

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

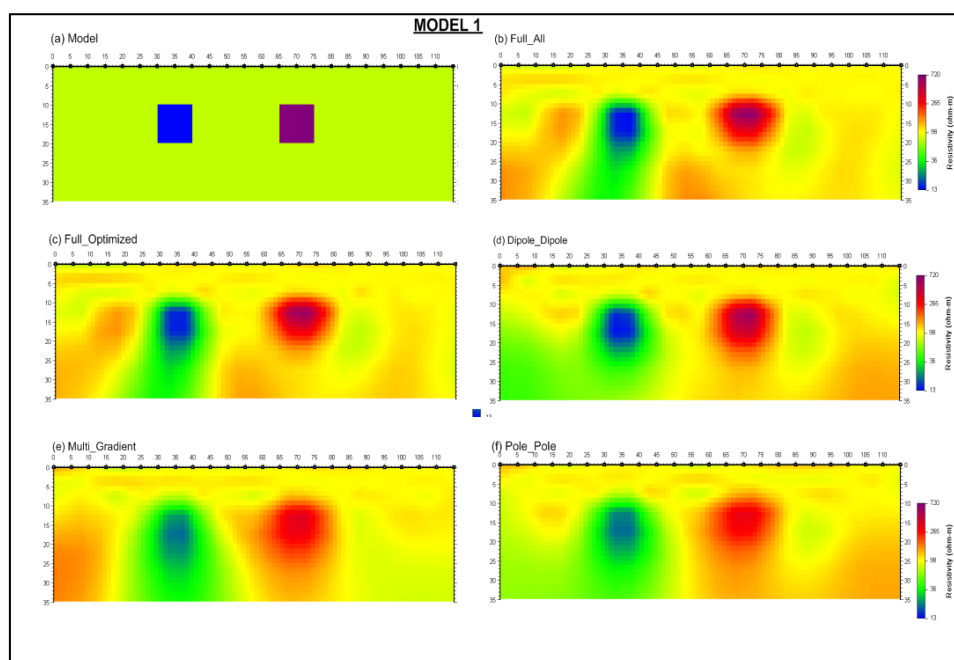


ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Συγκριτική Μελέτη Γεωηλεκτρικών Διατάξεων
Μέτρησης Βάσει Μοντέλων Προσομοίωσης»**

Αλμπάνης Άγγελος

ΑΕΜ:4863



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Τσούρλος Παναγιώτης (Καθηγητής ΑΠΘ)

Θεσσαλονίκη 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ-ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	1
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
2. ΘΕΩΡΙΑ.....	6
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	9
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	15
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	34
6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	37

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

«Συγκριτική Μελέτη Γεωηλεκτρικών Διατάξεων Μέτρησης Βάσει Μοντέλων Προσομοίωσης»

Η παρούσα εργασία είναι μια συγκριτική μελέτη της δυνατότητας απεικόνισης διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων σε συνθετικά μοντέλα μέσω της επίλυσης του ευθέως και αντίστροφης γεωηλεκτρικού προβλήματος. Ο σκοπός της μελέτης είναι να προτείνει βέλτιστη διάταξη ηλεκτροδίων.

Γενικά, οι γεωηλεκτρικές γεωφυσικές τεχνικές προσπαθούν να βρουν την κατανομή της ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος μεταβιβάζοντας ρεύμα και μετρώντας διαφορές δυναμικού. Τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών διασκοπήσεων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή της διάταξης ηλεκτροδίων με την οποία διεξάγεται η έρευνα. Η απαίτηση για την καλύτερη απεικόνιση της αντίστασης του υπεδάφους καθιστά τη μελέτη της βέλτιστης διάταξης ηλεκτροδίων σημαντική. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην εργασία αυτή περιλαμβάνει τον υπολογισμό της απευθείας απόκρισης του μοντέλου για μια συγκεκριμένη διάταξη και ακολούθησε η αντιστροφή των παραγόμενων συνθετικών δεδομένων προκειμένου να γίνει σύγκριση του αρχικού μοντέλου με το προϊόν της αντιστροφής και να αποφασιστεί ποια διάταξη είναι καλύτερη.

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη της απόδοσης των διαφόρων διατάξεων ηλεκτροδίων σε οκτώ διαφορετικά μοντέλα που προσομοιώνουν απλές έως σύνθετες κατανομές της αντίστασης του υπεδάφους. Περαιτέρω προστέθηκε τυχαίος θόρυβος σε μερικές από τα δεδομένα, ενώ χρησιμοποιήθηκαν για ορισμένα μοντέλα διαφορετικοί τύποι αντιστροφής. Όλα τα μοντέλα ελέγχθηκαν για 5 διατάξεις και συγκεκριμένα για τις: διπόλου-διπόλου, τροποποιημένη πόλου πόλου, πολλαπλής βαθμίδας, συνδυασμός όλων και βέλτιστη διάταξη με βάση την ευαισθησία.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βελτιστοποιημένη και η διάταξη διπόλου-διπόλου παράγουν

κατά μέσο όρο τις καλύτερες αναπαραστάσεις του μοντέλου. Η διάταξη πλήρων δεδομένων παρουσιάζει πολύ καλά αποτελέσματα επίσης όμως η χρήση της συνεπάγεται πολλές μετρήσεις γεγονός που τη καθιστά λιγότερο πρακτική στην εφαρμογή της.

ABSTRACT

Comparative study of geoelectrical arrays through synthetic models

This thesis is a comparative study of the performance of different electrode arrays to synthetic models through forward and inverse modelling. The aim of the study is to propose optimum electrode configurations.

Generally, the geoelectrical geophysical techniques try to find the distribution of the electrical resistivity within the subsurface by injecting current and measuring potential differences. The results of electrical prospecting depend up to a certain degree on the choice of the electrode array with which the survey is conducted. The requirement for better imaging of the subsurface resistivity makes the study of optimum electrode configurations important. The procedure involved calculation of the forward response of the model for a particular array and then the produced synthetic data are inverted in order to compare the original model to the product of the inversion and decide which array is better.

In this work we studied the performance of several electrode arrays to eight different subsurface models which simulate a variety of subsurface geoelectrical distributions. Some models are simple but others are more complex. Further random noise was added to some of the modelled data while different inversion schemes were used for some. All models were tested for 5 arrays namely: dipole-dipole, modified pole-pole, multiple gradient, combination of all and sensitivity based optimized.

Results suggest that optimized and dipole-dipole arrays produced on average the best model reconstructions. Full combined array performed very well however it involves a very large amount of measurements so it is less practical to use.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο πλαίσιο της πτυχιακής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Καθηγητή Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Παναγιώτη Τσούρλο για την ανάθεση αυτής της εργασίας και την πολύτιμη καθοδήγηση του. Η εμπειρία, η γνώση και οι πολύτιμες συμβουλές του έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην ολοκλήρωση και επίτευξη της Διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπλέον, ευχαριστώ τους συγγραφείς που μέσα από τις βιβλιογραφίες και τις αναφορές τους μου επέτρεψαν και με βοήθησαν να αντλήσω πολύτιμες πληροφορίες για την δομή και τον εμπλουτισμό της εργασίας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω το Τμήμα Γεωλογίας του Αριστοτέλειου πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης και όλους τους καθηγητές οι οποίοι μέσα από την διδακτική τους βοήθεια με έκαναν να κατανοήσω και να αγαπήσω την επιστήμη της Γεωλογίας.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή διαφορετικών διατάξεων ηλεκτροδίων σε γεωηλεκτρικά μοντέλα προσομοίωσης, μέσω της μεθόδου αντιστροφής. Ο στόχος της εργασίας είναι η εύρεση καλύτερης διάταξης ηλεκτροδίων με βάση τη σύγκριση της ποιότητας της απεικόνισης της δομής του υπεδάφους που παράγουν σε σχέση με τα αρχικά μοντέλα αντίστασης για τα οποία και υπολογίστηκαν τα συνθετικά δεδομένα.

Γενικά, οι ηλεκτρικές μέθοδοι γεωφυσικών διασκοπήσεων βασίζονται στην ανίχνευση της κατανομής της ηλεκτρικής αντίστασης στο υπέδαφος, μέσω της μέτρησης της διαφοράς δυναμικού που προκαλείται από τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσα στη γη. Έχουν προταθεί πολλές διατάξεις ηλεκτροδίων στη γεωηλεκτρική διασκόπηση κάθε μια με σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών διασκοπήσεων εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή της διάταξης μέτρησης. Επομένως είναι απαραίτητη η μελέτη της απόδοσης των διαφορετικών γεωηλεκτρικών διατάξεων προκειμένου να βρεθούν οι βέλτιστες. Για τον σκοπό αυτό, μελετήθηκε η απόδοση πέντε διαφορετικών γεωηλεκτρικών διατάξεων (multiple gradient, η διάταξη pole-pole, η διάταξη dipole-dipole, η διάταξη full-all και η διάταξη full-optimized). με τη χρήση οκτώ διαφορετικά μοντέλων προσομοίωσης που περιγράφουν διαφορετικές γεωηλεκτρικές δομές του υπεδάφους. Για κάθε μοντέλο και διάταξη υπολογίστηκαν οι παραγόμενες φαινόμενες αντιστάσεις οι οποίες και στη συνέχεια υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με τη διαδικασία της αντιστροφής. Το αποτέλεσμα της αντιστροφής συγκρίνεται με το αρχικό μοντέλο αντίστασης (για το οποίο και υπολογίστηκε η απόκριση) έτσι ώστε να διαπιστωθεί ποιοτικά αλλά και ποσοτικά η απόδοση της διάταξης.

Η συστηματική αυτή μελέτη μεταξύ αποτελεσμάτων και αρχικών μοντέλων επιτρέπει τη συνολική αξιολόγηση των διατάξεων και την εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων σε σχέση με την απόδοση της κάθε διάταξης.

Στο αρχικό κεφάλαιο της διπλωματικής περιγράφεται η γεωηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα ενώ στο πέμπτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα που εξάγονται.

2. ΘΕΩΡΙΑ

Γεωφυσική διασκόπηση είναι η μελέτη της δομής επιφανειακών στρωμάτων του γήινου φλοιού, με βάση τις μετρήσεις γεωφυσικών μεγεθών. Σκοπός της γεωφυσικής διασκόπησης είναι ο εντοπισμός γεωλογικών δομών οικονομικής σημασίας. Οι βασικές μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης είναι οι σεισμικές, οι βαρυτομετρικές, οι μαγνητικές, οι ηλεκτρικές και οι ηλεκτρομαγνητικές, ενώ χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις η ραδιομετρική και θερμική μέθοδος.

Με τις ηλεκτρικές μεθόδους γεωφυσικής διασκόπησης επιδιώκεται ο καθορισμός των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων και των επιφανειακών στρωμάτων του φλοιού της γης. Η ηλεκτρική διασκόπηση γίνεται με μετρήσεις ηλεκτρικών ποσοτήτων, όπως η ηλεκτρική τάση και η ειδική ηλεκτρική αντίσταση. Οι σημαντικότερες ηλεκτρικές μέθοδοι είναι η μέθοδος της ειδικής αντίστασης, η μέθοδος των ισοδυναμικών γραμμών, η μέθοδος της επαγόμενης πολικότητας, η μέθοδος του φυσικού δυναμικού και η μέθοδος τελλουρικών ρευμάτων.

Για την εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος της ειδικής αντίστασης με την οποία διαβιβάζεται στο έδαφος ηλεκτρικό ρεύμα με δύο ηλεκτρόδια ρεύματος A, B και μετριέται σε διάφορες θέσεις του εδάφους το δυναμικό που δημιουργεί το ρεύμα αυτό με δύο ηλεκτρόδια M, N. Εξαιτίας της ανομοιογένειας της γης, απαιτούνται πιο σύνθετες μέθοδοι για τον καθορισμό της κατανομής της ειδικής αντίστασης στη γη, που επιτυγχάνονται με διάφορες διατάξεις των ηλεκτροδίων ρεύματος και δυναμικού. Οι πιο γνωστές από αυτές είναι η διάταξη Wenner, η διάταξη Schlumberger, η διάταξη pole-pole και η διάταξη dipole-dipole.

