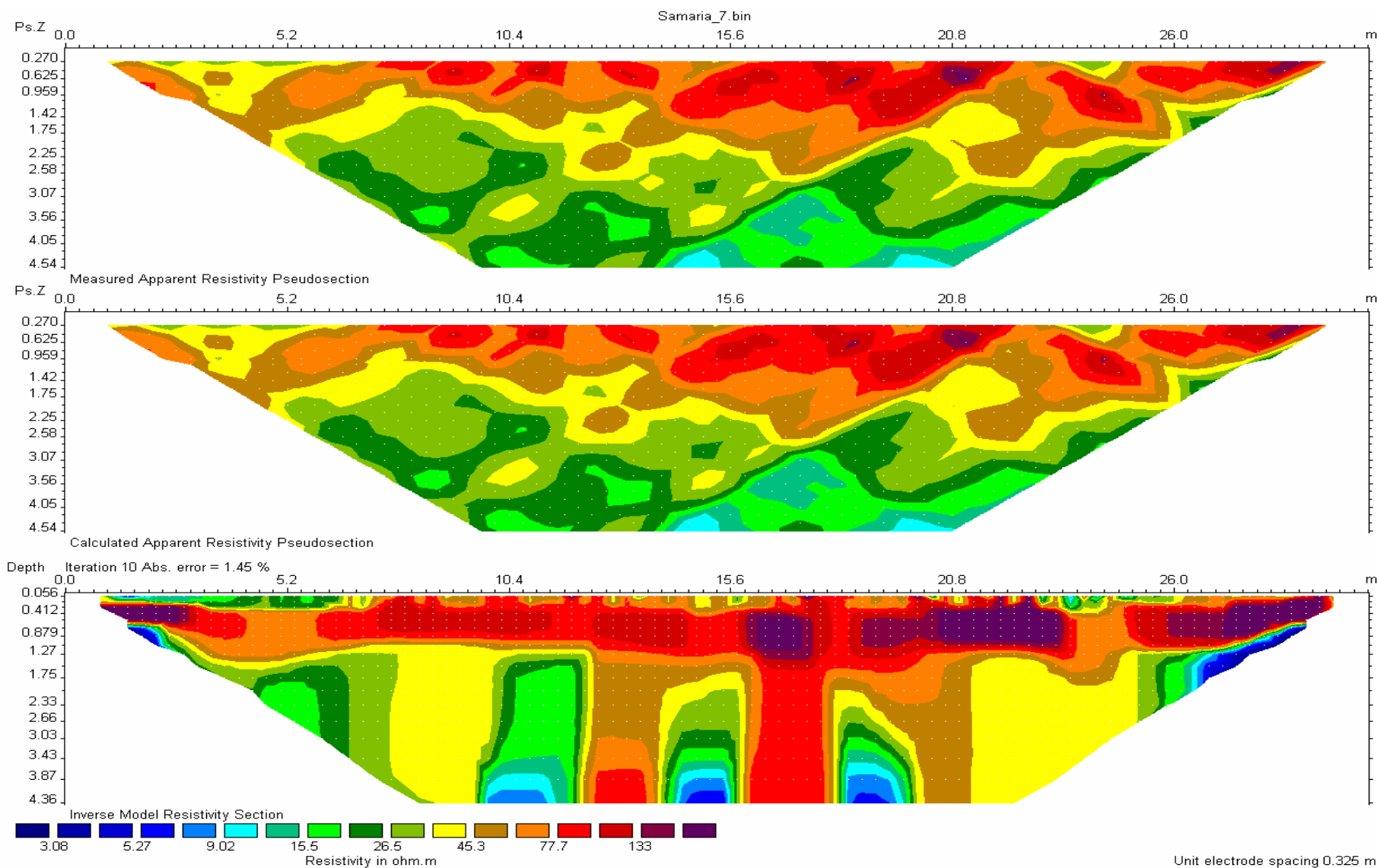
**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



