

Εδνικόν και Καποδιστριακόν ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΙΩΝ ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ & ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ & ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

# ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ ΣΕ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΗ ΘΕΣΗ ΤΗΣ ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΝΑΣΚΑΦΗΣ ΤΟΥ ΕΚΠΑ ΣΤΟ ΠΛΑΣΙ (ΜΑΡΑΘΩΝΑΣ ΑΤΤΙΚΗ)

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

## ΜΑΡΚΑΣΙΩΤΗ ΠΕΛΑΓΙΑ-ΜΠΗΛΙΩ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Αναπλ. Καθηγητής

AOHNA 2021

#### ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της συνεργασίας των Τμημάτων Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος και Ιστορίας και Αρχαιολογίας του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Σκοπός της αποτέλεσε η εφαρμογή γεωφυσικής έρευνας με την εκτέλεση γεωηλεκτρικής διασκόπησης υψηλής διακριτικής ικανότητας, στην Πανεπιστημιακή αρχαιολογική ανασκαφική θέση «Πλάσι», στον Μαραθώνα Αττικής για τη διερεύνηση υπεδαφικών στόχων και την υπόδειξη θέσεων ανασκαφικού ενδιαφέροντος.

Η συγκεκριμένη θέση υποδείχθηκε από τον υπεύθυνο της ανασκαφής Αναπλ. Καθηγητή του Τμήματος Ιστορίας και Αρχαιολογίας Δρ. Ιωάννη Παπαδάτο. Η παρούσα εργασία μου ανατέθηκε από τον Δρ. Ιωάννη Αλεξόπουλο Αναπλ. Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, τον οποίο ευχαριστώ θερμά για την εμπιστοσύνη, την καθοδήγηση, τις επεξηγήσεις, τις υποδείξεις και το ενδιαφέρον του για την ομαλή διεξαγωγή και ολοκλήρωση της εργασίας μου κατά τη διάρκεια της δύσκολης, λόγω της πανδημίας του κορονοϊού, περιόδου εκπόνησής της.

Ευχαριστώ πολύ όλους τους συναδέλφους που συμμετείχαν στις εργασίες πεδίου για τη συγκέντρωση της γεωφυσικής πληροφορίας, μέρος της οποίας παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία. Ευχαριστώ τους, Ιωάννα Παναγιωτοπούλου, Θεοδώρα Μπλαγκόεβα και Νίκο Βητόπουλο.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες αποδίδω στον Δρ Σπυρίδωνα Δίλαλο και στους μεταπτυχιακούς φοιτητές του Τμήματός μου, Αθανάσιο Πετρά και Ιωάννη Γιαννόπουλο, για την πολύτιμη συνεργασία στις εργασίες πεδίου και για τη βοήθειά τους και τις υποδείξεις τους στην επεξεργασία δεδομένων.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ПЕРІЛНѰН	. 3
ABSTRACT	. 4
1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	. 5
1.1 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ	. 5
1.1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	. 5
1.1.2 Διάδοση ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος	. 5
1.1.3 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση	. 6
1.1.4 Γεωηλεκτρικές παράμετροι	. 8
1.1.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων	. 9
1.1.5 Κατακόρυφη και πλευρική γεωηλεκτρική έρευνα	11
1.1.6 Βάθος έρευνας	12
1.1.7 Παράγοντες επιρροής των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης	14
1.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ (RES2DINV	')
	15
1.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο	16
1.2.2 Μορφή αρχείου δεδομένων (Data file format)	16
1.2.3 Μορφή δεδομένων βάσει ευρετηρίου (Index based data format)	17
1.2.4 Δεδομένα τοπογραφίας για index based data format	18
1.2.5 Επεξεργασία δεδομένων	19
1.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ (Voxler)	28
1.3.1 Το περιβάλλον του Voxler	28
1.3.2 Εκκίνηση του λογισμικού Voxler	31
1.3.3 Exclusion Filter	31
1.3.4 Scatter Plot	33
1.3.5 Axes και BoundingBox	36
1.3.6 Gridder	37
1.3.7 Isosurface	39
2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	43
2.1 Εργασίες Υπαίθρου και Εξοπλισμός	43
2.2 Επεξεργασία δεδομένων - Φαινόμενη Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση	47
2.3 Δισδιάστατη (2D) επεξεργασία – Τρισδιάστατη απεικόνιση – Ερμηνεία	55
3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ	61
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως στόχο την παρουσίαση και απεικόνιση των αποτελεσμάτων λεπτομερούς εφαρμοσμένης γεωφυσικής έρευνας, η οποία πραγματοποιήθηκε στην πανεπιστημιακή ανασκαφή στην περιοχή Πλάσι του Μαραθώνα Αττικής, στο πλαίσιο συνεργασίας της συνεργασίας του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος και του Τμήματος Ιστορίας και Αρχαιολογίας του Ε.Κ.Π.Α.

Η περιοχή ενδιαφέροντος όπου διεξήχθη η υπεδαφική έρευνα έχει πληρωθεί από Νεογενή κλαστικά ιζήματα. Στις παράκτιες περιοχές συναντώνται καστανόχρωμα αργιλο-αμμώδη κλαστικά ιζήματα με διάσπαρτες κροκαλο-λατύπες, ερυθρογή και λεπτόκοκκα κλαστικά ιζήματα χειμαρρωδών αποθέσεων.

Η τεχνική που επιλέχθηκε για την ανάδειξη των υπεδαφικών στόχων είναι αυτή της τεχνικής υψηλής διακριτικής ικανότητας *γεωηλεκτρικής τομογραφίας* με διάταξη ηλεκτροδίων Wenner. Από τη διαχείριση των δεδομένων της *φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης* και των αποτελεσμάτων της επεξεργασίας της ('πραγματική' ηλεκτρική ειδική αντίσταση), αναδείχθηκαν και υποδείχθηκαν ανασκαφικοί στόχοι. Μετά την επεξεργασία των δεδομένων και την εξαγωγή των δισδιάστατων αποτελεσμάτων, κατασκευάστηκαν τομές και χάρτες σε ψεύδο-τρισδιάστατες απεικονίσεις, προκειμένου να αναδειχθούν και να αναπαρασταθούν σαφέστερα οι στόχοι της έρευνας. Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα Terrameter του οίκου ABEM, με 41 ηλεκτρόδια και ισοαποστάσεις 25 cm. Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται δεκαέξι (16) τομές με μήκος δεκαπέντε (15) μέτρα η κάθε μία.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την δισδιάστατη επεξεργασία των δεδομένων ήταν το RES2DINV της Geotomo. Για την διαχείριση και την απεικόνιση των δεδομένων της φαινόμενης και (πραγματικής) ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε τομές και χάρτες χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Surfer της Golden Software.

Για την τρισδιάστατη αναπαράσταση των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης επελέγη το λογισμικό EriViz, ενώ για τα δεδομένα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Voxler της Golden Software.

Από την αξιολόγηση των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης προσδιορίστηκαν τρείς (3) πιθανοί στόχοι ενδιαφέροντος με τιμές  $\rho_{\alpha}$  >200 Ohm\*m και ψευδο-βάθος ("Z-location") ~ 50-60 cm. Σύμφωνα με τα δεδομένα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης φανερώθηκαν οι τρείς στόχοι που προαναφέρθηκαν, αλλά και ένας ακόμα. Οι τιμές  $\rho$  είναι >300 Ohm\*m, ενώ το βάθος, πλέον, που εντοπίστηκαν περιορίζεται στο 1-1,5m.

<u>Λέξεις κλειδιά</u>: γεωηλεκτρική τομογραφία, 2D γεωηλεκτρική επεξεργασία, 3D απεικόνιση, διάγραμμα 'φράχτη', αρχαιολογία και γεωφυσική

### ABSTRACT

«Resistivity investigation in a selected site of the Marathon (Plasi) NKUA archaeological excavation area»

The present dissertation aims to present and illustrate the results of applied geophysical research, which was carried out in the university excavation in the area of Plasi, Marathon, Attica, in collaboration with the Department of Geology and Geoenvironment and the Department of History and Archeology of the National and Kapodistrian University of Athens.

The area of interest where the subsoil research was conducted has been filled by Neogene clastic sediments. In the coastal areas, brown-sandy clastic sediments with scattered cobblestones, reddish and fine-grained clastic sediments of torrent deposits are found.

The technique chosen to highlight the subterranean targets is that of geoelectric tomography with Wenner electrode array. It is a technique of high resolution, which offers high accuracy results.

Through the management of the data of the apparent electrical specificity and the results of its processing ('real' electrical resistivity), excavation targets were identified and indicated. After processing the data and extracting the two-dimensional results, sections and maps were made in pseudo-three-dimensional representations, in order to highlight and more clearly represent the objectives of the research. The ABEM Terrameter system was used, with 41 electrodes and equal distances of 25 cm. In this work sixteen (16) sections with a length of fifteen (15) meters each, are presented.

The software used for the 2D data processing was Geotomo RES2DINV. Golden Software Surfer software was used to manage and display the data of the apparent and electrical resistivity in sections and maps.

The EriViz software was selected for the 3D representation of the resistivity data, while the Golden Software Voxler software was used for the resistivity data.

With the specific geophysical research, the possible targets were identified and the possible excavation sites in the area were indicated. In addition, the functions of the software used for the 2D and 3D display of the results were analyzed. Finally, the representations of the data of the apparent electrical resistance were compared with those of the specific electrical resistance to identify differences, but also similarities.

From the evaluation of the results of the data of the apparent electrical resistivity, three (3) possible targets of interest were identified with values of  $\rho_{\alpha}$ > 200 Ohm\*m and pseudo-depth ("Z-location") ~ 50-60 cm According to the data of the electrical resistivity, the three objectives mentioned above were revealed, as well as one more. The  $\rho$  values are > 300 Ohm\*m, while the depth detected now, reaches about 1-1,5m.

<u>Key words</u>: electrical resistivity tomography, ert, 2D resistivity processing, 3D representation, fence diagram, archaeology and geophysics

# 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΤΗΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ

### 1.1 ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗ

Αποτελεί το πλέον έμπιστο εργαλείο αναζήτησης της Πολιτιστικής Κληρονομιάς στην ύπαιθρο, εάν ληφθεί υπόψη η μεθοδολογική και η τεχνολογική της εξέλιξη. Η παράμετρος της **ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης**, επιτρέπει την διάκριση δομών και σωμάτων με αρχαιολογικό και αρχιτεκτονικό ενδιαφέρον από το υλικό που τα περιβάλει, καθώς είναι δυνατή η ανίχνευση γεωλογικών σχηματισμών με διαφορετικές ηλεκτρικές αντιστάσεις και γεωηλεκτρικές ασυνέχειες, οι οποίες διαχωρίζονται μέσω διαφορετικής αγωγιμότητας που παρουσιάζουν. Η αντίσταση του πετρώματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η θερμοκρασία, το πορώδες και η γεωμετρία του, το υγρό στο πορώδες και άλλα (*Τσελέντης, Α., Παρασκευόπουλος, Π., 2013*). Συνήθως, το στεγνό έδαφος δεν είναι αγώγιμο.

Στην αναζήτηση αρχαιολογικού υλικού, η παρουσία ανωμαλίας υψηλής ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης αποτελεί δείκτη κάποιας ανθεκτικής δομής, όπως συγκεντρωμένοι στόχοι (πλακάκια, πέτρινοι τοίχοι, θεμέλια κτηρίων), σε σχέση με το λιγότερο ανθεκτικό υλικό που τα περιβάλει και τα έχει εγκλωβίσει (υπέδαφος/ ημιχώρος).

### 1.1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Η γεωφυσική διασκοπική μέθοδος της **ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης** αποτελεί μια ενεργητική μέθοδο, στην οποία παράγεται με τεχνητό τρόπο στο υπέδαφος ηλεκτρικό πεδίο. Διοχετεύεται ελεγχόμενη ποσότητα συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος, ή χαμηλής συχνότητας εναλλασσόμενο ρεύμα, στο υπέδαφος δια μέσου δύο ηλεκτροδίων, τα οποία ονομάζονται *ηλεκτρόδια ρεύματος*, και ταυτόχρονα πραγματοποιείται μέτρηση της διαφοράς δυναμικού που δημιουργείται μεταξύ ενός ζεύγους ηλεκτροδίων δυναμικού, τα οποία ονομάζονται *ηλεκτρόδια δυναμικού*. Η διαφορά δυναμικού που μετριέται εξαρτάται από την αγωγιμότητα των υπεδαφικών σχηματισμών, δηλαδή την ευκολία διάδοσης των ηλεκτρικών φορτίων μέσα στον ημιχώρο. Με την μετρούμενη διαφορά δυναμικού είναι δυνατός ο υπολογισμός της *ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, ρ*, διαμέσου της *ωμικής αντίστασης, R*.

Πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι τα εξής:

- Άμεσα αποτελέσματα ερευνών. Πραγματοποιείται έλεγχος και ποιοτική ερμηνεία των μετρήσεων κατά τη διάρκεια διεξαγωγής τους.
- Χαμηλό σχετικά κόστος εργασιών υπαίθρου.
- Εύκολη και σύντομη διαδικασία λήψης μετρήσεων. Ο χρόνος έχει άμεση σχέση με το επιθυμητό βάθος που στοχεύει η έρευνα κάθε φορά.
- Σχετικά μικρό βάρος και όγκος των φορητών συσκευών, αρά εύκολη μετακίνησή τους.
- Φιλική (μη καταστροφική) μέθοδος προς το περιβάλλον.

### 1.1.2 Διάδοση ηλεκτρικού ρεύματος στο έδαφος

Το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να διαδοθεί με τρείς τρόπους στους διάφορους γεωλογικού σχηματισμούς, ηλεκτρονικά (ωμικά), ηλεκτρολυτικά και διηλεκτρικά.

Ο πρώτος είναι ο πλέον συνηθισμένος σε υλικά με ελεύθερα ηλεκτρόνια, όπως τα μέταλλα. Με τον *ηλεκτρολυτικό* τρόπο, το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται από τα ιόντα, τα οποία, όμως, μετακινούνται με χαμηλό ρυθμό. Τέλος, διηλεκτρικά μεταδίδεται σε φτωχούς αγωγούς ή μονωτές, στους οποίους οι ελεύθεροι φορείς είναι ελάχιστοι έως μηδενικοί. Ο γενικότερος τρόπος διάδοσης του ηλεκτρικού ρεύματος είναι εκείνος της ηλεκτρονικής (ωμικής) μετάδοσης.

Είναι γνωστό ότι όταν εφαρμοστεί η διαφορά δυναμικού *V* στα άκρα ενός αγώγιμου σώματος με ηλεκτρική αντίσταση R, τότε αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης *I*, η οποία υπολογίζεται από τον νόμο του Ohm:

 $I = \frac{V}{R}$ 

και μετράται σε Ohm.

Η μετρούμενη *ωμική αντίσταση* δεν εξαρτάται μόνο από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο το σώμα, αλλά και από την γεωμετρία του. Έστω, λοιπόν, ότι αποκόπτεται από ένα πέτρωμα κυλινδρικό δείγμα μήκους *L* και διατομής *A* (*Εικόνα 1.1*), τότε η ηλεκτρική του αντίσταση, *R*, παρέχεται από τη μαθηματική έκφραση:

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Οι μονάδες μέτρησης του κάθε παράγοντα είναι m<sup>2</sup> για το Α, m για το L και Ohm για την ηλεκτρική αντίσταση.



Εικόνα 1.1: Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση για κυλινδρικό σχηματισμό (Λούης, 2004).