2.1 ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΩΝ

Χρησιμοποιώντας τις ηλεκτρικές μεθόδους γίνεται μέτρηση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ δύο γνωστών σημείων. Όπως αναφέρθηκε, στην μέθοδο της ειδικής αντίστασης τοποθετούνται δύο ηλεκτρόδια παραγωγής ρεύματος και δύο ηλεκτρόδια για μέτρηση διαφοράς δυναμικού. Ανάλογα με την τοποθέτηση των ηλεκτροδίων ξεχωρίζουμε τις εξής διατάξεις:

Διάταξη Wenner: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού ισαπέχουν μεταξύ τους απόσταση α. (Σχήμα 2.1α) Η φαινόμενη αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I}$$

Διάταξη schlumberger: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος τοποθετούνται σε πολύ μεγαλύτερη απόσταση από αυτήν των ηλεκτροδίων δυναμικού (Σχήμα 2.1b). Αν η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος είναι 2L, η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων δυναμικού είναι 2a και ισχύει $L \gg a$, τότε η φαινόμενη αντίσταση είναι:

$$\rho_A = \frac{V}{I} \pi \frac{b(b+a)}{a} \approx \frac{V}{I} \pi \frac{b^2}{a} \quad \text{if } a \ll b$$

Διάταξη Dipole-Dipole: Τα ηλεκτρόδια ρεύματος είναι απομακρυσμένα από τα ηλεκτρόδια δυναμικού (Σχήμα 2.1d). Τα δύο δίπολα έχουν σταθερή απόσταση a ενώ, απέχουν μεταξύ τους απόσταση na . Η φαινόμενη αντίσταση για τη διάταξη Διπόλου-Διπόλου δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_A = \frac{V}{I} \pi a n(n+1)(n+2).$$

Διάταξη Pole-Pole: Ένα ηλεκτρόδιο ρεύματος και ένα ηλεκτρόδιο δυναμικού απέχουν μεταξύ τους απόσταση a , ενώ τα άλλα δύο βρίσκονται απομακρυσμένα (Σχήμα 2.1e). Αν $AM=a$, ο γεωμετρικός παράγοντας γίνεται $K=1/a$ που είναι ίδιος με τον γεωμετρικό παράγοντα της διάταξης Wenner και η φαινόμενη αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

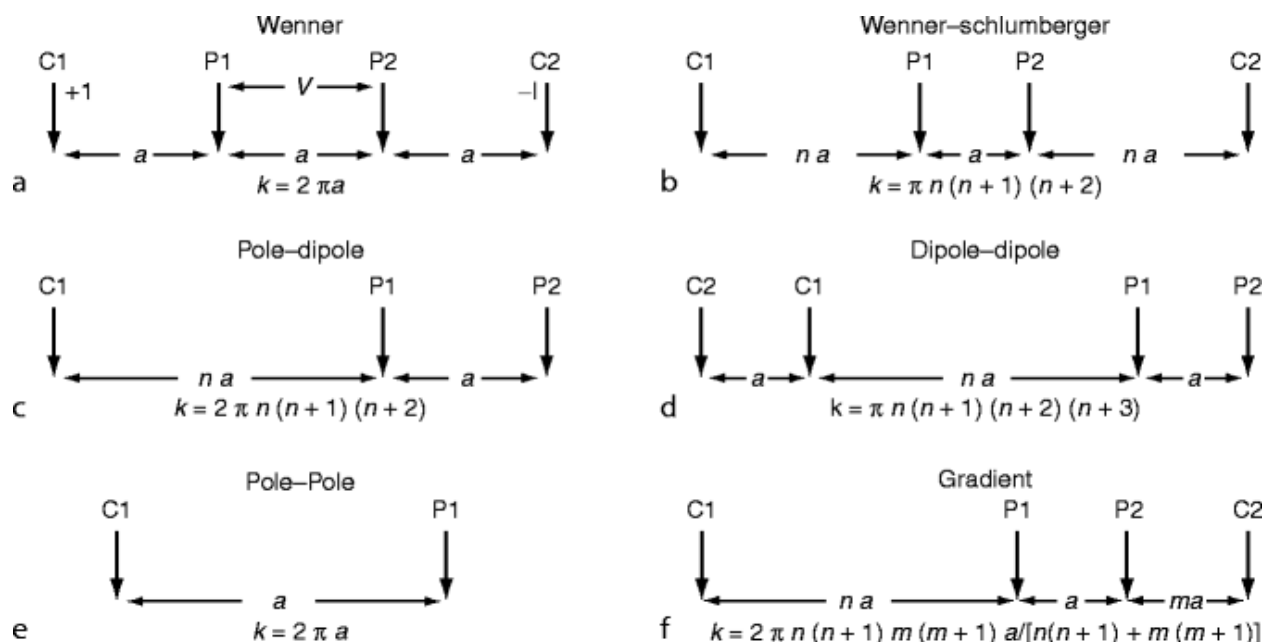
$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I}$$

Διάταξη Pole-Dipole: Τα ηλεκτρόδια δυναμικού βρίσκονται μεταξύ των ηλεκτροδίων ρεύματος, αλλά, ένα από τα ηλεκτρόδια ρεύματος, είναι τοποθετημένο σε απόσταση πολύ μεγαλύτερη από τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια (Σχήμα 2.1c).

$$\rho_A = 2\pi \frac{b(a+b)}{a} \frac{V}{I}$$

Για την συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η διάταξη Dipole-Dipole, η διάταξη Pole-Pole, η διάταξη multi-gradient, η διάταξη full_all και η διάταξη full_optimized.

Οι δύο πρώτες αναλύθηκαν παραπάνω ενώ, η διάταξη multi-gradient (πολλαπλής βαθμίδας) είναι παραλλαγή της Wenner-Schlumberger, έχει πολύ καλή διακριτική ικανότητα και ιδιαίτερα καλό λόγο σήματος/θορύβου. (Σχήμα 2.1f)



Σχήμα 2.1: Διατάξεις ηλεκτροδίων για μέτρηση ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης
(by Encyclopedia of Solid Earth Geophysics)

2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΙΑΚΩΒΙΑΝΟΥ ΠΙΝΑΚΑ

Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση μιας νέας μεθοδολογίας για εύρεση βέλτιστης διάταξης βασιζόμενη στον Ιακωβιανό πίνακα. Σύμφωνα με την μέθοδο αυτή, κατασκευάζεται ένα σύνολο δεδομένων όλων των πιθανών συνδυασμών ηλεκτροδίων ενώ, αφαιρούνται οι συνδυασμοί που έχουν εναλλάξ τα ηλεκτρόδια ρεύματος και δυναμικού καθώς και αυτοί για τους οποίους ο γεωμετρικός παράγοντας K είναι μεγαλύτερος από μια συγκεκριμένη τιμή. Έτσι, προκύπτει ένα ολικό σύνολο δεδομένων (**full_all**).

Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο Ιακωβιανός πίνακας των μετρήσεων και αναπτύσσονται αυτοματοποιημένοι αλγόριθμοι μέσω του προγράμματος Optcross1, οι οποίοι με βάση την ευαισθησία των μετρήσεων, που εκφράζεται με τον Ιακωβιανό πίνακα, επιλέγουν τις μετρήσεις αυτές που έχουν τη μεγαλύτερη ευαισθησία σε κάθε τμήμα της περιοχής μελέτης (**full_optimized**).

Ο αριθμός των μετρήσεων που έχουν επιλεγεί καθορίζεται από μια συνάρτηση βελτιστοποίησης, η οποία δημιουργεί μια σειρά μετρήσεων, που καλύπτουν κατά το μέγιστο δυνατό την εκάστοτε περιοχή μελέτης στο λιγότερο δυνατό χρόνο και με το μικρότερο κόστος.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας βασίζεται στην παραγωγή των διατάξεων μέτρησης, στον υπολογισμό της απόκρισης των διατάξεων για διάφορα μοντέλα και στην την αντιστροφή των αποτελεσμάτων. Παρακάτω περιγράφονται τα κύρια εργαλεία λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε στάδιο της εργασίας.

Παραγωγή πρωτοκόλλων: Optcross-Matlab

Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε το Optcross ένα πρόγραμμα της Matlab, που βασίζεται στον Ιακωβιανό πίνακα και με το οποίο έγινε η παραγωγή βελτιστοποιημένων πρωτόκολλων για τις μετρήσεις. Το πρόγραμμα παράγει ένα πλήρες σύνολο μετρήσεων για γνωστές διατάξεις (πόλου-πόλου, scihumbergerκ.λπ) και ένα σύνολο βέλτιστων δεδομένων επιλέγοντας μόνο τις καλύτερες μετρήσεις για κάθε περιοχή του υπεδάφους με βάση τον Ιακωβιανό Πίνακα. Για την λειτουργία του προγράμματος χρειάζονται μερικές παράμετροι που σχετίζονται με τις ανάγκες του προβλήματος και παρακάτω παρουσιάζονται οι βασικότερες:

Αρχικά ζητάει το όνομα του φακέλου στο οποίο θα εξάγει τα αποτελέσματα.

```
% ***** basic name for file saving  
str0='all5_24';
```

Πίνακας 3.1: Επιλογή ονόματος για τον φάκελο αποθήκευσης αποτελεσμάτων.

Η διάταξη του πλήρους συνόλου των δεδομένων ονομάζεται ως '*_full_meas', ενώ η βέλτιστη διάταξη ως '_opt_meas'. Οι υπόλοιπες διατάξεις αποθηκεύονται με τα αντίστοιχα ονόματα τους. Στη συνέχεια ζητείται ο αριθμός των ηλεκτροδίων καθώς και η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων.

```
% ***** inter electrode spacing in m  
e_dist=5;
```

Πίνακας 3.2: Επιλογή απόστασης μεταξύ ηλεκτροδίων.

Και τέλος ορίζονται οι διατάξεις που θα χρησιμοποιηθούν(διάταξη multi-gradient, διάταξη pole-pole, διάταξη dipole-dipole, διάταξη full-all και η διάταξη full-optimized).

```
% ***** array flags 1= array is used , 0= array is NOT used  
pt_flag=1    % pole-tripole ,  
bb_flag=0    % bipole-bipole ,  
mg_flag=0    % in-hole multi-gradient
```

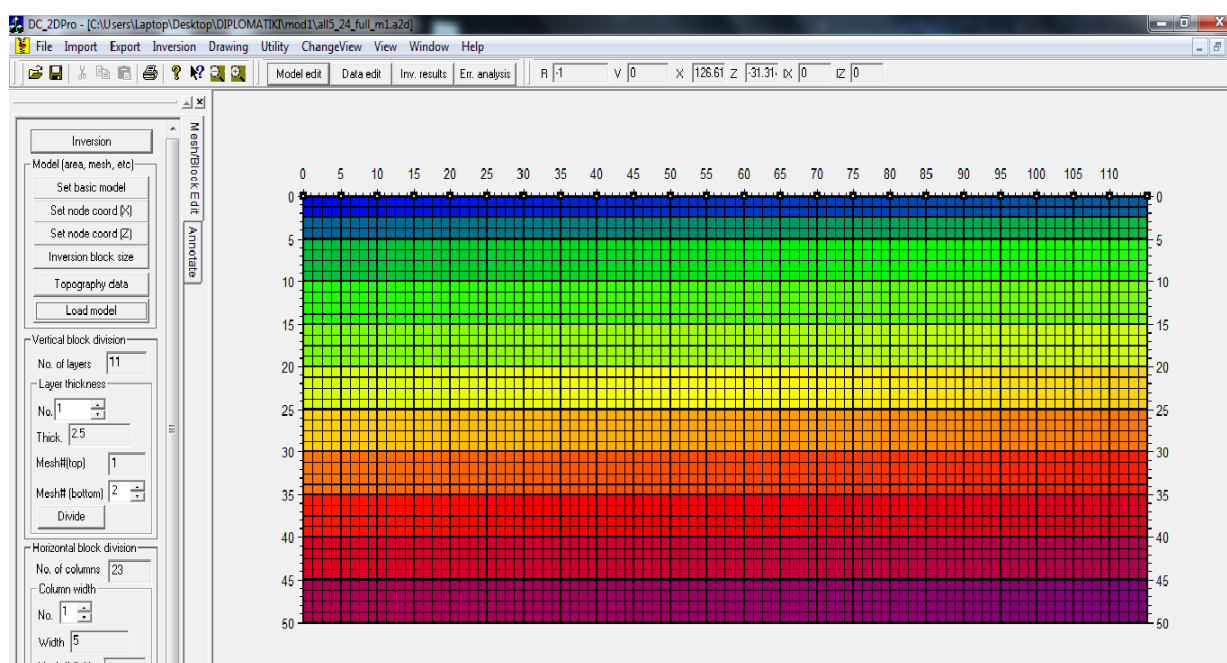
Πίνακας 3.3: Επιλογή διατάξεων που θα υπολογιστούν και θα χρησιμοποιηθούν.

Με την ολοκλήρωση του προγράμματος εμφανίζονται τα αρχεία στον φάκελο αποθήκευσης με τις μετρήσεις της κάθε διάταξης, το σύνολο των οποίων είναι:

Full_all--->899μετρήσεις
Full_optimized--->454μετρήσεις
Dipole-Dipole--->197μετρήσεις
Multi-Gradient--->516μετρήσεις
Pole-Pole--->186μετρήσεις

Επίλυση Ευθέος Προβλήματος(DC2PRO Modeling)

Η μελέτη απαιτεί την παραγωγή συνθετικών δεδομένων για διάφορα μοντέλα αντίστασης για όλα τα πρωτόκολλα μέτρησης. Τα συνθετικά δεδομένα προέκυψαν από τη χρήση του προγράμματος DC2DPRO.



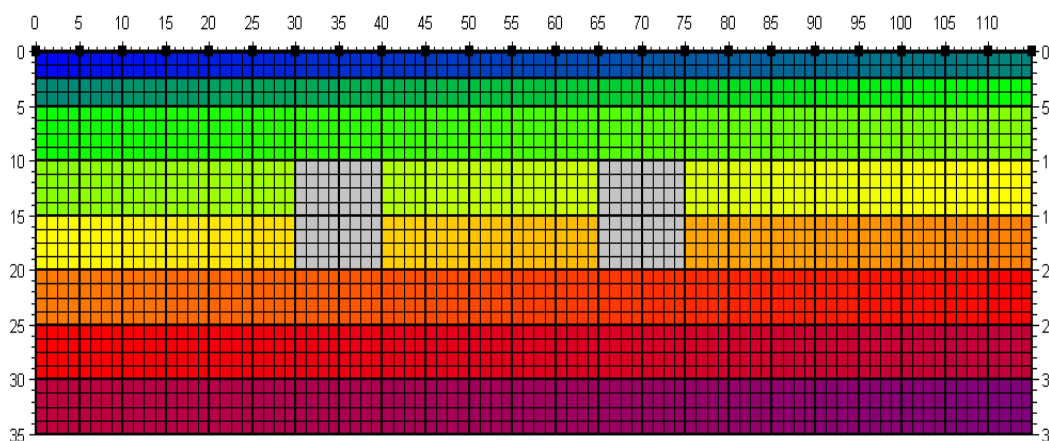
Εικόνα 3.1: Παράδειγμα δημιουργίας πρωταρχικού μοντέλου με την χρήση του προγράμματος DC2PRO.

Ειδικότερα έγινε εισαγωγή των αντιστάσεων των σωμάτων και του ημιχώρου για κάθε μοντέλο και στη συνέχεια με την ειδική ρουτίνα επίλυσης του ευθέος προβλήματος του προγράμματος (forward modeling) υπολογίστηκε η γεωηλεκτρική απόκριση του μοντέλου για κάθε πρωτόκολλο. Τα δεδομένα αυτά αντιστοιχούν στις γεωηλεκτρικές μετρήσεις που θα λαμβάναμε εάν η γεωηλεκτρική δομή της γης ήταν αυτή του μοντέλου.