Σχήμα 12. Τομή 06

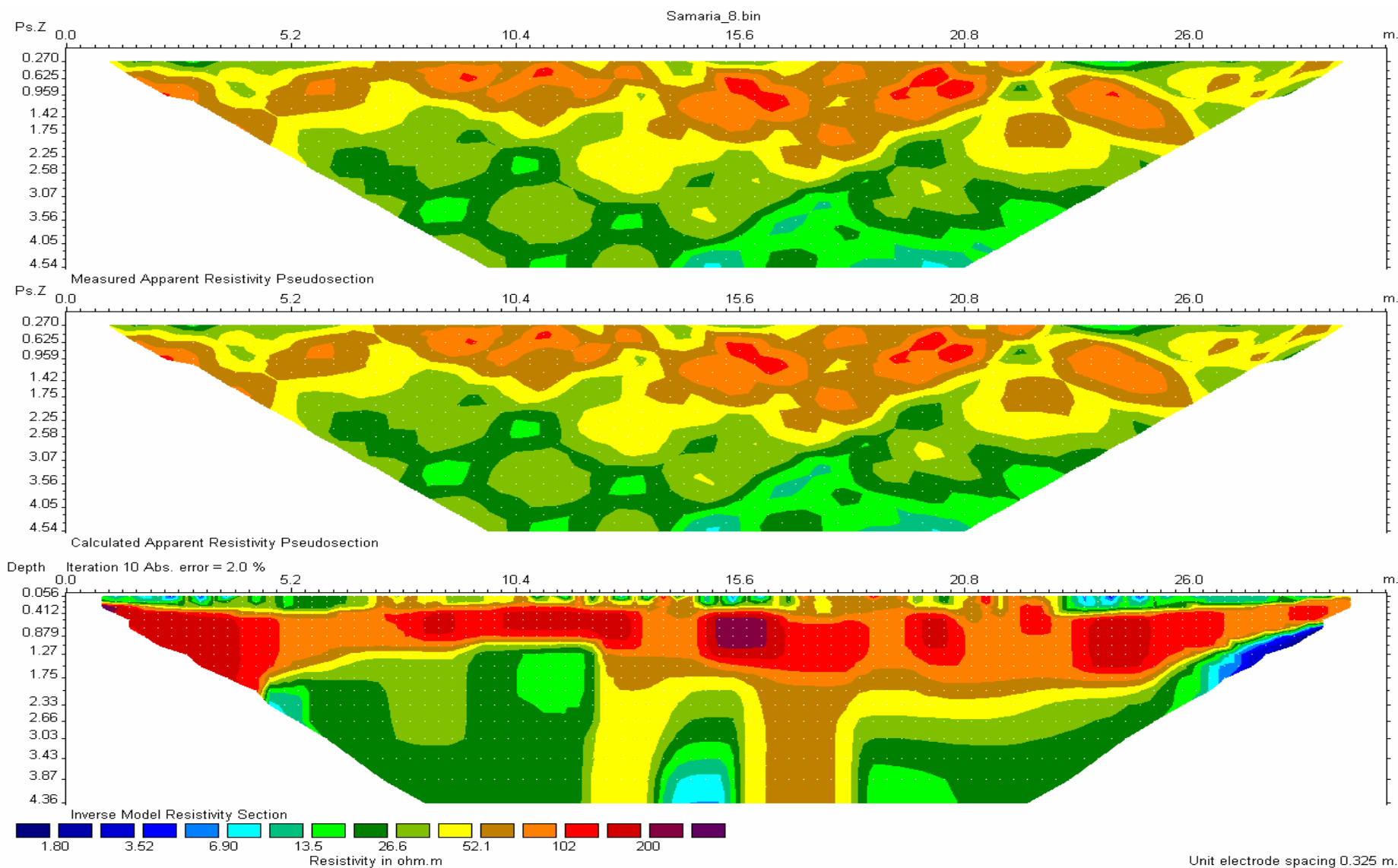


**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



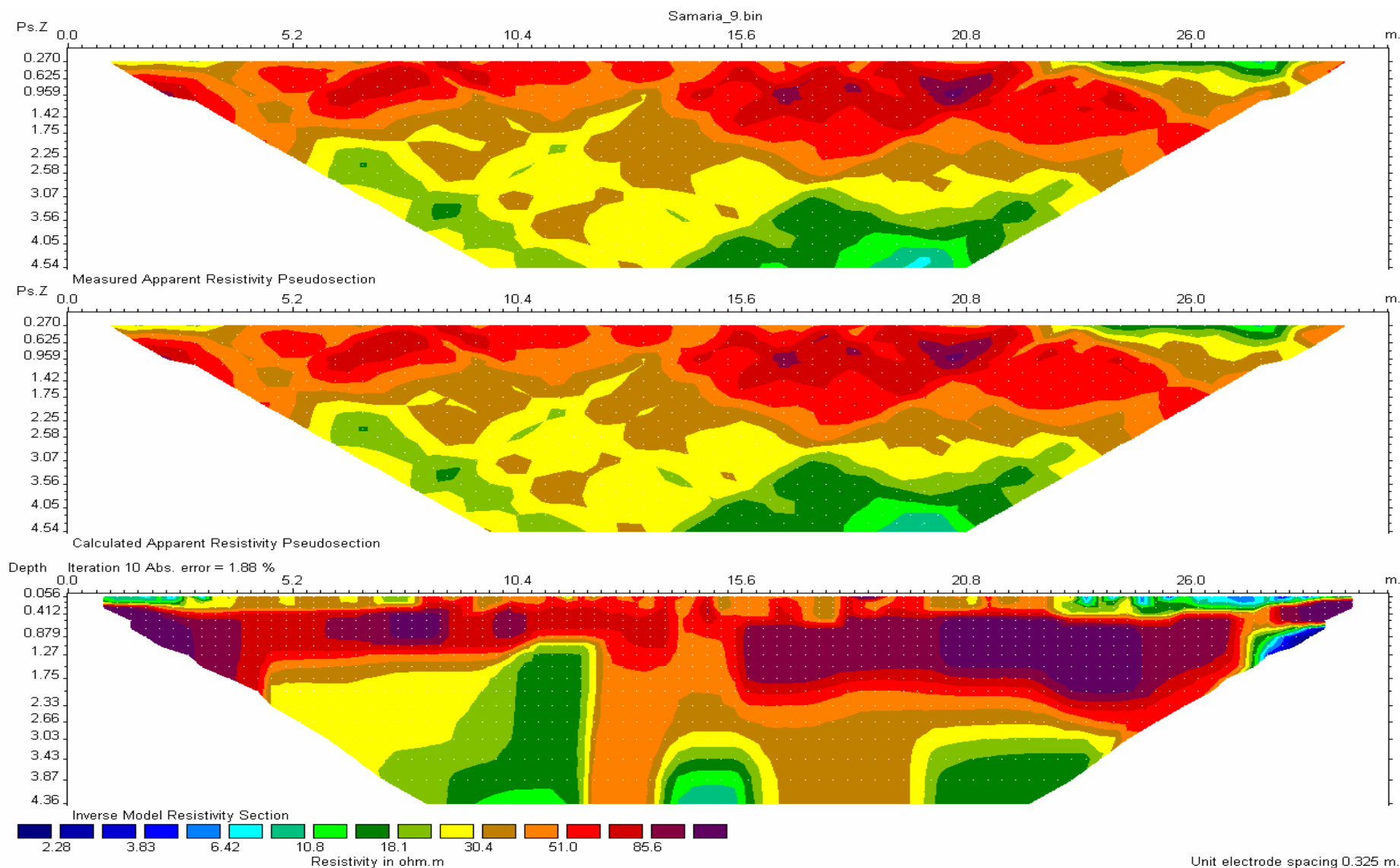
Σχήμα 13. Τομή 07

Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



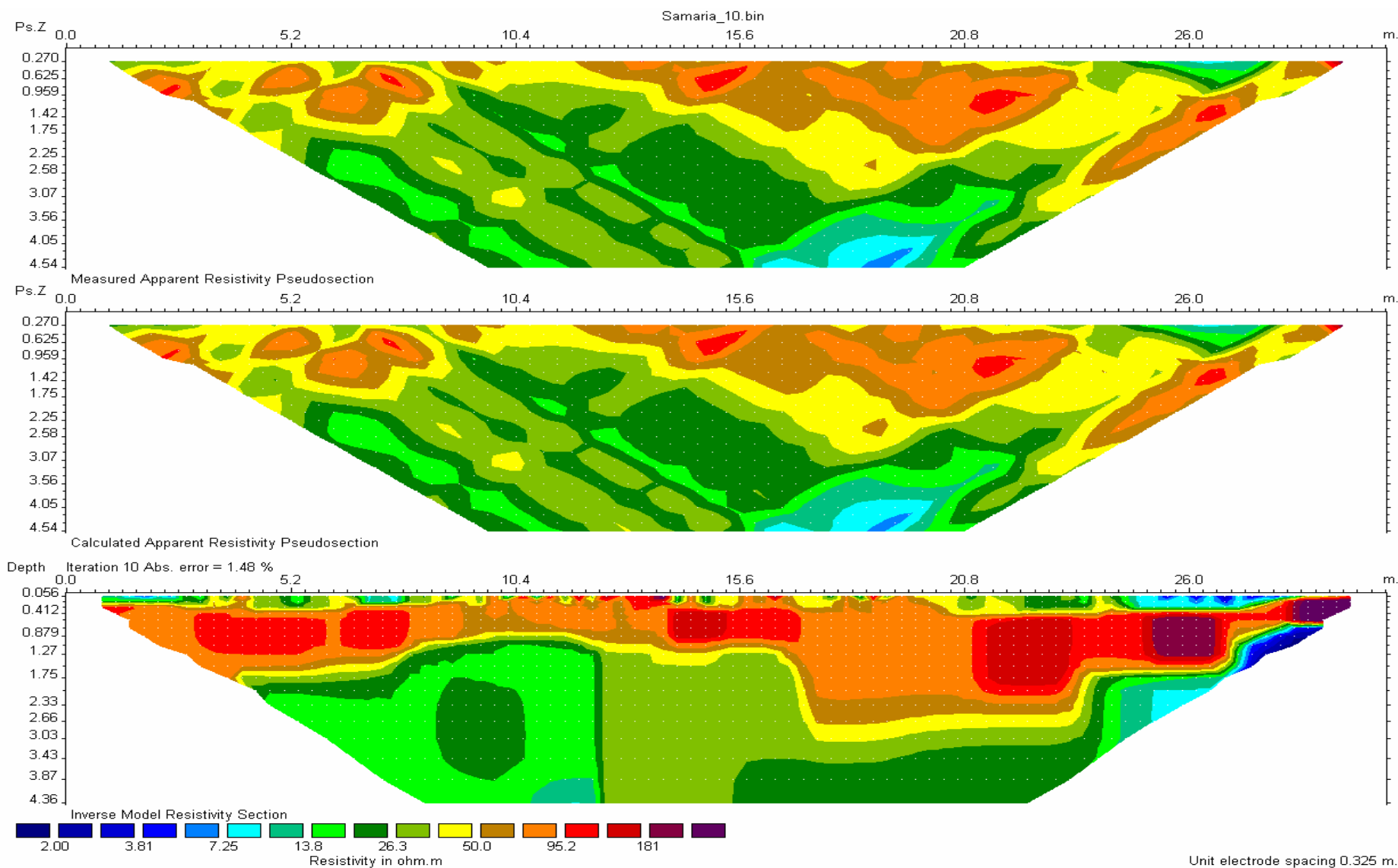
Σχήμα 14. Τομή 08

**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



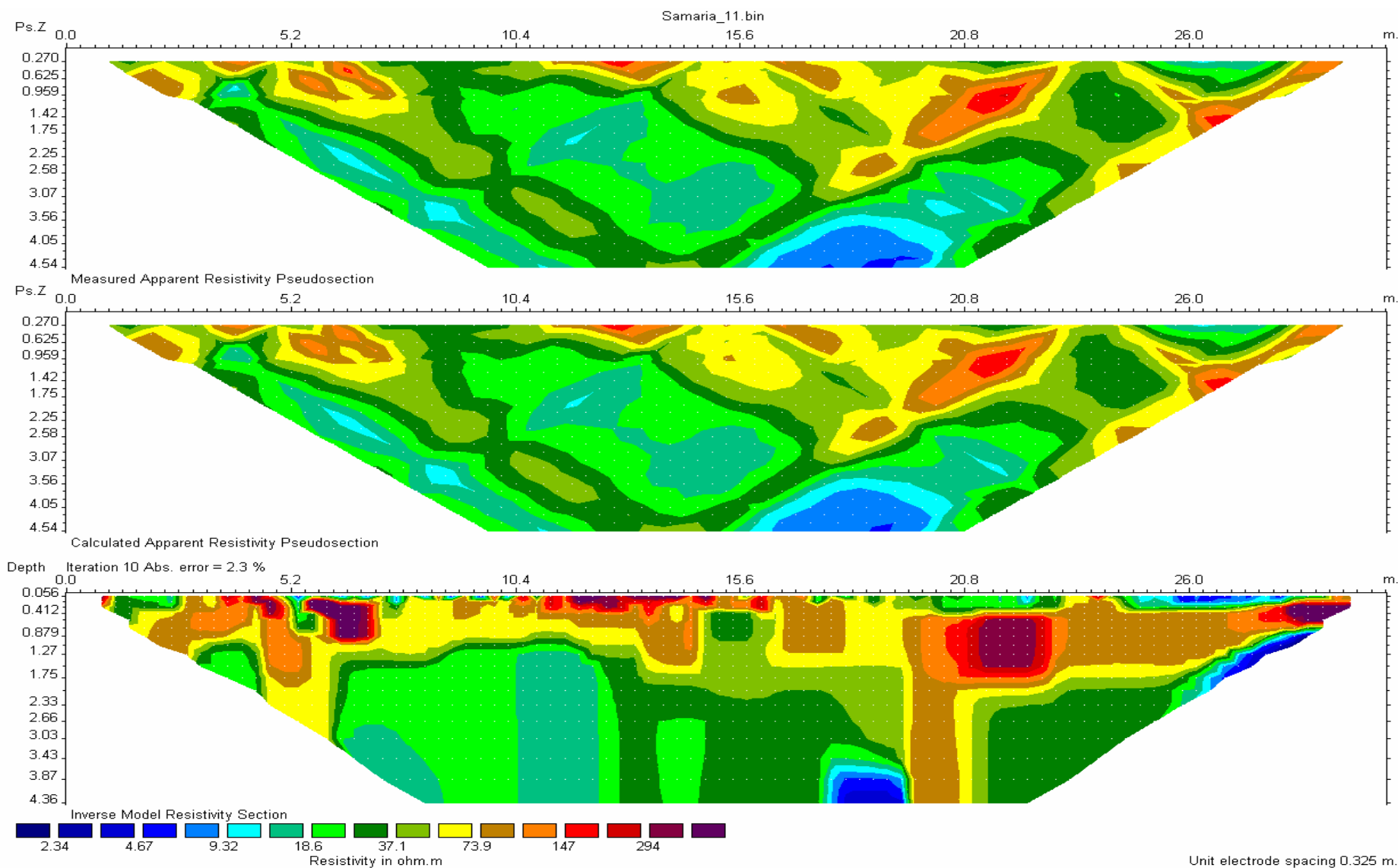
Σχήμα 15. Τομή 09

Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