Από την παραπάνω μαθηματική έκφραση, ο παράγοντας **ρ** ορίζεται ως η **ειδική ηλεκτρική αντίσταση** του αγωγού (σχηματισμού) και υπολογίζεται από την μαθηματική σχέση:

$$\rho = \frac{RA}{L}$$

και μονάδα μέτρησης Ohm\*m.

Η **ηλεκτρική αγωγιμότητα (σ)** είναι το αντίστροφο μέγεθος της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης και έχει μονάδα μέτρησης mhos/m ή Siemens/m.

Χρησιμοποιώντας τον νόμο του Ohm και θέτοντας **σ=1/ρ**, τότε:

$$\sigma = 1/\rho = L/RA = (I/A)/(V/L) = j/E$$

όπου:

j= I/A είναι η πυκνότητα του ρεύματος και μετριέται σε A/m<sup>2</sup>,

E = V/L είναι το ηλεκτρικό πεδίο και μετριέται σε V/m.

#### 1.1.3 Φαινόμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση

Στην εικόνα 1.2 παρουσιάζεται η γεωμετρία μιας γεωηλεκτρικής διάταξης. Αποτελείται από το ζεύγος ηλεκτροδίων ρεύματος (C1 και C2) και ηλεκτροδίων δυναμικού (P1 και P2).



Εικόνα 1.2: Γεωηλεκτρική διάταξη τεσσάρων συνευθειακών ηλεκτροδίων (Dobrin & Savit, 1988).

Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται, μεταξύ των ηλεκτροδίων P<sub>1</sub> και P<sub>2</sub>, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta V = \frac{l\rho}{2\pi} \left[ (1/r_1 - 1/r_2) - (1/r_3 - 1/r_4) \right]$$

Επιλύοντας τη σχέση αυτή, ως προς ρ, προκύπτει:

$$\rho = \frac{2\pi\Delta V}{I} \frac{1}{\left[(1/r_1 - 1/r_2) - (1/r_3 - 1/r_4)\right]} = \frac{2\pi\Delta V}{I}G$$

όπου ο παράγοντας  $G = \frac{1}{[(1/r_1 - 1/r_2) - (1/r_3 - 1/r_4)]}$  εξαρτάται από τη γεωμετρία της διάταξης των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού και ονομάζεται **γεωμετρικός παράγοντας** ή **γεωμετρικός συντελεστής**.

Από τις παραπάνω σχέση και λαμβάνοντας υπόψη τις αποστάσεις των ηλεκτροδίων, μπορεί να υπολογιστεί η *ειδική ηλεκτρική αντίσταση*, *ρ*.

Εάν το μέσο είναι ομογενές, ισότροπο, ομοιόμορφο και απείρου βάθους, η τιμή της μετρούμενης *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης* θα είναι σταθερή, ανεξάρτητη της τιμής του γεωμετρικού παράγοντα *G*. Αυτό σημαίνει ότι ανεξάρτητα από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, εάν μεταβληθεί η γεωμετρία της διάταξης, θα μεταβληθεί ο λόγος  $G \frac{\Delta V}{I}$ , ώστε να παραμένει πάντα σταθερός και η τιμή  $\rho$  πάντα ίδια.

Στην περίπτωση πολλών στρωματοποιημένων, οριζοντίων και ομογενών μέσων, ο λόγος αυτός θα μεταβάλλεται με αποτέλεσμα τη λήψη διαφορετικών τιμών ειδικής αντίστασης, *ρ*, σε κάθε θέση των ηλεκτροδίων, λόγω της παραμόρφωσης των γραμμών ροής ρεύματος και των ισοδυναμικών γραμμών του πεδίου.

Για τον λόγο αυτό, η μετρούμενη ειδική ηλεκτρική αντίσταση, αποκαλείται **φαινόμενη ηλεκτρική ειδική αντίσταση, ρ**<sub>α</sub>, και υπολογίζεται από τη μαθηματική έκφραση:

$$\rho_{\alpha} = \frac{2\pi\Delta V}{I * G}$$

Η *φαινόμενη ηλεκτρική ειδική αντίσταση*, *ρ*<sub>α</sub>, θα ισούται με την *ειδική ηλεκτρική αντίσταση* του ανώτερου σχηματισμού, *ρ*<sub>1</sub>, όταν η απόσταση των ηλεκτροδίων είναι μικρή σχετικά με το πάχος του στρώματος, όπου το ποσοστό του ρεύματος που διέρχεται στο κατώτερο στρώμα

είναι το ελάχιστο δυνατό. Σε μεγάλες αποστάσεις ηλεκτροδίων ρεύματος, συγκριτικά με το πάχος του πρώτου σχηματισμού, η *φαινόμενη ηλεκτρική ειδική αντίσταση* πλησιάζει την (πραγματική) ηλεκτρική ειδική αντίσταση του δευτέρου στρώματος, ρ<sub>2</sub>, αφού σε αυτήν την περίπτωση η διερχόμενη ποσότητα του ρεύματος από το ανώτερο στρώμα είναι ελάχιστη.



Απόσταση ηλεκτροδίων ρεύματος L

**Εικόνα 1.3:** Σχέση φαινόμενης ειδικής αντίστασης με την απόσταση των ηλετροδίων για δύο οριζόντια στρώματα (Dobrin & Savit, 1988).

### 1.1.4 Γεωηλεκτρικές παράμετροι

Σημαντικό ρόλο παίζει η ανισοτροπία της ειδικής αντίστασης του υλικού σε διάφορες κατευθύνσεις. Αποτελεί χαρακτηριστική ιδιότητα των πετρωμάτων, τα οποία είναι πιο αγώγιμα παράλληλα προς τη στρώση παρά κάθετα προς αυτή. Η παράμετρος *Τ* ονομάζεται *εγκάρσια αντίσταση* και η παράμετρος *S* διαμήκης αγωγιμότητα (Εικόνα 1.4)



Εικόνα 1.4: Σχηματική απεικόνιση της εγκάρσιας αντίστασης Τα και της διαμήκους αγωγιμότητας S (Zohdy, 1974).

Ο συντελεστής ανισοτροπίας,  $\lambda$ , αποτελεί την ρίζα του λόγου της εγκάρσιας (μέγιστης)  $\rho_t$ , προς την διαμήκη (ελάχιστη)  $\rho_L$  ειδική αντίσταση. Για ισότροπο μέσον ισχύει ότι  $\rho_t = \rho_L$  και  $\lambda = 1$ .

Για ν αριθμό στρωμάτων, η συνολική διαμήκης αγωγιμότητα, S, είναι:

$$S = \sum_{i=1}^{\nu} \frac{h_i}{\rho_i} = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + - - + \frac{h_{\nu}}{\rho_{\nu}}$$

Η συνολική εγκάρσια αντίσταση, Τ, είναι:

$$T = \sum_{i=1}^{\nu} h_i * \rho_i = h_1 * \rho_1 + h_2 * \rho_2 + - - + h_{\nu} * \rho_{\nu}$$

Η μέση διαμήκης ειδική αντίσταση, ρ<sub>L</sub>, είναι:

$$\rho_L = \frac{H}{S} = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} h_i}{\sum_{i=1}^{\nu} \frac{h_i}{\rho_i}}$$

Η μέση εγκάρσια ειδική αντίσταση, ρ<sub>t</sub>, είναι:

$$\rho_t = \frac{T}{H} = \frac{\sum_{i=1}^{\nu} h_i * \rho_i}{\sum_{i=1}^{\nu} h_i}$$

Ο συντελεστής ανισοτροπίας, λ, είναι:

$$\lambda = \frac{\sqrt{\rho_t}}{\sqrt{\rho_L}} = \frac{\sqrt{T * S}}{H}$$

Οι παραπάνω παράμετροι παράγονται από τη θεώρηση μίας στήλης εδάφους με διατομή 1x1 m (*Εικόνα 1.4*), η οποία τέμνεται από μία σειρά στρωμάτων άπειρης πλευρικής εξάπλωσης. Στην περίπτωση που το ρεύμα διαδίδεται προς τα κάτω μόνο δια μέσου της στήλης, τα στρώματα θα συμπεριφερθούν ως αντιστάτες που συνδέονται σε σειρά και η συνολική αντίσταση θα είναι:

$$R = R_1 + R_2 + - - + R_{\nu}$$
$$R = h_1 * \rho_1 + h_2 * \rho_2 + - - + h_{\nu} * \rho_{\nu} = \sum_{i=1}^{\nu} h_i * \rho_i = T$$

Εάν, όμως, το ρεύμα διαδίδεται παράλληλα προς τη στρώση, τα στρώματα στη στήλη θα συμπεριφερθούν ως αντιστάτες που συνδέονται με παράλληλη διάταξη και η αγωγιμότητα θα δίδεται από τη μαθηματική έκφραση:

$$S = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_{\nu}}$$
$$S = \frac{h_1}{\rho_1} + \frac{h_2}{\rho_2} + \dots + \frac{h_{\nu}}{\rho_{\nu}} = \sum_{i=1}^{\nu} \frac{h_i}{\rho_i}$$

#### 1.1.5 Διατάξεις ηλεκτροδίων

Στην εφαρμογή της γεωηλεκτρικής μεθόδου στο πεδίο, λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες της έρευνας, εφαρμόζεται συγκεκριμένη διάταξη ηλεκτροδίων. Κάθε διάταξη έχει καθορισμένο τρόπο τοποθέτησης των ηλεκτροδίων. Σημαντικότερες από αυτές είναι εκείνες που προτείνουν ο Wenner και ο Schlumberger και η διπόλου-διπόλου.

#### Διάταξη Wenner

Χρησιμοποιούνται τέσσερα ηλεκτρόδια, τα οποία διατάσσονται σε μια ευθεία γραμμή και ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση a. Δύο χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρόδια ρεύματος (C1, C2) και δύο ως ηλεκτρόδια δυναμικού (P1, P2). Η μετρούμενη φαινόμενη ειδική αντίσταση παρέχεται από τη μαθηματική έκφραση:

$$\rho_{\alpha} = 2\pi \alpha \frac{\Delta V}{I}$$

Το βάθος διερεύνησης με τη συγκεκριμένη διάταξη αυξάνει με την αύξηση της απόστασης των ηλεκτροδίων. Εφαρμόζεται για ηλεκτρική χαρτογράφηση, ηλεκτρική τομογραφία και ηλεκτρική βαθοσκόπηση.



Εικόνα 1.5: Διάταξη Wenner (Τσελέντης, κ.ά, 2013).

#### Διάταξη Schlumberger

Χρησιμοποιεί και αυτή τέσσερα ηλεκτρόδια διατεταγμένα σε μια ευθεία. Τα δύο από αυτά αποτελούν ηλεκτρόδια ρεύματος και μετακινούνται σε προκαθορισμένες αποστάσεις (C1, C2), και δύο δυναμικού (P1, P2). Η θέση των ηλεκτροδίων ρεύματος διατηρείται σταθερή και τα ηλεκτρόδια δυναμικού μετακινούνται κατά μήκος τους γραμμής διατηρώντας τη μεταξύ τους απόσταση (a) σταθερή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μαθηματική έκφραση που παρέχει τη φαινόμενη ειδική αντίσταση είναι:

$$\rho_a = \pi \frac{b^2 - a^2}{4a} \frac{\Delta V}{I}$$

Η συγκεκριμένη διάταξη χρησιμοποιείται για χαρτογράφηση του υπεδάφους κατά μήκος προφίλ (profiling) ή και κατά το βάθος (sounding).



Εικόνα 1.6: Διάταξη Schlumberger (Τσελέντης, κ.ά, 2013).

#### Διάταξη Διπόλου-Διπόλου

Χρησιμοποιούνται δύο ζεύγη ηλεκτροδίων από τα οποία, στις περισσότερες περιπτώσεις, το ένα αποτελείται από τα δύο ηλεκτρόδια ρεύματος ενώ το άλλο από τα ηλεκτρόδια δυναμικού. Το ζεύγος των ηλεκτροδίων δυναμικού μπορεί να έχει οποιαδήποτε θέση και διεύθυνση σε σχέση με τα ηλεκτρόδια ρεύματος. Αν όλα τα ηλεκτρόδια είναι σε ευθεία γραμμή, η διάταξη ονομάζεται διάταξη συνευθειακών διπόλων ή πολικό δίπολο.

Η φαινόμενη ηλεκτρική ειδική αντίσταση στη συνευθειακή διάταξη διπόλου-διπόλου παρέχεται από τη μαθηματική έκφραση:



Εικόνα 1.7: Διάταξη Διπόλου-Διπόλου (Τσελέντης, κ.ά, 2013).

#### 1.1.5 Κατακόρυφη και πλευρική γεωηλεκτρική έρευνα

Η γεωηλεκτρική τομογραφία (electrical resistivity tomography – ert) αποτελεί μία τεχνική υψηλής διακριτικής ικανότητας, η οποία αναδεικνύει την πλευρική γεωηλεκτρική δομή στις δύο διαστάσεις (2D). Περιγράφεται ως μία σειρά από συνεχόμενες γεωηλεκτρικές βαθοσκοπήσεις (vertical electrical sounding – ves) κατά μήκος της γραμμής έρευνας και για την εκτέλεσή της πραγματοποιούνται πλήθος μετρήσεων.

Μαζί με τη **γεωηλεκτρική βαθοσκόπηση**, η οποία αποτελεί διαδικασία προσδιορισμού της κατακόρυφης κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, αποτελούν τεχνικές που ανήκουν στις ενεργητικές γεωηλεκτρικές μεθόδους διασκόπησης. Αυτό σημαίνει ότι εισάγεται 'σήμα' στο υπέδαφος (ημιχώρο) και μετράται η ανταπόκριση του υπεδάφους στο 'σήμα' αυτό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται πηγή ελεγχόμενου συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος.

Η ιδιότητα του υπεδάφους μπορεί να διερευνηθεί μετακινώντας την διάταξη των ηλεκτροδίων, με συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους, σε μια ευθεία γραμμή. Τα ηλεκτρόδια είναι μεταλλικοί ράβδοι, οι οποίοι πακτώνονται στο έδαφος και συνήθως είναι από ανοξείδωτο ατσάλι. Για την λήψη των δεδομένων, τοποθετείται μεγάλος αριθμός ηλεκτροδίων κατά μήκος του προφίλ. Για να υπάρξει βέλτιστη απόκριση κατά τη διάρκεια της έρευνας, η επιλογή της απόστασης μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι θεμελιώδης για τον προσδιορισμό του σχήματος, του μεγέθους και του βάθους του στόχου (*Marilena Cozzolino, et.al., 2018*). Η αύξηση της απόστασης οδηγεί σε αύξηση του βάθους διερεύνησης αλλά μείωση της διακριτότητας και του μεγέθους του σήματος. Έτσι, πραγματοποιείται η τεχνική της γεωηλεκτρικής βαθοσκόπησης, με την οποία προσδιορίζονται οι <u>κατακόρυφες</u> γεωηλεκτρικές ασυνέχειες με το βάθος (ψευδογεώτρηση), πάνω από ένα καθορισμένο σημείωση της απόστασης που εδάφος και καλύτερη διακριτική ικανότητα.