Αντιστροφή (DC2PRO)

Στην παρακάτω εικόνα(Εικόνα 3.2) φαίνεται το πρώτο αρχικό γεωηλεκτρικό μοντέλο βάση του οποίου γίνεται η απεικόνιση της κάθε διάταξης μέσω της δισδιάστατης αντιστροφής δεδομένων.

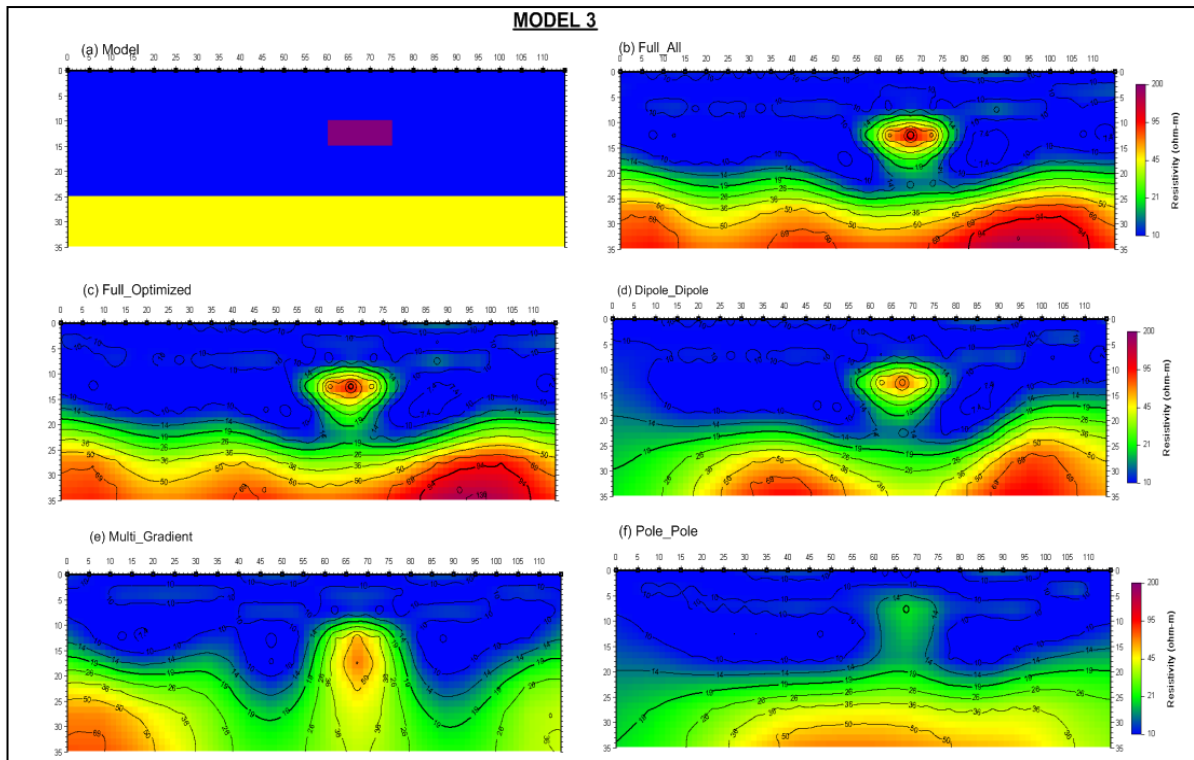
Με το DC2PROmodeling έγινε η δημιουργία του αρχείου **tst_full_m1_DC.A2D** για κάθε μοντέλο και μέσω numericalmodelingέγινε η αντιστροφή που έδωσε το ανάλογο αποτέλεσμα(Εικόνα 3.3). Το αποτέλεσμα της μεθόδου αντιστροφής έχει σαν σκοπό την εύρεση ενός μοντέλου αντίστασης που θα απεικονίσει όσο το δυνατόν καλύτερα το αρχικό μοντέλο(Εικόνα 3.3). Η αντιστροφή μπορεί να γίνει δισδιάστατα ή τρισδιάστατα. Η παρούσα εργασία πραγματεύεται μόνο την δισδιάστατη απεικόνιση.



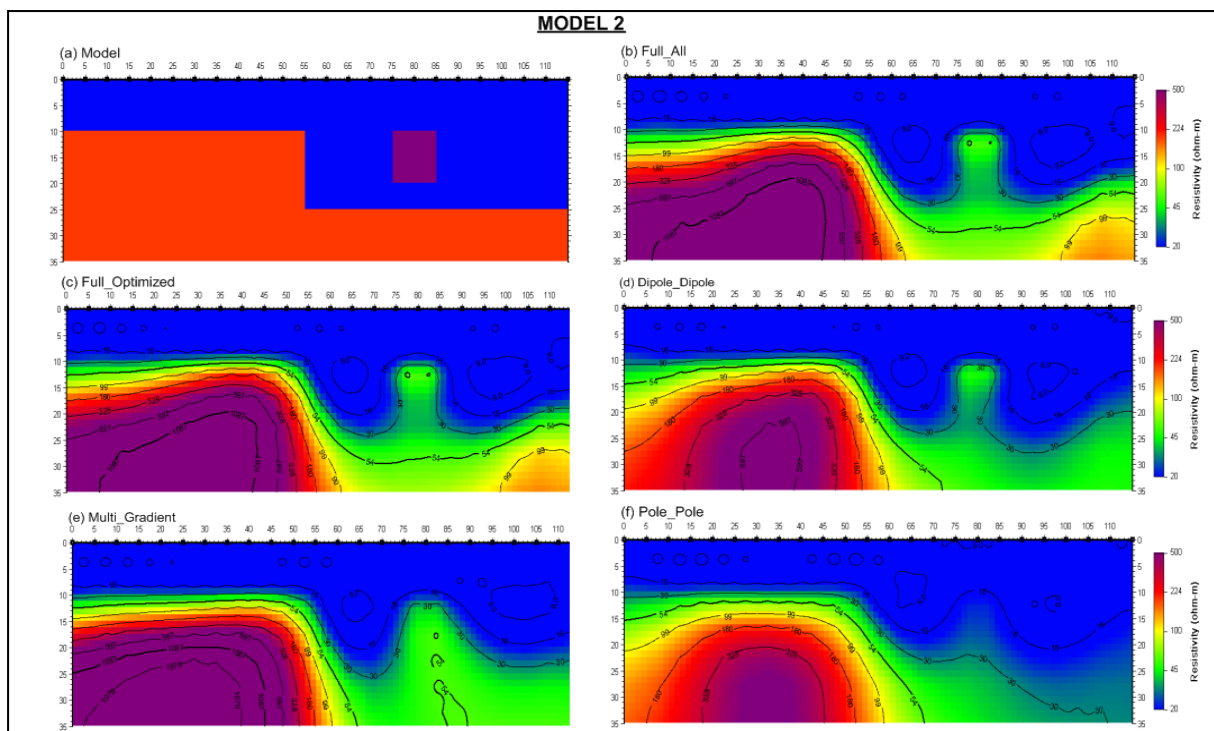
Εικόνα 3.2: Αποτέλεσμα του forwardmodellingγια το πρωταρχικό μοντέλο 1.

Στην εικόνα 3.3b-f φαίνεται το αποτέλεσμα της αντιστροφής για όλες τις διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν, όπου φαίνεται η απεικόνιση της τομής του αρχικού μοντέλου. Η προηγούμενη διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλα τα πρωταρχικά μοντέλα και διατάξεις.

Το κάθε γεωηλεκτρικό μοντέλο συνοδεύεται από μία χρωματική κλίμακα αποτελούμενη από ψυχρά (για τις χαμηλές αντιστάσεις) και θερμά (για τις υψηλές αντιστάσεις) χρώματα. Αριστερά φαίνεται η κλίμακα(σεm) βάθους, ενώ η οριζόντια κλίμακα αποτελεί το μήκος της γεωφυσικής διασκόπησης.

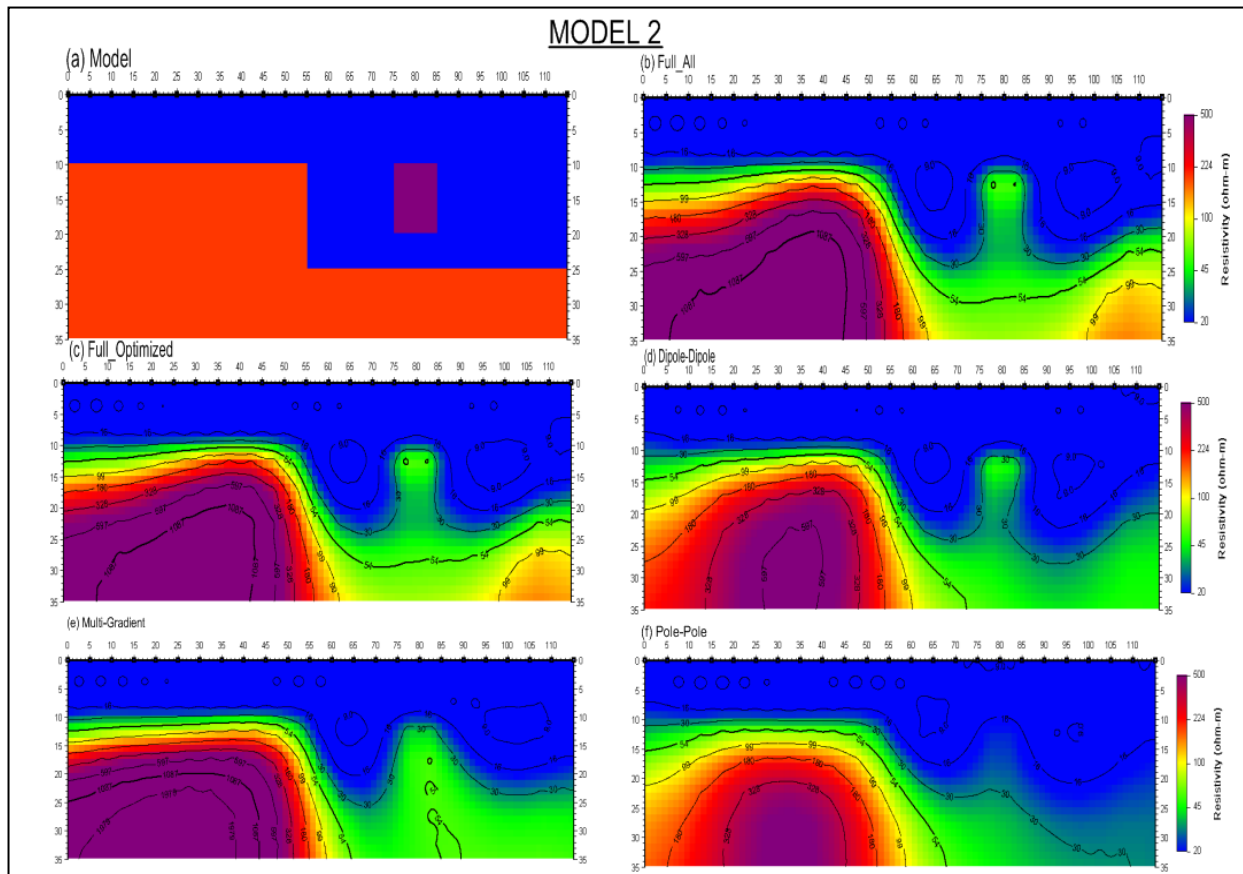


Εικόνα 3.3: Παράδειγμα της μεθόδου αντιστροφής μέσω του προγράμματος DC2PROmodeling.

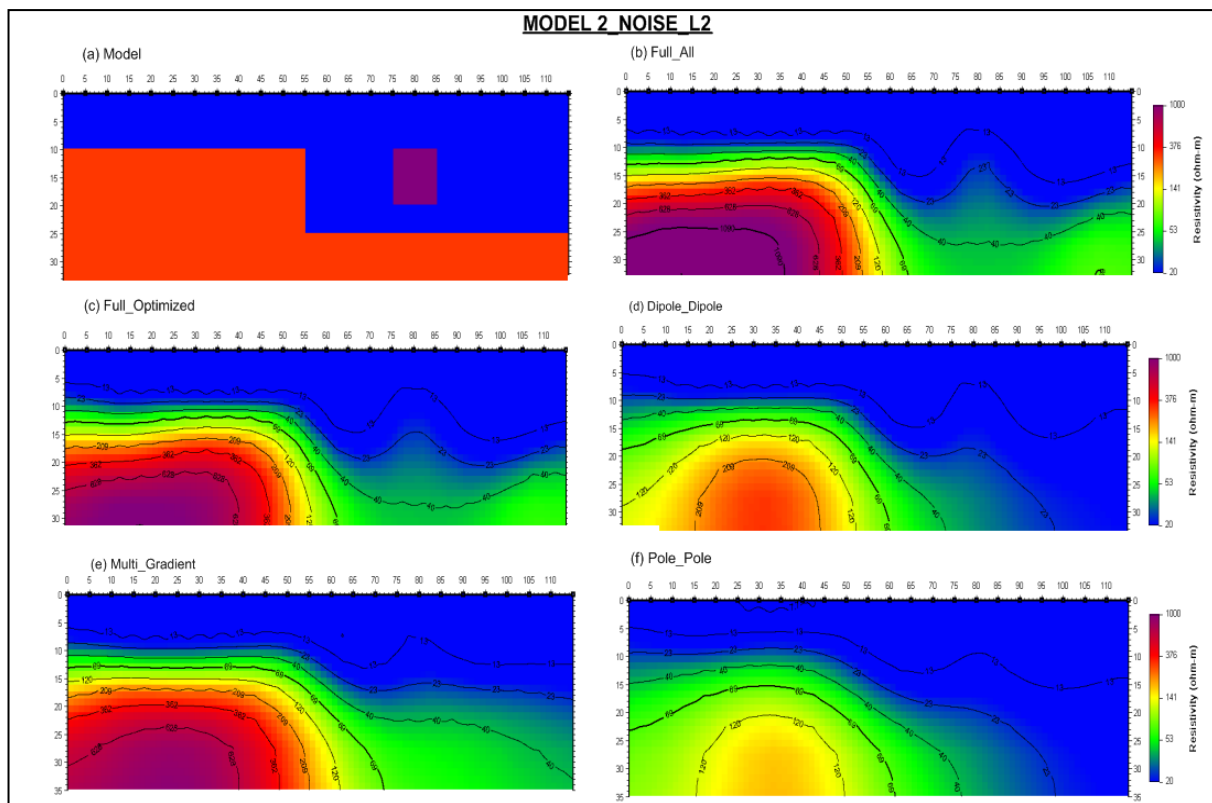


Εικόνα 3.4: Παράδειγμα της μεθόδου αντιστροφής μέσω του προγράμματος DC2PROmodeling.