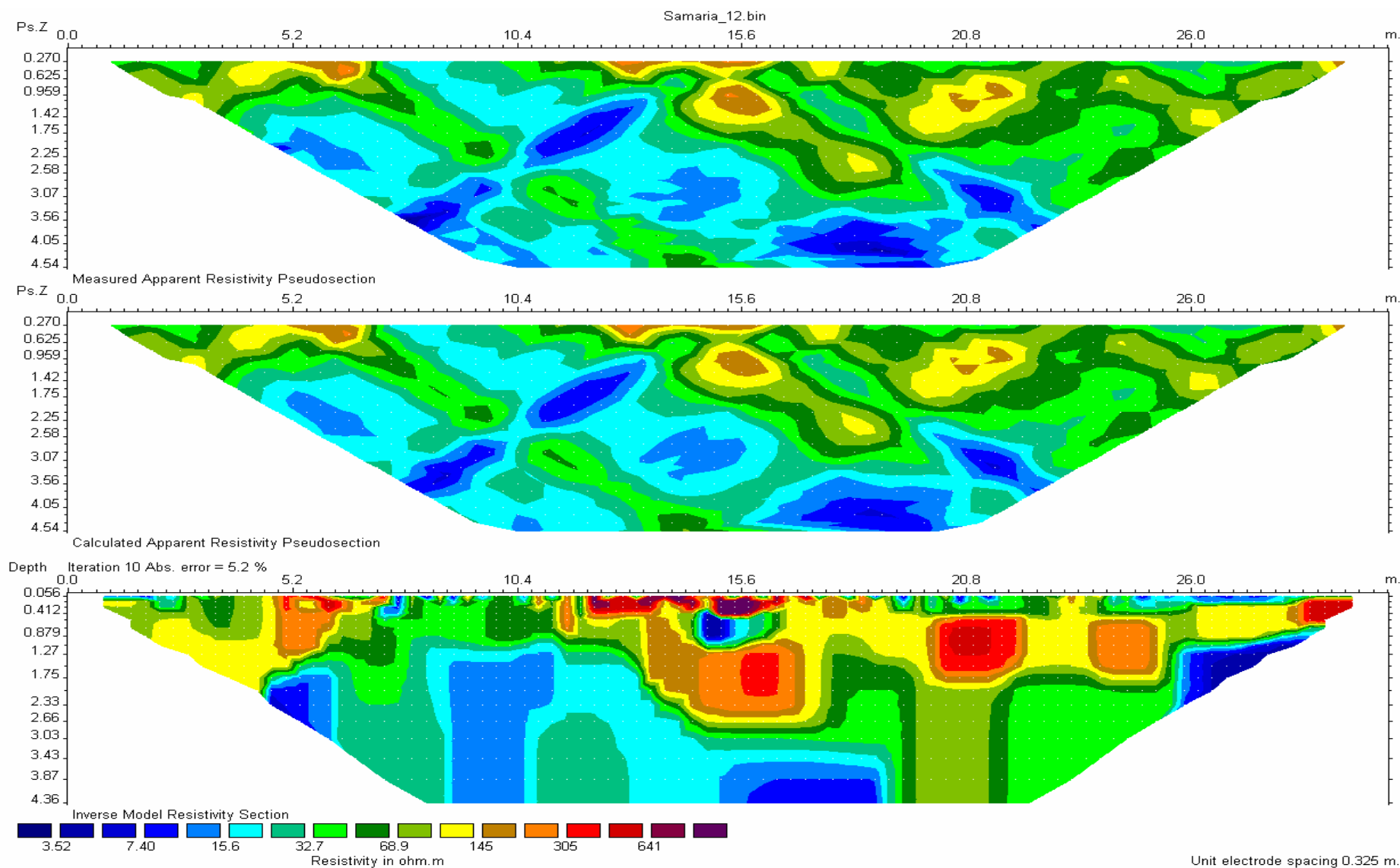
Σχήμα 16. Τομή 10

Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



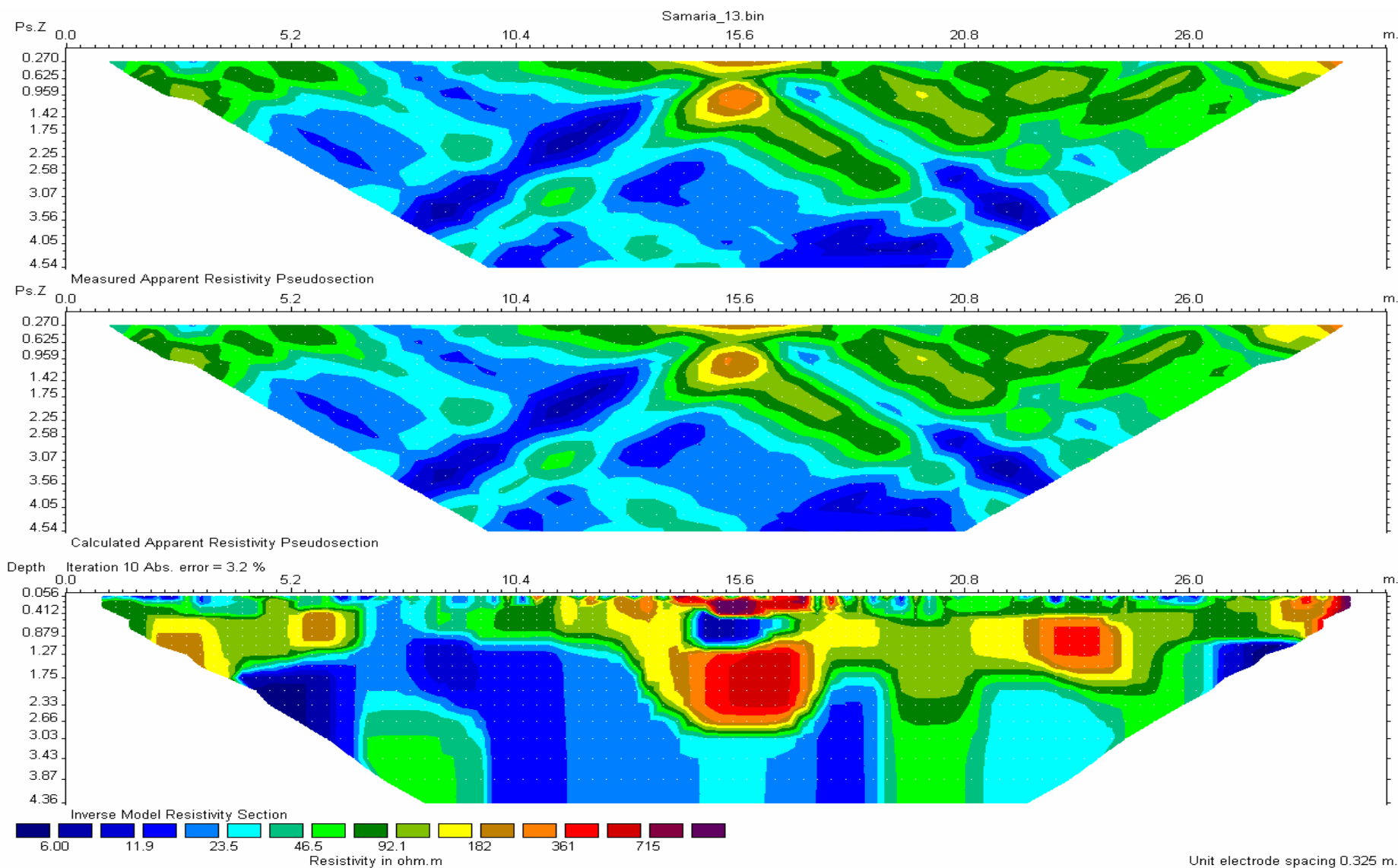
Σχήμα 17. Τομή 11

**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



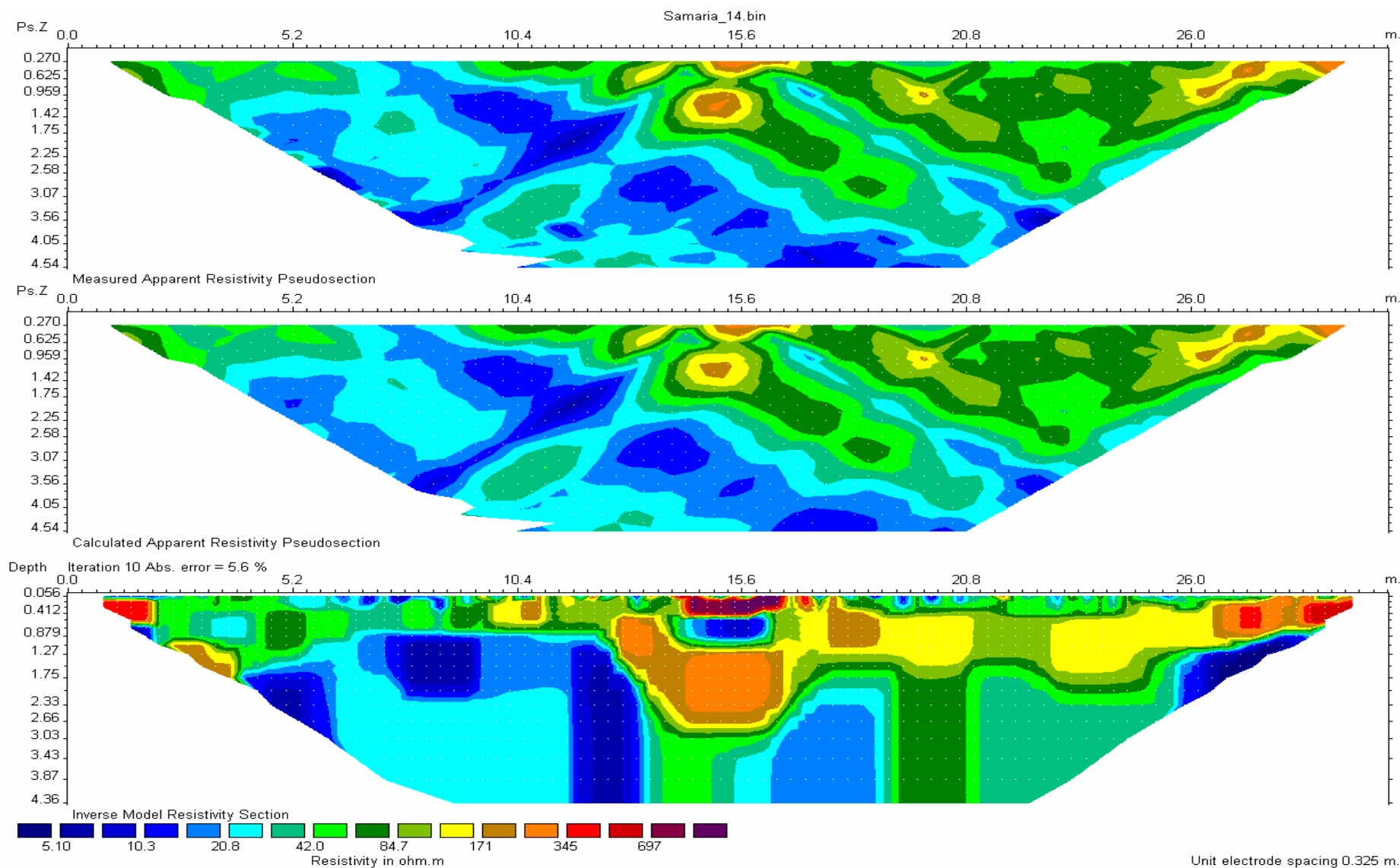
Σχήμα 18. Τομή 12

Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



Σχήμα 19. Τομή 13

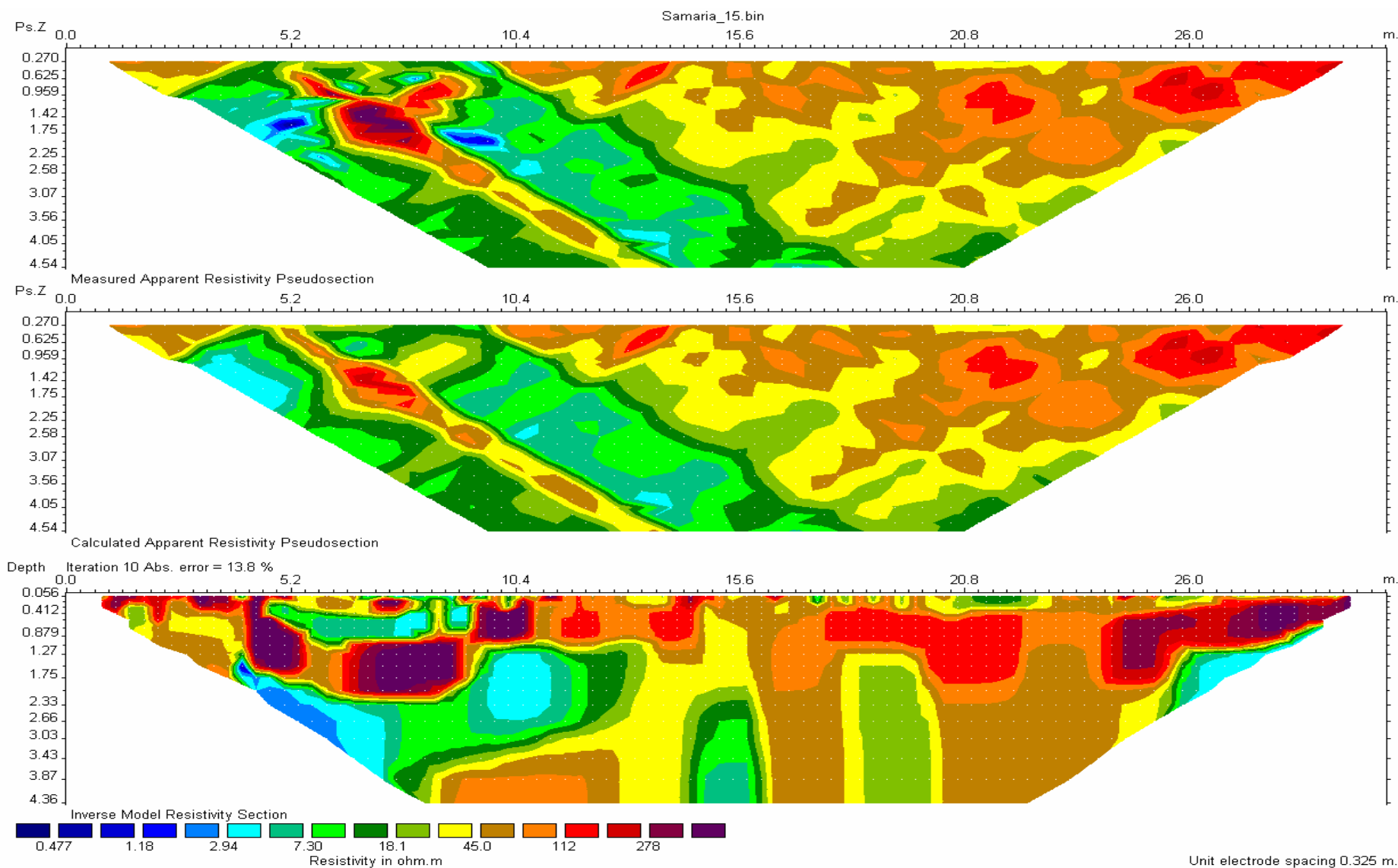
Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