Στη **γεωηλεκτρική τομογραφία** (electrical resistivity tomography – ert), τα ηλεκτρόδια συνδέονται χρησιμοποιώντας σειρά πολυκαναλικών καλωδίων (συνήθως 2 ή/και 4), τα οποία καταλήγουν στην γεωηλεκτρική συσκευή. Αυτή η συσκευή περιλαμβάνει μια πηγή ελεγχόμενου – συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος (μπαταρία/συσσωρευτής) και ένα βολτόμετρο. Για μεγαλύτερα προφίλ είναι δυνατή η χρήση της τεχνικής γραμμικής μετακίνησης της γεωηλεκτρικής γραμμής (roll along), στην οποία το τελευταίο πολυκαναλικό καλώδιο διαδοχικά αποσυνδέεται και επανασυνδέεται στο εμπρόσθιο άκρο της γραμμής.



A) Principle of geoelectric profiling / tomography

Εικόνα 1.8: Λήψη πολυκαναλικών μετρήσεων με τη διάταξη Wenner (Patrick Keilholz, et. al., 2018).

Κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης των μετρήσεων, η συσκευή διαχείρισης των ηλεκτροδίων, προγραμματίζεται έτσι ώστε να ελέγχει ποια ηλεκτρόδια θα λειτουργήσουν ως ηλεκτρόδια ρεύματος και ποια ως ηλεκτρόδια δυναμικού, αφήνοντας τα υπόλοιπα σε αδράνεια. Η επιλογή γίνεται με βάση τη διάταξη που έχει επιλεγεί. Οι μετρήσεις συνεχίζονται μέχρι να πραγματοποιηθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού που παρέχουν τα τοποθετημένα ηλεκτρόδια.

Αφού πραγματοποιηθεί η λήψη των μετρήσεων, τα δεδομένα αποτυπώνονται σε μια (<u>ψευδο)τομή φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης</u>. Το σημείο αναφοράς της μέτρησης τοποθετείται οριζόντια στο μέσο των ηλεκτροδίων, τα οποία έχουν επιλεγεί από τη συσκευή για τη μέτρηση και κατακόρυφα σε βάθος ανάλογο της απόστασης των ηλεκτροδίων. Με βάση αυτά κατασκευάζονται οι καμπύλες ίσης κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Η ψευδοτομή αποτελεί μια προσεγγιστική και αλλοιωμένη εικόνα του υπεδάφους. Επιπρόσθετα, το βάθος στο οποίο απεικονίζονται οι φαινόμενες ειδικές αντιστάσεις δεν είναι το πραγματικό. Γι' αυτό δεν πρέπει να χρησιμοποιείται ως τελική τομή εξαγωγής συμπερασμάτων, αλλά είναι σαφώς καθοριστική για την εξέλιξη της επεξεργασίας, παρέχοντας ιδιαίτερα χρήσιμες πληροφορίες.

Για την δημιουργία της (τελικής) τομής στην οποία παρουσιάζεται η <u>κατανομή της ειδικής</u> <u>ηλεκτρικής αντίστασης με το βάθος</u> στον ημιχώρο, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι αντιστροφής 2D των δεδομένων.

### 1.1.6 Βάθος έρευνας

Σε ομογενές έδαφος όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων (*L*), τόσο αυξάνεται και το βάθος διείσδυσης του ρεύματος (*Z*) (*Εικόνα 1.9*).



**Εικόνα 1.9:** Αναλογία ρεύματος που ρέει κάτω από ένα βάθος Ζ (σε μέτρα), L είναι η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος (τροποποιημένο από Telford,1988).

Στην περίπτωση που ισχύει ότι L=Z τότε περίπου το 30% του ρεύματος διεισδύει σε βάθος Z, ενώ εάν L=2Z τότε περίπου το 50% του ρεύματος διεισδύει σε βάθος Z.

Στην εικόνα 1.10, η καμπύλη που παρουσιάζει τον συνδυασμό των ηλεκτροδίων δυναμικού δείχνει ότι η ζώνη η οποία επηρεάζεται περισσότερο βρίσκεται σε βάθος ίσο με την απόσταση των δύο ηλεκτροδίων, d. Για να φτάσει το ρεύμα στο επιθυμητό βάθος θα πρέπει η απόσταση των ηλεκτροδίων ρεύματος να είναι τουλάχιστον ίση με το βάθος. Η συνθήκη αυτή δημιουργεί πρακτικά προβλήματα, διότι εάν το βάθος διερεύνησης είναι μεγάλο χρειάζονται τα κατάλληλα καλώδια και ισχυρής ισχύος όργανα. Με έναν κανονικό εξοπλισμό μπορεί να επιτευχθεί βάθος διείσδυσης της τάξης του 1 χιλιομέτρου.



**Εικόνα 1.10:** Καμπύλες ευαισθησίας ηλεκτροδίων δυναμικού P1, P2 και ο συνδυασμός των ηλεκτροδίων ρεύματος σε διάταξη Wenner (Παπαδόπουλος, 2005).

### 1.1.7 Παράγοντες επιρροής των τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης

Το ρεύμα διαρρέει τις λιθολογίες εξαιτίας των ιόντων που είναι διαλυμένα στο νερό, το οποίο βρίσκεται στους πόρους τους. Άρα, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση εξαρτάται από την ηλεκτρολυτική αγωγιμότητα.

Πιο συγκεκριμένα, όμως, εξαρτάται από τους εξής παράγοντες:

- > Θερμοκρασία
- > Πίεση
- Πορώδες και γεωμετρία του, καθώς και από το υγρό του πορώδους
- Περιεκτικότητα σε νερό ή/και αργίλους
- Ποιότητα και χημική σύσταση νερού

Μια μαθηματική/εμπειρική σχέση, η οποία συνδέει την εξάρτηση της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης ενός πετρώματος με τους παραπάνω παράγοντες είναι ο νόμος του Archie:

$$\rho = \rho_w \alpha \varphi^{-m} S^{-n}$$

όπου:

- ρ, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πετρώματος,
- *ρ<sub>w</sub>*, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του ρευστού στο πορώδες του πετρώματος, το οποίο συνήθως είναι νερό,
- φ, το πορώδες,
- S, ο βαθμός κορεσμού σε ρευστό,
- α, ο συντελεστής που εξαρτάται από τη λιθολογία,
- *m*, ο συντελεστής στερεοποίησης και
- n, ο συντελεστής του οποίου η τιμή είναι συνήθως 2.

Η σχέση του Archie μπορεί να γραφτεί αλλιώς:

$$\rho = \rho_w F S^{-n}$$

όπου  $F = \alpha \varphi^{-m}$  αποτελεί τον συντελεστή, γνωστός ως παράγοντας σχηματισμού.

Ο νόμος του Archie δεν ισχύει στην περίπτωση αργιλικών πετρωμάτων.

Η ειδική ηλεκτρική αντίσταση ελαττώνεται όσο αυξάνεται το νερό μέσα στους πόρους του πετρώματος, η περιεκτικότητα σε χλωριόντα ή ελεύθερα ιόντα καθώς και η θερμοκρασία. Αντίθετα, η τιμή της θα αυξηθεί εάν οι πόροι του πετρώματος δεν είναι διαποτισμένοι με νερό ή είναι με γλυκό νερό, το έδαφος είναι παγωμένο ή υπάρχει αέρας μέσα στα κενά που δημιουργεί το πέτρωμα.

Πρέπει να τονιστεί ότι η διακύμανση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στον ίδιο λιθολογικό τύπο μπορεί να παρουσιάζει μεγάλος εύρος. Επιπρόσθετα, υπάρχον περιπτώσεις όπου δύο διαφορετικοί σχηματισμοί εμφανίζουν παρόμοιες ειδικές αντιστάσεις (*Εικόνα 1.11*). Για τους παραπάνω λόγους η ποιοτική και ποσοτική ερμηνεία των μετρήσεων της ειδικής αντίστασης πρέπει να γίνεται με προσοχή, χρησιμοποιώντας και άλλες πηγές με γεωλογικές πληροφορίες της περιοχής ενδιαφέροντος, όπως γεωλογικοί χάρτες, γεωτρήσεις ή άλλες εργασίες.

Material	Density Mg m <sup>-3</sup>	Susceptibility SI × 10 <sup>6</sup>	Resistivity Ohm-m	Conductivity mS m <sup>-1</sup>
Air	0	0	8	0
loe	0.9	-9	100 000-8	0-0.01
Fresh water	1	0	1 000 000	0.001
Seawater	1.03	0	0.2	5000
Topsoil	1.2-1.8	0.1-10	50-100	10-20
Coal	1.2-1.5	0-1000	500-2000	2-0.5
Dry sand	1.4-1.65	30-1000	1000-5000	1-0.02
Wet sand	1.95-2.05	30-1000	500-5000	0.2-2
Gravel	1.5-1.8	20-5000	100-1000	1-10
Clay	1.5-2.2	10-500	1-100	10-1000
Weathered	1.8-2.2	10-10 000	100-1000	1–10
- Patron Contraction				

**Εικόνα 1.11:** Στην τρίτη στήλη παρουσιάζεται το εύρος των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης διάφορων σχηματισμούς και άλλων στοιχείων (αέρας, νερό, πάγος) (Milsom & Erikson, 2011).

### 1.2 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΗΣ (RES2DINV)

Οι δισδιάστατες (2D) απεικονίσεις μιας γεωηλεκτρικής έρευνας χρησιμοποιούνται ευρέως, πλέον, για τη χαρτογράφηση περιοχών μέτριας έως σύνθετης υπεδαφικής δομής. Το λογισμικό RES2DINV του οίκου Geotomo, παρέχει την δυνατότητα κατάλληλης επεξεργασίας των δεδομένων υπαίθρου, προκειμένου να παραχθεί η επιθυμητή δισδιάστατη απεικόνιση. Χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος αντιστροφής ελάχιστων τετραγώνων Gauss-Newton (Sasaki, 1992) για την παραγωγή ενός 2D μοντέλου του ημιχώρου από τα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Στην εικόνα 1.12 παρουσιάζεται παράδειγμα διάταξης των ηλεκτροδίων και ακολουθίας μετρήσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μια έρευνα 2D γεωηλεκτρικής απεικόνισης.



**Εικόνα 1.12:** Ακολουθία μετρήσεων με σκοπό τη δημιουργία μιας "ψευδοτομή", χρησιμοποιώντας πολλαπλά ηλεκτρόδια (Geotomo Software, 2019).

Έχουν αναπτυχθεί πολλά διαφορετικά συστήματα πολλαπλών ηλεκτροδίων, χρησιμοποιώντας διαφορετικές διευθετήσεις των καλωδίων και τρόπους μέτρησης (*Loke*, 2018). Η έρευνα πραγματοποιείται σε ένα σύστημα στο οποίο τα ηλεκτρόδια είναι διατεταγμένα κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής, με ίσες, σταθερές αποστάσεις μεταξύ των. Παρ' όλα αυτά, το λογισμικό μπορεί να διαχειριστεί και δεδομένα με άνιση/ανομοιόμορφη απόσταση ηλεκτροδίων.

Εάν η περιοχή μελέτης παρουσιάσει τοπογραφική παραμόρφωση, το λογισμικό δύναται να χρησιμοποιεί ένα παραμορφωμένο πλέγμα (grid) πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε η επιφάνεια του πλέγματος να ταιριάζει με την τοπογραφία (*Loke, 2000*).

Το λογισμικό λειτουργεί σε έρευνες με διατάξεις ηλεκτροδίων τύπου Wenner, Schlumberger, πόλου-πόλου, διπόλου-διπόλου, πόλου-διπόλου και τετραγώνου. Εκτός από αυτές τις γνωστές συστοιχίες ηλεκτροδίων, το RES2DINV υποστηρίζει ακόμα και συμβατικές συστοιχίες με σχεδόν απεριόριστο αριθμό ηλεκτροδίων.

### 1.2.1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Η διαδικασία αντιστροφής που χρησιμοποιείται από το λογισμικό βασίζεται στη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (*deGroot-Hedlin and Constable, 1990, Sasaki, 1992, Loke, et al., 2003*). Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην παρακάτω μαθηματική έκφραση:

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_{k-1}$$

Όπου:

- $F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_z C_z^T C_z$
- *C<sub>x</sub>* = οριζόντια φίλτρα τραχύτητας
- C<sub>z</sub> = κατακόρυφα φίλτρα τραχύτητας
- J = Jacobian matrix of partial derivatives
- $J^T = transpose of J$
- $\lambda$  = συντελεστής απόσβεσης

- q = διάνυσμα
- g = δεδομένα ακατάλληλου
   διανύσματος
- α<sub>x</sub> = βάρος για οριζόντιο φίλτρο
- α<sub>z</sub> = βάρος για κατακόρυφο φίλτρο
- k = αριθμός επανάληψης

Ένα πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι τα  $\lambda$ ,  $C_x$  και  $C_z$  μπορούν να προσαρμοστούν με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να ταιριάζουν σε διαφορετικούς τύπους δεδομένων. Ξεκινώντας από ένα αρχικό μοντέλο, συνήθως από ένα ομοιογενές γήινο μοντέλο, το λογισμικό υπολογίζει την αλλαγή στις παραμέτρους του μοντέλου ( $\Delta q_k$ ), οι οποίες θα μειώσουν την διαφορά μεταξύ υπολογισθέντων και μετρούμενων τιμών φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης (g). Μια μέτρηση αυτής της διαφοράς δίνεται από το σφάλμα *root-mean-squared (RMS)* error. Ωστόσο, ορισμένες φορές, το μοντέλο με το χαμηλότερο δυνατό σφάλμα (RMS error) εμφανίζει μεγάλες και μη ρεαλιστικές μεταβολές στο μοντέλο των τιμών ειδικής αντίστασης και μπορεί να μην είναι το καλύτερο μοντέλο, με βάση την αναμενόμενη υπεδαφική δομή. Γενικότερα, η πιο συνετή προσέγγιση είναι να επιλεχθεί το μοντέλο κατά την επανάληψη μετά την οποία το σφάλμα RMS δεν αλλάζει σημαντικά. Αυτό, συνήθως, συμβαίνει μεταξύ της 3ης και της 6ης επανάληψης υπολογισμού.

### 1.2.2 Μορφή αρχείου δεδομένων (Data file format)

Στο λογισμικό δίνεται η επιλογή "**Read data file**" στο File menu options. Εκεί εμφανίζεται μια λίστα από αρχεία στον τρέχοντα φάκελο με επέκταση \*DAT (Εικόνα 1.13). Οι τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης δίδονται σε ένα αρχείο τύπου κειμένου (text file). Σε αυτή την περίπτωση, είναι δυνατή η χρήση οποιουδήποτε προγράμματος επεξεργασίας κειμένου, όπως το Windows Notepad, εάν το αρχείο δεδομένων δημιουργείται με μη αυτόματο τρόπο.

ୟେମ୍ଟ୍ର Input 2D resistivity data file		×
🔶 → 🔹 🕇 🛄 > This PC > Local Disk (Ε:) > ert > Τομές ξ	RT → T15_18S 🗸 Ö	Search T15_18S
Organise 👻 New folder		E • 🔟 💡
This PC	Date modified	Type Size
ip 3D Objects III5-18S-2019-08-28-202031.dat	28/08/2019 18:20	Grapher Worksheet 17 KB
Desktop		
Documents		
🕂 Downloads		
👌 Music		
E Pictures		
🚰 Videos		
监 OS (C:)		
Local Disk (E:)		
🚔 Local Disk (E:)		
250 MHz toixoi		
ABEM EriViz		
🔄 Android 🗸 🚽		
File name: * DAT	~	Data Files (*.dat)
		Onen
		Open Cancel

Εικόνα 1.13: Μορφή αρχείου δεδομένων.