Τα συνθετικά δεδομένα είναι θεωρητικά και άρα θεωρούνται «τέλεια». Για να προσομοιώσουμε την πραγματικότητα προστέθηκε θόρυβος 3% για όλες τις διατάξεις σε κάποια μοντέλα. Στην παραπάνω εικόνα 3.4 φαίνεται ένα πρωταρχικό μοντέλο για το οποίο έγινε αντιστροφή των καθαρών δεδομένων και ύστερα η αντιστροφή των δεδομένων θόρυβο 3% (εικόνα 3.5) . Επίσης για κάποια μοντέλα επιλέχτηκε διαφορετική διαδικασία αντιστροφής (L2) (εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.5: Αντιστροφή δεδομένων για το πρωταρχικό μοντέλο με ύπαρξη θορύβου 3%.



Εικόνα 3.6: Αντιστροφή δεδομένων με την χρήση ελαχίστων τετραγώνων.

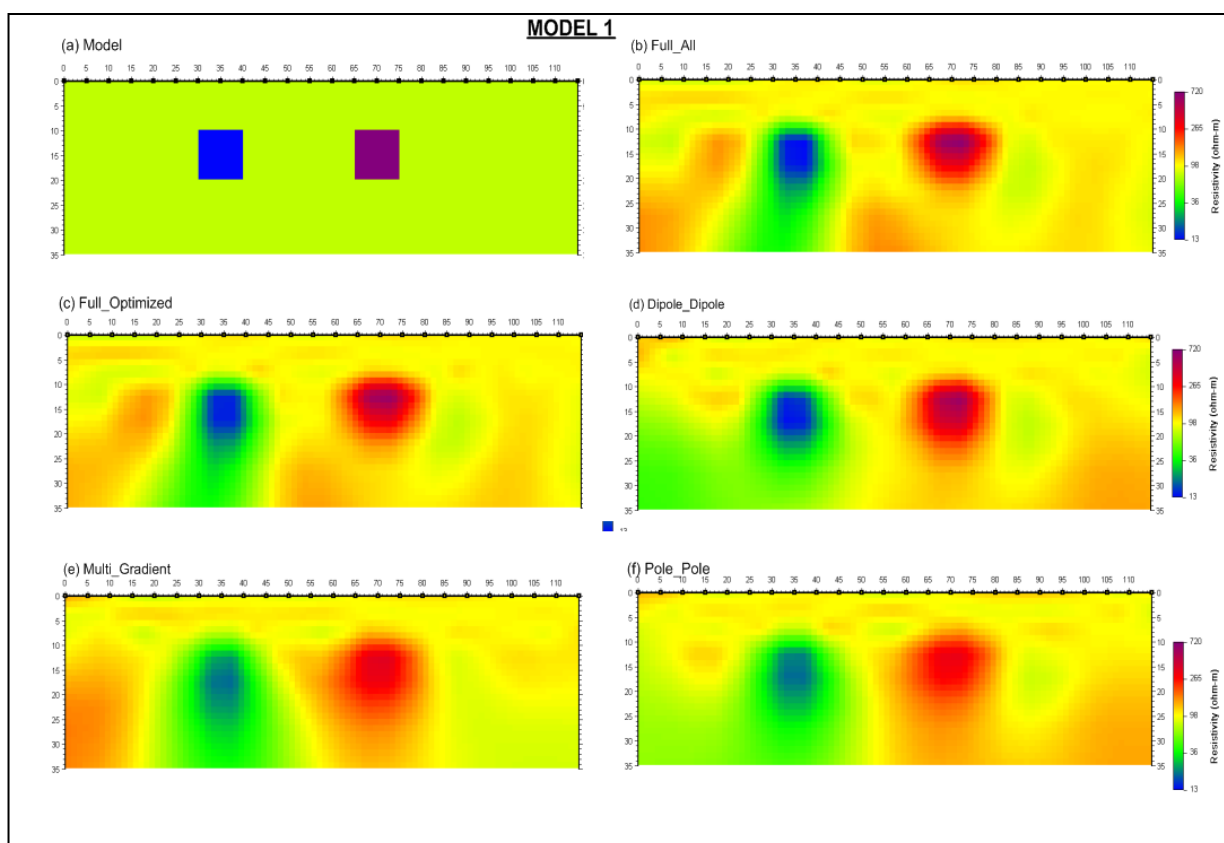
Σκοπός της αντιστροφής όπως αναφέρθηκε είναι να βρεθεί η διάταξη που προσομοιάζει καλύτερα το αρχικό μοντέλο. Έτσι, με την ολοκλήρωση των παραπάνω διαδικασιών για την αντιστροφή όλων των δεδομένων, γίνεται η συσχέτιση της κάθε διάταξης με το αντίστοιχο πρωταρχικό μοντέλο, μέσω του προγράμματος Microsoft Excel η οποία δίνει την συνολική εικόνα της κάθε διάταξης σε ποσοστό επί τοις εκατό. (100%= απόλυτη ταύτιση αρχικού μοντέλου με το αποτέλεσμα)

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών απεικονίσεων που προέκυψαν από τις διάφορες διατάξεις για τα διάφορα μοντέλα και θα παρουσιαστεί η συσχέτιση αυτών με το πρωταρχικό μοντέλο. Τέλος, για το κάθε μοντέλο θα σχολιαστούν οι διατάξεις σε σχέση με το αποτέλεσμα τους.

4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ 1

Το μοντέλο 1 αποτελείται από σώματα διαστάσεων 5x5 m, χαμηλής αντίστασης(10Ωμ) και υψηλής αντίστασης(1000) αντίστοιχα που βρίσκονται σε ημιχώρο μέσης αντίστασης (100Ωμ). Τα δύο σώματα βρίσκονται σε βάθος 10 μ και σε αποστάσεις 30μ και 65μ αντίστοιχα από την αρχή της τομής μετρήσεων, ενώ η μεταξύ τους απόσταση είναι 25μ.(Σχήμα 4.1a)



Σχήμα 4.1: (a) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (b) διάταξη ολικών δεδομένων, (c) βέλτιστης διάταξης, (d) διάταξης Διπόλου-Διπόλου, (e) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (f) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Στο σχήμα 4.1 φαίνονται τα γεωηλεκτρικά μοντέλα που προέκυψαν από την αντιστροφή των διατάξεων. Όπως παρατηρείται, τα μοντέλα διπόλου-διπόλου, full_all και optimized (Σχήμα 4.1

b,c,d) αναπαράγουν πολύ καλά την δομή του αρχικού μοντέλου. Εντοπίζουν σε μεγάλο βαθμό τα δύο σώματα μέσα στον ημιχώρο, με μικρή απόκλιση της τιμής αντίστασης τους σε σχέση με την πραγματική.

Ωστόσο, στα τρία αυτά μοντέλα, εμφανίζεται μια μικρή παραμόρφωση του πρώτου σώματος, η οποία αυξάνεται σε μεγαλύτερο βαθμό στα μοντέλα πόλου-πόλου και πολλαπλής βαθμίδας (Σχήμα 4.1 e,f), όπου η διάκριση των δύο σωμάτων είναι λιγότερο καθαρή. Η τιμή αντίστασης του ημιχώρου σε όλα τα μοντέλα, φαίνεται λίγο πιο μεγάλη απ' αυτήν του αρχικού μοντέλου και μεταβάλλεται στα διάφορα σημεία, κυρίως γύρω από τα δύο σώματα.

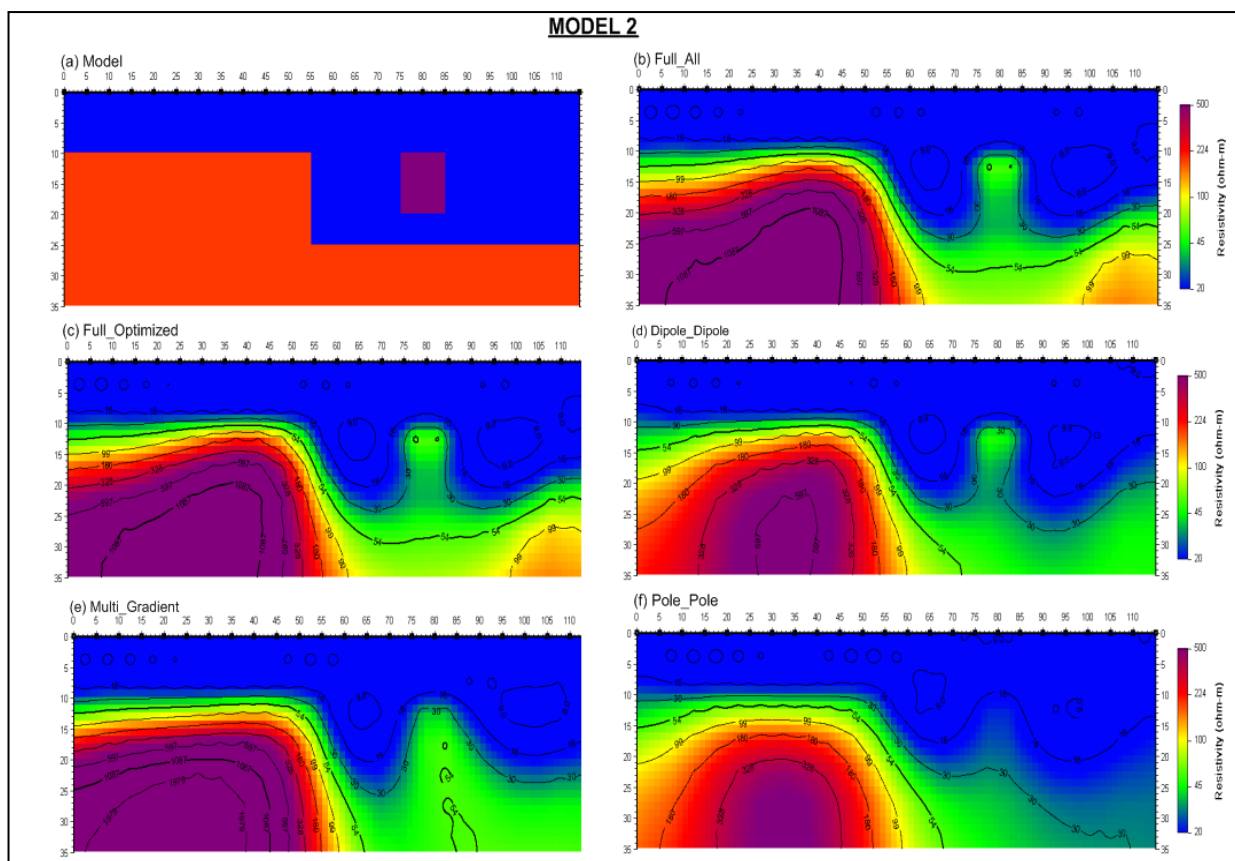
	full	opt	Dd	mg	pp
Correlation(%)	81,9954	82,1634	85,6732	69,7894	67,3706

Πίνακας 4.1: Η % σχετική συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1 η διάταξη διπόλου-διπόλου (dd) έχει συσχέτιση 86% ενώ ακολουθούν η διάταξη των ολικών δεδομένων και η βέλτιστη διάταξη (opt) με 82%. Λιγότερη συσχέτιση έχουν οι διατάξεις πολλαπλής βαθμίδας (mg) και πόλου-πόλου (pp) με 70% και 67% αντίστοιχα.

4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ 2

Το μοντέλο 2 αποτελείται από σώμα διαστάσεων 10x10 m, πολύ υψηλής αντίστασης (5000 Ωm) βρίσκεται σε ημιχώρο χαμηλής αντίστασης (10 Ωm) πάχους 10 m μέχρι τα 55m (απόσταση από το σημείο μέτρησης) ενώ, από' κει και πέρα το πάχος αυξάνεται στα 25 m. Το σώμα βρίσκεται σε βάθος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση 75 m από το σημείο μέτρησης (0m). Κάτω από τον ημιχώρο χαμηλής αντίστασης υπάρχει δεύτερος ημιχώρος μέσης αντίστασης (500 Ωm) από το οποίο το σώμα απέχει 20 m οριζόντια απόσταση, ενώ βρίσκεται 5 m πάνω απ' αυτό. (Σχήμα 4.2 α)



Σχήμα 4.2: (α) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (β) διάταξη ολικών δεδομένων, (γ) βέλτιστη διάταξη, (δ) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (ε) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (φ) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Από τα γεωηλεκτρικά μοντέλα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.2, προκύπτει η πολύ κακή αναπαραγωγή της δομής του αρχικού μοντέλου (Σχήμα 4.2α). Το σώμα που βρίσκεται στον πρώτο ημιχώρο είναι έντονα παραμορφωμένο σε όλα τα μοντέλα, πλην του μοντέλου πόλου-πόλου (Σχήμα 4.2f) όπου η διάκριση του είναι σχεδόν αδύνατη. Στο μοντέλο πολλαπλής βαθμίδας (Σχήμα 4.2e) το σώμα φαίνεται να είναι τμήμα του δεύτερου ημιχώρου, όπως επίσης φαίνεται το ίδιο, αλλά, σε μικρότερο βαθμό στα μοντέλα ολικών δεδομένων, βέλτιστης διάταξης και διπόλου-διπόλου (Σχήμα 4.2 b,c,d). Η τιμή αντίστασης του σώματος απέχει πολύ από την πραγματική της.