Σχήμα 20. Τομή 14

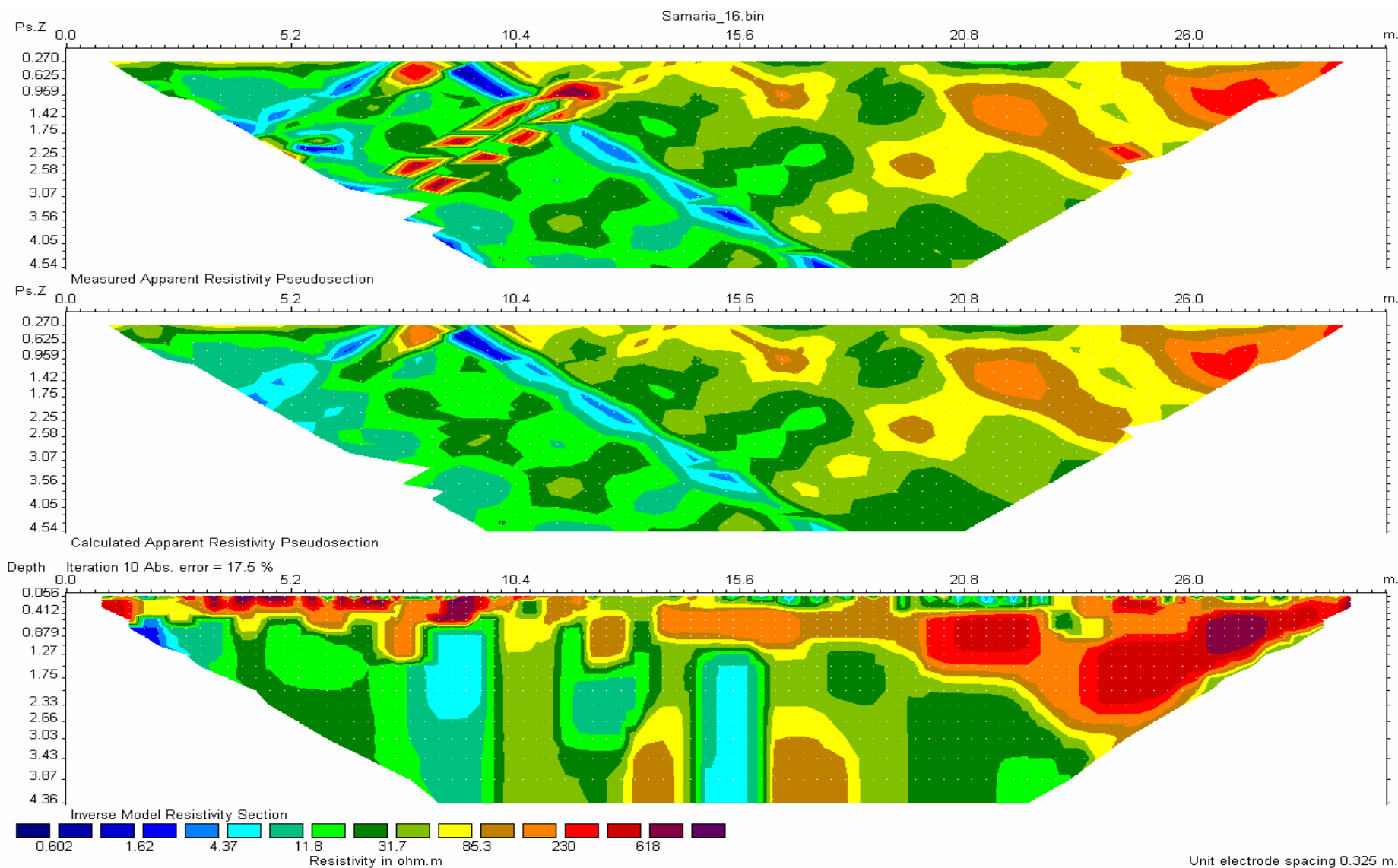


Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



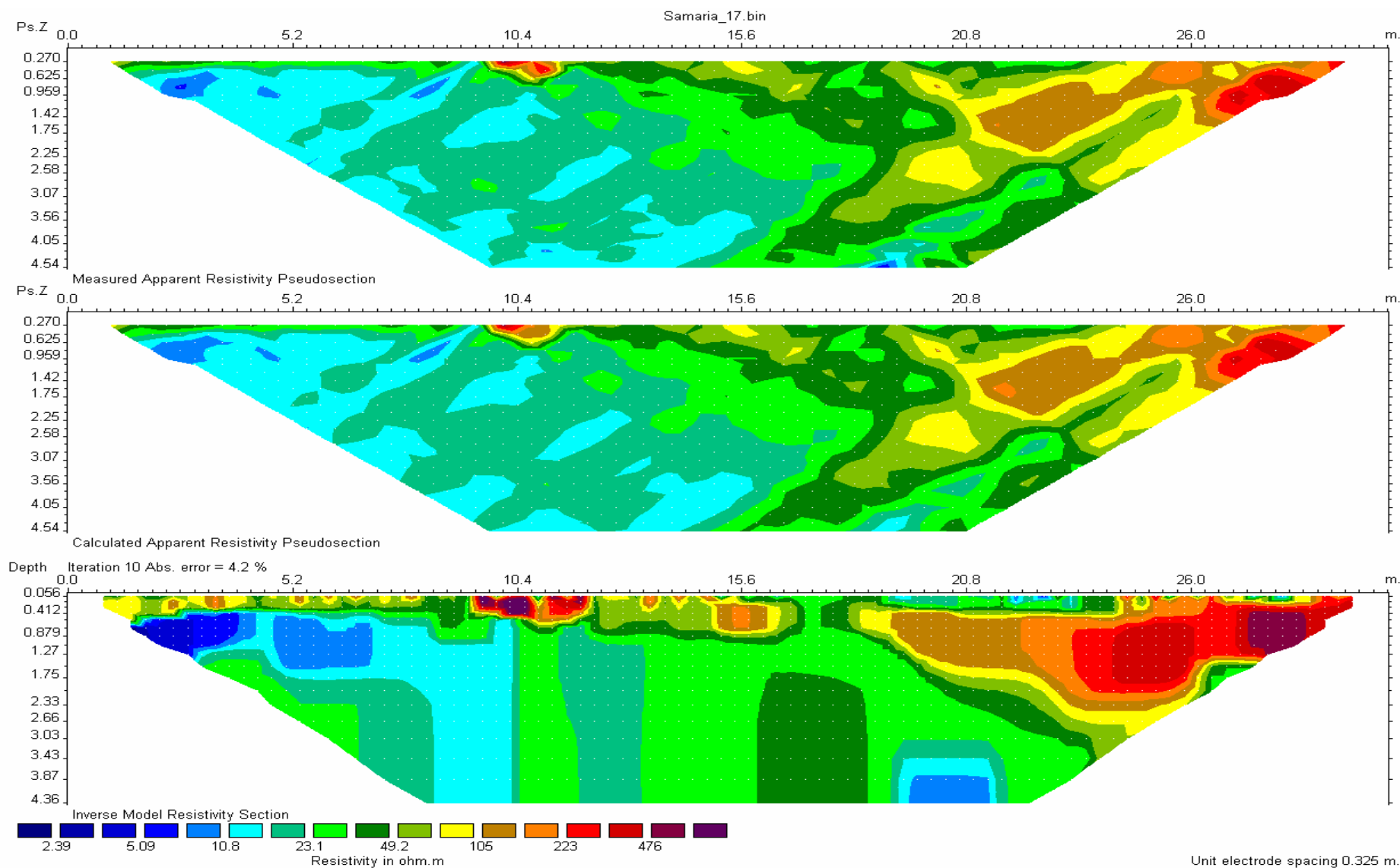
Σχήμα 21. Τομή 15

Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



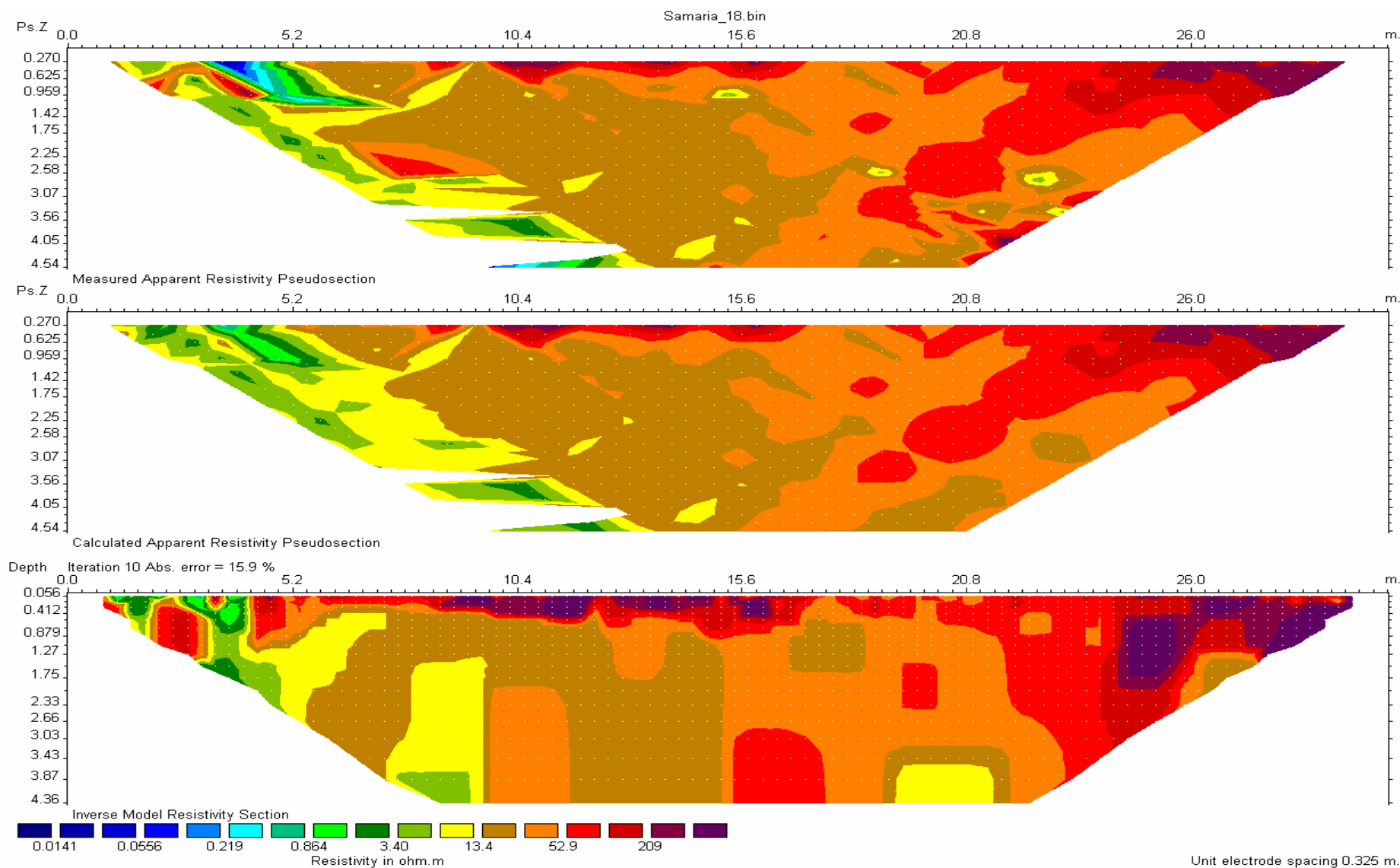
Σχήμα 22. Τομή 16

Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



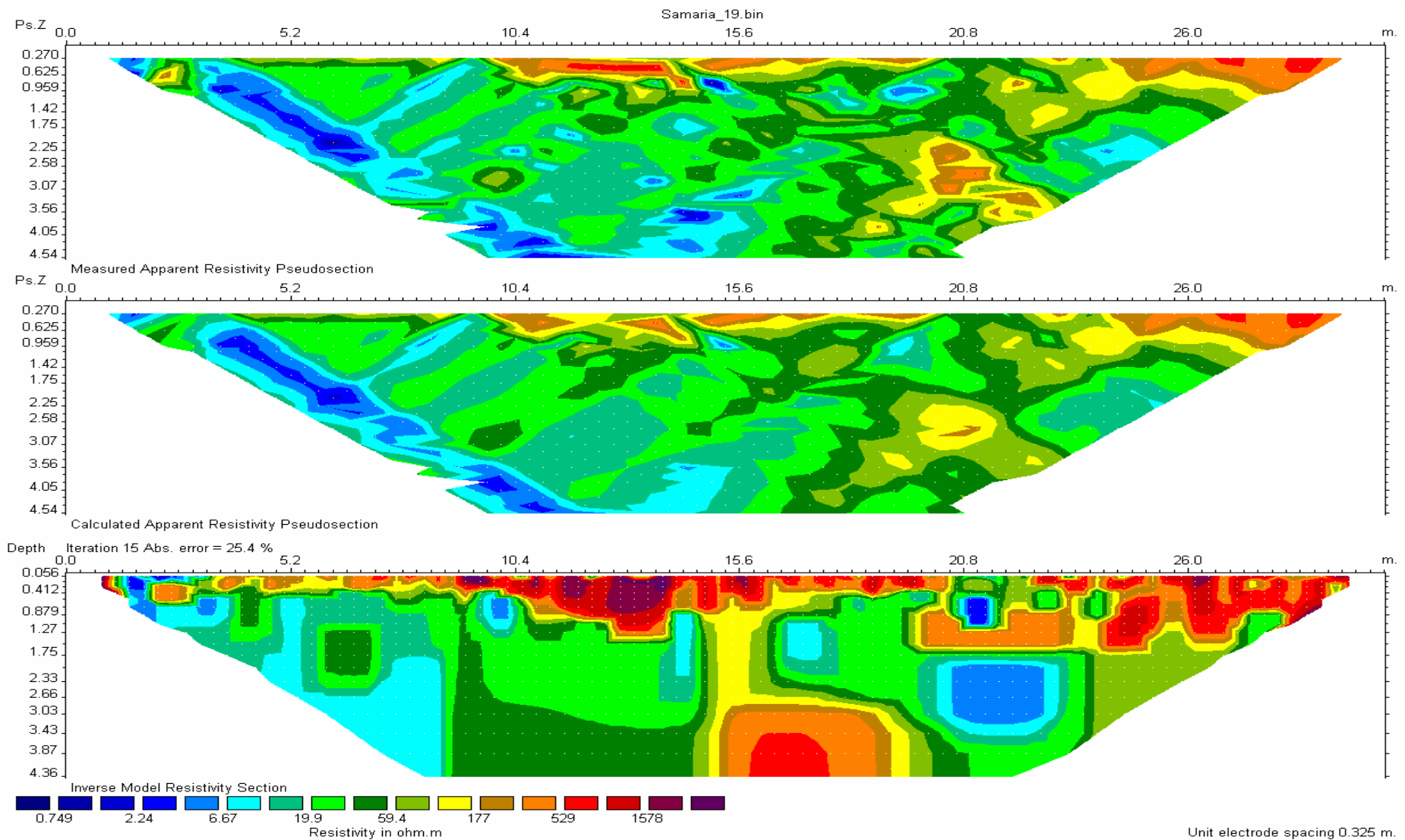
Σχήμα 23. Τομή 17

Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



Σχήμα 24. Τομή 18

**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



Σχήμα 25. Τομή 19

Παρατηρείται σε όλες τις τομές πως το επιφανειακό κάλυμμα των πρώτων 1.30 έως 1.80 μέτρων είναι εξαιρετικά συμπαγές, με τιμές ειδικής αντίστασης που υπερβαίνουν τα 300 Ohm.m. Οι τιμές αυτές οφείλονται στο ανώτερο στρώμα κάλυψης (στρώση FILL), που αποτελείται από χαλίκια και κροκάλες με μεγάλη συνοχή μεταξύ τους, και πιθανότατα φερτά υλικά τα οποία έχουν αποθεθεί στο χώρο σε διάφορες χρονικές στιγμές για την εξομάλυνση του εδάφους. Το στρώμα αυτό δείχνει να μειώνεται σε έκταση καθώς μετακινούμαστε από την τομή 01 προς την τομή 19, μέχρι της τομής 09 (άξονας y στο τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς), και από το τέλος των τομών προς την αρχή (άξονας x στο τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς).

Στο στρώμα αυτό δεν αναμένεται η ύπαρξη δομών στα πρώτα 20 μέτρα κατά τη διεύθυνση των τομών (άξονας x στο τρισδιάστατο σύστημα αναφοράς). Στα τελευταία 10 μέτρα διαφαίνονται κάποιες σχηματισμένες δομές που πιθανόν να είναι παλαιότερες θεμελιώσεις κτιρίων που βρίσκονταν στο χώρο κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του εργοστασίου ελαιουργίας που προϋπήρχε στην περιοχή τη δεκαετία του 1960.

Μετά την τομή 09 δείχνει να επανεμφανίζεται στις τομές 18 και 19, με μικρότερο όμως πάχος. Σε αυτές τις δύο τομές οι μεγάλες αντιστάσεις που εμφανίζονται ερμηνεύτηκαν ως μεγάλα κομμάτια φερτών υλικών τα οποία έχουν πολύ χαμηλή συνεκτικότητα, με αποτέλεσμα να υπάρχει κενό αέρος μεταξύ των συμπαγών αυτών φερτών υλικών.

Στο υποκείμενο στρώμα που κυμαίνεται από τα 1.80 μέτρα μέχρι του μέγιστου βάθους διασκόπησης, το υπέδαφος αποτελείται από υλικά με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται από 10 Ohm.m μέχρι 100 Ohm.m περίπου. Τα υλικά αυτά με βάση προηγούμενη γεωτεχνική μελέτη αποτελούνται από άργιλο έως αμμώδη άργιλο μέσης συνεκτικότητας, με ενστρώσεις αμμώδους μαλακής ιλύος καθώς και ιλυώδους άμμου με παρουσία ψαμμιτομαργαϊκών συγκριμάτων και κατά θέσεις οργανικές προσμίξεις.

Ένα σημείο ιδιαίτερου ενδιαφέροντος παρουσιάζεται στις τομές 13,14 και 15. Σε βάθος από 0.5 μέχρι 1.5 μέτρα και από το 4ο μέχρι το 10ο μέτρο των τομών, παρουσιάζεται ένας συμπαγής όγκος με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 180-300 Ohm.m. Ο όγκος αυτός, λόγω του βάθους που βρίσκεται και του μεγέθους του, πιθανολογείται πως είναι προϊόν προηγούμενης θεμελίωσης δεξαμενής κατά τις περασμένες δεκαετίες.

Ένα δεύτερο σημείο ενδιαφέροντος παρουσιάζεται στις τομές 12,13 και 14. Στο μέσο των τομών αυτών, και σε βάθος που δεν ξεπερνάει τα 2.5 μέτρα, εμφανίζεται ένας ακόμα συμπαγής όγκος, με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 150-400 Ohm.m. Σύμφωνα με ενδείξεις που μας παρουσίασε ένας εκ των ιδιοκτητών της περιοχής στο σημείο αυτό του χώρου έρευνας κατά το παρελθόν υπήρχε δεξαμενή ύδατος διαμέτρου 5 περίπου μέτρων, κατασκευασμένη από τσιμέντο. Ο όγκος που φαίνεται στις τομές αυτές δεν αποκλείεται να είναι στο κάτω μέρος του η θεμελίωση της δεξαμενής, και στο πάνω μέρος του κατακρημνίσεις των τοιχωμάτων της οι οποίες παρέμειναν στο χώρο κατά την κατεδάφιση της.

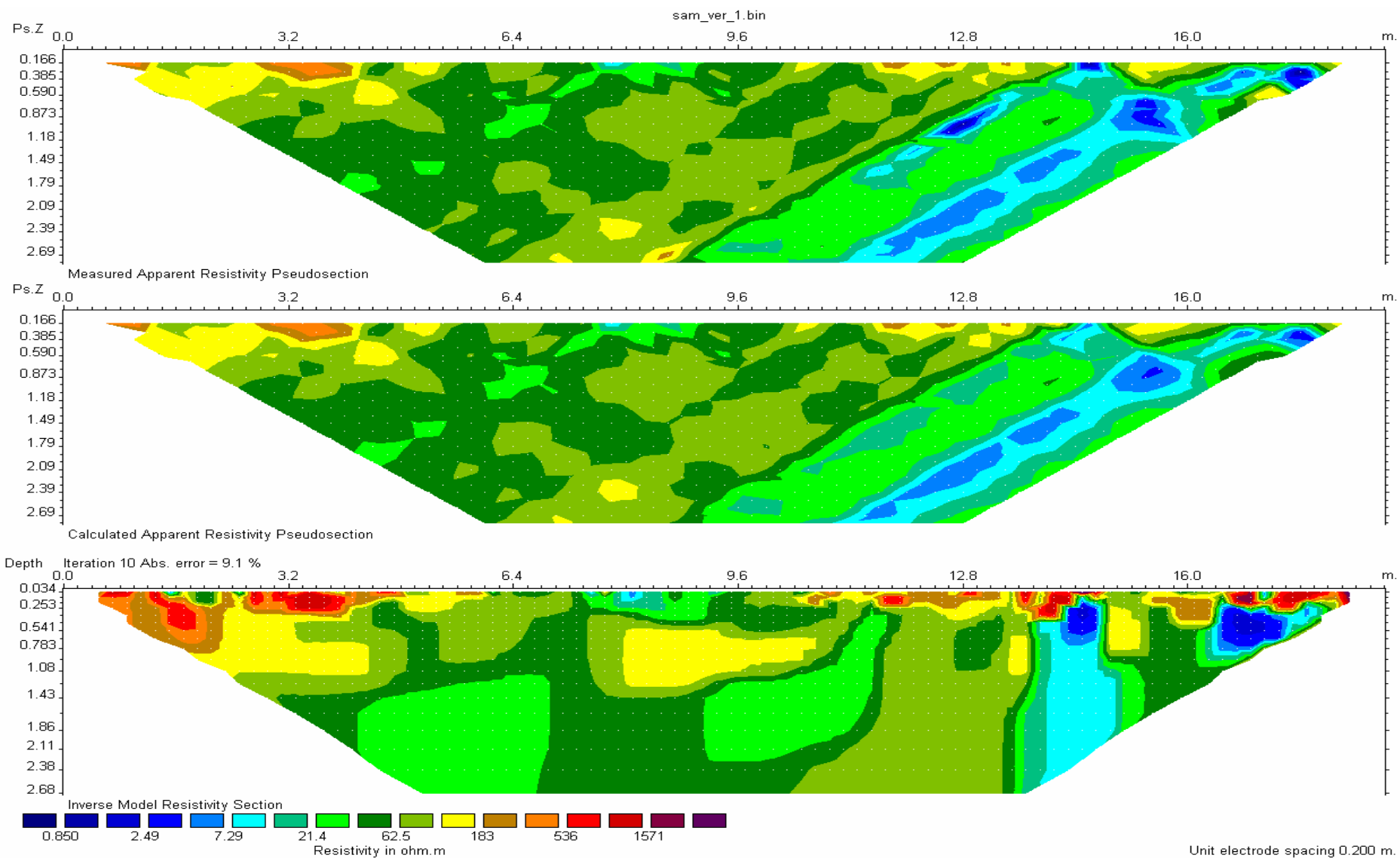
**5.3.2. Τομές ν 01-ν 05:**

Κάθετα στη διεύθυνση των πρώτων 19 τομογραφιών διεξήχθησαν 5 τομές με αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων 0.4 μέτρα, με σκοπό να ερευνηθεί καλύτερα η πρώτη περιοχή ενδιαφέροντος που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο (φωτογραφία 5). Οι τομές έχουν μεταξύ τους απόσταση 2 μέτρα. Το μέγιστο βάθος διασκόπησης ξεπέρασε τα 2.5 μέτρα. Για τη διεξαγωγή τους απαιτήθηκε να διανοιχτούν οπές για την εισαγωγή των ηλεκτροδίων και έξω από τον χώρο που οριοθετείται από την τειχοποιία του χώρου



στάθμευσης. Οι τομές παρουσιάζονται στα σχήματα 26 έως 30 με τον ίδιο τρόπο όπως και οι προηγούμενες. Σημειώνεται η σχετικότητα της χρωματικής κλίμακας.