Τα δεδομένα είναι διατεταγμένα με ένα ASCII οριοθετημένο τρόπο, στο οποίο χρησιμοποιείται κόμμα, κενό διάστημα ή LF/CR για τον διαχωρισμό διαφορετικών δεδομένων αριθμητικών στοιχείων. Εάν υπάρξει πρόβλημα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του λογισμικού, η αιτία μπορεί να είναι ότι τα δεδομένα εισόδου έχουν λάθος μορφή.

LANDFILL.DAT file	Comments	
LANDFILL SURVEY Name of survey line		
3.0	Unit electrode spacing	
1 Array type, 1 for Wenner		
334	Number of data points	
1	Type of x-location for data points, 1 for mid-point	
0	Flag for I.P. data, 0 for none (1 if present)	
4.50 3.0 84.9	First data point. For each data point, list the x-location,	
7.50 3.0 62.8	'a' electrode spacing, apparent resistivity value	
10.50 3.0 49.2	.50 3.0 49.2 Third data point	
13.50 3.0 41.3 Fourth data point		
Same format for other data points		
75.00 48.0 52.5	Last data point	
0,0,0,0,0	Ends with a few zeros. Flags for other options.	

Εικόνα 1.14: Παράδειγμα φακέλου δεδομένων διάταξης Wenner.

### 1.2.3 Μορφή δεδομένων βάσει ευρετηρίου (Index based data format)

Χρησιμοποιούνται το πολύ τρείς (3) παράμετροι για να καθοριστεί η διάταξη.

- Η πρώτη παράμετρος είναι η θέση του πρώτου ηλεκτροδίου ή το μεσαίο σημείο (midpoint) της διάταξης (Κέντρο Διάταξης).
- II. Η δεύτερη παράμετρος είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού P1 και
   P2 (δηλαδή η απόσταση α).
- III. Η τρίτη παράμετρος είναι η αναλογία της απόστασης του τρέχοντος ηλεκτροδίου από το πλησιέστερο ηλεκτρόδιο δυναμικού προς την απόσταση P1 P2 (η τιμή n) (Εικόνα 1.15).



**Εικόνα 1.15:** Παράμετροι που προσδιορίζουν την θέση και την απόσταση των ηλεκτροδίων σε διάταξη διπόλου-διπόλου (Geotomo Software, 2019).

Για την διάταξη Wenner, η οποία εφαρμόζεται στη συγκεκριμένη εργασία, θεωρείται ότι ο συντελεστής "n" είναι πάντα ίσος με 1, επομένως δεν χρειάζεται να αναφέρεται στο αρχείο δεδομένων. Η φαινόμενη ηλεκτρική ειδική αντίσταση υπολογίζεται από την μαθηματική έκφραση:

$$ho_{lpha} = 2\pi lpha s R/(s-lpha)$$
όπου  $s$  = ( $a^2$  +  $b^2$ )<sup>0.5</sup> και R η μετρούμενη ηλεκτρική αντίσταση.

Κάθε ερμηνεία χαρακτηρίζεται από δύο αποστάσεις. Η πρώτη απόσταση, *α*, είναι η απόσταση μεταξύ του τρέχοντος ζεύγους ηλεκτροδίων C1 – C2 και του ζεύγους δυναμικού P1 – P2. Η δεύτερη απόσταση, b, είναι η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων C1 και C2. Το πρόγραμμα έχει έναν περιορισμό. Η απόσταση μεταξύ του ζεύγους ηλεκτροδίων P1 – P2 πρέπει να είναι η ίδια όπως μεταξύ του ζεύγους C1 – C2. Στην περίπτωση της διάταξης Wenner ισχύει ότι b=3a.



Εικόνα 1.16: Διάταξη Wenner.

### 1.2.4 Δεδομένα τοπογραφίας για index based data format

Τα δεδομένα τοπογραφίας εισάγονται αμέσως μετά την κύρια τομή (ενότητα) με τις τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης. Στην εικόνα 1.17 το αρχείο GLADOE2.DAT.file αποτελεί παράδειγμα με τοπογραφικά δεδομένα. Αυτά τα δεδομένα τοποθετούνται αμέσως μετά από τα σημεία δεδομένων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Το πρώτο στοιχείο αποτελεί ένα *flag*, το οποίο υποδεικνύει ότι ο φάκελος περιλαμβάνει τοπογραφικά δεδομένα. Εάν δεν υπάρχουν, τότε η τιμή του *flag* θα είναι 0. Στην αντίθετη περίπτωση, η τιμή θα είναι 1 ή 2. Στην περίπτωση όπου δίδονται οι πραγματικές οριζόντιες και κατακόρυφες συντεταγμένες των δεδομένων τοπογραφίας κατά μήκος της γραμμής, τότε η τιμή θα είναι 1. Ακόμα κι αν οι πραγματικές οριζόντιες αποστάσεις δίνονται στην ενότητα

δεδομένων τοπογραφίας, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ο άξονας x (απόσταση) κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους στην τομή της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Το *index based* πάντα υποθέτει ότι οι αποστάσεις x στην κύρια τομή δεδομένων είναι επιφανειακές αποστάσεις ανεξάρτητα από τις αποστάσεις x που χρησιμοποιούνται στην τοπογραφική τομή.

Στις περισσότερες έρευνες, οι αποστάσεις των σημείων κατά μήκος της επιφάνειας του εδάφους, και όχι η πραγματική οριζόντια απόσταση, μετρούνται στην πραγματικότητα με μετροταινία ή χρησιμοποιώντας καλώδιο πάνω στο οποίο έχουν τοποθετηθεί ενδείξεις, όπου κάθε ένδειξη αντιστοιχεί στο αντίστοιχο μέτρο, για τον άμεσο και γρήγορο υπολογισμό της απόστασης στην ύπαιθρο. Σε αυτή την περίπτωση, η τιμή του topography data flag θα είναι 2. Αυτό ακολουθείται από τα σημεία των τοπογραφικών δεδομένων.

Δεν είναι απαραίτητο να υπολογισθεί το υψόμετρο για κάθε ηλεκτρόδιο. Ο μέγιστος αριθμός σημείων τοπογραφικών δεδομένων είναι 4000. Για κάθε σημείο, η οριζόντια θέση και το υψόμετρο εισάγονται στο αρχείο δεδομένων. Μετά το τελευταίο σημείο των δεδομένων τοπογραφίας, δίδεται ο αριθμός του τοπογραφικού σημείου με το πρώτο ηλεκτρόδιο. Είναι πολύ σημαντικό να συμπεριλαμβάνεται και το υψόμετρο του πρώτου ηλεκτροδίου. Εάν δεν μετρήθηκε στο πεδίο, είναι δυνατό να εκτιμηθεί από τα υψόμετρα των γειτονικών σημείων. Συνήθως, το πρώτο σημείο της τοπογραφίας αντιστοιχεί στο πρώτο ηλεκτρόδιο και αντίστοιχα το τελευταίο σημείο στο τελευταίο ηλεκτρόδιο. Συμπεριλαμβάνοντας αυτά τα δύο σημεία, αποφεύγονται σφάλματα στη μορφή των δεδομένων.

GLADOE2.DAT file	Comments
237 2 39.207	Last four data points
203 2 14.546	with x-location of the data point, electrode spacing
227 2 31.793	and measured apparent resistivity values
233 2 30.285	
2	Topography data flag. If no topography data, place 0 here.
26	Number of topography data points
-100 33	Horizontal and vertical coordinates of 1st,
-40 34.5	2nd topography data point
-20 35.0	This is followed by similar data for
0 35.209	the remaining topography data points
2000 - C	
300 33	Last topography data point
2	The topography data point number with the first electrode
0,0,0,0,0	A few zeros to end the file

Εικόνα 1.17: Παράδειγμα ενός τοπογραφικού index based data file.

### 1.2.5 Επεξεργασία δεδομένων

Για την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέχθηκαν στην ύπαιθρο, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής λειτουργίες του RES2DINV:

- Edit
  - Exterminate bad datum points
  - Model Discretization
    - Use model refinement
- Inversion Methods and settings
  - Select robust inversion

- Inversion Damping Parameters
  - Vertical/Horizontal flatness filter ratio
- Mesh parameters
  - Mesh refinement
- Least-squares inversion
- Display sections
  - > Display data and model sections

#### Edit

Αυτή η ενότητα καλύπτει μερικές επιλογές επεξεργασίας δεδομένων για την απομάκρυνση ανεπιθύμητων data points, περικοπή πολύ μεγάλων προφίλ, αντιστροφή της κατεύθυνσης ενός συνόλου δεδομένων και για την αλλαγή θέσης έναρξης της γραμμής.

#### Exterminate bad data points

Με αυτή την επιλογή, οι τιμές φαινόμενης ειδική αντίστασης εμφανίζονται με την μορφή προφίλ για το καθένα επίπεδο δεδομένων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για δεδομένα τα οποία συλλέγονται με συμβατικές συστοιχίες.



Εικόνα 1.18: Αποτέλεσμα εντολής " Exterminate bad datum points".

Ο κύριος σκοπός αυτής της επιλογής στο λογισμικό είναι να αφαιρέσει σημεία με τιμές αντιστάσεων σαφώς λανθασμένες. Τέτοια "bad points" μπορεί να οφείλονται στην αποτυχία λειτουργίας ενός ηλεκτροδίου, στην επαφή του ηλεκτροδίου με το έδαφος λόγω ξηρότητας, ή σε βραχυκύκλωμα των καλωδίων λόγω πολύ υγρών συνθηκών στο έδαφος. Συνήθως, οι τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης σε αυτά τα σημεία είναι διακριτά πολύ μεγάλες ή πολύ μικρές συγκριτικά με γειτονικά data points. Ο καλύτερος τρόπος διαχείρισης τέτοιων σημείων είναι να αφαιρεθούν, έτσι ώστε να μην επηρεάσουν το μοντέλο.



Εικόνα 1.19: Παράδειγμα παράβλεψης των μη αποδεκτών σημείων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. + Μετρούμενα δεδομένα (Measured data), + Αφαιρούμενα δεδομένα (Removed data)

#### Model Discretization

Αυτή η επιλογή επιτρέπει την αλλαγή του τρόπου με τον οποίο το λογισμικό υποδιαιρεί τον ημιχώρο σε κελιά, το οποίο χρησιμοποιείται ως μοντέλο αντιστροφής.

> <u>Use model refinement</u>

Το λογιμσικό RES2DINV προεπιλέγει ένα μοντέλο στο οποίο το πλάτος του εσωτερικού (*interior model blocks*) είναι το ίδιο με το διάστημα των ηλεκτροδίων. Σε περιπτώσεις με μεγάλες παραλλαγές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην επιφάνεια του εδάφους μπορούν να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας στενότερα μοντέλα κελιών ή κόμβων. Υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι μείωσης του πάχους του μοντέλου κελιών. Ο πρώτος είναι χρησιμοποιώντας την επιλογή "Use model refinement" από το μενού "Inversion".



Εικόνα 1.20: Πρώτος πιθανός τρόπος μείωσης του πάχους του μοντέλου κελιών.

Επιτρέπεται, επίσης, η επιλογή κελιών μοντέλου με πλάτος τη μισή απόσταση των ηλεκτροδίων. Αφού οριστεί αυτή η επιλογή, πρέπει να διαβαστεί το αρχείο δεδομένων. Στη συνέχεια, το λογισμικό θα μειώσει την απόσταση των ηλεκτροδίων που χρησιμοποιεί κατά το ήμισυ από αυτό που γίνεται στο αρχείο δεδομένων.

Η δεύτερη μέθοδος αποτελεί την απευθείας τροποποίηση του αρχείου δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα επεξεργασίας κειμένου.



Εικόνα 1.21: Παράδειγμα μοντέλων αντιστροφής χρησιμοποιώντας τα μισού μεγέθους model blocks.

#### Inversion Methods and settings

Αυτή η σειρά επιλογών επιτρέπει την επιλογή του τύπου κανονικής μεθόδου αντιστροφής που θα χρησιμοποιηθεί.

#### > <u>Select robust inversion</u>

Η συμβατική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων έχει τη δυνατότητα να ελαχιστοποιήσει το τετράγωνο της διαφοράς μεταξύ των μετρημένων και υπολογισθέντων τιμών φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης. Αυτή η μέθοδος δίνει λογικά αποτελέσματα εάν τα δεδομένα περιέχουν τυχαίο ή «Gaussian» θόρυβο. Ωστόσο, εάν το σύνολο των δεδομένων περιέχει "outlier" data points (ο θόρυβος προέρχεται από μη τυχαίες πηγές, όπως αβλεψίες ή προβλήματα στον εξοπλισμό), η μέθοδος αυτή είναι λιγότερο ικανοποιητική. Τέτοια σημεία data points θα μπορούσαν να έχουν μεγάλη επιρροή στο προκύπτον μοντέλο αντιστροφής.

Υπάρχει ένας παράγοντας *cut-off* (αποκοπής), ο οποίος ελέγχει το βαθμό στον οποίο χρησιμοποιείται αυτός ο ισχυρός περιορισμός δεδομένων. Εάν χρησιμοποιείται η τιμή 0,05, σημαίνει ότι η επίδραση των *data points*, των οποίων οι διαφορές των μετρημένων και υπολογισθέντων τιμών φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι πολύ μεγαλύτερες από 5%, θα μειωθεί σημαντικά.



Εικόνα 1.22: Select robust inversion.

Η συμβατική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων περιορισμένης ομαλότητας (deGroot-Hedlin and Constable, 1990) επιχειρεί, επίσης, να ελαχιστοποιήσει το "τετράγωνο" (τετραγωνισμό) των αλλαγών στις τιμές φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης του μοντέλου. Αυτό θα παράγει ένα μοντέλο με ομαλή διακύμανση στις τιμές της αντίστασης. Ένα τέτοιο μοντέλο είναι κατάλληλο εκεί όπου η επιφανειακή αντίσταση αλλάζει επίσης ομαλά (Loke, et. al., 2003).

Ωστόσο, εάν τα υποεπιφανειακά στρώματα (σώματα) έχουν απότομα όρια, όπως η διεπαφή εδάφους-υποστρώματος ή μεγάλα ομοιογενή σώματα, η συμβατική μέθοδος ομαλότητας-περιορισμού ελάχιστων τετραγώνων τείνει να τα ομαλύνει. Εάν χρησιμοποιείται ισχυρή μέθοδος περιορισμένης αντιστροφής μοντέλου, το πρόγραμμα θα προσπαθήσει να ελαχιστοποιήσει τις αλλαγές στις τιμές της ειδικής αντίστασης. Αυτός ο περιορισμός τείνει να παράγει μοντέλα με απότομες διεπαφές μεταξύ διαφορετικών περιοχών με διαφορετικές τιμές ειδικής αντίστασης, αλλά σε κάθε περιοχή η τιμή ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι σχεδόν συνεχής. Αυτό μπορεί να είναι κατάλληλο για περιοχές όπου υπάρχει μια τέτοια γεωλογική κατάσταση, όπως η διεπαφή εδάφουςμητρικού πετρώματος.

#### **Inversion Damping Parameters**

Καλύπτει μια λίστα από επιλογές, οι οποίες ελέγχουν τον συντελεστή απόσβεσης, λ, της μαθηματικής έκφρασης (1). Μία από τις επιλογές είναι η Vertical/Horizontal flatness filter ratio.