Το στρώμα χαμηλής αντίστασης εμφανίζεται κοντά στη πραγματική του τιμή, ενώ η δομή του είναι αρκετά καλή, με εξαίρεση γύρω από το σώμα και στην επαφή του με το δεύτερο ημιχώρο σε βάθος κάτω από 20 m. Η δομή του δεύτερου ημιχώρου είναι έντονα παραμορφωμένη στο μοντέλο πόλου-πόλου και λιγότερο στα υπόλοιπα μοντέλα. Η παραμόρφωση όπως και η απόκλιση της τιμής αντίστασης από την πραγματική, συμβαίνει κυρίως κάτω από το βυθισμένο σώμα.

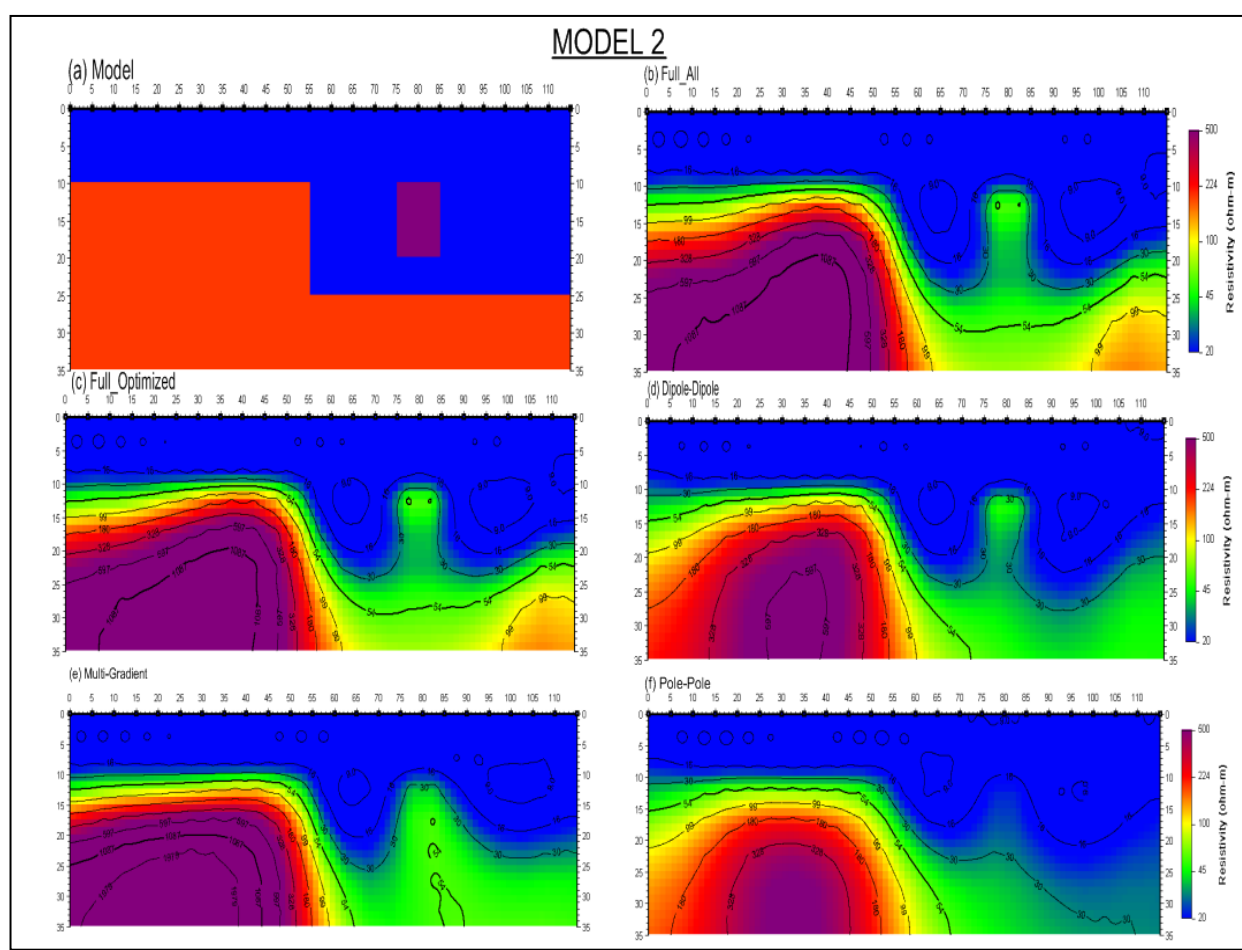
	Full	Opt	dd	mg	Pp
Correlation(%)	12,73867	12,80884	14,82327	10,87459	13,41262

Πίνακας 4.2: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο.

Ωστόσο, όπως φαίνεται στον πίνακα 4.2, το μοντέλο που συσχετίζεται περισσότερο με το αρχικό μοντέλο είναι το μοντέλο διπόλου-διπόλου με 15% ενώ ακολουθεί το μοντέλο πόλου-πόλου με 13,4% και τελευταία βρίσκεται το μοντέλο πολλαπλής βαθμίδας.

4.2.1 ΜΟΝΤΕΛΟ 2-ΜΕ ΘΟΡΥΒΟ

Το παρακάτω μοντέλο (Σχήμα 4.2.1) είναι το μοντέλο 2 με προσθήκη θορύβου 3% στις μετρήσεις για καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας.



Σχήμα 4.2.1: Μοντέλο 2 με προσθήκη θορύβου 3%. (α) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (β) διάταξη ολικών δεδομένων, (γ) βέλτιστη διάταξη, (δ) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (ε) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (φ) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Η ύπαρξη θορύβου 3% στις μετρήσεις δεν φαίνεται να διαφοροποιεί τις απεικονίσεις των διατάξεων σε σχέση με αυτές χωρίς θόρυβο. Από το σχήμα 4.2.1 η διάταξη ολικών δεδομένων και η βέλτιστη διάταξη απεικονίζουν καλύτερα το πρωταρχικό μοντέλο, ενώ σε μικρότερο βαθμό βρίσκονται οι άλλες διατάξεις.

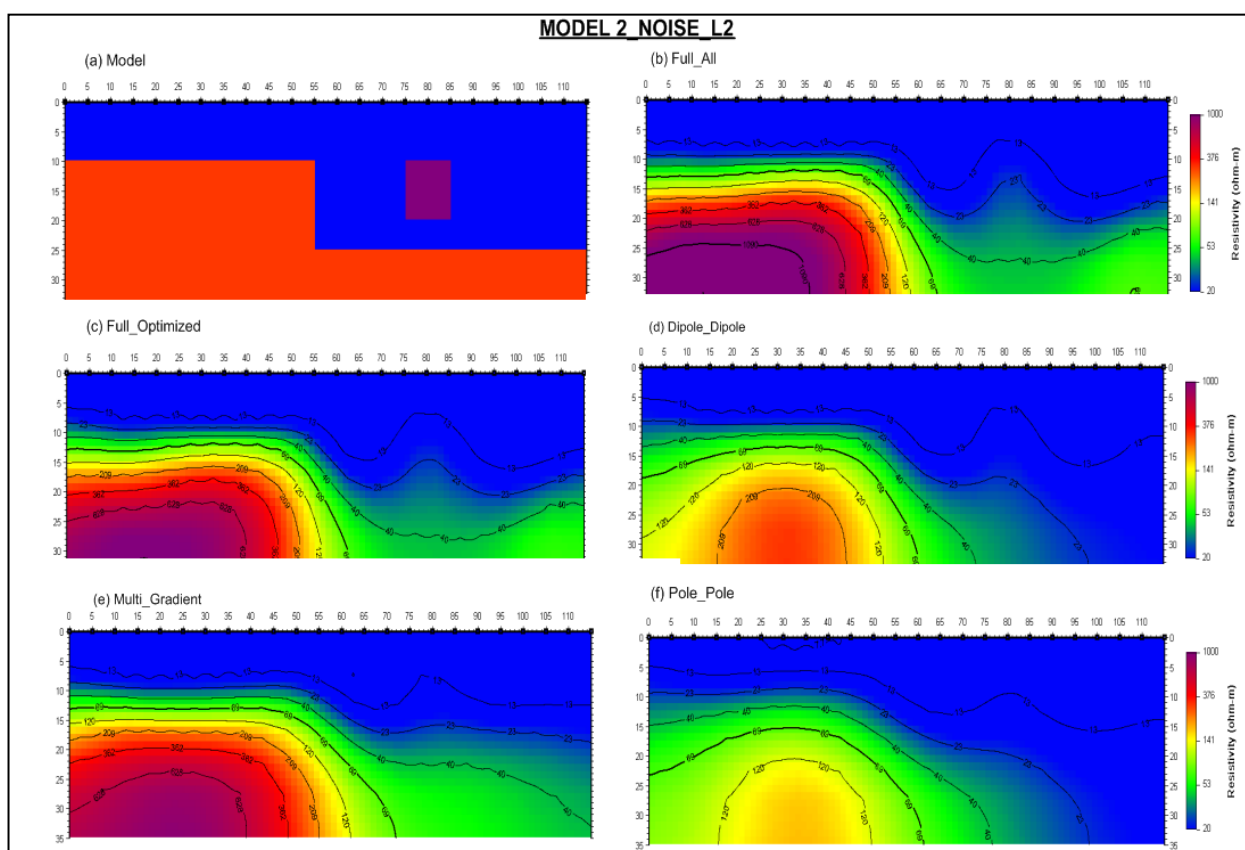
Όπως και στο μοντέλο 2(χωρίς θόρυβο) ο υπολογισμός της συσχέτισης της κάθε διάταξης δίνει ως καλύτερη διάταξη την διπόλου-διπόλου με 14,8%. Η προσθήκη θορύβου στις μετρήσεις δεν δείχνει να επηρεάζει ιδιαίτερα την απεικόνιση των διατάξεων.

	Full	Opt	dd	mg	pp
Correlation(%)	12,7387	12,8088	14,8233	10,8746	13,4126

Πίνακας 4.2.1: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο. Οι μετρήσεις έχουν προσθήκη θορύβου 3%.

4.2.2 ΜΟΝΤΕΛΟ 2-ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΑ

Παρακάτω παρουσιάζεται το μοντέλο 2(Σχήμα 4.2.2) με ύπαρξη θορύβου 3% και χρήση ελαχίστων τετραγώνων στην ανάλυση των δεδομένων.



Σχήμα 4.2.2: Μοντέλο 2 με προσθήκη θορύβου 3% και χρήση ελαχίστων τετραγώνων στην ανάλυση των δεδομένων. (α) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (β) διάταξη ολικών δεδομένων, (γ) βέλτιστη διάταξη, (δ) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (ε) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (φ) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Η ύπαρξη θορύβου 3% στις μετρήσεις και η ανάλυση των δεδομένων με ελάχιστα τετράγωνα στις μετρήσεις δεν φαίνεται να διαφοροποιούν τις απεικονίσεις των διατάξεων σε σχέση με αυτές χωρίς θόρυβο. Από το σχήμα 4.2.2 η διάταξη διπόλου-διπόλου και η πόλου-πόλου φαίνεται να απεικονίζουν καλύτερα το πρωταρχικό μοντέλο, ενώ σε μικρότερο βαθμό βρίσκονται οι άλλες διατάξεις.

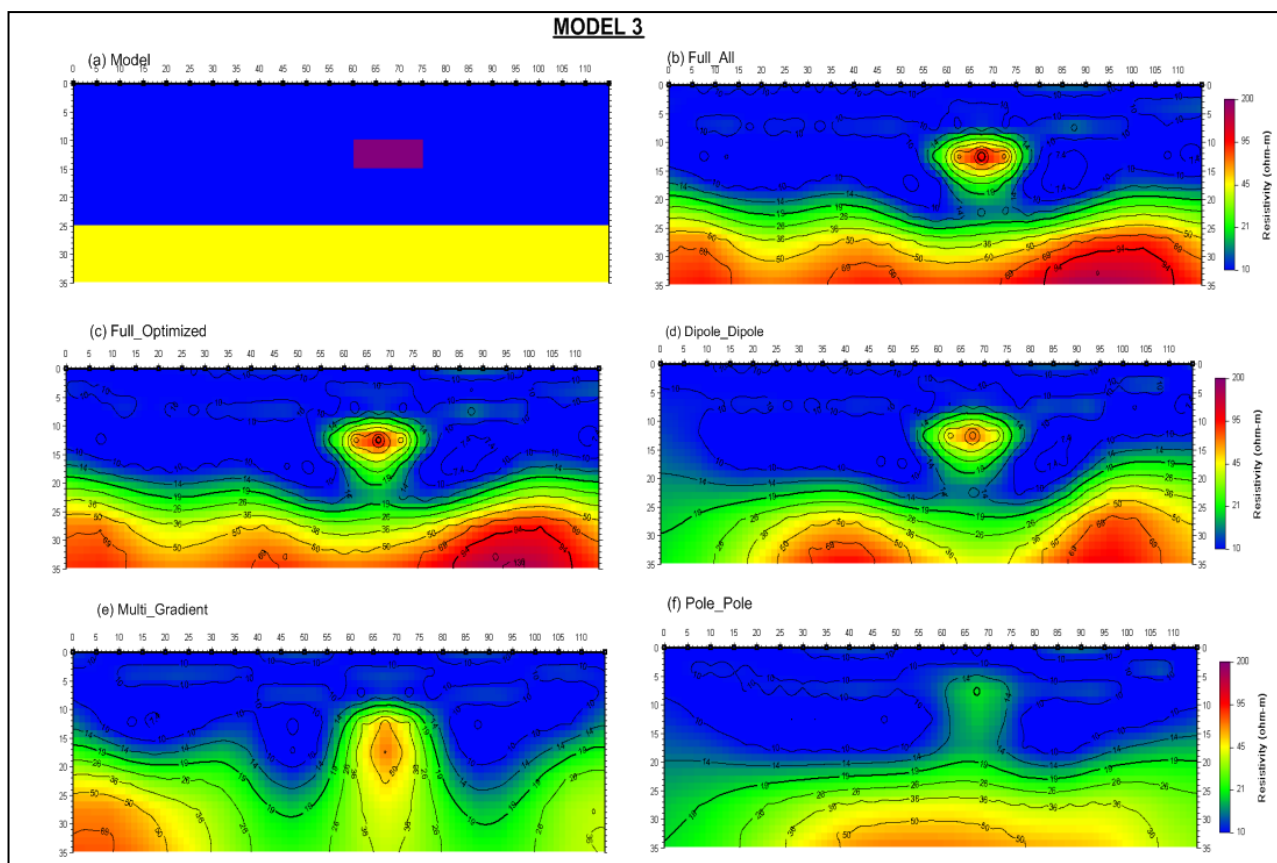
Από τον πίνακα 4.2.2 η διάταξη πόλου-πόλου δίνεται με συσχέτιση 15,5%, ενώ η διπόλου-διπόλου με 14,5%. Οι υπόλοιπες διατάξεις έχουν συσχέτιση κάτω από 13%.

	full	Opt	dd	mg	pp
Correlation(%)	11,3993	12,283	14,4937	12,6392	15,5368

Πίνακας 4.2.2: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο. Η ανάλυση των μετρήσεων έχει γίνει με ελάχιστα τετράγωνα.