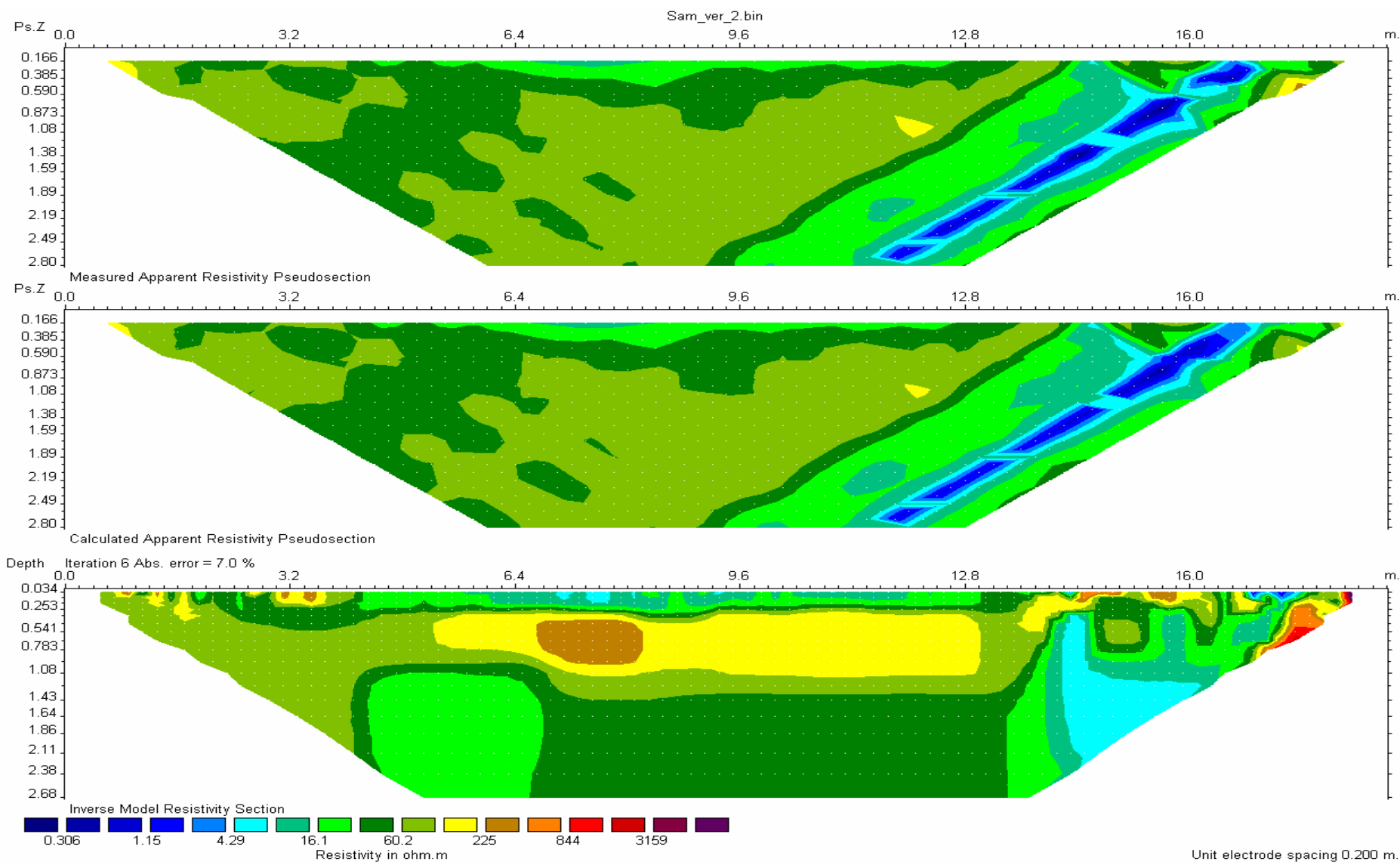
**Φωτογραφία 5. Παράδειγμα τομής ν .**



Σχήμα 26. Τομή v\_01

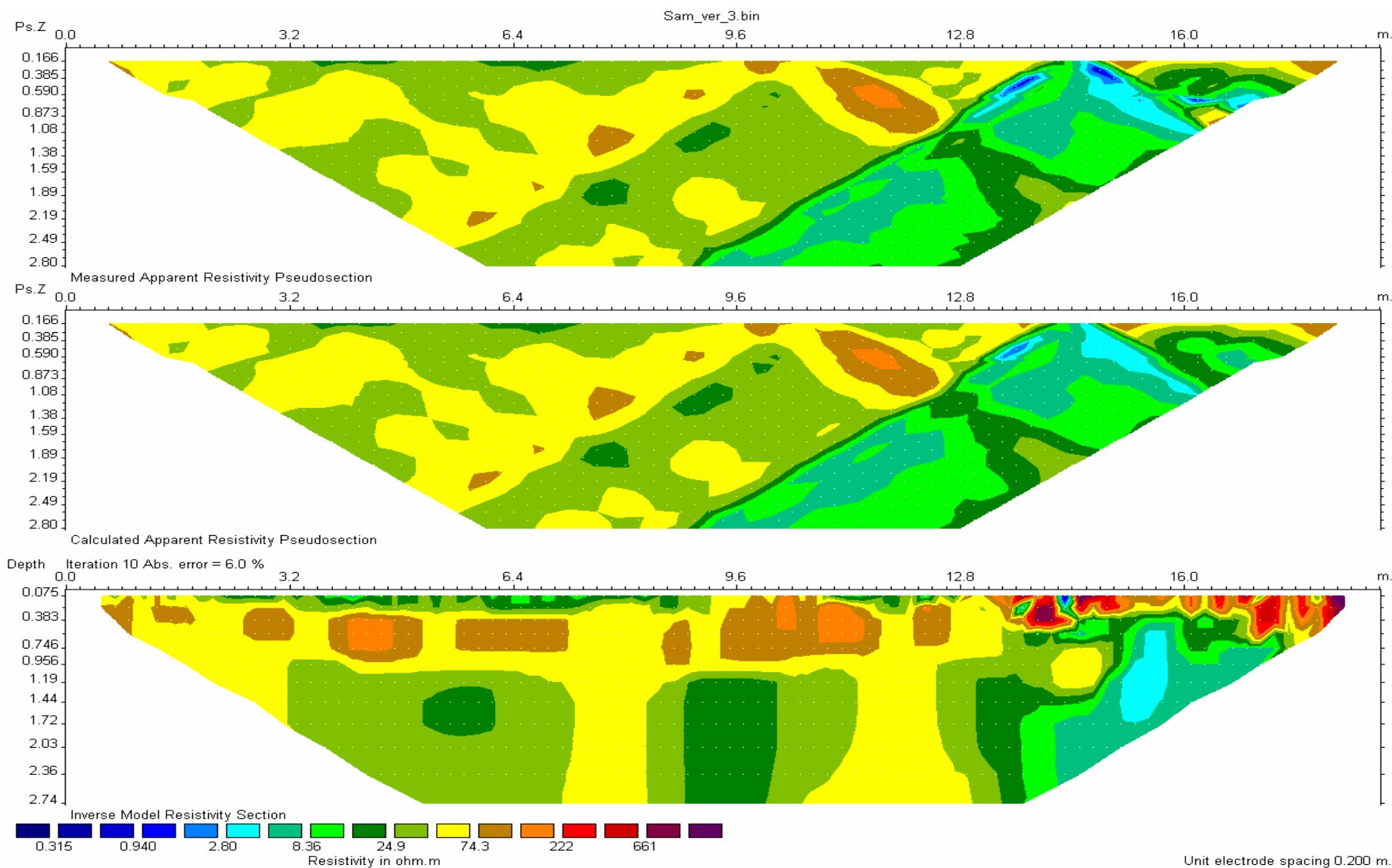


**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



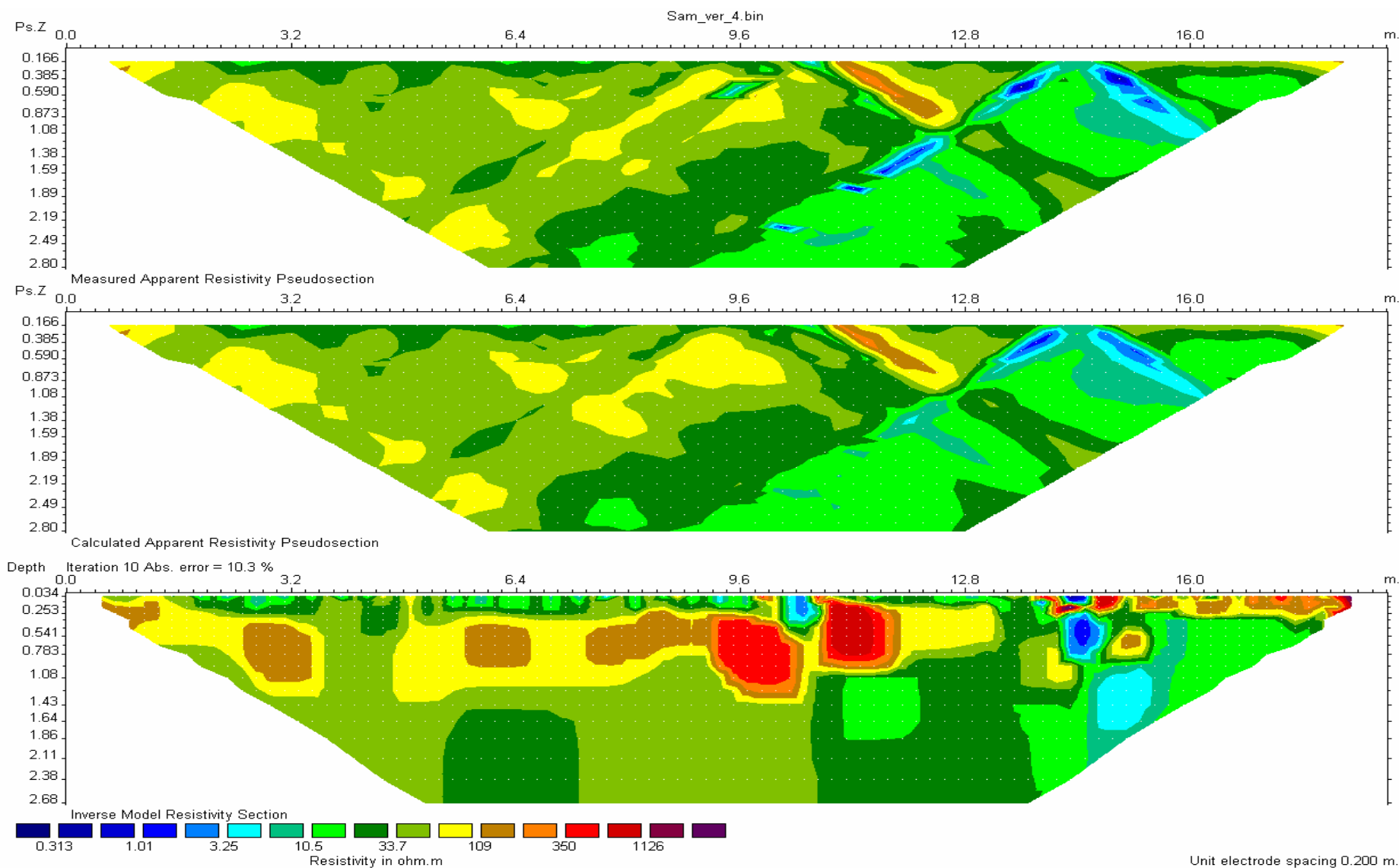
Σχήμα 27. Τομή v\_02

Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ



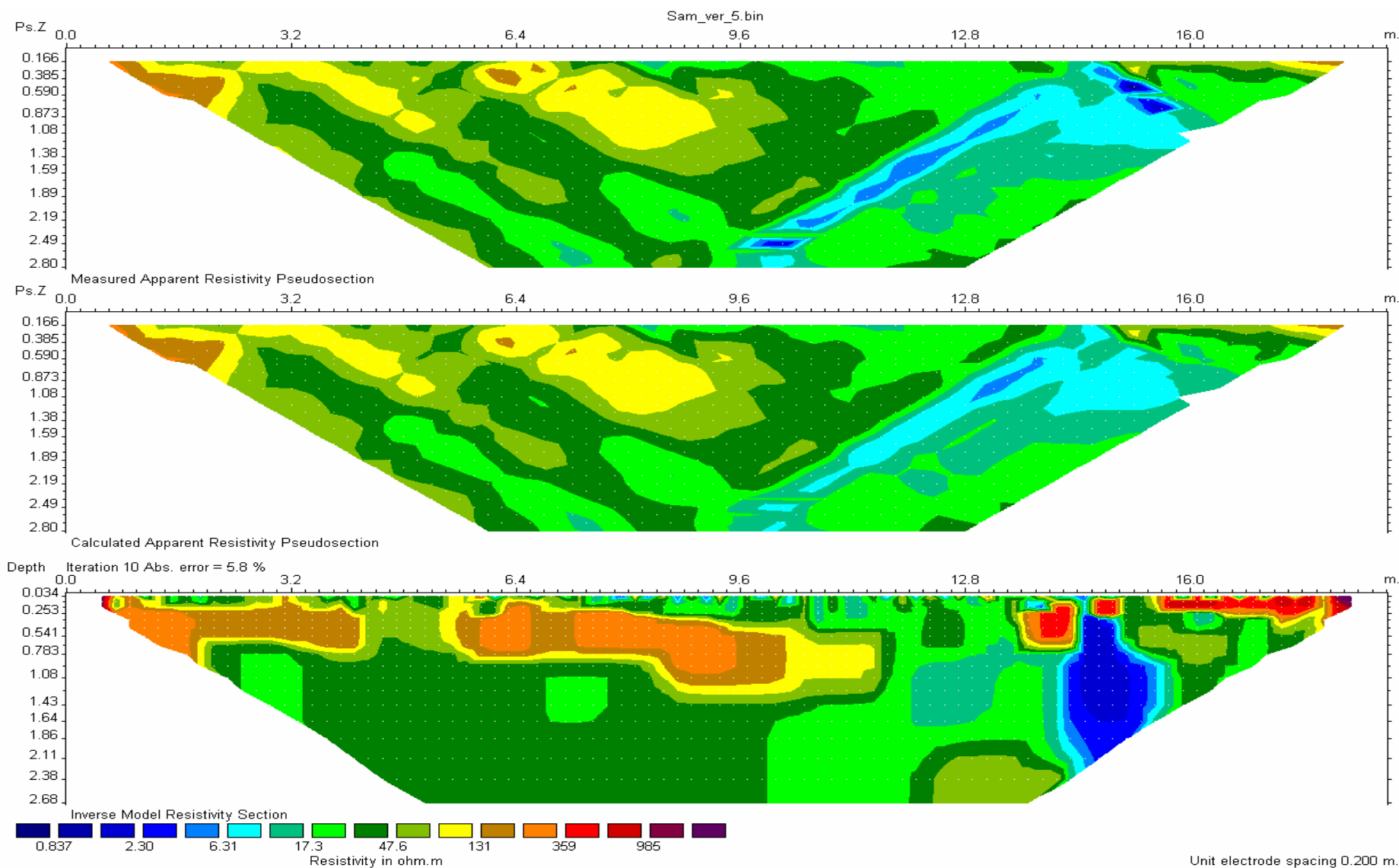
Σχήμα 28. Τομή ν\_03

**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



Σχήμα 29. Τομή v\_04

**Γεωφυσική μελέτη στο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων του ξενοδοχείου ΣΑΜΑΡΙΑ**



Σχήμα 30. Τομή v\_05

Στις τομές αυτές, και ειδικότερα στις τομές v\_02 έως v\_04 φαίνεται ο όγκος που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Οριοθετήθηκε έτσι καλύτερα η πλήρης έκταση του, η οποία συνδυάζοντας όλες τις τομές φαίνεται να είναι 2.0x3.0x1.5 μέτρα. Στο τέλος των τομών, κάτω από την τσιμεντένια στρώση και παραπλεύρως του ξενοδοχείου, φαίνονται σχηματισμοί πολύ χαμηλών αντιστάσεων. Όπως ενημερωθήκαμε εκ των υστέρων, κάτω ακριβώς από την τσιμεντένια στρώση υπάρχει αγωγός ύδατος.

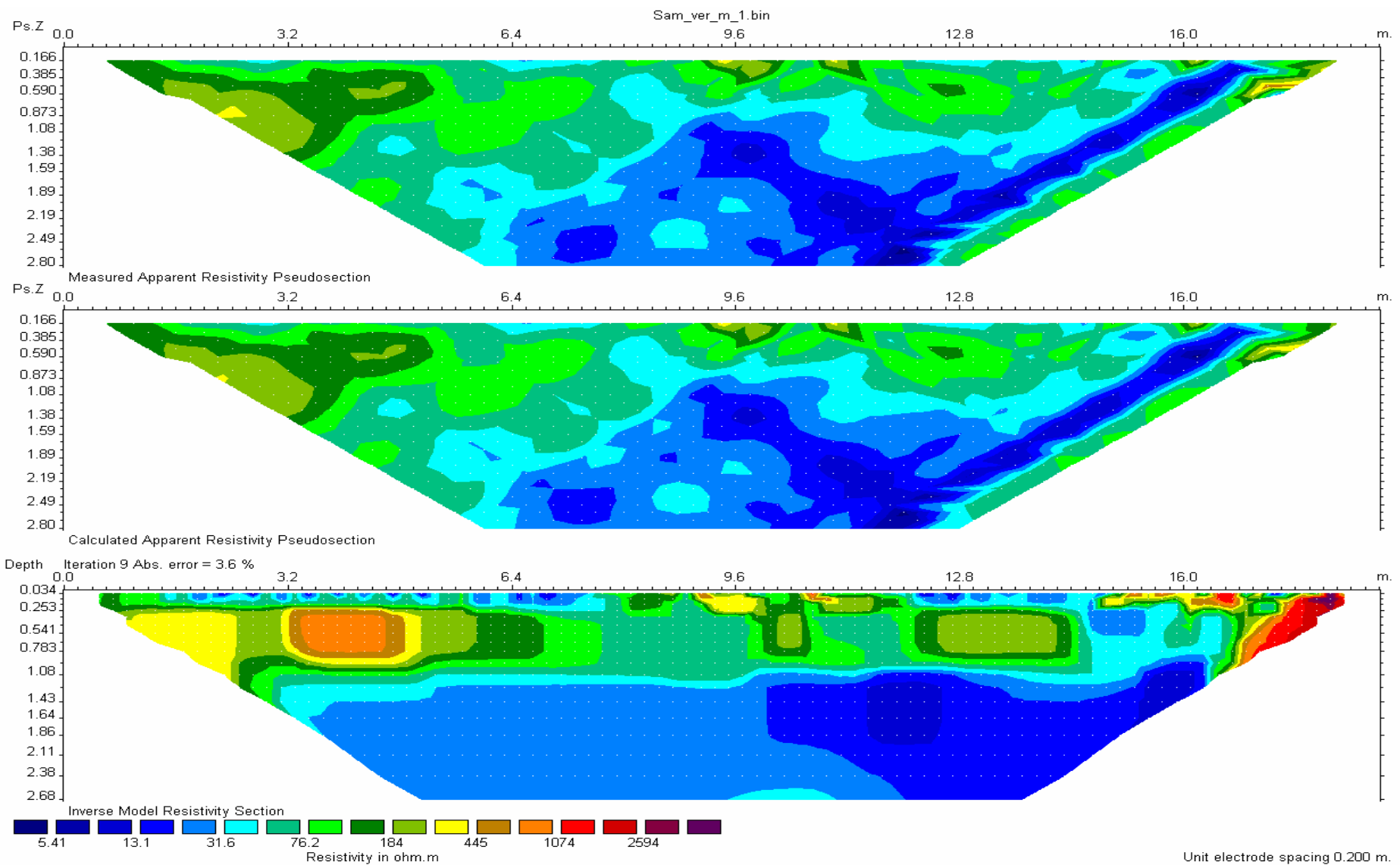
Η ύπαρξη της αγωγίμης ζώνης δεν αποκλείει τη διαρροή ύδατος από τον αγωγό, ή την παρουσία υγρασίας από ύδατα βροχοπτώσεων που έχουν εγκλωβιστεί μεταξύ του υπερκείμενου τσιμέντου και των υποκείμενων συμπαγών σχηματισμών.