#### Vertical/Horizontal flatness filter ratio

Είναι δυνατή η επιλογή της αναλογίας του συντελεστή απόσβεσης για το vertical flatness filter (fz) στον horizontal flatness filter (fx). Εξ ορισμού ο ίδιος συντελεστής απόσβεσης χρησιμοποιείται και για τα δύο. Ωστόσο, εάν οι ανωμαλίες στην "ψευδοτομή" επιμηκύνονται κάθετα, είναι δυνατό το πρόγραμμα να παράγει μοντέλα, τα οποία είναι επιμηκυμένα κάθετα, επιλέγοντας μια υψηλότερη τιμή για την αναλογία vertical προς

horizontal flatness filter. Για ανωμαλίες οι οποίες είναι επιμηκυμένες οριζόντια, η καλύτερη επιλογή είναι μια μικρότερη τιμή (π.χ. 0,5).

choose ventical	-to-horizontal	flatness	filter ratio	
he present s	etting is :-			
latio of the ve	ertical/horizon	tal filter	r weight is 1.00.	
are elongated optimise the in using a higher However, if the oseudosection smaller weigh	in the vertical nversion parar weight (for eg e main anoma n are elongate t (for eg. 0.5)	direction meters g. 2.0) dies in ed horiz for the	for vertical structur for vertical structur for vertical flatness the apparent resist contally, you can ch vertical filter.	e to es by filter. ivity noose a
JIGGEG ONTOF I	new ratio of ve	encalt	o norizontal filter w	eight.
1.5				

Εικόνα 1.23: Παράδειγμα εφαρμογής Vertical/Horizontal flatness filter ratio.

### Mesh parameters

Αυτή η επιλογή καθορίζει τις παραμέτρους, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων. Χρησιμεύουν στον υπολογισμό των τιμών φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

### Mesh refinement

File

Για να επιτευχθεί ο επιθυμητός υπολογισμός, εμφανίζεται το παρακάτω παράθυρο, στο οποίο γίνονται οι απαραίτητες επιλογές.



#### Least-squares inversion

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αντιστροφής, μετά από κάθε μία επανάληψη, το λογισμικό θα εμφανίσει το αντίστροφο *model section* στην οθόνη. Εάν χρησιμοποιείται ένα συμβατικό array δεδομένων, θα εμφανιστούν οι μετρημένες και υπολογισθείσες "ψευδοτομές" της φαινόμενης ειδικής αντίστασης (1<sup>n</sup> και 2<sup>n</sup> τομή της Εικόνας 1.25).



**Εικόνα 1.25:** Model section και RMS.

Το σφάλμα που αναγράφεται κατά τη διάρκεια την επεξεργασίας (π.χ. error = 1.46%) αφορά τις δύο πρώτες τομές, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 1. 25. Δηλαδή, εμφανίζεται με τη μορφή ποσοστού η διαφορά μεταξύ της *Measured* (1<sup>η</sup> τομή) και της *Calculated* (2<sup>η</sup> τομή) *Apparent Resistivity Pseudosections*.

Η τιμή του σφάλματος υπολογισμού (error) θα πρέπει να είναι <2. Αν χρειαστεί αλλαγή, στον πίνακα που εμφανίζεται (Enter Additional Iterations), πληκτρολογείται η τιμή 2 ή 1. Αν το σφάλμα <2, τότε αναγράφεται η τιμή 0. Σε περίπτωση που η τιμή του δεν μειώνεται, τότε το σφάλμα επιτρέπεται να είναι < 5.

### **Display sections**

Καλύπτει πολλές επιλογές για την απεικόνιση του model section.

### Display data and model sections

Με αυτή την επιλογή γίνεται δυνατός ο σχεδιασμός του μοντέλου και της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης στην οθόνη. Ζητείται ο αριθμός επανάληψης και ο τύπος των *contour* 

*intervals* (*ισοδιάσταση ισότιμων καμπυλών*). Θα εμφανιστεί το παράθυρο της εικόνας 1.26 για τα δεδομένα ειδικής αντίστασης των οποίων οι τιμές είναι θετικές.

File	Display sections	Change display settings	Edit data	Print	Exit	
Maxi Minii	imum value 783 mum value 7.76	2.40 3				
	Select Ty	pe of Contour Intervals				
	Set Re	sistivity Contour Values				
	Choos	e the type of contour sp	acing you v	want to	use:-	
	O L	inear contour intervals				
	O L	ogarithmic contour inter	vals			
	ēι	Jser defined linear cont	our interval	s		
	0.	Jser defined logarithmic	contour in	tervals		
	0.	Jser defined contour inte	ervals			
	O F	Read contour values from	m file			
		ОК	Ca	ncel		

Εικόνα 1.26: Επεξεργασία των contours.

Η επιλογή 'User defined linear contour intervals' θα εμφανίσει το παράθυρο της εικόνας 1.27.

Θα πρέπει να οριστεί από τον χειριστή η τιμή της μικρότερης ισότιμης καμπύλης (Enter Minimum Contour Value) και του ισοδιαστήματος αυτών, έτσι ώστε να καλύπτει το εύρος των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που έχουν υπολογισθεί. Στο παράδειγμα της εικόνας 1.27 οι τιμές κυμαίνονται από 10,2 έως 1.555,2 Ohm\*m.

Linear contour intervals	
Minimum ∨alue is 10.2 Maximum ∨alue is 1555.2	
Enter Minimum Contour Value: 1 Enter Contour Spacing Value:	<b>Εικόνα 1.27:</b> Καθορισμός του τρόπου αναπαράστασης των ισότιμων καμπύλων ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης.
75 OK Cancel	

Στόχος της μεθόδου βελτιστοποίησης είναι να μειώσει τη διαφορά μεταξύ των «**υπολογιζόμενων**» και «**μετρούμενων**» τιμών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, προσαρμόζοντας την ειδική αντίσταση των ορθογώνιων τμημάτων του μοντέλου. Ένα μέτρο της διαφοράς αυτής εκφράζει η *ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος*.

Θα πρέπει το μοντέλο να έχει όσο το δυνατό μικρότερο σφάλμα. Ωστόσο, ανάλογα με τα αναμενόμενα αποτελέσματα, οι μικρότερες τιμές του σφάλματος σε κάποιες περιπτώσεις

μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες και μη ρεαλιστικές διακυμάνσεις στις τιμές της ειδικής αντίστασης.



**Εικόνα 1.28:** Παράδειγμα επεξεργασίας δεδομένων γεωηλεκτρικής τομογραφίας με το λογισμικό *RES2DINV.* 

Στην εικόνα 1.28 παρουσιάζονται

- [1] *στην πρώτη τομή,* η τομή κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης όπως αυτή μετρήθηκε στο ύπαιθρο, συναρτήσει του βάθους,
- [2] στο μέσο, η τομή κατανομής της υπολογισθείσας φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης σε σχέση με το βάθος, και
- [3] στην τελευταία τομή, η τομή κατανομής της πραγματικής ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους.

### 1.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗΣ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗΣ (Voxler)

Τα δεδομένα που παρήχθησαν από το RES2DINV για κάθε δισδιάστατο προφίλ, συγκεντρώθηκαν και επεξεργάστηκαν προκειμένου να παραχθεί η τρισδιάστατη απεικόνισή τους. Για την εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Voxler της *Golden Software*.

Το λογισμικό Voxler παρέχει διάφορες δυνατότητες. Κάποιες από αυτές είναι οι εξής:

#### Δημιουργία 3D μοντέλων

Το λογισμικό μετατρέπει τα δεδομένα σε ολοκληρωμένα μοντέλα (αναπαραστάσεις), τα οποία διευκολύνουν την λήψη συμπερασμάτων και αποφάσεων, δίνοντας βασικές εικονο-πληροφορίες για το πεδίο ενδιαφέροντος.

#### Οπτικοποίηση δεδομένων

Τα δεδομένα μοντελοποιούνται με σαφήνεια σε κάθε διάσταση. Με τα εργαλεία του λογισμικού είναι εύκολη η αποτύπωση δεδομένων πολλών συνιστωσών για γεωλογικές και γεωφυσικές αναπαραστάσεις.

#### ✓ Ανάλυση δεδομένων

Ως μια 3D αναπαράσταση γίνεται να ερευνηθεί το μοντέλο από οποιαδήποτε γωνία, έτσι ώστε να εντοπιστούν ανωμαλίες ή να αναλυθούν λεπτομερώς τα δεδομένα, αναδεικνύοντας πολύπλοκες εικόνες με εύκολο και κατανοητό τρόπο.

### 1.3.1 Το περιβάλλον του Voxler

Υπάρχουν δύο τύποι παραθύρων στο Voxler, το **Project View** και το **Worksheet View** (Εικόνα 1.29).



**Εικόνα 1.29:** Αριστερά **Project View** (ενιαίο κόκκινο πλαίσιο) και δεξιά **Worksheet View** (κόκκινο πλαίσιο με διακεκομμένη γραμμή).

Το **Project View** παρουσιάζει όλα τα (γραφικά) στοιχεία του *project*. Σε αυτό παρέχεται η δυνατότητα της σχεδίασης και της δημιουργίας του *project*.

Πολλά από τα graphic modules ξεκινούν από ένα <u>data file</u>, το οποίο μπορεί να είναι ένα αρχείο <u>\*.xls</u> ή ένα αρχείο <u>\*.dat</u>. Για να εμφανιστεί το αρχείο στο λογισμικό επιλέγεται το αρχείο, το οποίο βρίσκεται στο Network Manager (Εικόνα 1.29).

Στο Property Manager, το Edit Worksheet χρησιμεύει για να εισαχθεί το αρχείο στο λογισμικό Voxler. Διαφορετικά, μέσω του μενού File και επιλέγοντας το Open, είναι δυνατή η εύρεση του αρχείου ενδιαφέροντος. Έτσι εμφανίζονται τα δεδομένα στο Worksheet View.

Στο Worksheet View παρουσιάζονται τα δεδομένα του project και είναι δυνατή η επεξεργασία τους (Εικόνα 1.29).

Το **Project View** στο λογισμικό Voxler χωρίζεται σε τρία (3) διαφορετικά managers και εμφανίζονται στο αριστερό τμήμα της οθόνης. Αυτά είναι (Εικόνα 1.29 και Εικόνα 1.30)

- i. το *Module Manager* (κόκκινο πλαίσιο πάνω αριστερά στην εικόνα 1.30),
- ii. το Network Manager (κόκκινο πλαίσιο πάνω δεξιά στην εικόνα 1.30) και
- iii. το **Property Manager** (κόκκινο πλαίσιο κάτω δεξιά στην εικόνα 1.30).

Το **Module Manager** εμφανίζει τα modules που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να συνδεθούν με το αρχείο που έχει επιλεχθεί για επεξεργασία. Περιλαμβάνει ένα σύνολο εντολών μέσα σε φακέλους (*Εικόνα 1.30*):

- <u>Samples:</u> Παραδείγματα που μπορούν να εισαχθούν στο Voxler.
- <u>Computational</u>: Περιλαμβάνει εργαλεία, τα οποία μπορούν να τροποποιήσουν τα δεδομένα.
- Data Source: Περιλαμβάνει εργαλεία για την προσθήκη πλέγματος, το οποίο έχει δημιουργηθεί από τον χρήστη, και δεν βρίσκεται σε κάποιον άλλο φάκελο. Είναι ο ίδιος τύπος εργαλείου που έχει δημιουργηθεί από έναν εισαγόμενο φάκελο.
- <u>General Modules</u>: Περιλαμβάνει εργαλεία, τα οποία παραθέτουν πληροφορίες για άλλα εργαλεία (info), ή μπορούν να αλλάξουν το φωτισμό (light) της τρισδιάστατης απεικόνισης που παρουσιάζεται στο περιβάλλον του Project Manager.
- <u>Graphics Output</u>: Περιλαμβάνει εργαλεία, τα οποία προσθέτουν τα επιθυμητά γραφικά στην εικόνα.
- <u>Well:</u> Περιλαμβάνει τα δεδομένα για γεωτρήσεις.

and the second	Ne	twork Manager		4	×
-		Viewer Window O	5		^
Import     Samples     Samples     Computational     Data Source     General Modules     Graphics Output     Well		Dissolved Solids.x	Sx - Points OD Transform OD C Transform OD C Obliquelman C Obliquelman C Obliquelman C Obliquelman C Obliquelman C Obliquelman C Obliquelman	ge Q	
	<			>	
	Pro	operty Manager			×
		Auto Update	Update Now		2
	G	eneral			-
		Dissolved Solids.x	lsx - Points (id:8)		1
	-	Dissolved Solids.x	<b>lsx - Points (id:8)</b> C:\Program Files∖Golden Software\Voxler		,
	-	Dissolved Solids.x File path Worksheet	<b>Isx - Points (id:8)</b> C:\Program Files\Golden Software\Voxler Edit Worksheet		,
	-	Dissolved Solids.x File path Worksheet Output	<b>Isx - Points (id:8)</b> C:\Program Files\Golden Software\Voxler Edit Worksheet		1
		Dissolved Solids.x File path Worksheet Output Output type	<b>Isx - Points (id:8)</b> C:\Program Files\Golden Software\Voxler Edit Worksheet Points		,
		Dissolved Solids.» File path Worksheet Output Output type Worksheet Colum	Isx - Points (id:8) C:\Program Files\Golden Software\Voxler Edit Worksheet Points		,
		Dissolved Solids.x File path Worksheet Output Output type Worksheet Colun X coordinates	Isx - Points (id:8) C:\Program Files\Golden Software\Voxler Edit Worksheet Points Ins Column A	: >	
		Dissolved Solidsx File path Worksheet Output Output type Worksheet Colun X coordinates Y coordinates	Isx - Points (id:8) C:\Program Files\Golden Software\Voxler Edit Worksheet Points ns Column A Column B	:	
		Dissolved Solids File path Worksheet Output Output type Worksheet Colun X coordinates Y coordinates Z coordinates	Isx - Points (id:8) C:\Program Files\Golden Software\Voxler Edit Worksheet Points Column A Column B Column C	: > > >	
		Dissolved Solids File path Worksheet Output Output type Worksheet Colum X coordinates Y coordinates Z coordinates E Components	Isx - Points (id:8) C:\Program Files\Golden Software\Voxler Edit Worksheet Points Column A Column B Column C	: > > >	
	-	Dissolved Solids File path Worksheet Output Output type Worksheet Colun X coordinates Y coordinates Z coordinates Z coordinates Components Component	Isx - Points (id:8) C:\Program Files\Golden Software\Voxler Edit Worksheet Points Column A Column B Column C 1	•	

Εικόνα 1.30: Το Project View στο λογισμικό Voxler, στο οποίο απεικονίζονται στην αριστερή στήλη το Module Manager, στη δεξιά στήλη το Network Manager και στην κάτω δεξιά στήλη Property Manager.

Με την επιλογή ενός εργαλείου από το *Module Manager*, εμφανίζεται απευθείας στο *Network Manager*. Στην περίπτωση που προστεθεί καινούριο module, θα συνδεθούν αυτά τα δύο αυτόματα, αρκεί να είναι συμβατά.

Στο **Network Manager** παρουσιάζονται όλα τα δεδομένα και εργαλεία που έχουν εισαχθεί στο Voxler. Κάθε εργαλείο εμφανίζει το όνομά του, ένα check box, έναν δείκτη LED (πράσινη κουκίδα) καθώς και input – output connection pads (Εικόνα 1.31). Κάθε εργαλείο συνδέεται με άλλα μέσω μιας γραμμής σύνδεσης.



**Εικόνα 1.31:** Από αριστερά προς τα δεξιά στο κόκκινο πλαίσιο. Input connection pads, check box, όνομα, δείκτης LED, output connection pads.