4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ 3

Το μοντέλο 3 αποτελείται από σώμα διαστάσεων 15x5 m και αντίστασης 1000 Ohm/mτο οποίο βρίσκεται σε βάθος 10 m από την επιφάνεια του εδάφους, μέσα σε ημιχώρο χαμηλής αντίστασης(10 Ohm/m). Ο ημιχώρος έχει πάχος 25 m, ενώ υπέρκειται από ημιχώρο μέσης αντίστασης(100 Ohm/m) και πλάτους 10 m. Το σώμα απέχει απόσταση 10 m από τον δευτεροημιχώρο. (Σχήμα 4.3a)



Σχήμα 4.3: (α) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (β) διάταξη ολικών δεδομένων, (γ) βέλτιστη διάταξη, (δ) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (ε) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (φ) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Στο Σχήμα 4.3 διακρίνονται οι απεικονίσεις των γεωηλεκτρικών μοντέλων. Στα μοντέλα ολικών δεδομένων, βέλτιστης διάταξης και διπόλου-διπόλου φαίνεται ότι η απεικόνιση της δομής του εδάφους είναι καλύτερη απ' ότι στα άλλα δύο μοντέλα. Στα τρία αυτά μοντέλα ο ημιχώρος χαμηλής αντίστασης παρουσιάζεται λίγο παραμορφωμένος στα σημεία γύρω από το βυθισμένο σώμα και στην επαφή του με τον κατώτερο ημιχώρο, ενώ η τιμή αντίστασης του είναι ίδια της πραγματικής. Η δομή του σώματος είναι αρκετά παραμορφωμένη, σε βαθμό που φαίνεται να συσχετίζεται με τον κατώτερο ημιχώρο, ενώ η τιμή αντίστασης του αποκλίνει πολύ από την πραγματική. Τέλος, ο κάτω ημιχώρος φαίνεται να έχει μεγαλύτερο πάχος από το κανονικό και απεικονίζεται έντονα ανομοιογενής. Για τα μοντέλα πολλαπλής βαθμίδας και πόλου-πόλου όλα τα παραπάνω ισχύουν σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό, αφού οι δύο ημιχώροι είναι έντονα παραμορφωμένοι, χωρίς καμιά δομή και το σώμα είτε φαίνεται να ανήκει στον κατώτερο ημιχώρο χωρίς να διακρίνεται η δομή του, είτε δεν διακρίνεται καθόλου.

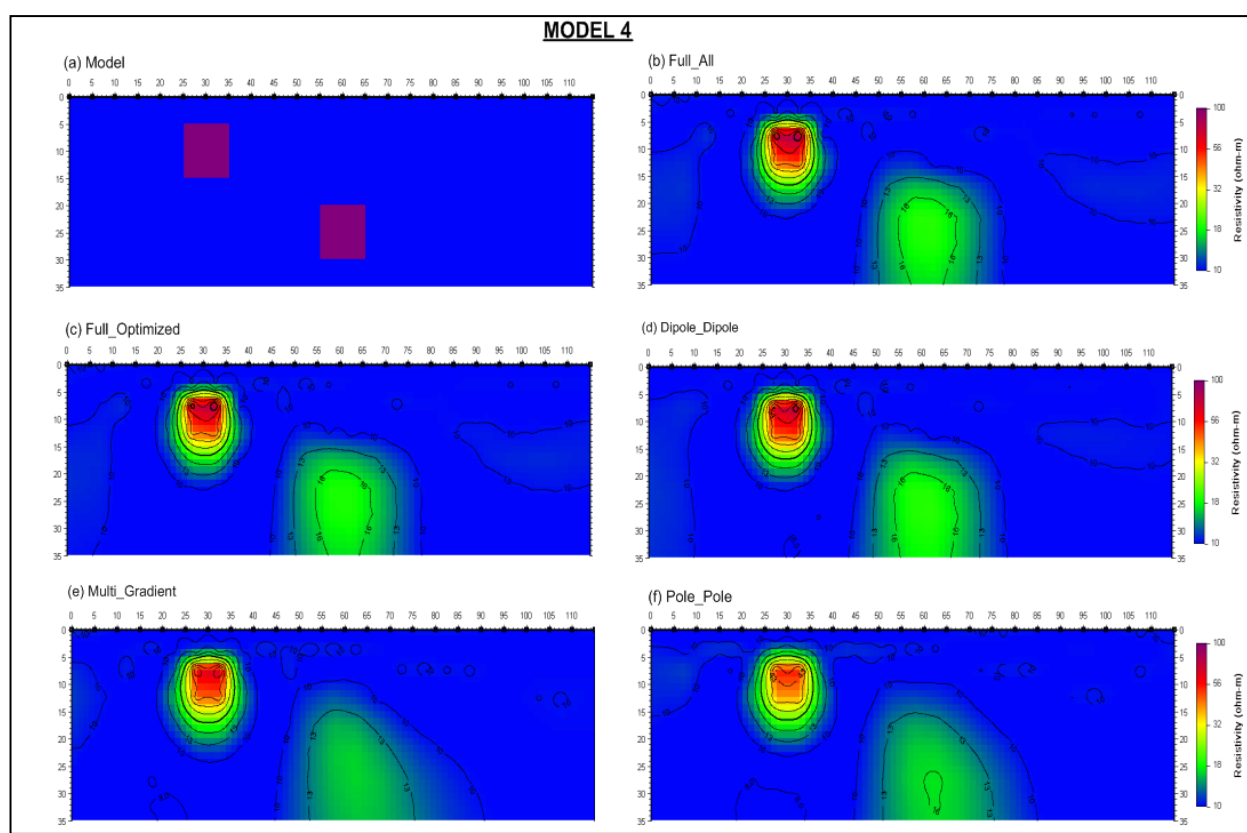
	full	opt	Dd	mg	Pp
Correlation(%)	51,6365	47,98	47,1707	38,2776	23,5615

Πίνακας 4.3: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο.

Στον πίνακα 4.3 επιβεβαιώνεται η σχετικά καλύτερη απεικόνιση των τριών πρώτων διατάξεων. Την μέγιστη συσχέτιση με το πρωταρχικό μοντέλο την έχει η διάταξη ολικών δεδομένων με 52%, ενώ η πόλου-πόλου έχει την ελάχιστη με 24%.

4.4 ΜΟΝΤΕΛΟ 4

Το μοντέλο 4 (Σχήμα 4.4α) αποτελείται από ημιχώρο χαμηλής αντίστασης 10 Ohm-m και δύο σώματα διαστάσεων 10x10m και αντίστασης 100 Ohm-m. Το πρώτο σώμα βρίσκεται σε βάθος 5 m και σε απόσταση 25 μαπό το σημείο μετρήσεων, ενώ το δεύτερο σώμα είναι βυθισμένο σε βάθος 20 m και απέχει απόσταση 55 μαπό το σημείο μετρήσεων.



Σχήμα 4.4: (α) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (β) διάταξη ολικών δεδομένων, (γ) βέλτιστη διάταξη, (δ) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (ε) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (φ) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Τα γεωηλεκτρικά μοντέλα του Σχήματος 4.4 παρουσιάζουν μια πολύ κακή απεικόνιση της δομής του εδάφους του πρωταρχικού μοντέλου. Το σώμα που βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους αποκλίνει πολύ από την πραγματική τιμή αντίστασης, η δομή του διακρίνεται αρκετά παραμορφωμένη και σε μεγαλύτερο βάθος απ'το κανονικό, ενώ εξαιτίας της επαφής του με τον ημιχώρο υπάρχει έντονη αλλοίωση του σχήματος και του μεγέθους του. Το σώμα που βρίσκεται σε μεγαλύτερο βάθος εμφανίζεται με έντονη παραμόρφωση στην επαφή του με τον ημιχώρο, ενώ η τιμή αντίστασης του είναι πολύ μικρότερη από την πραγματική. Το μέγεθος του είναι διπλάσιο

απ'το κανονικό και εμφανίζεται σαν ανωμαλία που έρχεται από μεγαλύτερο βάθος. Για τον ημχώρο, εκτός από τα σημεία επαφής του με τα δύο σώματα ισχύει η ομοιογένεια του στο υπόλοιπο τμήμα και η τιμή αντίστασης του κοντά στην πραγματική.

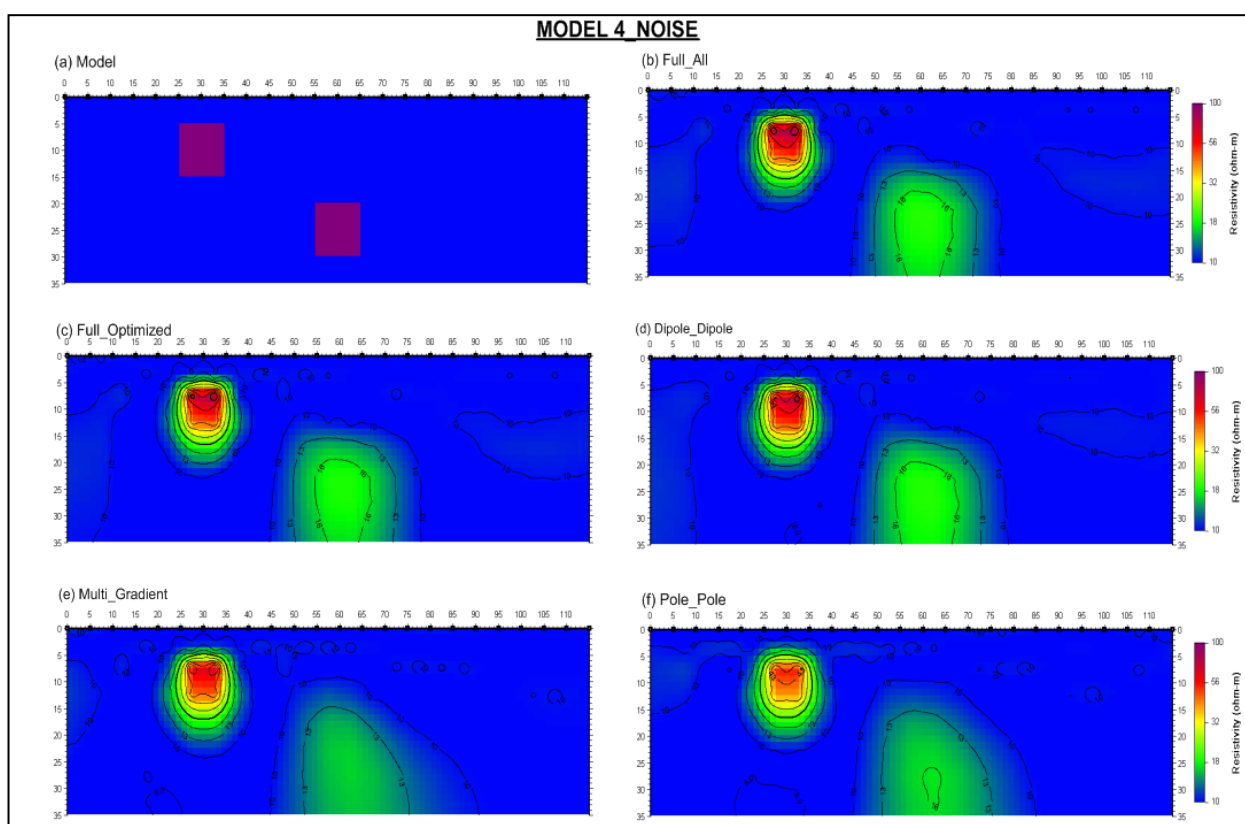
	Full	Opt	dd	mg	Pp
Correlation(%)	20,4903	20,5224	21,8045	17,4913	21,1974

Πίνακας 4.4: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.4 όλα τα γεωηλεκτρικά μοντέλα έχουν πολύ χαμηλή συσχέτιση με το μοντέλο διπόλου-διπόλου να παρουσιάζει την μέγιστη συσχέτιση με μόλις 22% έναντι των υπολοίπων μοντέλων.

4.4.1 ΜΟΝΤΕΛΟ 4-ΜΕ ΘΟΡΥΒΟ

Στο σχήμα 4.4.1 παρουσιάζονται οι απεικονίσεις του μοντέλου 4 με ύπαρξη θορύβου 3%.