**5.3.3 Τομές m 01-m 03:**

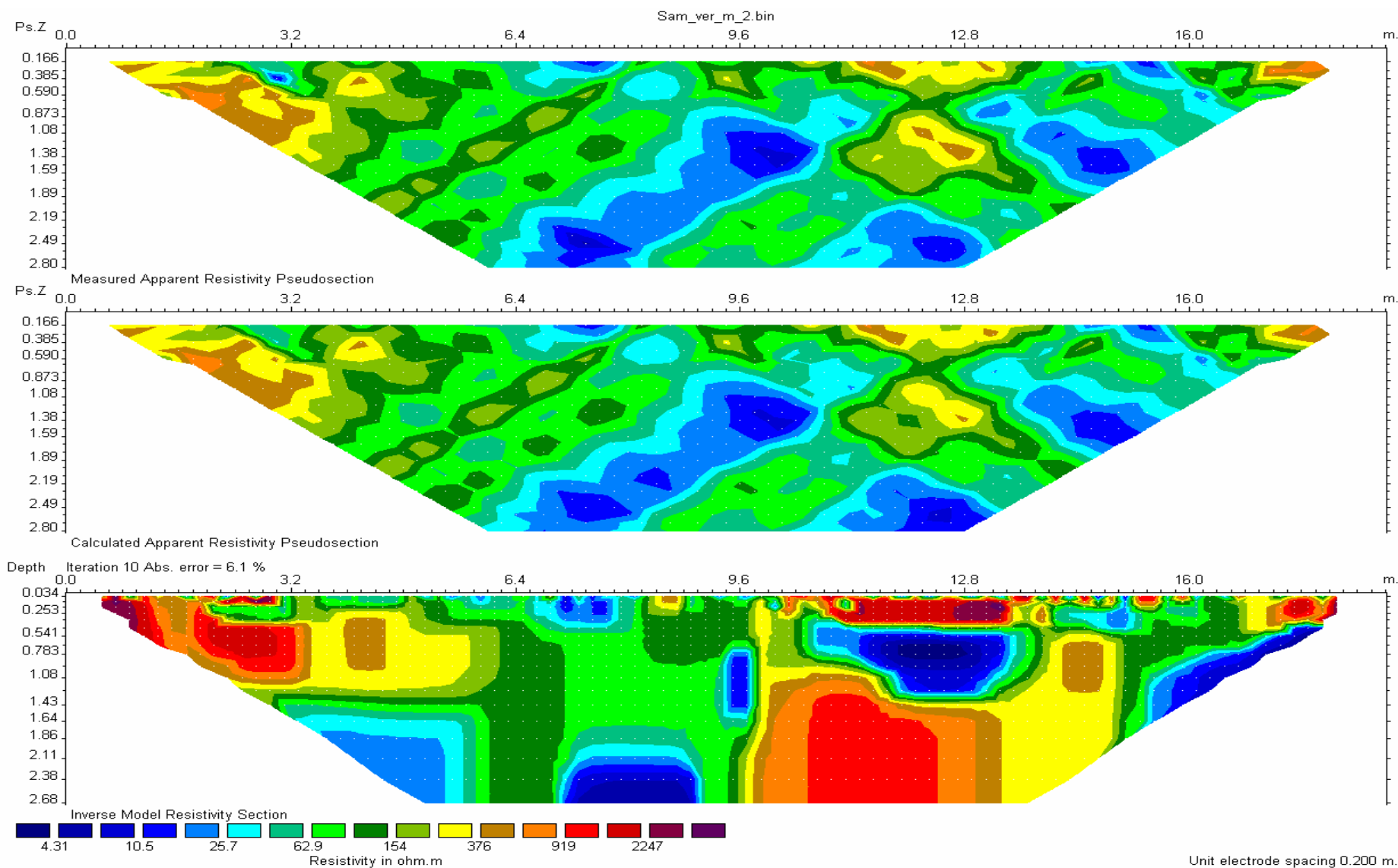
Οι τομές αυτές διεξήχθησαν με απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων 0.4 μέτρα, και μεταξύ τους απόσταση 2.70 μέτρα (φωτογραφία 6). Το βάθος διασκόπησης ξεπέρασε τα 2.5 μέτρα. Σκοπός των τομών αυτών ήταν να χαρτογραφηθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια η δεύτερη περιοχή ενδιαφέροντος που προέκυψε από τις προηγούμενες τομογραφίες. Σημειώνεται η σχετικότητα της χρωματικής κλίμακας.



**Φωτογραφία 6. Παράδειγμα τομής m .**

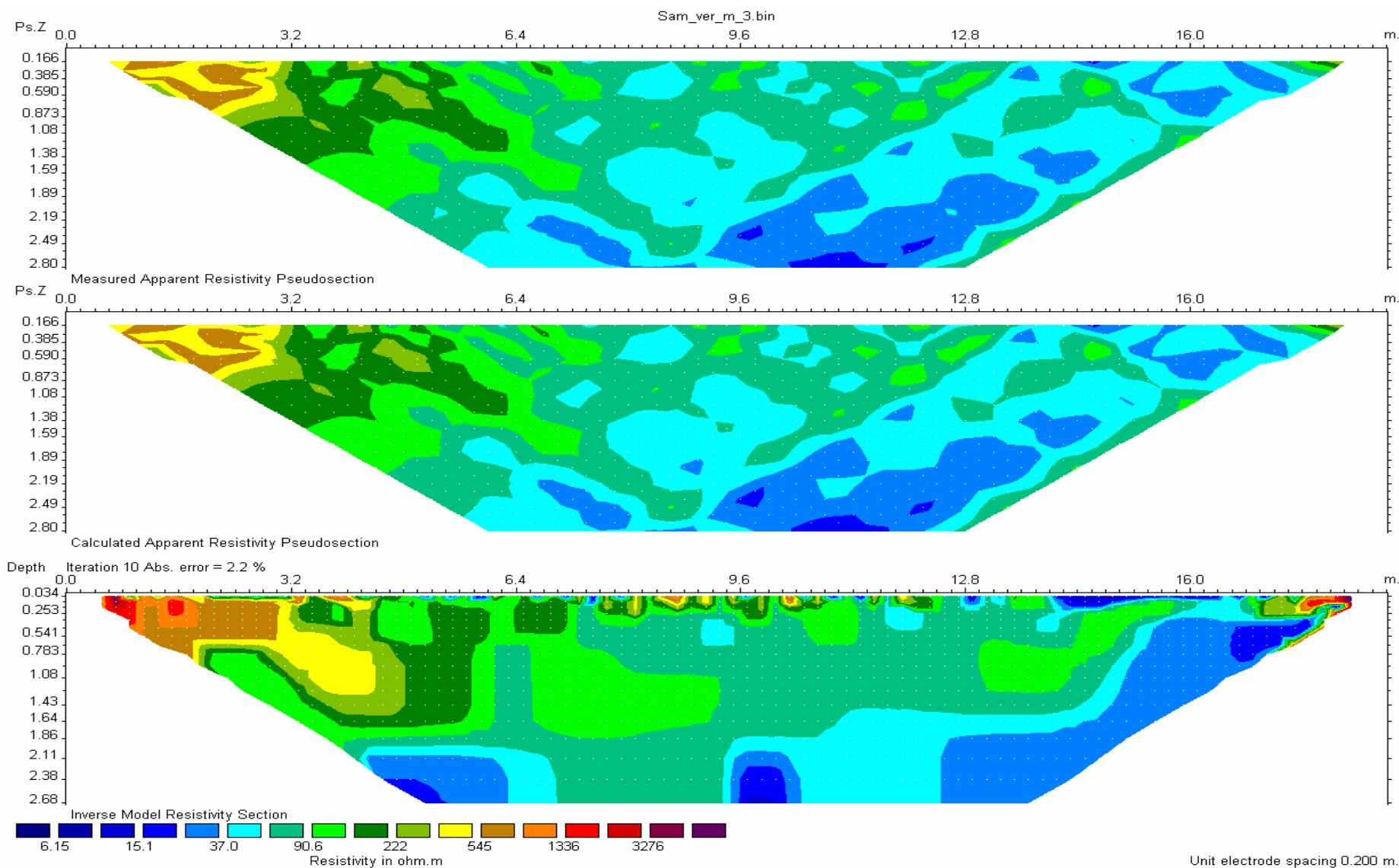


Σχήμα 31. Τομή m\_01



Σχήμα 32. Τομή m\_02





Σχήμα 33. Τομή m\_03

Στις τομές αυτές φαίνεται ο συμπαγής όγκος που ερμηνεύτηκε ως κομμάτι της θεμελίωσης της δεξαμενής ύδατος που προϋπήρχε. Συνδυάζοντας όλες τις τομές μαζί, προκύπτει πως ο όγκος του σχηματισμού είναι 3.0x2.0x3.0 μέτρα. Ο κύριος όγκος βρίσκεται σε βάθος 1.5 μέτρα και φαίνεται να φτάνει μέχρι τα 4 μέτρα. Υπερκείμενο του κυρίως όγκου φαίνεται να υπάρχει ένα στρώμα υγρασίας που δημιουργείται από τα ύδατα των βροχοπτώσεων.

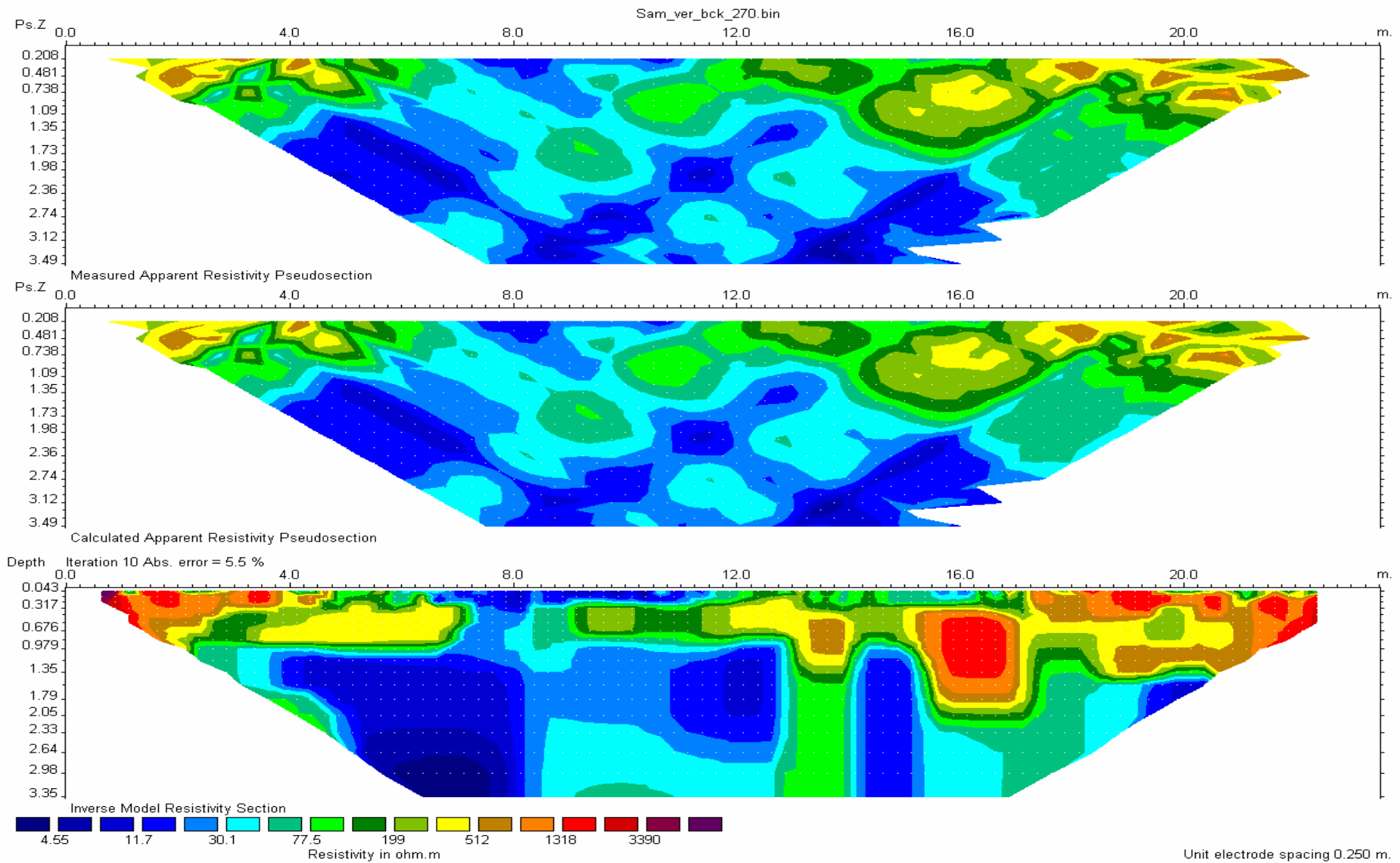
Επιφανειακά, φαίνεται ένας σχηματισμός από διάσπαρτα συμπαγή υλικά, που μπορεί να είναι μέρη από τα τοιχώματα της δεξαμενής τα οποία έπεσαν κατά την κατεδάφιση τους στο εσωτερικό της.

#### **5.3.4. Τομή $\nu$ $bck$**

Η τομή αυτή πραγματοποιήθηκε για να αποκτήσουμε καλύτερη εικόνα του χώρου έρευνας στη δυτική πλευρά του (φωτογραφία 7). Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι 0.50 μέτρα, και το βάθος διασκόπησης ξεπέρασε τα 3 μέτρα.



**Φωτογραφία 7. Η τομή  $\nu$   $bck$ .**



Σχήμα 34. Τομή v\_bck

Στο 16<sup>ο</sup> μέτρο της τομής φαίνεται ένας σχηματισμένος συμπαγής όγκος με τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης πάνω από 1000 Ohm.m, σε βάθος από 0.5 μέτρα μέχρι περίπου τα 2 μέτρα. Ο όγκος αυτός ερμηνεύεται ως κομμάτι παλαιάς θεμελίωσης, που φαίνεται να συνεχίζεται σε μικρότερο βάθος έως το τέλος της τομής.

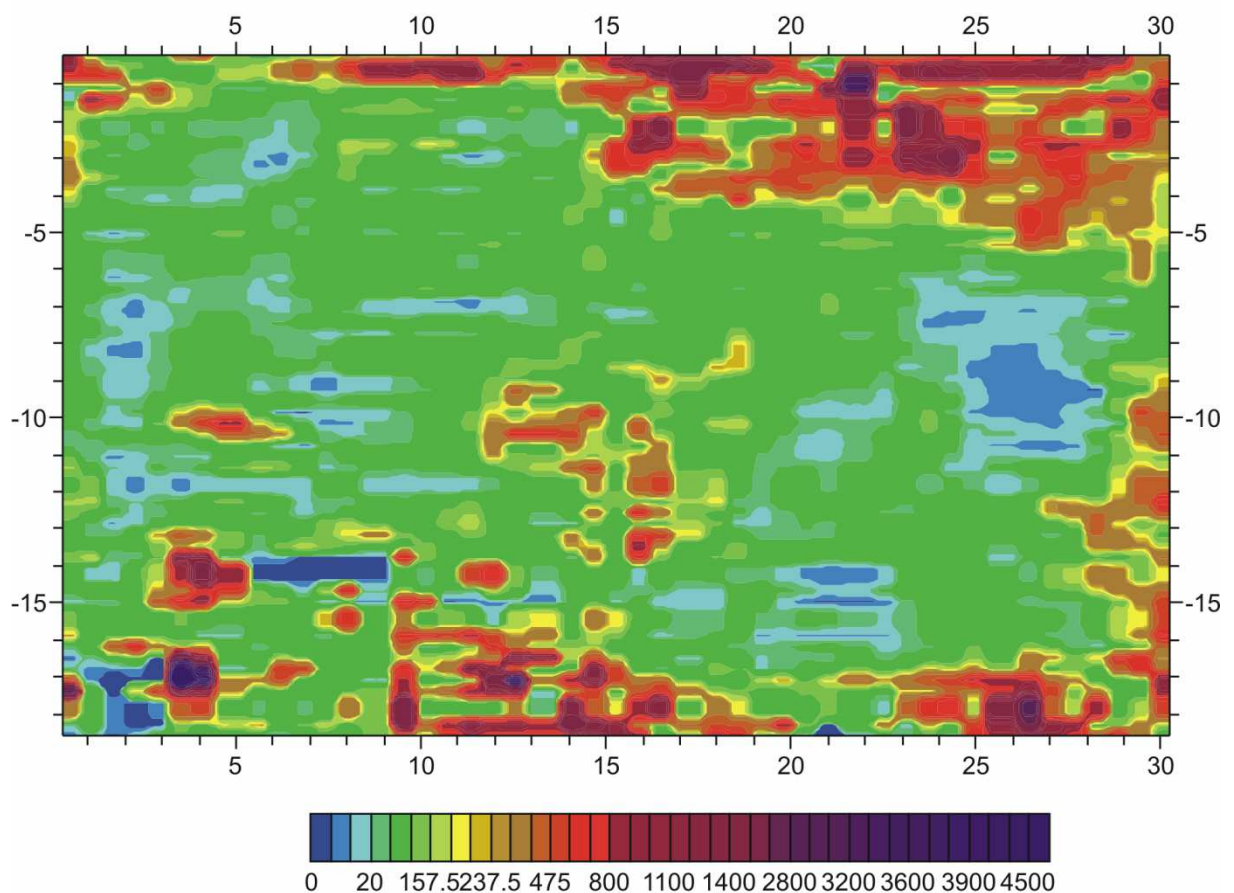
**ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΟ ΙΔΙΟ ΒΑΘΟΣ**

Για την καλύτερη απεικόνιση των αποτελεσμάτων δημιουργήθηκαν ισοβαθής τομές του χώρου έρευνας. Οι τομές παρουσιάζονται στα σχήματα 35 έως 41.