To check box δείχνει αν το εργαλείο είναι ορατό στο *Worksheet View*. Ο δείκτης *LED* δηλώνει εάν το *module* χρειάζεται ενημέρωση ή όχι. Όταν το χρώμα του είναι πράσινο, το εργαλείο είναι ενημερωμένο, ενώ εάν είναι κίτρινο σημαίνει ότι χρειάζεται ενημέρωση.

Οι ιδιότητες κάθε εργαλείου εμφανίζονται στο **Property Manager**. Όσο το check box δίπλα από το Auto update (Εικόνα 1.30) στο επάνω μέρος του Property Manager είναι επιλεγμένο, το viewer window (παράθυρο προγράμματος προβολής) θα ενημερωθεί αυτόματα για να εμφανίσει τις αλλαγές που έγιναν στο property manager.

Στο Viewer Window εμφανίζονται όλα τα εργαλεία που έχουν επιλεχθεί στο Network Manager. Είναι δυνατή η μεγέθυνση, η σμίκρυνση και η περιστροφή του μοντέλου για την παρατήρησή του από άλλη γωνία.

### 1.3.2 Εκκίνηση του λογισμικού Voxler

Εκκινώντας το λογισμικό Voxler, προκειμένου να εισαχθούν (Import) τα δεδομένα για επεξεργασία, εμφανίζεται αρχικά το παράθυρο "Welcome to Voxler" (Εικόνα 1.32). Ως δεύτερη επιλογή, υφίσταται η εντολή Import, μέσω του File στο μενού, ή κάνοντας δεξί κλικ στο χώρο του Network Manager, Import για να επιλεγεί το επιθυμητό αρχείο.



Εικόνα 1.32: Παράθυρο "Welcome to Voxler".

### 1.3.3 Exclusion Filter

Στον φάκελο Computational του Module Manager υπάρχει το εργαλείο Exclusion Filter Εικόνα 1.33.



Εικόνα 1.33: Φάκελος Computational.

Το εργαλείο αυτό εξαιρεί σημεία δεδομένων σύμφωνα με μια συνάρτηση *Boolean* που καθορίζεται από τον χρήστη. Η συνάρτηση *Boolean* περιλαμβάνει τους ακόλουθους χειριστές/δείκτες (*operators*):

- Λογικοί δείκτες (*AND, OR, XOR, NOT*)
- Δείκτες σύγκρισης (=, <>, <, >, <=, >=)
- *IF condition, true\_value, false\_value*

Η ιδιότητα *Input* δείχνει την πηγή στην οποία είναι συνδεδεμένη η λειτουργική μονάδα. Αυτή η επιλογή δεν μπορεί να αλλάξει από το *Property Manager*, αλλά στο *Network Manager*, διαφοροποιώντας την είσοδο της λειτουργικής μονάδας.

Η επιλογή *Filter string* περιλαμβάνει την έκφραση αποκλεισμού *Boolean*. Οι προκαθορισμένες μεταβλητές είναι X,Y,Z και C. Γνωρίζοντας ότι αποτελεί φίλτρο αποκλεισμού, τα σημεία που ταιριάζουν στην εντολή εξαιρούνται και αφαιρούνται από την έξοδο (*output*). Όταν χρησιμοποιείτε το *AND* στο φίλτρο, τα σημεία αποκλείονται μόνο εάν πληρούν και τις δύο προϋποθέσεις, ενώ όταν χρησιμοποιείτε το *OR* στο φίλτρο, τα σημεία αποκλείονται μόνο εάν πληρούν μια από τις 2 προϋποθέσεις.

Για παράδειγμα, το φίλτρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον αποκλεισμό ενός εύρους συγκεκριμένων τιμών από μια γραφική παράσταση διασποράς (scatter plot). To filter string X<10 OR Y>=20 αποκλείει τα σημεία με συντεταγμένη Χ μικρότερη του 10 ή με συντεταγμένη Υ μεγαλύτερη ή ίση με 20. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον αποκλεισμό δεδομένων πάνω ή κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή. Το filter string Z<0 αποκλείει όλα τα σημεία με συντεταγμένη Ζ μικρότερη Ζ

### 1.3.4 Scatter Plot

Στον φάκελο Graphics Output του Module Manager δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής ενός Scatter plot **Εικόνα 1.34**.



Εικόνα 1.34: Φάκελος Graphics Output.

To Scatter plot εμφανίζει ένα σύνολο συμβόλων σε κάθε σημείο ή σε σύνολο σημείων, ή σε κάθε κόμβο ενός πλέγματος. Τα σύμβολα είναι ευθυγραμμισμένα στην οθόνη και δεν κλιμακώνονται ή "γέρνουν" καθώς η κάμερα αλλάζει. Ωστόσο, οι θέσεις των συμβόλων διατηρούνται σε τρείς διαστάσεις (Εικόνα 1.35).



**Εικόνα 1.35:** Το σύμβολο "Diamond Line", το οποίο παρουσιάζεται παραπάνω, είναι ένα από τους τύπους συμβόλων που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο Scatter Plot.

Η ενότητα Scatter Plot περιλαμβάνει τις ακόλουθες καρτέλες στο Property Manager:

- > General
- Labels
- > Legend

Αναλυτικότερα:

General (Εικόνα 1.36)

Auto Update Updat	te Now	?
General Labels Legend		
ScatterPlot (id:3)		
Input	3-comp-1000-vals.csv	
Density	100% (all points)	~
Classification		
Method	Fixed	~
🗉 Rendering		
Geometric quality	1 =	
Symbol	Square fast	~
Size	0.20	
Show lines		
Line width (points)	1	
Color method	By RGB	~
Color range	0 - 255 (byte)	~
Red color component	Column G: c4	4
Green color component	Column H: c5	~
Blue color component	Column I: c6	~



Input: Εμφανίζει την πηγή με την οποία ενώνεται η ενότητα (module).

- Density: Καθορίζει τον αριθμό των σημείων που θα εισαχθούν, ως ποσοστό του συνολικού αριθμού των σημείων στο αρχείο δεδομένων. Πιθανές επιλογές είναι 100% (all points), 50% (every other point), 33% (every 3rd point), 25% (every 4th point), 20% (every 5th point), 10% (every 10th point), 5% (every 20th point) και 1% (every 10th point).
- Classification: Ελέγχει τη μέθοδο ταξινόμησης και εμφανίζει πληροφορίες σχετικά με τις κλάσεις όταν από Fixed γίνει Binning.
- Rendering: Περιλαμβάνει επιλογές για την απεικόνιση του scatter plot. Κάποια από αυτά είναι το Geometric Quality, το οποίο ελέγχει την τρισδιάστατη μορφή του μοντέλου, το Symbol, στο οποίο δίνεται η δυνατότητα επιλογής του συμβόλου, το Size, για τον έλεγχο του μεγέθους των συμβόλων και το Color Method, το οποίο καθορίζει το χρώμα της ετικέτας και της γραμμής ετικέτας.
  - Labels (Εικόνα 1.37)

Show labels: Εμφανίζει τις ετικέτες σε κάθε σημείο του scatter plot.

Label Field: Αποτελεί την τιμή η οποία εμφανίζεται ως ετικέτα στο scatter plot. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι Χ, Υ, Ζ, ΧΥΖ, καθώς και όλες οι στήλες ετικετών, οι οποίες καθορίζονται στις ιδιότητες του Data Source. Εάν έχουν επιλεχθεί πολλές στήλες ετικετών στις ιδιότητες του Data Source, κάθε στήλη θα αναφέρεται ως ξεχωριστή επιλογή.

Property Manager		×	
✓ Auto Update Update	e Now	?	
General Labels Legend			
- Labels		2	
Show labels	•		
Label field	Column G: c4	~	
Density	100% (all labels)	~	
X offset	0		
Y offset	0		
Z offset	0		- /
Show leader lines			<b>Εικόνα 1.37:</b> Lab
Leader line width (points)	1 —		
Label Format	d.ddddd		
🗆 Font			
Font	Arial	~	
Size (points)	12		
Justification	Left	~	
Color method	Fixed	*	
Color	Black		

- Density: Καθορίζει τον αριθμό των ετικετών που θα εισαχθούν, ως ποσοστό του συνολικού αριθμού των σημείων που θα απεικονισθούν στο Scatter Plot.
- *X, Y, Z Offset:* Μετακινεί τη θέση της ετικέτας μακριά από το σύμβολο κατά τον άξονα Χ, Υ, Ζ, αντίστοιχα.

Font: Ορίζει την γραμματοσειρά που θα χρησιμοποιηθεί για την σύνταξη των ετικετών.

Legend (Εικόνα 1.38 και Εικόνα 1.39)



**Εικόνα 1.38**: Παράδειγμα Υπομνήματος, το οποίο είναι οριζόντιο, με καθορισμένο πάχος και μήκος, τίτλο και γκρι φόντο.

Το υπόμνημα επισημαίνει τα δεδομένα ανά χρώμα, μοτίβο ή σύμβολο μιας γραφικής παράστασης. Υπάρχει η δυνατότητα αλλαγής της θέσης του, έτσι ώστε να παρουσιάζεται καθαρά, χωρίς να καλύπτει τα υπόλοιπα δεδομένα, του πάχους, του μήκους και του τίτλου που τον χαρακτηρίζει.

✔ Auto Update U	pdate Now ?
General Properties	
🗉 Legend	///
Show legend	
Orientation	Horizontal
X position	0.3657407463
Y position	0.03999999911
Width (points)	20
Length (points)	200
🗉 Title	
Title	Total Dissolved Solids (mi
Size (points)	14.38888931
E Labels	
Number of labels	5
Size (points)	8
Use custom labels	
Custom labels	
🗄 Label Format	d.dddd
🗉 Font	
Font	Arial 🗸
Antialias text	
Background rectangl	le 🗌
Foreground color	White
Background color	White

**Εικόνα 1.39:** Legend.

#### 1.3.5 Axes και BoundingBox

Στον φάκελο Graphics Output του Module Manager (βλ. Εικόνα 1.34) δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής αξόνων και ενός BoundingBox, το οποίο οριοθετεί τα δεδομένα.

Axes (Εικόνα 1.40)

Δημιουργείται ένα σετ αξόνων. Οι άξονες συνδέονται με ένα σετ σημείων εισόδου ή με πλέγμα. Πλέγμα μπορεί να εμφανιστεί και μεταξύ δύο αξόνων. Από προεπιλογή, ο άξονας Χ είναι κόκκινος, ο Υ πράσινος και ο Ζ μπλε. Φυσικά, τα χρώματα, το μέγεθος, οι ετικέτες και οι βαθμίδες μπορούν να τροποποιηθούν, μέσω του *Property Manager*.



Εικόνα 1.40: Άξονες Χ (κόκκινος, Υ (πράσινος) και Ζ (μπλε).

#### BoundingBox (Εικόνα 1.41)

Σχηματίζεται ένα ορθογώνιο παραλληλόγραμμο με οριζόντιες και κάθετες πλευρές, οι οποίες οριοθετούν τα δεδομένα. Χρησιμεύει στην εμφάνιση της έκτασης αυτών.



**Εικόνα 1.41:** Δημιουργείται ένα πλαίσιο, το οποίο εσωκλείει ολόκληρη την περιοχή γύρω από τα επιλεγμένα δεδομένα.

Και στο πλαίσιο οριοθέτησης είναι δυνατή η επεξεργασία του χρώματος, του πάχους της γραμμής και την εμφάνιση των συντεταγμένων ορισμένων γωνιών του πλαισίου μέσω του *Property Manager*.

### 1.3.6 Gridder

Μέσω του φακέλου Computational στο Module Manager (βλ. Εικόνα 1.33) είναι δυνατή η εισαγωγή ενός Gridder. Η μονάδα παρεμβάλλει διάσπαρτα data points σε ένα ομοιόμορφο πλέγμα. Ένα ομοιόμορφο πλέγμα είναι μια μονοδιάστατη, δισδιάστατη ή τρισδιάστατη ορθογώνια σειρά σημείων, τα οποία είναι διατεταγμένα στις διευθύνσεις XYZ, με σημεία τα οποία απέχουν εξίσου σε κάθε διεύθυνση. Η απόσταση μεταξύ των σημείων δεδομένων στις διευθύνσεις X,Y και Z είναι η ίδια σε όλο το πλέγμα, αλλά η απόσταση διαχωρισμού X δεν είναι απαραίτητα η ίδια με αυτές των Y και Z. Επίσης, το Gridder χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό τιμών σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν δεδομένα.

Το εύρος και η ανάλυση του πλέγματος μπορούν να καθοριστούν μαζί με την μέθοδο της παρεμβολής και τις σχετικές παραμέτρους. Η διαδικασία σχηματισμού του πλέγματος ξεκινά αφού επιλεχθεί το ''Begin Gridding'' (Εικόνα 1.43). Το Gridder στο Network Manager θα εμφανίσει κίτρινη ένδειξη (Εικόνα 1.42). Αφού καθοριστούν οι ιδιότητες του πλέγματος και επιλεχθεί το ''Begin Gridding'', η ένδειξη αλλάζει σε πράσινο για να καθορίσει ότι η ενότητα είναι ενημερωμένη και έτοιμη για να προστεθούν άλλα εργαλεία.



Εικόνα 1.42: Η ένδειξη "κίτρινο" LED του Gridder.

Input: Δείχνει την πηγή στην οποία είναι συνδεδεμένη η μονάδα. Αυτή η επιλογή δεν μπορεί να τροποποιηθεί στο Property Manager, αλλά στο Network Manager, αλλάζοντας την ενότητα εισόδου.

Input Points: Εμφανίζει το σύνολο των σημείων.

Input Component: Δείχνει εάν το input set έχει περισσότερα από ένα στοιχεία. Επίσης, καθορίζει ποια στοιχεία δεδομένων θα εμφανίζονται στο grid εάν το σύνολο των δεδομένων έχει περισσότερα από ένα στοιχεία.

✓ Auto Update		Update Now			?
General	Geometry	Search	]		
🗆 Gridde	er (id:3)				
Input		Dissolved Solids.xlsx - Points			
Input points			44549		
Input	Input component		Column D	Comp1	~
Data dependent parame		Recalculate			
Action		Begin Gridding			
- Metho	bd		16-16-		
Metho	Method		Inverse dis	tance	4
Anisot	Anisotropy		Isotropic		~
Power			2		
Smoot	Smooth		0		

**Εικόνα 1.43:** Property Manager του Gridder.

- Data Dependent Parameters: Επιλέγοντας το Recalculate button υπολογίζονται οι προεπιλεγμένες τιμές με βάση τα δεδομένα εισαγωγής. Αυτή η λειτουργία είναι χρήσιμη όταν τα δεδομένα εισαγωγής έχουν αλλάξει ή το Gridder module (μονάδα) είναι συνδεδεμένο με ένα σύνολο νέων δεδομένων, κάνοντας τις παλιές τιμές ακατάλληλες.
- Method: Οι διαφορές μεταξύ των μεθόδων πλέγματος (gridding methods) βρίσκονται στους μαθηματικούς αλγορίθμους οι οποίοι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του βάρους κατά την παρεμβολή κόμβου πλέγματος. Κάθε μέθοδος μπορεί να αναπαραστήσει διαφορετικά τα δεδομένα. Η προεπιλεγμένη μέθοδος είναι το "Inverse distance", η οποία παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα στις περισσότερες περιπτώσεις. Οι άλλες δύο επιλογές είναι "Choose Data metric" και "Local

*polynomial"*, οι οποίες αποτελούν μέθοδοι παρεμβολής και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του πλέγματος εξόδου.