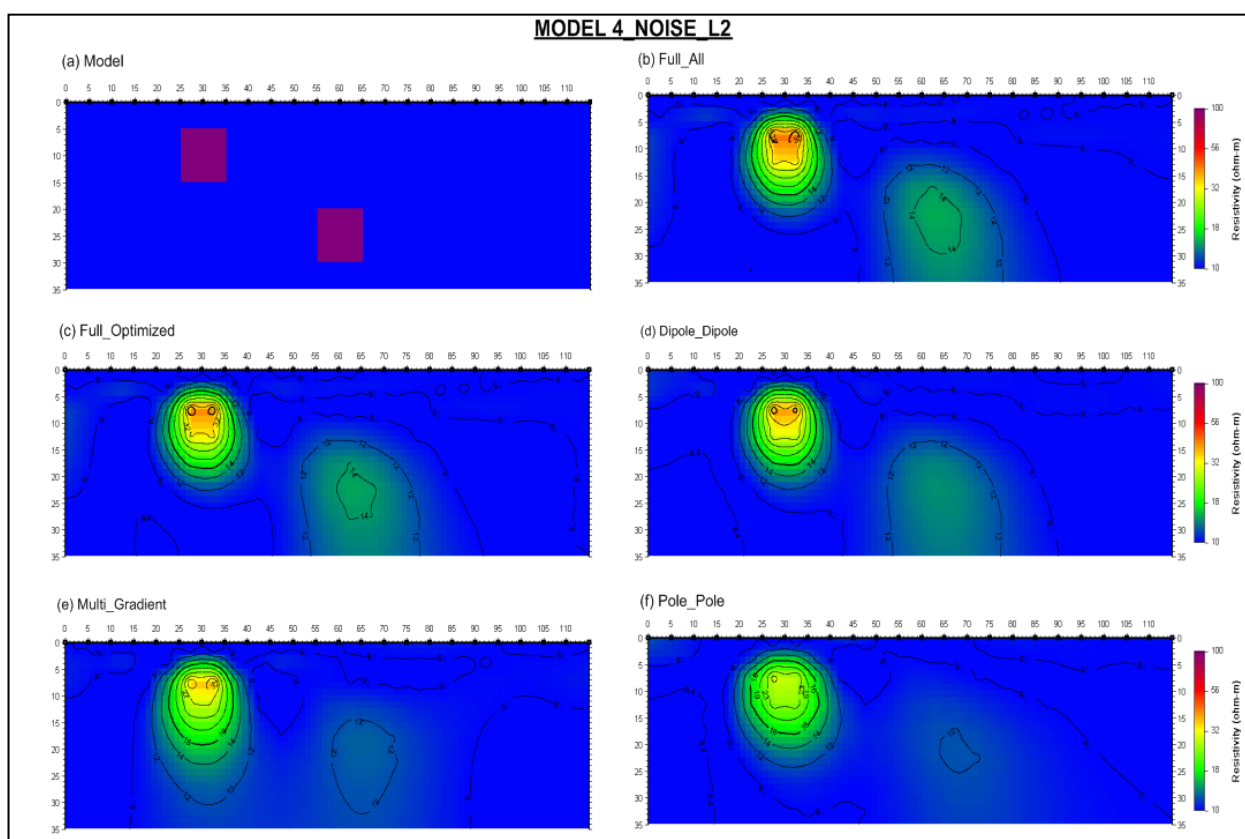
Σχήμα 4.4.1: Μοντέλο 2 με προσθήκη θορύβου 3%. (α) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (β) διάταξη ολικών δεδομένων, (γ) βέλτιστη διάταξη, (δ) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (ε) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (φ) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Από το σχήμα 4.4.1 και τον πίνακα 4.4.1 φαίνεται η μικρή συσχέτιση με το πρωταρχικό μοντέλο, με μέγιστη τιμή 22% της διάταξης διπόλου-διπόλου. Συγκριτικά με το μοντέλο 4-χωρίς θόρυβο(Σχήμα 4.4) δεν παρουσιάζεται καμία διαφορά είτε στις απεικονίσεις, είτε στην συσχέτιση της κάθε διάταξης.

	full	Opt	dd	mg	pp
Correlation(%)	20,4903	20,5224	21,8045	17,4913	21,1974

Πίνακας 4.4.1: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο. Οι μετρήσεις έχουν προσθήκη θορύβου 3%.

4.4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ 4-ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΑ



Σχήμα 4.4.2: Μοντέλο 2 με προσθήκη θορύβου 3% και χρήση ελαχίστων τετραγώνων στην ανάλυση των δεδομένων. (a) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (b) διάταξη ολικών δεδομένων, (c) βέλτιστη διάταξη, (d) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (e) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (f) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Στο σχήμα 4.2.2 παρουσιάζονται οι απεικονίσεις του μοντέλου 4 με χρήση ελαχίστων τετραγώνων στην ανάλυση των δεδομένων και ύπαρξη θορύβου 3%.

Από την εξέταση του σχήματος 4.2.2 προκύπτει ότι η ύπαρξη θορύβου 3% στις μετρήσεις και η ανάλυση των δεδομένων με ελάχιστα τετράγωνα στις μετρήσεις δεν φαίνεται να διαφοροποιούν τις απεικονίσεις των διατάξεων σε σχέση με αυτές χωρίς θόρυβο. Η μόνη ουσιαστική διαφορά τους είναι η μείωση της συσχέτισης της κάθε διάταξης.

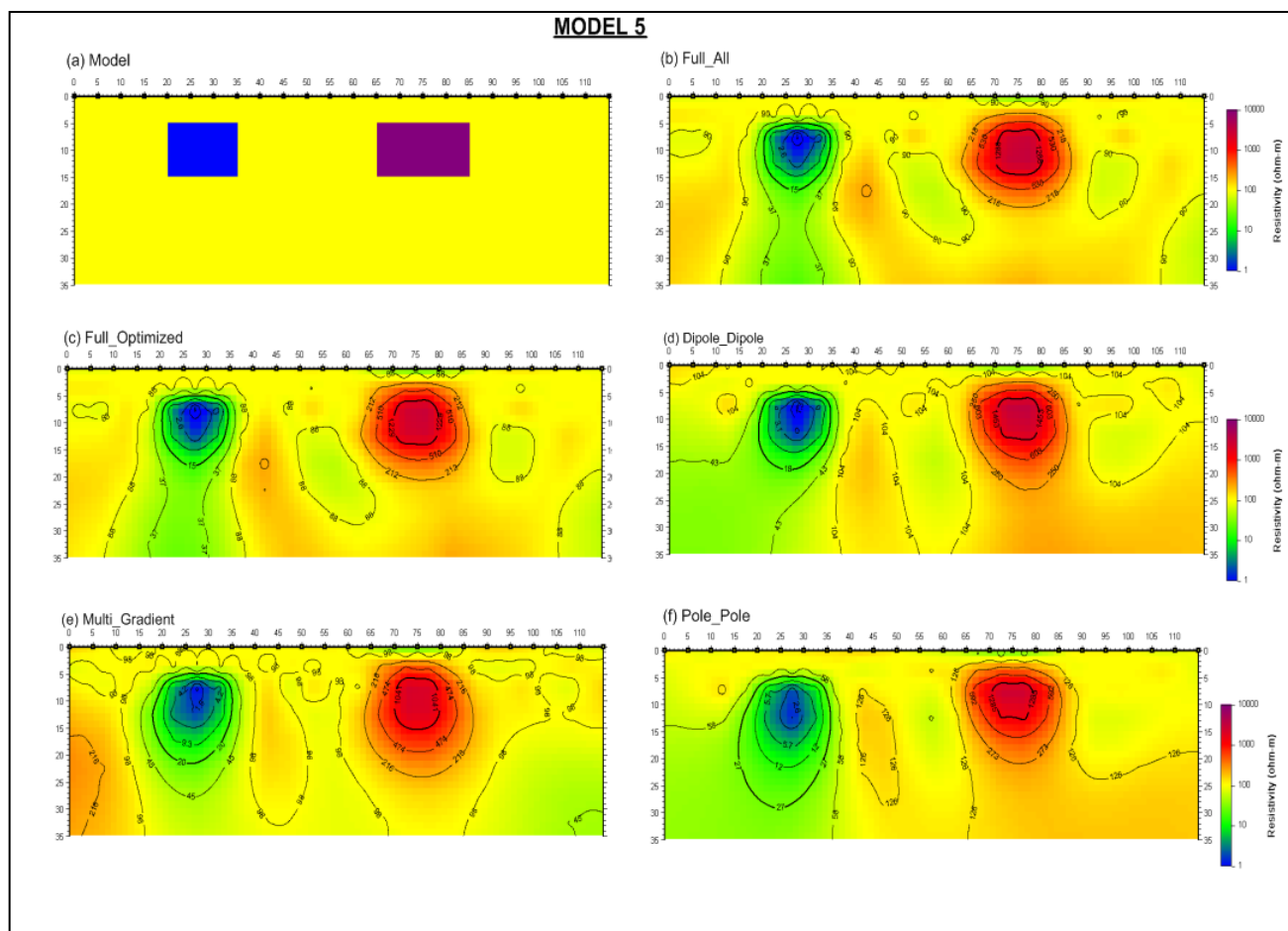
Η διάταξη ολικών δεδομένων, η βέλτιστη διάταξη και η διάταξη διπόλου-διπόλου φαίνεται να απεικονίζουν καλύτερα το πρωταρχικό μοντέλο, ενώ σε μικρότερο βαθμό βρίσκονται οι άλλες δύο διατάξεις. Από τον πίνακα 4.2.2 φαίνεται η πολύ μικρή συσχέτιση (<20%) των απεικονίσεων με το πρωταρχικό μοντέλο.

	Full	opt	dd	Mg	pp
Correlation(%)	17,7845	17,7451	17,0541	11,3857	10,6583

Πίνακας 4.2.2: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο. Η ανάλυση των μετρήσεων έχει γίνει με ελάχιστα τετράγωνα.

4.5 ΜΟΝΤΕΛΟ 5

Το μοντέλο 5 (Σχήμα 4.5a) αποτελείται από ημιχώρομέσης αντίστασης 100 Ohm και δύο σώματα σε βάθος 5m από την επιφάνεια του εδάφους. Το πρώτο σώμα βρίσκεται σε απόσταση 20m από το σημείο μετρήσεων και έχει αντίσταση 10ohm/m. Το δεύτερο σώμα απέχει απόσταση 65m από το σημείο μετρήσεων και έχει αντίσταση 10000ohm/m. Τα δύο σώματα έχουν διαστάσεις 15x10m και 20x10m αντίστοιχα, ενώ απέχουν 30m απόσταση μεταξύ τους.



Σχήμα 4.5: (a) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (b) διάταξη ολικών δεδομένων, (c) βέλτιστη διάταξη, (d) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (e) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (f) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Από τα αποτελέσματα των διατάξεων του σχήματος 4.5, φαίνεται η πολύ καλή αναπαραγωγή της δομής του αρχικού μοντέλου (Σχήμα 4.5a). Η διάταξη ολικών δεδομένων που παρουσιάζει την μεγαλύτερη συσχέτιση (Πίνακας 4.5) με το πρωταρχικό μοντέλο, απεικονίζει σε μεγάλο βαθμό την δομή του κάθε σώματος, ενώ διατηρεί αρκετά την ομοιογένεια του ημιχώρου. Ωστόσο, το πρώτο σώμα είναι παραμορφωμένο στο κατώτερο σημείο του, δηλαδή, σε βάθος 15m και κάτω, ενώ φαίνεται να συνδέεται με τον ημιχώρο του οποίου μεταβάλλει την τιμή αντίστασης σ' αυτό το βάθος. Για το δεύτερο σώμα, η απεικόνιση της δομής του είναι πιο ομοιόμορφη, με τη διαφορά ότι φαίνεται πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, έχει μεγαλύτερο μέγεθος και αποκλίνει αρκετά από την πραγματική τιμή αντίστασης στα σημεία που βρίσκονται πιο μακριά από το κέντρο του σώματος.

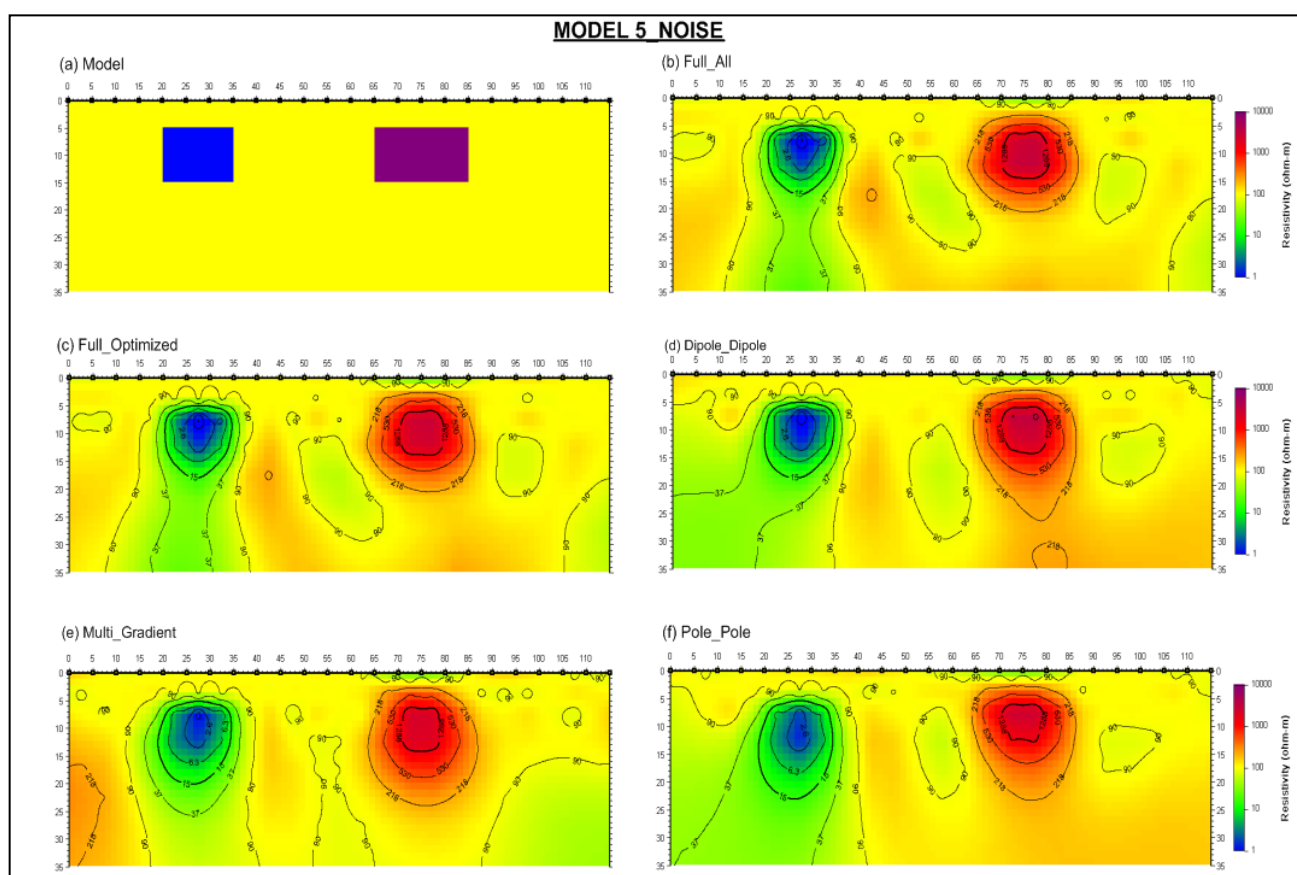
	Full	Opt	Dd	mg	pp
Correlation(%)	83,0784	82,6353	80,0509	79,6559	80,0582

Πίνακας 4.5: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο.