**Βάθος 0.045 μέτρα**

Φαίνεται το επιφανειακό στρώμα που αποτελείται από χαλίκια και κροκάλες, με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται από 800 μέχρι 4500 Ohm.m. Στο νότιο τμήμα του χώρου διακρίνονται οι γραμμικοί σχηματισμοί υψηλών αντιστάσεων που ερμηνεύτηκαν ως υπολείμματα παλαιότερων θεμελιώσεων.

**Βάθος 0.045 μέτρα**



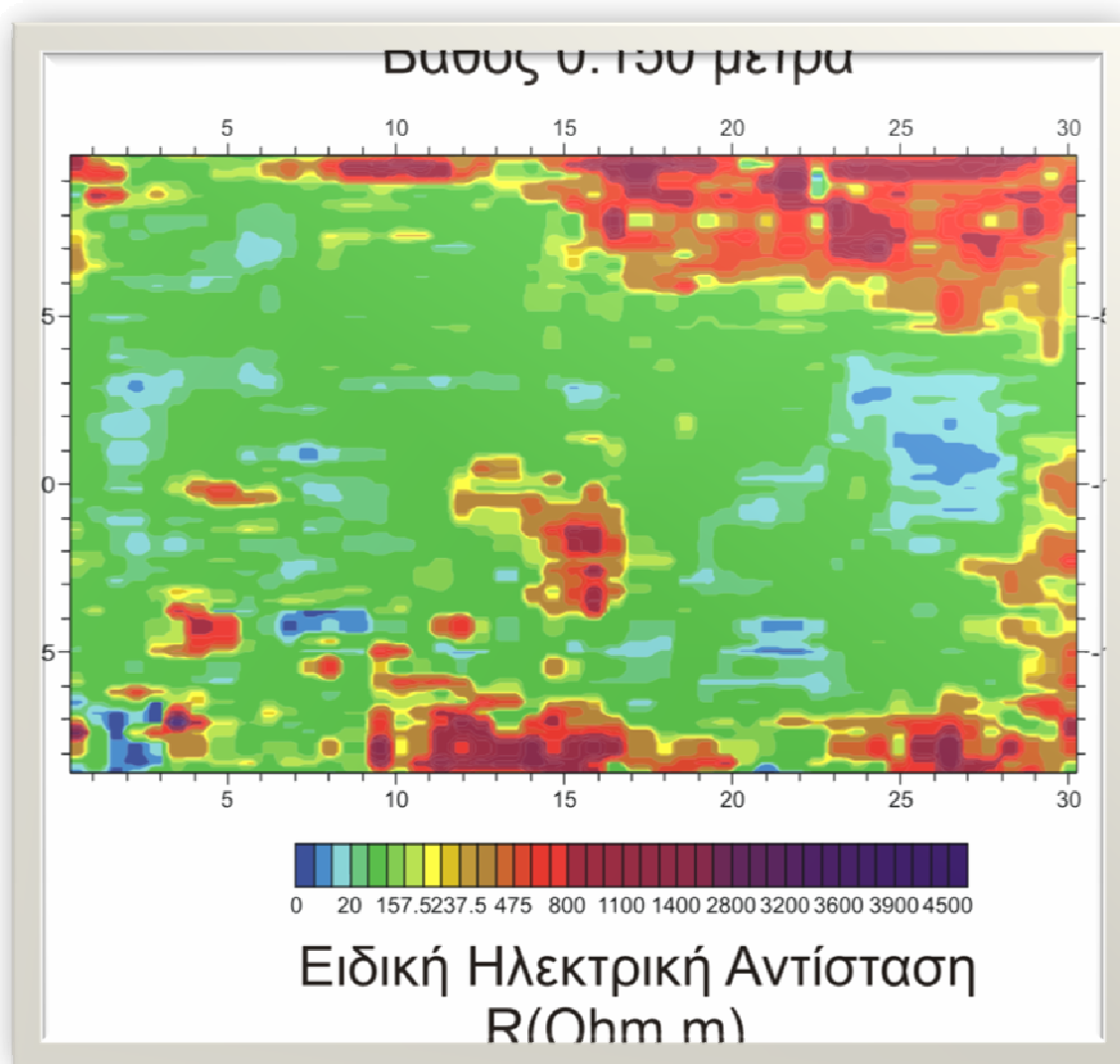
**Ειδική Ηλεκτρική Αντίσταση  
R(Ohm.m)**

**Σχήμα 35.Αποτελέσματα αντιστροφής σε βάθος 0.045 μέτρα.**

### **Βάθος 0.150 μέτρα**

Αρχίζει να εμφανίζεται η πρώτη περιοχή ενδιαφέροντος με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται από 800 μέχρι 2800 Ohm.m. Παράλληλα φαίνεται το πάνω μέρος της δεύτερης περιοχής ενδιαφέροντος στο μέσο περίπου της περιοχής έρευνας. Στον χώρο που ορίζεται μεταξύ των πρώτων 5 μέτρων κατά τον y άξονα και μεταξύ του δέκατου και τριακοστού μέτρου κατά τον x άξονα εμφανίζονται γραμμικοί όγκοι με υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, οι οποίοι παραμένουν μέχρι το 1 μέτρο περίπου.

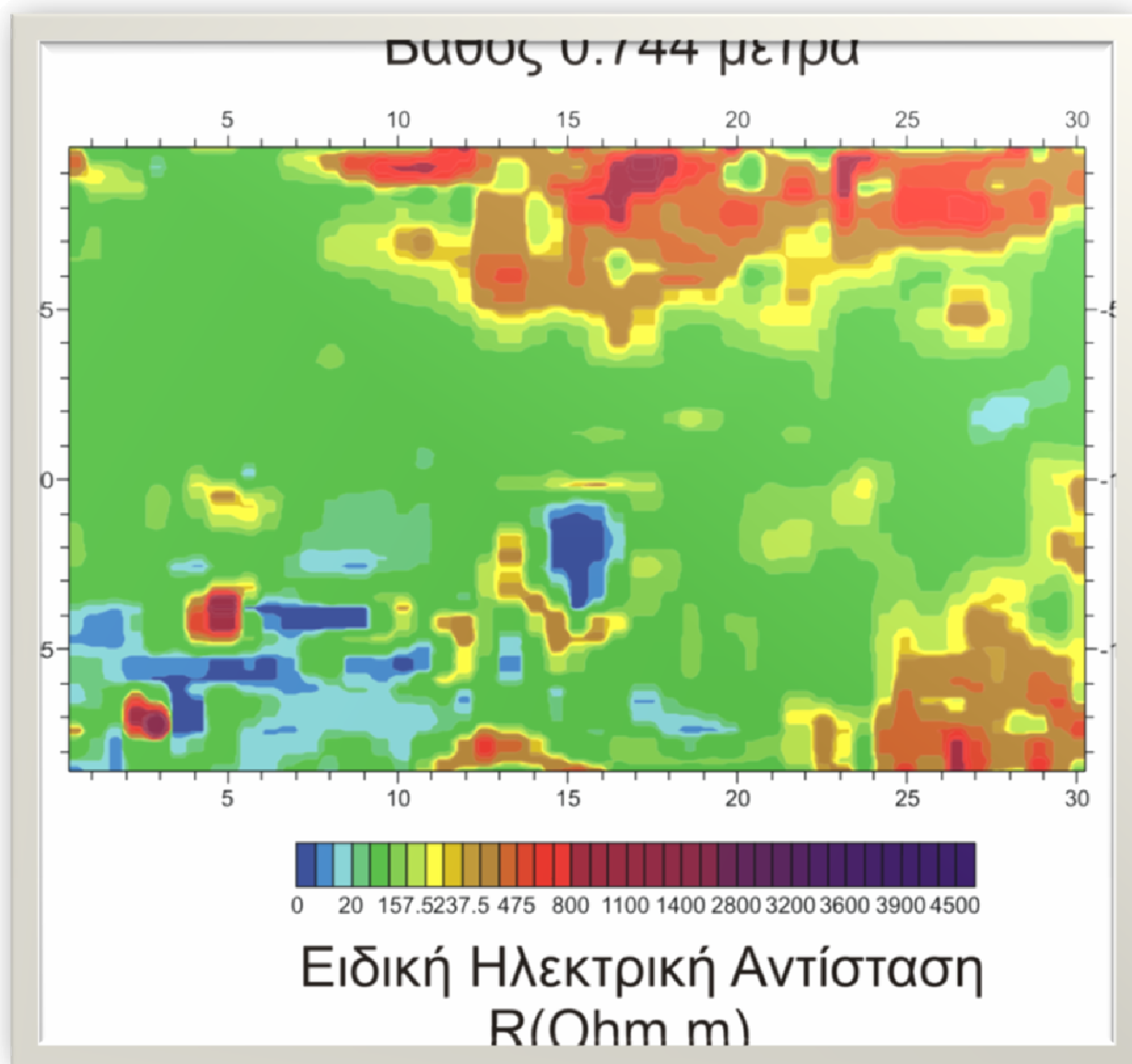
Από το βάθος που εμφανίζονται και στη θέση που βρίσκονται, εξάγουμε το συμπέρασμα πως πρόκειται για θεμελιώσεις ή τοιχώματα από δομές που προϋπήρχαν κατά τα προηγούμενα χρόνια στο χώρο. Το ίδιο φαίνεται και στο χώρο που ορίζεται μεταξύ των τελευταίων τριών μέτρων κατά τον y άξονα και μεταξύ του εικοστού πέμπτου και τριακοστού μέτρου κατά τον x άξονα, όπου πάλι εμφανίζονται δομές με γραμμική μορφή.



**Σχήμα 36. Αποτελέσματα αντιστροφής σε βάθος 0.150 μέτρα.**

Βάθος 0.744 μέτρα

Σε αυτό το βάθος κάνει την κύρια εμφάνιση του ο όγκος της πρώτης περιοχής ενδιαφέροντος, που ερμηνεύτηκε ως κομμάτι θεμελίωσης δεξαμενής ή πηγαδιού που υπήρχε στο χώρο. Οι χαμηλές αντιστάσεις που εμφανίζονται γύρω από τη μεγαδομή πιθανότατα οφείλονται σε υγρασία που έχει συσσωρευτεί μεταξύ των δομών. Στο βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής εμφανίζεται πάλι περιοχή χαμηλών αντιστάσεων, που μπορεί να οφείλεται σε διαρροή ύδατος από τον αγωγό που υπάρχει στην περιοχή. Στο μέσο της περιοχής έρευνας εμφανίζεται και η τοιχοποιία της δεξαμενής ύδατος.

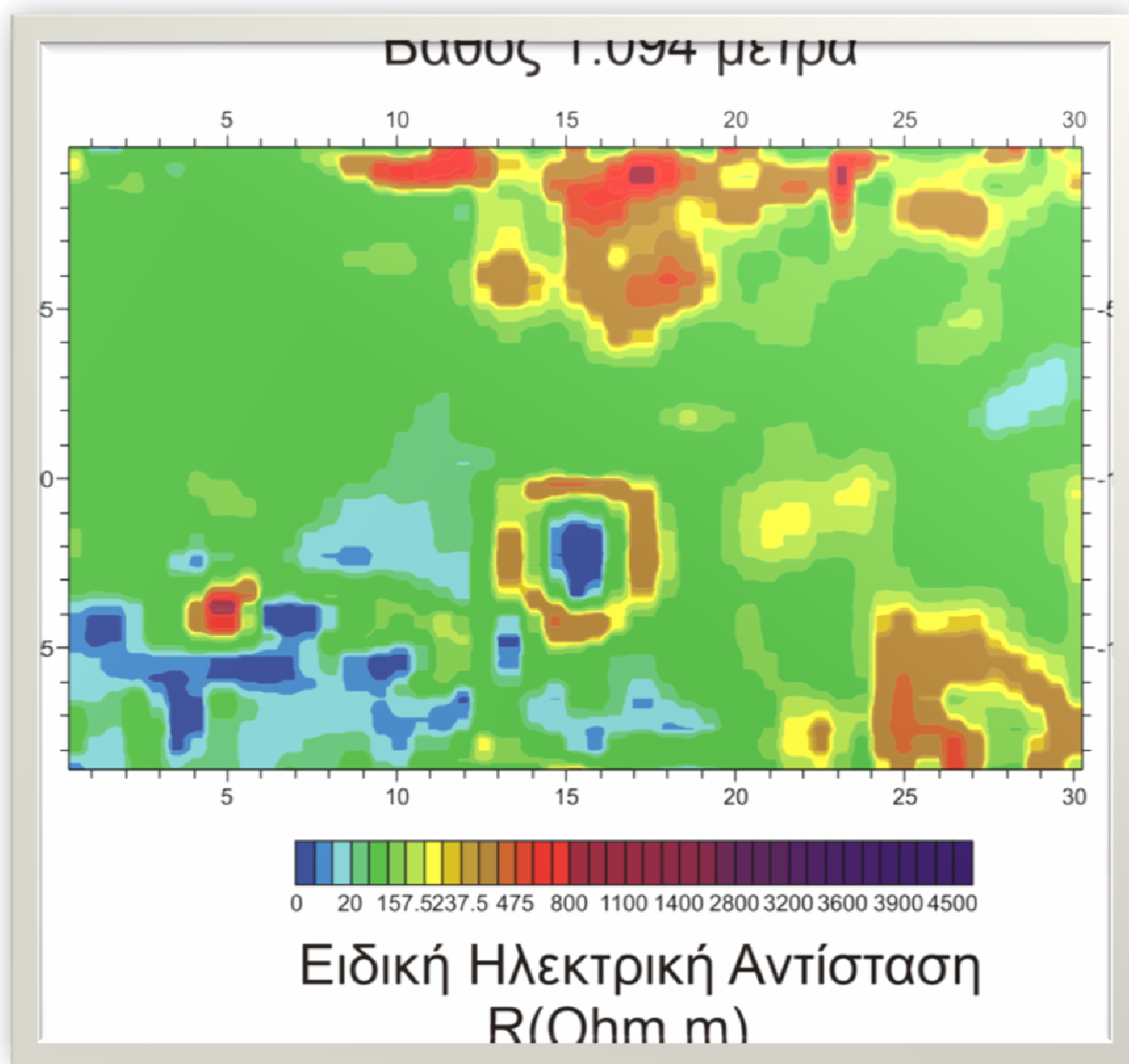


Σχήμα 37.Αποτελέσματα αντιστροφής σε βάθος 0.744 μέτρα.