- Power: Η επιλογή αυτή είναι διαθέσιμη όταν το "Method" έχει οριστεί ως Inverse distance ή Local polynomial. Το Power αποτελεί τον εκθέτη στο inverse distance weighting formula ή local polynomial weighting formula.
- Smooth: Η επιλογή αυτή είναι διαθέσιμη όταν το "Method" έχει οριστεί ως Inverse distance. Η τιμή του smooth ελέγχει την εξομάλυνση της παρεμβολής. Όσο υψηλότερη είναι η τιμή, τόσο πιο ομαλή γίνεται.
- Anisotropy: Η ιδιότητα της Ανισοτροπίας στη μέθοδο Inverse distance gridding επιτρέπει τον καθορισμό σημείων δεδομένων σε μια κατεύθυνση του κόμβου πλέγματος να έχουν μεγαλύτερο βάρος, από τα σημεία άλλης κατεύθυνσης. Σημεία, τα οποία βρίσκονται πιο κοντά στο κόμβο πλέγματος συνήθως έχουν μεγαλύτερο βάρος από τα πιο απομακρυσμένα σημεία, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση. Εάν τα σημεία μιας κατεύθυνσης έχουν μεγαλύτερη ομοιότητα από αυτά άλλης κατεύθυνσης, είναι πλεονεκτικό να δοθεί μεγαλύτερο βάρος σε σημεία με συγκεκριμένη κατεύθυνση για τον προσδιορισμό της τιμής ενός κόμβου πλέγματος.



Εικόνα 1.44: Η ρύθμιση Isotropic anisotropy δίνει βάρος σε όλες τις κατευθύνσεις.



Εικόνα 1.45: Η ρύθμιση Anisotropic anisotropy επιτρέπει τον προσδιορισμό τριών ορθογώνιων αξόνων κατεύθυνσης για να σταθμιστεί η διαφορά μεταξύ ενός κόμβου πλέγματος και σημείων δεδομένων.



**Εικόνα 1.46:** Η ρύθμιση General anisotropy επιτρέπει τον προσδιορισμό τριών μη ορθογώνιων αξόνων.

#### 1.3.7 Isosurface

Μέσω του φακέλου Graphics Output στο Module Manager (βλ. Εικόνα 1.34) είναι δυνατή η εισαγωγή ενός ή και περισσότερων Isosurfaces. Αποτελεί ένα τρισδιάστατο περίγραμμα. Η

επιφάνεια διαχωρίζει τιμές λιγότερες της ισότιμης (*isovalue*) από μεγαλύτερες αυτής. Όλα τα σημεία του *isosurface* έχουν την ίδια τιμή.

Αυτή η ενότητα παρέχει μια πολύ γρήγορη μέθοδο για ανακατασκευή πολυγωνικών μοντέλων επιφανείας από ένα πλέγμα. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τις αλληλεπιδράσεις κελιών του πλέγματος και τις συνδυάζει με τριγωνικά πλέγματα, έτσι ώστε να αποδοθούν γραφικά, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 1.47.



Εικόνα 1.47: Οι κόκκινοι όγκοι αποτελούν Isosurface (παράδειγμα από το λογισμικό Voxler).

Στο Property Manager (Εικόνα 1.48) εμφανίζονται δύο (2) καρτέλες,

- [1] *General* και
- [2] Legend.

Auto Update Update Now				
General Legend				
Isosurface (id:3)				
Input	TestLattice			
Input component	Component-1			
Isovalue	0.5001347976			
Compute volume				
Volume >= isovalue	e 0			
Volume <= isovalue	e 0			
E Rendering				
Draw style	Shaded			
Side(s) to draw	Front and back			
Color method	By isovalue			
Colormap	GrayScale			
🖂 Material				
Specular color	White			
Specular intensit	y 0.5			
Shininess	0.20000003			
Opacity	1			

**Εικόνα 1.48:** Isosurface properties.

Input: Η ιδιότητα εισόδου δείχνει την πηγή με την οποία είναι συνδεδεμένη η μονάδα.

- Input Component: Καθορίζει ποιο από τα input components περιέχει τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του isosurface.
- *Isovalue:* Η τιμή της επιφάνειας που δημιουργείται. Αυτή η επιφάνεια διαχωρίζει δεδομένα με μικρότερη τιμή από το *isovalue* από δεδομένα με μεγαλύτερες τιμές.
- Volume: Επιλέγοντας το 'Compute volume' υπολογίζεται ο όγκος ο οποίος εμφανίζεται από όλες τις κλειστές περιοχές του Isosurface. Η τιμή μεγαλύτερη από το isosurface εμφανίζεται δίπλα από την επιλογή

#### Volume >= isovalue

Σε αυτόν τον υπολογισμό περιλαμβάνονται μόνο περιοχές με τιμές επιφάνειας μεγαλύτερες από την *isovalue*.

Περιοχές με τιμές μικρότερες από την ισοτιμή εμφανίζονται στην επιλογή

Volume <= isovalue

Οι υπολογισμοί όγκου δημιουργούνται από όλα τα *voxels* και περιλαμβάνονται είτε εν μέρει είτε πλήρως στην επιφάνεια.

Ένα **voxel** είναι <u>πλήρες</u> εάν και τα οκτώ γωνιακά πλέγματα έχουν τιμή συνιστώσας μεγαλύτερη ή ίση με το *isovalue*.

Ένα **voxel** είναι εν μέρει πλήρες εάν ένα ή περισσότερα γωνιακά πλέγματα έχουν τιμή συνιστώσας μεγαλύτερη ή ίση με το *Isovalue*. Το συνολικό **volume >= isovalue** είναι το άθροισμα των μεμονωμένων όγκων από αυτά τα **voxels**.

Τα αποτελέσματα παρέχονται σε κυβικές μονάδες (units) με βάση τις μονάδες του αρχείου πλέγματος εισόδου.

Για να υπάρχει ογκομετρική έννοια, πρέπει οι μονάδες Χ,Υ και Ζ να είναι ίδιες.

# 2. ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΕΔΙΟΥ – ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΓΕΩΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

### 2.1 Εργασίες Υπαίθρου και Εξοπλισμός



**Εικόνα 2.1:** Πανοραμική εικόνα της θέσης της πανεπιστημιακής ανασκαφής (φωτογραφία από Αναπλ. Καθηγ. Ι. Παπαδάτο)

Σε επιλεγμένη θέση της πανεπιστημιακή ανασκαφή στο Πλάσι του δήμου Μαραθώνα, εφαρμόστηκε η γεωηλεκτρική μέθοδος της *ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης*, την εφαρμογή της τεχνικής της **γεωηλεκτρικής τομογραφίας** (electrical resistivity tomography – ert). Συγκεκριμένα, με κόκκινο βέλος αναδεικνύεται η θέση εντός του αρχαιολογικού χώρου της πανεπιστημιακής ανασκαφής, η οποία αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σκοπός είναι η ανάδειξη πιθανών στόχων και η υπόδειξη πιθανών θέσεων ανασκαφής μέσω της διερεύνησης του υπεδάφους.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά δεκαέξι (16) γεωηλεκτρικές τομές χρησιμοποιώντας τη διάταξη Wenner. Το μήκος της κάθε τομής που πραγματοποιήθηκε είναι 15 m και η απόσταση των ηλεκτροδίων καθορίστηκε στα 25 cm. Η συγκεκριμένη απόσταση επιλέχθηκε διότι ήταν γνωστές, κατά προσέγγιση, οι διαστάσεις, το βάθος ταφής και το υλικό κατασκευής των στόχων. Τέλος, κάθε τομή απέχει 1 m από την επόμενη διαδοχική της.

Στον χάρτη της εικόνα 2.2 αποτυπώνονται οι θέσεις, καθώς και ΒΔ-ΝΑ διεύθυνση των γεωηλεκτρικών τομών που πραγματοποιήθηκαν. Στον ίδιο χάρτη έχει γεωαναφερθεί πανοραμική ανασκαφική εικόνα από το αρχείο του Αναπλ. Καθηγ. Ι. Παπαδάτου, με τα ευρήματα της συγκεκριμένης αρχαιολογικής ανασκαφής.



**Εικόνα 3.2:** Χάρτης γεωφυσικών εργασιών - γεωηλεκτρικές τομές (φωτογραφία από Αναπλ. Καθηγ. Ι. Παπαδάτο).

Η συγκεκριμένη θέση υποδείχθηκε στην γεωφυσική ομάδα, έτσι ώστε να ερευνηθεί η συνέχεια ή μη των ήδη αποκαλυφθέντων αρχαιολογικών ευρημάτων.

Για τη διεξαγωγή των μετρήσεων στον αρχαιολογικό χώρο χρησιμοποιήθηκε ο εξοπλισμός του εργαστηρίου Γεωφυσικής του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.

Ειδικότερα, για την συλλογή των γεωηλεκτρικών δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το σύστημα *Terrameter* του οίκου *ABEM*, όπως επίσης και ηλεκτρονικός υπολογιστής υπαίθρου (*Εικόνα* 2.3), με εγκατεστημένο το λογισμικό αυτοματοποιημένης διαχείρισης των παραμέτρων της τεχνικής (*Εικόνα* 2.4 και Εικόνα 2.5). Διοχετεύεται στο υπέδαφος ηλεκτρικό ρεύμα γνωστής έντασης, έχοντας τη δυνατότητα να λαμβάνει αυτοματοποιημένα πολλαπλές μετρήσεις της ωμικής αντίσταση, ελέγχοντας το 'θόρυβο' και υπολογίζοντας την **φαινόμενη ηλεκτρική** ειδική αντίσταση σε κάθε θέση μέτρησης.



Εικόνα 2.3: Το σύστημα Terrameter του οίκου ΑΒΕΜ της γεωηλεκτρικής τομογραφίας.



Εικόνα 2.4: Λογισμικό αυτοματοποιημένης διαχείρισης ηλεκτροδίων και λήψης μετρήσεων.

Ο υπόλοιπος εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις είναι (Εικόνα 2.5):

- Πολυκαναλικά καλώδια, μονωμένα με ισχυρό πλαστικό.
- Ηλεκτρόδια, για τη διοχέτευση του ηλεκτρικού ρεύματος και τη μέτρηση της διαφοράς δυναμικού.
- Ηλεκτρική πηγή (μπαταρία).
- Εκτυλίκτριες καλωδίων.
- Σφυριά, για την πάκτωση των ηλεκτροδίων, δοχεία μεταφοράς νερού για τον διαποτισμό των ηλεκτροδίων και τη μείωση της αντίστασης επαφής, όπως επίσης και

παρελκόμενος εξοπλισμός (πυξίδα, μετροταινίες, ανταλλακτικά εξαρτήματα και εργαλεία).

Τέλος, πραγματοποιήθηκε λεπτομερής τοπογραφική αποτύπωση όλων των ηλεκτροδίων (Εικόνα 2.6). Στο συγκεκριμένο ανασκαφικό πεδίο είχε ιδρυθεί από ερευνητική ομάδα του τμήματος Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος μία τοπική τοπογραφική «Βάση Αναφοράς». Για τον ακριβή προσδιορισμό των συντεταγμένων επιλέχθηκε η τεχνική static με ένα ζεύγος διπλόσυχνων δεκτών GPS HiperPro του οίκου TopCon.



**Εικόνα 2.5:** Το πεδίο έρευνας και στιγμιότυπο κατά την διάρκεια των μετρήσεων ert (τομή t15\_02S).





**Εικόνα 2.6:** Τοπογραφική βάση αναφοράς της πανεπιστημιακής ανασκαφής και τοπογραφική αποτύπωση των γεωηλεκτρικών τομών.

## 2.2 Επεξεργασία δεδομένων - Φαινόμενη Ηλεκτρική Ειδική Αντίσταση

Αρχικά, συλλέχθηκαν όλα τα δεδομένα της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τη μορφή αρχείων DAT. Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων στο λογισμικό excel για την καλύτερη, γρήγορη και πιο εύκολη διαχείριση και επεξεργασία τους.

Σύμφωνα με αυτή, κατανεμήθηκαν σε κολώνες οι θέσεις των κέντρων διάταξης (*X-location*), το αντίστοιχο *pseudo-depth* (*Z-location*) και οι αντίστοιχες τιμές της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, *ρ<sub>α</sub>* (*App. Resistivity*).

Μέσω των λειτουργιών του excel ελέγχθηκαν και απομακρύνθηκαν τιμές  $\rho_{\alpha}$  που κατά την κρίση μας θα αλλοίωναν την επεξεργασία των αποτελεσμάτων (ακραία υψηλές ή χαμηλές τιμές). Δηλαδή, τιμές φαινόμενης ηλεκτρική ειδικής αντίστασης, οι οποίες ήταν σχεδόν ίσες με το μηδέν (0), ή τιμές πολύ μεγαλύτερες από τις γειτονικές τους, δεν λήφθηκαν υπόψη στην επεξεργασία. Έτσι, κατέστη περισσότερο εύκολη η παρατήρηση του εύρους των τιμών φαινόμενης ειδικής συνίατασης σε κάθε τομή, αλλά και συνολικά (μέγιστα και ελάχιστα).



Στη συνέχεια, με το λογισμικό Surfer κατασκευάστηκαν οι τομές κατανομής της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, σε σχέση με το *pseudo-depth*.





Εικόνα 2.7: Τομές κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης.

Τα θερμά χρώματα, των οποίων η τιμή φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κυμαίνεται μεταξύ 212-463 Ohm\*m, αξιολογούνται ότι αναδεικνύουν τα πιο αντιστατικά υλικά και ενδεχομένως τους υποψήφιους στόχους.

Τα ψυχρά χρώματα, των οποίων η τιμή φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης κυμαίνεται μεταξύ 12-211 Ohm\*m, αποτελούν τα αγώγιμα υλικά. Στην πεδιάδα του Μαραθώνα, τα λιγότερο αντιστατικά υλικά θεωρούνται μεταλπικά ιζήματα ποτάμιας, λιμναίας, χερσαίας, λιμνοθαλάσσιας και θαλάσσιας φάσης.

Θεωρώντας, επίσης, ότι οι στόχοι αποτελούν τοιχία, κρίθηκε προτιμότερο να αποτυπωθούν απότομα οι πλευρικές μεταβολές των δεδομένων της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Στην

επεξεργασία των δεδομένων στο λογισμικό Surfer, στο Gridding Method επιλέχθηκε η μέθοδος υπολογισμού του grid η Nearest Neighbor.

Ακολούθως, οι τομές κατανομής της φαινόμενης ειδικής αντίστασης εισήχθησαν στο λογισμικό EriViz με τη μορφή PNG, όπου δημιουργήθηκε η τρισδιάστατη απεικόνισή τους (Εικόνα 2.8).



Εικόνα 2.8: Τρισδιάστατη απεικόνιση (fence diagram) των τομών κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης συναρτήσει του βάθους, από το λογισμικό EriViz.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, τόσο μεμονωμένα από τις τομές που εξήχθησαν από το λογισμικό Surfer και από την τρισδιάστατη αναπαράστασή τους, είναι ευδιάκριτος μία/ένας περιοχή/στόχος σε όλη την έκταση της δυτικής πλευράς του κτήματος. Η περιοχή αυτή τοποθετείται συστηματικά στην αρχή 0-4 μέτρα στο σύνολο τω τομών και ορίζεται ως η περιοχή **A** στο σχέδιο της εικόνα 2.8. Είναι χαρακτηριστικό ότι στην συγκεκριμένη περιοχή οι τιμές φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης παρουσιάζονται ιδιαίτερα υψηλές και κυμαίνονται μεταξύ 300 έως 462 Ohm\*m.

Επιπλέον, υψηλές τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης παρουσιάζονται στις τομές T15\_8S μέχρι T15\_26S σε απόσταση 13-15 m, σχηματίζοντας έναν πιθανό ευθύγραμμο στόχο στην ανατολική πλευρά της θέσης έρευνας. Η συγκεκριμένη περιοχή ορίζεται ως **B**, στο σχέδιο της εικόνας 2.8.

Επίσης, παρατηρείται ότι στις τομές T15\_12S έως T15\_16S συνεχίζεται η εμφάνιση υψηλών τιμών αλλά σε απόσταση 8 - 14 m, με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ, εμφανίζοντας έτσι ένα πιθανό στόχο - τοιχίο (περιοχή **C** στο σχέδιο της εικόνας 2.8).

Επιπλέον, κατασκευάστηκαν Volume Maps, στα οποία εμφανίζεται η κατανομή της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε ένα συγκεκριμένο εύρος pseudo-depths.

Επελέγησαν και κατασκευάστηκαν τρείς (3) χάρτες κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, για:

- [1] 13-26 ''Z location''  $\rho_{\alpha}$  Volume Slice,
- [2] 39-52 ''Z location''  $\rho_{\alpha}$  Volume Slice ка
- [3] 78-100 "Z location"  $\rho_{\alpha}$  Volume Slice.

Από αυτούς ο δεύτερος χάρτης είναι αυτός που αναδεικνύει περισσότερο πιθανούς στόχους ενδιαφέροντος.

Με τη διαδικασία αυτή λοιπόν, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα φαινόμενης ειδικής αντίστασης, σχηματίζεται μια πρώτη απεικόνιση των θέσεων και της γεωμετρίας των υπεδαφικών στόχων.

<u>Καθίσταται σαφές ότι η περιοχή Α προσδιορίζει την πρώτη στη σειρά προτεινόμενη για</u> <u>περαιτέρω ανασκαφική διερεύνηση</u>.



13-26 cm Pseudo-Section (Z location)  $ho_{lpha}$  Volume Slice

**Εικόνα 2.9:** 13-26 cm Pseudo-Section'  $ρ_α$  Volume Slice.



**Εικόνα 2.10:** 39-52 cm Pseudo-Section  $ρ_α$  Volume Slice.



**Εικόνα 2.11:** 78-100 cm Pseudo-Section  $ρ_α$  Volume Slice.

Παρατηρώντας τους παραπάνω χάρτες γίνεται αντιληπτό ότι κάτω από το ψευδο-βάθος των 78 cm δεν υπάρχει κάποιος επιθυμητός στόχος, παρά μόνο είναι φανερό το ίχνος του πιθανού στόχου Α. Η ευθύγραμμες απεικονίσεις με τιμές φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης 100 Ohm\*m περίπου και διεύθυνση ίδια με αυτή των τομών, πιθανόν να αποτελούν ίχνη προγενέστερων αρχαιολογικών κτισμάτων.

Επιπλέον, στο ψευδο-βάθος των 13-26 cm παρατηρούνται περισσότερες θέσεις με υψηλές τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης, αλλά οι περισσότερες δεν αποτελούν στόχους ενδιαφέροντος, αλλά αναμοχλευθέν υλικό της επιφάνειας. Παρ 'όλα αυτά έχουν σημειωθεί σε όλους τους χάρτες οι θέσεις των πιθανών στόχων ενδιαφέροντος.

Και στο Volume Slice των 39-52 cm (Εικόνα 2.9) είναι ευδιάκριτοι και πιθανοί οι στόχοι Α,Β και C, οι οποίοι σημειώθηκαν και στην τρισδιάστατη απεικόνιση με το λογισμικό EriVIz (Εικόνα 2.8).

## 2.3 Δισδιάστατη (2D) επεξεργασία – Τρισδιάστατη απεικόνιση – Ερμηνεία

Στη συνέχεια τα δεδομένα φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, επεξεργάστηκαν με το λογισμικό RES2DINV, προκειμένου να αναδειχθεί η κατανομή της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης σε σχέση με το βάθος (*Depth* και όχι το *Pseudo-Depth*). Μετά την επεξεργασία της κάθε μίας, εξήχθησαν τα στοιχεία από το λογισμικό, σε αρχείο DAT.

Από τα δεκαέξι (16) αυτά αρχεία δημιουργήθηκε μια βάση δεδομένων στο λογισμικό excel σύμφωνα με την οποία σε κολώνες παρατάχθηκαν οι θέσεις των Κέντρων Διάταξης (*X-location*), το αντίστοιχο (πραγματικό) βάθος (*Z-location*) και οι αντίστοιχες τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, *ρ* (*Resistivity*).

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία με τις τιμές φαινόμενης ειδικής αντίστασης, κατασκευής τομών, προκειμένου να απεικονισθούν τα αποτελέσματα σε τομές κατανομής της ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με το βάθος (Εικόνα 2.12). Ως gridding method επιλέχθηκε και εδώ εκείνη της Nearest Neighbor.







Εικόνα 2.12: Τομές κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Τα θερμά χρώματα αντιστοιχούν προφανώς στους πλέον αντιστατικούς σχηματισμούς, οπότε και προσδιορίζουν τους στόχους ενδιαφέροντος με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης που κυμαίνονται σε 300-1500 Ohm\*m, ενώ τα ψυχρά χρώματα τους αγώγιμους με τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης να κυμαίνονται μεταξύ 6 και 250 Ohm\*m.

Στη συνέχεα, για την τρισδιάστατη αναπαράσταση των αποτελεσμάτων της 2D επεξεργασίας χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Voxler της Golden Software.

Επειδή το Voxler και το Surfer ανήκουν στον ίδιο οίκο, είναι δυνατή η χρήση της ίδιας χρωματικής κλίμακας (\*clr), η οποία κατασκευάστηκε με βάση το εύρος των τιμών και των στόχων ενδιαφέροντος μέσω του λογισμικού Surfer. Έτσι η χρωματική κλίμακα αντιστοιχεί στις ίδιες τιμές ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης με τις τομές της Εικόνας 2.12.

Στη θέση έρευνα, αξιολογείται πλέον και η περιοχή **D**, μία δευτερεύουσα περιοχή ενδιαφέροντος, η οποία παρουσιάζεται να αναπτύσσεται σε διαγώνια διεύθυνση των άλλων.



**Εικόνα 2.13:** Τορ View. Με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή αποτυπώνονται οι πιθανοί στόχοι – τοιχία στις περιοχές **Α**, **Β**, **C** και **D**.



**Εικόνα 2.14:** Front View.



**Εικόνα 2.15:** Left View.



**Εικόνα 2.16:** Right View.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τις παραπάνω εικόνες, ο στόχος στο δυτικό τμήμα της θέσης έρευνας που αναφέρθηκε και στις αναπαραστάσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης είναι φανερός και με τα επεξεργασμένα δεδομένα (*Εικόνα 2.13,***A**). Καλύπτει όλο το μήκος της δυτικής πλευράς (15 μέτρα) και φτάνει μέχρι το βάθος του ενός (1) μέτρου περίπου. Το συγκεκριμένο τοιχίο έχει απεικονισθεί και με τη βοήθεια του *Isosurface* (*Isovalue* = 461 Ohm\*m).

Επιπρόσθετα, στο ανατολικό τμήμα (X-Easting 15 m) παρατηρείται ένας ευθύγραμμος στόχος (B), ο οποίος με βάση τον άξονα Y ξεκινάει από τα 8 μέτρα και τελειώνει στα 14 μέτρα περίπου, καθώς και ένας οριζόντιος στόχος (C), ο οποίος με βάση τον άξονα X ξεκινάει από το μέσω της απόστασης (7,5 m) και καταλήγει στα 15 m (*Εικόνα 2.13*). Οι συγκεκριμένοι στόχοι – τοιχία δεν αποτυπώνονται ολόκληροι με το *Isosurface*. Αυτό συμβαίνει, διότι το εύρος των τιμών που έχει επιλεχθεί για να αποτυπωθούν συγκεκριμένα δεδομένα δεν περιλαμβάνει αυτές των δύο τοιχίων που περιεγράφηκαν.

Τέλος, είναι ευδιάκριτη μια διαγώνιος εμφάνιση (**D**) με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Δεν αποτυπώνεται με το *Isosurface* στο λογισμικό Voxler, λόγω τιμών ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης μικρότερων από αυτών που έχουν οριστεί.

## 3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Συνοψίζοντας, λοιπόν, υπάρχουν σαφείς διαφοροποιήσεις μεταξύ των ανεπεξέργαστων δεδομένων που λήφθηκαν στο πεδίο και των αποτελεσμάτων και οπτικοποιήσεων της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.

Αρχικά, στα δεδομένα και στις απεικονίσεις της φαινόμενης ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, ενώ ήταν ευδιάκριτοι ορισμένοι στόχοι ενδιαφέροντος, δεν είναι καθορισμένο το βάθος στο οποίο ενδεχομένως να εμφανίζονται. Συγκεκριμένα, στις τομές και στις τρισδιάστατες απεικονίσεις χρησιμοποιείται ο όρος ψευδο-βάθος (pseudo-section) ή "Z-location". Αντιθέτως, τα δεδομένα της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης αναπαρίστανται σε σχέση με το βάθος. Οπότε, είναι πιο σαφή και καθορισμένα τα αποτελέσματα.

Επιπρόσθετα, παρατηρώντας τον χάρτη κατανομής της φαινόμενης ηλεκτρικής ειδικής αντίστασης, εμφανίζονται τρείς (3) ενδεχόμενοι στόχοι ενδιαφέροντος **A**, **B** και **C** (*Eικόνα* 3.1). Είναι γνωστό ότι στην τρισδιάστατη αναπαράσταση των τιμών της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης, εκτός από τα τοιχία **A**, **B** και **C**, παρουσιάζεται να αναδεικνύεται και ένας τέταρτος διαγώνιος στόχος, ο **D** (*Εικόνα* 3.2).

Όσον αφορά την τρισδιάστατη αναπαράσταση των αποτελεσμάτων, τόσο το λογισμικό EriViz, όσο και το Voxler εξυπηρέτησαν τον σκοπό τους, ο οποίος είναι η ανάδειξη των επιθυμητών στόχων στον ημιχώρο.

Συγκεκριμένα, με το λογισμικό EriViz, συνδυάζοντας αρχεία \*PNG των τομών της φαινόμενης ειδικής αντίστασης, πραγματοποιήθηκε μια τρισδιάστατη αναπαράσταση (fence diagram), η οποία υπέδειξε τις θέσεις και τις διαστάσεις των πιθανών στόχων. Επειδή το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί τις επεξεργασμένες «εικόνες», δεν είναι δυνατό να γίνει παρεμβολή των δεδομένων (interpolation), γι΄ αυτό εμφανίζεται με τη μορφή πλέγματος (Εικόνα 3.3).

Το λογισμικό Voxler εξυπηρετεί τους ίδιους σκοπούς. Δηλαδή, ενισχύει την απεικόνιση των δεδομένων για την αναγνώριση της θέσης και των διαστάσεων των πιθανών στόχων. Η διαφορά του με το προαναφερθέν λογισμικό είναι ότι χρησιμοποιεί τα αρχεία \*DAT, τα οποία εξήχθησαν από το RES2DINV. Έτσι, παρέχει τη δυνατότητα παρεμβολής των δεδομένων (*interpolation*), αποδίδοντας μία ολοκληρωμένη εικόνα των υπεδαφικών στόχων (*Εικόνα 3.4*). Με τα εργαλεία και τις δυνατότητες που περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 1.3. είναι εφικτή η καλύτερη δυνατή απεικόνιση και οπτικοποίηση του αποτελέσματος, με βάση την έρευνα και τον αντίστοιχο επιθυμητό στόχο.

Για την καλύτερη ανάδειξη των στόχων ενδιαφέροντος και την αναγνώριση του μεγέθους και της γεωμετρίας τους, προτείνεται σε επόμενη ερευνητική δραστηριότητα η εκτέλεση επιπλέον γεωηλεκτρικών τομών, με διεύθυνση κάθετη στις υφιστάμενες (BA-NΔ). Με τον τρόπο αυτό παρέχεται η δυνατότητα περαιτέρω ελέγχου του ημιχώρου και ανάδειξη των υφιστάμενων στόχων. Προς την κατεύθυνση αυτή αναμένεται να αναδειχθεί και η ύπαρξη ή μη στόχων στην περιοχή **D.** Επιπλέον με τον όγκο της πληροφορίας που θα ληφθεί, θα δοθεί δυνατότητα καλύτερης και ρεαλιστικότερης απεικόνισης στα λογισμικά αναπαράστασης (EriViz και Voxler).



Εικόνα 4.1: Δεδομένα φαινόμενης ειδικής αντίστασης.



Εικόνα 3.2: Δεδομένα ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης.



Εικόνα 3.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων φαινόμενης ειδικής αντίστασης χρησιμοποιώντας το λογισμικό EriViz.



**Εικόνα 3.4:** Τρισδιάστατη απεικόνιση των δεδομένων της "πραγματικής" ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης χρησιμοποιώντας το λογισμικό Voxler.

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Λούης Ι. Φ., 2004. Εισαγωγικά Μαθήματα στη Διερευνητική Γεωφυσική. Αθήνα, Σύγχρονες Εκπαιδευτικές Σημειώσεις Γεωφυσικής.
- Τσελέντης, Α., Παρασκευόπουλος, Π., 2013. Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Αθήνα, εκδόσεις Liberal Books.
- Dobrin M. B. and Savit C. H., 1988. Introduction to geophysical prospecting. McGraw Hill International Editions, 846 p.
- Geotomo Software SDN BHD, May 2019. Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method Wenner ( $\alpha,\beta,\gamma$ ), dipole-dipole, inline pole-pole, poledipole, equatorial dipole-dipole, offset pole-dipole, Wenner-Schlumberger, gradient and non-conventional arrays On land, aquatic, cross-borehole and time-lapse surveys.
- deGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models form magnetotelluric data. Geophysics, 55, 1613-1624.
- Keilholz P., Wellbrock K., Voß P., Heemeier B., Patzelt A., Grottker M., 2018. The water management of Taymā' and other ancient oasis settlements in the north-western arabian peninsula-a preliminary synthesis.
- Loke, M.H., 2000. Topographic modelling in resistivity imaging inversion. 62nd EAGE Conference & Technical Exhibition Extended Abstracts, D-2.
- Loke, M.H., Acworth, I. and Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. Exploration Geophysics, 34, 182-187.
- Loke, M.H., 2018. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Geotomosoft Solutions, Malaysia.
- Marilena Cozzolino, Elisa Di Giovanni, Paolo Mauriello, Salvatore Piro, Daniela Zamuner, 2018. Geophysical Methods for Cultural Heritage Management. Springer Geophysics.
- Milsom, J., & Eriksen, A., 2011. Field Geophysics, 4th Edition.
- Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. Geophysical Prospecting, 40, 453-464.
- Telford W.M, Geldart L.P, Sheriff R.E, 1988. Applied geophysics. Cambridge Univ. Press, 843 p.
- Zohdy A.A.R., 1974. Automatic interpretation of Schlumberger sounding curves. Geol. Sur. Bull. 1313 E. U. S Government Printing Office, Washington, 71pp.