Βάθος 1.094 μέτρα

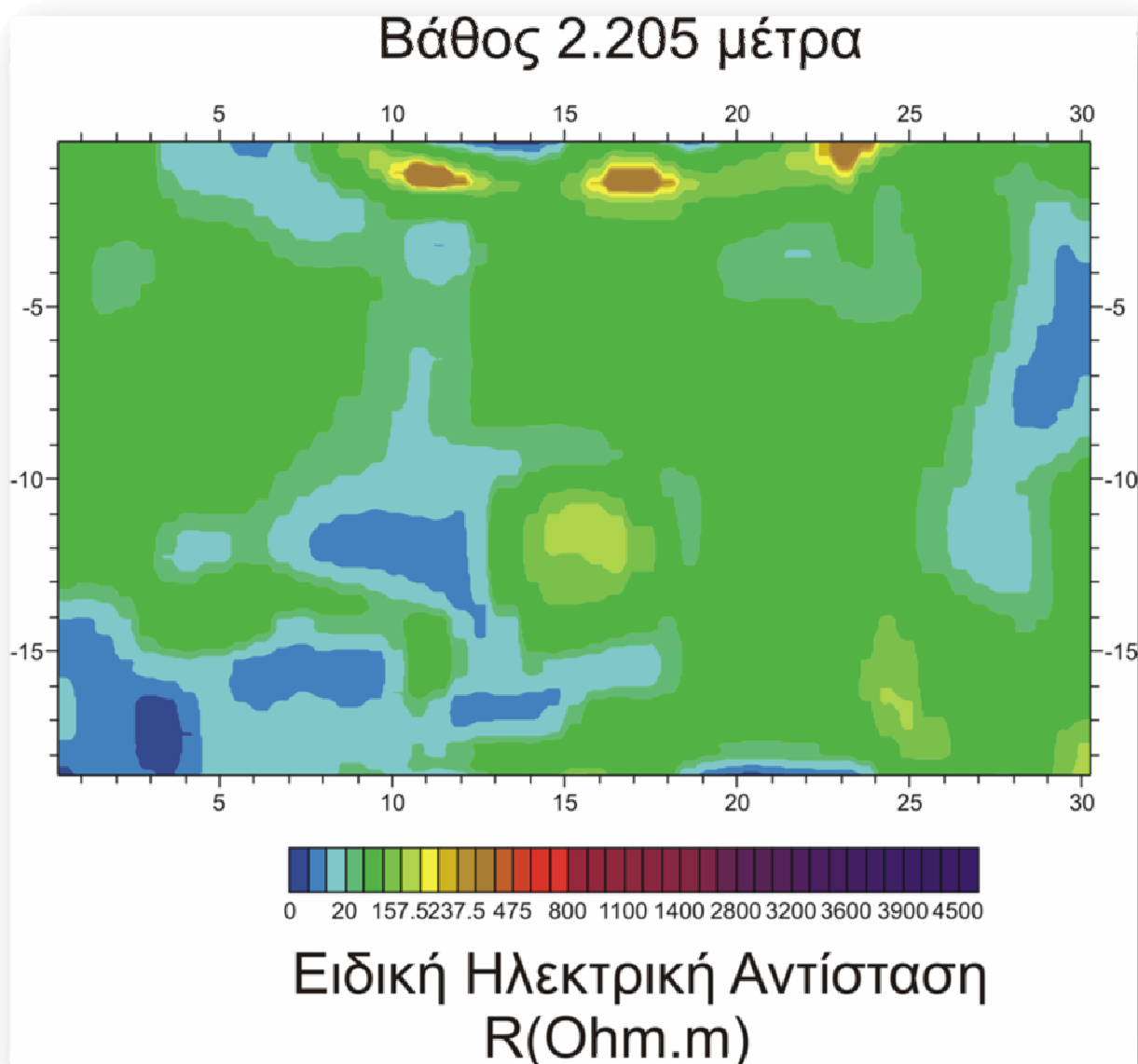
Σε αυτό το βάθος φαίνονται καθαρά τα πλευρικά τοιχώματα της δεξαμενής ύδατος, η οποία πρέπει να είχε διάμετρο περίπου 4 με 5 μέτρα. Η πρώτη περιοχή ενδιαφέροντος φαίνεται να σταματά σε αυτό το βάθος, όπως και οι γραμμικές δομές στο βόρειο μέρος του χώρου έρευνας και στο νοτιοδυτικό τμήμα.



Σχήμα 38.Αποτελέσματα αντιστροφής σε βάθος 1.094 μέτρα.

Βάθος 2.205 μέτρα

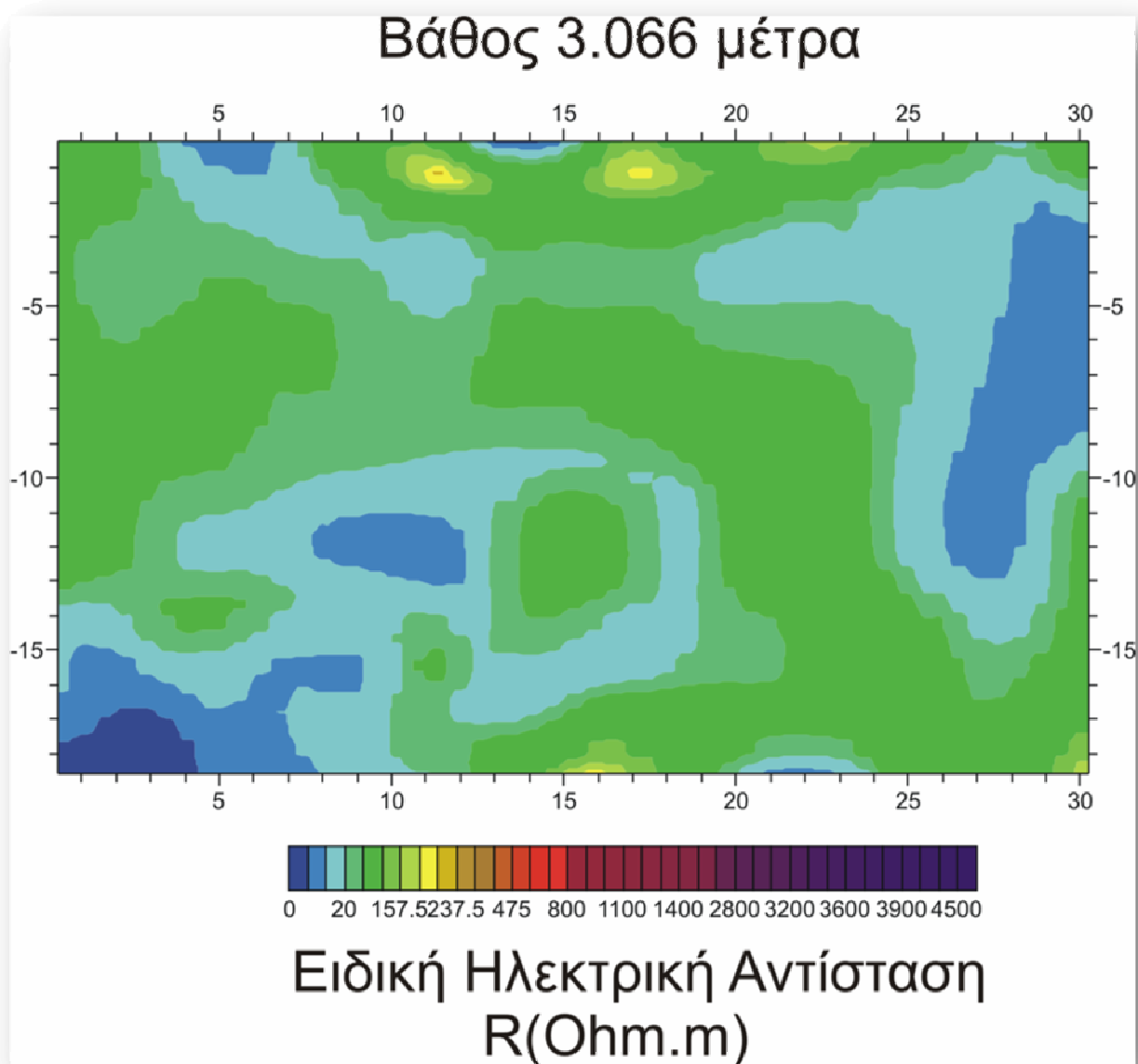
Οι δομές που υπήρχαν σε ανώτερα βάθη δεν εμφανίζονται, και φαίνεται το στρώμα των ψαμιτομαργαϊκών συγκριμάτων και της αργίλου με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται μεταξύ 50 και 100 Ohm.m. Στα σημεία όπου η τιμή της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι χαμηλή, κάτω από 20 Ohm.m, ερμηνεύουμε πως είναι στρώματα άμμου τα οποία έχουν διαποτιστεί από νερό βροχοπτώσεων ή αργιλικά υλικά που έχουν παρόμοιες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



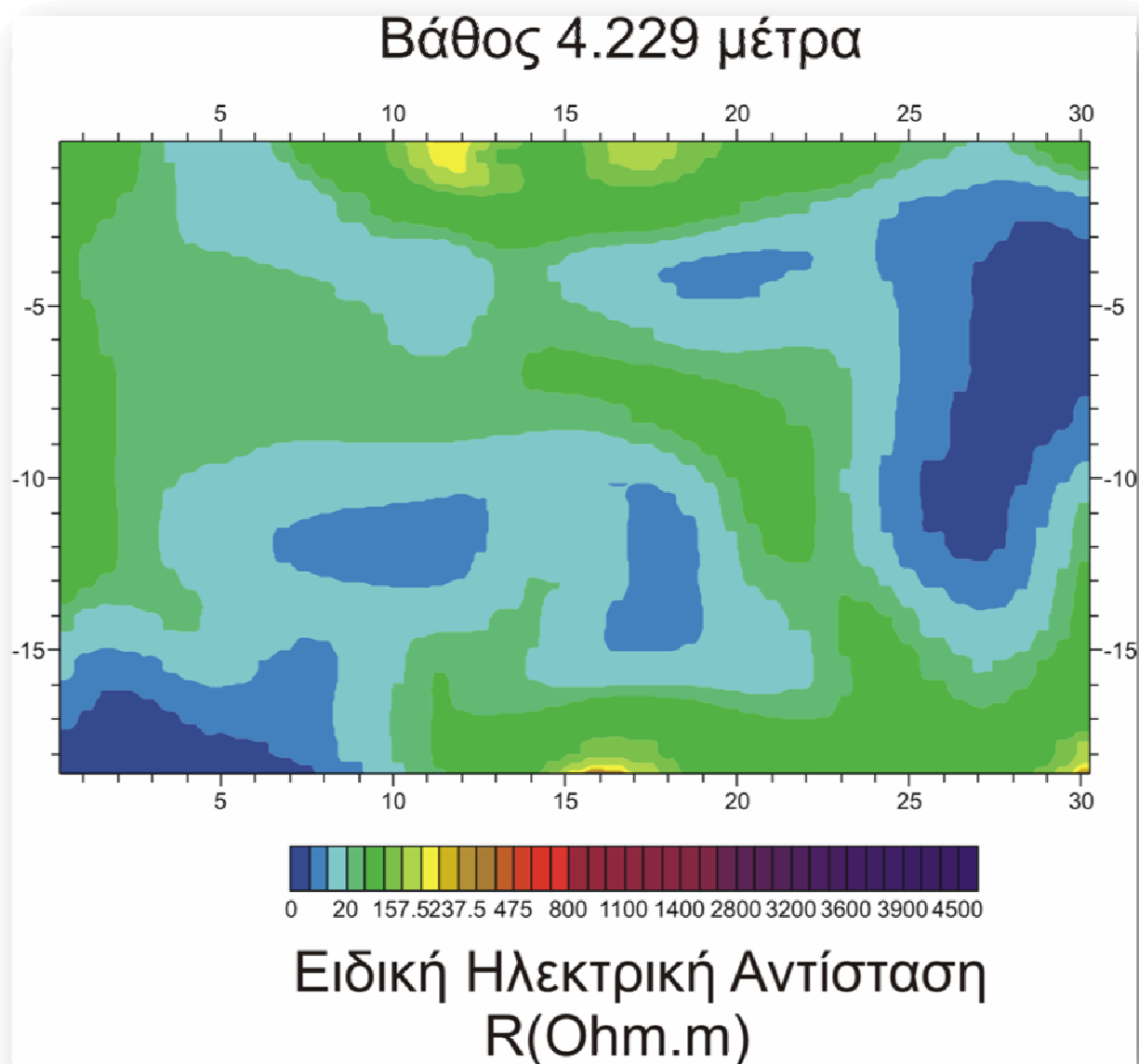
Σχήμα 39. Αποτελέσματα αντιστροφής σε βάθος 2.205 μέτρα.

Βάθος 3.066 μέτρα και 4.229 μέτρα

Δείχνεται η χωροταξική τοποθέτηση των στρωμάτων αργίλου και ψαμμιτόμαργας με τιμές αντιστάσεων 100 Ohm.m, και άμμου με τιμές κάτω των 20 Ohm.m.



Σχήμα 40. Αποτελέσματα αντιστροφής σε βάθος 3.066 μέτρα.



Σχήμα 41. Αποτελέσματα αντιστροφής σε βάθος 4.229 μέτρα.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα για τον χώρο έρευνας:

Γενικότερα στο χώρο εμφανίζονται γραμμικές δομές μέχρι το βάθος των 2 περίπου μέτρων. Οι δομές αυτές βρίσκονται στη νότια πλευρά του χώρου και στην βορειοδυτική. Ερμηνεύτηκαν ως θεμελιώσεις κτιρίων που ήταν σε χρήση κατά την εκμετάλλευση του χώρου τις προηγούμενες δεκαετίες από το εργοστάσιο ελαιουργίας που υπήρχε.

Στο κέντρο περίπου του χώρου εντοπίστηκε μια δομή κυλινδρικού σχήματος, η οποία φτάνει μέχρι τα 3 μέτρα περίπου, και έχει διάμετρο 4 μέτρα. Η δομή αυτή ερμηνεύτηκε ως θεμελίωση δεξαμενής ύδατος που υπήρχε στο χώρο κατά το παρελθόν.

Στην ανατολική πλευρά του χώρου εντοπίστηκε μια ακόμα δομή κυλινδρικού σχήματος, μικρότερης διαμέτρου από την παραπάνω, η οποία ερμηνεύτηκε ως κομμάτι δεξαμενής ή πηγαδιού που υπήρχε στο χώρο κατά το παρελθόν.

Στο χώρο δεν εντοπίστηκαν δομές μέχρι το μέγιστο βάθος διερεύνησης που να δείχνουν να προέρχονται από ανθρώπινες κατασκευές παλαιότερων χρονικών περιόδων, προ του εργοστασίου ελαιουργίας. Το συμπέρασμα προκύπτει από παράπλευρους χώρους της περιοχής έρευνας, στους οποίους εντοπίστηκαν



δομές αρχαίων χρόνων σε βάθη που κυμαίνονταν από 2.5 έως 4 μέτρα περίπου (φωτογραφίες 8,9,10).



Φωτογραφίες 8,9,10. Θέσεις αρχαίων δομών στην πλατεία 1866, και σε χώρο που βρίσκεται στη συμβολή των οδών Ζυμπρακάκηδων και Υψηλάντων.

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

**Loke, M. H., 2002, RES2DMOD, Rapid 2D Resistivity Forward Modeling Using Finite-Difference and Finite-Element Methods, published at [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com)**

**Loke, M. H., 2000, A Practical Guide to 2D & 3D Electrical Imaging Surveys, published at [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com)**

**Tsourlos, P., Szymanski, J. and Tsokas G., 1999, The effect of terrain topography on commonly used resistivity arrays: *Geophysics*, 64, 1357-1363.**