Οι απεικονίσεις των υπόλοιπων διατάξεων (Σχήμα 4.5- c,d,e,f) δεν διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό από αυτή της διάταξης ολικών δεδομένων. Η μόνη ουσιαστική διαφορά είναι στην μεγαλύτερη παραμόρφωση της δομής των δύο σωμάτων, στο μέγεθος και στην κατανομή της τιμής αντίστασης γύρω και κυρίως κάτω απ' αυτά

4.5.1 ΜΟΝΤΕΛΟ 5-ΜΕ ΘΟΡΥΒΟ

Στο σχήμα 4.5.1 παρουσιάζονται οι απεικονίσεις του μοντέλου 5 με ύπαρξη θορύβου 3%.



Σχήμα 4.5.1: Μοντέλο 2 με προσθήκη θορύβου 3%. (a) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (b) διάταξη ολικών δεδομένων, (c) βέλτιστη διάταξη, (d) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (e) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (f) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Όπως στο κανονικό μοντέλο 5 (Σχήμα 4.5), έτσι και εδώ με την ύπαρξη θορύβου οι πέντε διατάξεις δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα, εμφανίζοντας τις δύο γεωφυσικές ανωμαλίες και πλησιάζοντας πολύ την τιμή αντίστασης τους. Η διάταξη ολικών δεδομένων είναι αυτή με την μέγιστη συσχέτιση 83%, με τις υπόλοιπες να ακολουθούν σε πολύ κοντινές τιμές (Πίνακας 4.5.1).

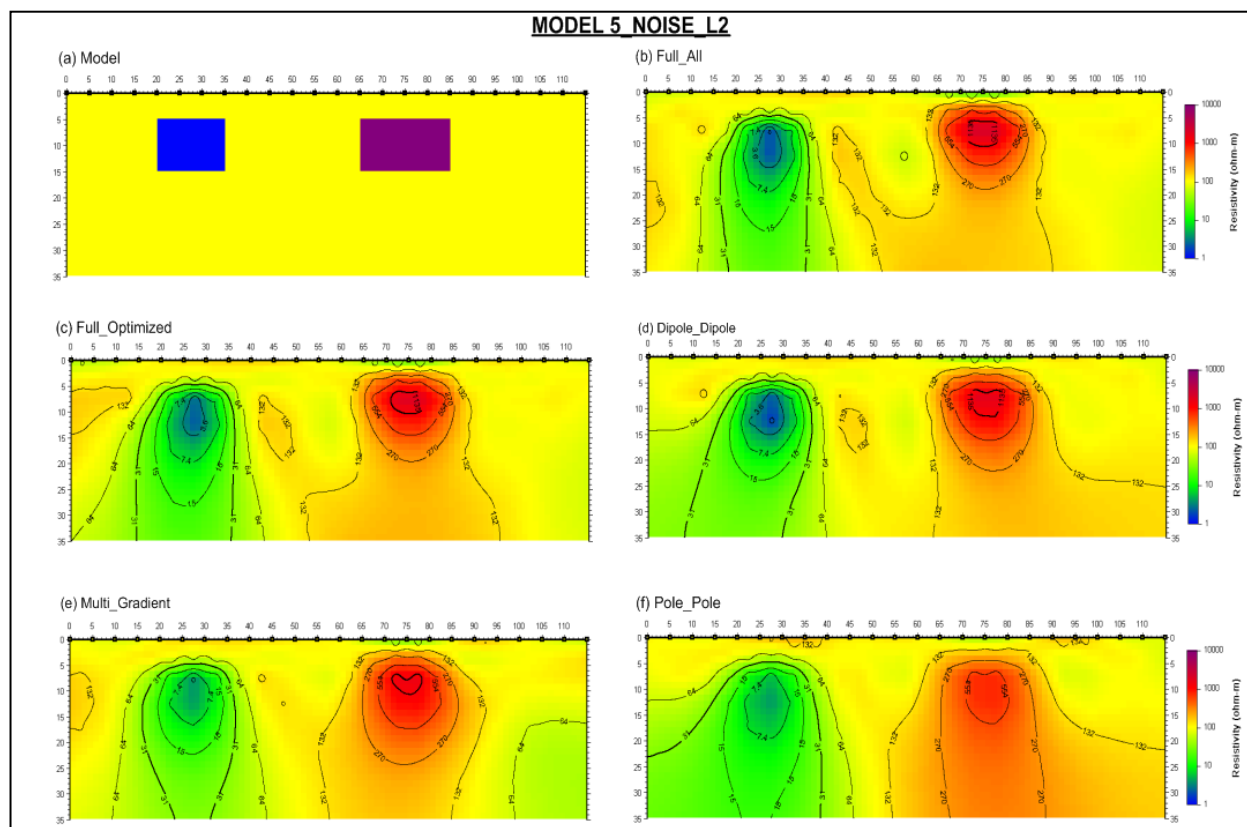
	Full	Opt	dd	mg	Pp
Correlation(%)	83,0784	82,6353	80,0509	79,6559	80,0582

Πίνακας 4.5.1: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο. Οι μετρήσεις έχουν προσθήκη θορύβου 3%

4.5.2 ΜΟΝΤΕΛΟ 5-ΕΛΑΧΙΣΤΑ ΤΕΤΡΑΓΩΝΑ

Στο σχήμα 4.5.2 παρουσιάζονται οι απεικονίσεις του μοντέλου 4 με χρήση ελαχίστων τετραγώνων στην ανάλυση των δεδομένων και ύπαρξη θορύβου 3%.

Η ύπαρξη θορύβου 3% στις μετρήσεις και η ανάλυση των δεδομένων με ελάχιστα τετράγωνα στις μετρήσεις μειώνουν ελάχιστα την συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο, σε σχέση με το μοντέλο 5.(Σχήμα4.5)



Σχήμα 4.5.2: Μοντέλο 2 με προσθήκη θορύβου 3% και χρήση ελαχίστων τετραγώνων στην ανάλυση των δεδομένων. (a) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (b) διάταξη ολικών δεδομένων, (c) βέλτιστη διάταξη, (d) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (e) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (f) διάταξη Πόλου-Πόλου.

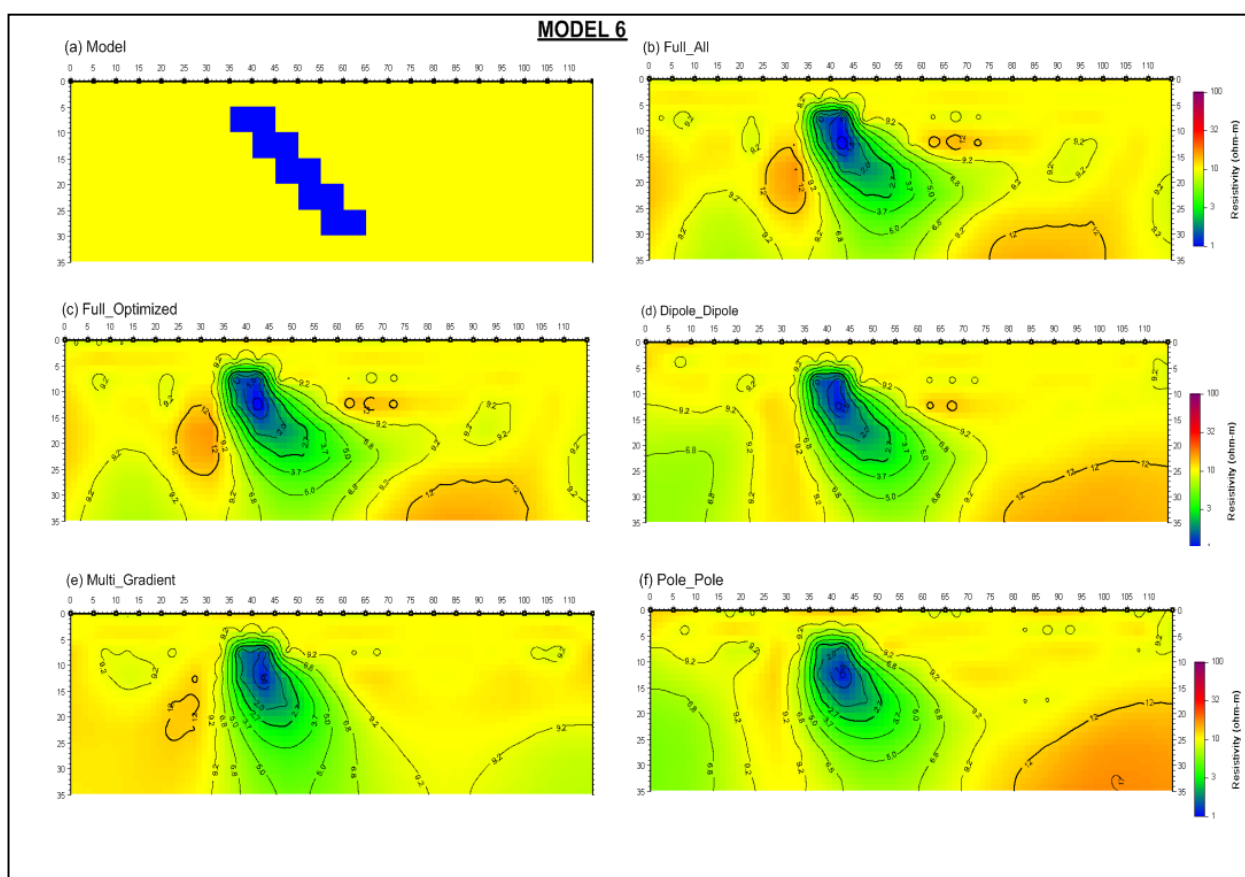
Από το σχήμα 4.5.2 η διάταξη διπόλου-διπόλου και πολλαπλής βαθμίδας απεικονίζουν καλύτερα το πρωταρχικό μοντέλο, ενώ σε μικρότερο βαθμό βρίσκονται οι άλλες διατάξεις. Από τον πίνακα 4.2.2 φαίνεται η μεγάλη συσχέτιση των μετρήσεων με το πρωταρχικό μοντέλο.

	Full	Opt	dd	mg	Pp
Correlation(%)	73,9871	76,4546	82,2649	81,1416	65,9029

Πίνακας 4.5.2: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο. Η ανάλυση των μετρήσεων έχει γίνει με ελάχιστα τετράγωνα.

4.6 ΜΟΝΤΕΛΟ 6

Το μοντέλο 6 (Σχήμα 4.6a) αποτελείται από ημιχώρο αντίστασης 100 Ohm και μια γεωφυσική ανωμαλία σε μορφή σκάλας, με αντίσταση 1 Ohm. Η ανωμαλία ξεκινάει από τα 5m βάθος και φτάνει μέχρι τα 30m ενώ, απέχει απόσταση 35m από το σημείο μετρήσεων.



Σχήμα 4.6: (a) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (b) διάταξη ολικών δεδομένων, (c) βέλτιστη διάταξη, (d) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (e) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (f) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Το μοντέλο αυτό είναι πιο πολύπλοκο από τα προηγούμενα, αφού η γεωφυσική ανωμαλία είναι πολύ μικρότερης αντίστασης από τον ημιχώρο μέσα στον οποίο βρίσκεται.

Από τα αποτελέσματα των γεωηλεκτρικών μοντέλων του σχήματος 4.6 προκύπτει η δυσκολία προσέγγισης της δομής του πρωταρχικού μοντέλου σε σχέση με το βάθος. Η αντίθεση του στρώματος και της γεωφυσικής ανωμαλίας είναι μεγάλη, ωστόσο όσο αυξάνεται το βάθος γίνεται όλο και πιο δύσκολο να απεικονιστεί σωστά το πρωταρχικό μοντέλο. Η διάταξη ολικών δεδομένων δείχνει να παρουσιάζει λίγο καλύτερα αποτελέσματα από ότι οι υπόλοιπες, χωρίς να διαφέρει αισθητά. Γενικά, για όλες τις διατάξεις, ισχύει ότι γίνεται καλή αναπαραγωγή της γεωφυσικής ανωμαλίας στα πρώτα 5-10m, αλλά, από εκεί και πέρα αδυνατούν να εντοπίσουν την χαμηλής αντίστασης γεωφυσική ανωμαλία μέσα στο πολύ υψηλότερης αντίστασης ημιχώρο. Η παραμόρφωση κάτω από τα 10m είναι μεγάλη για την ανωμαλία και για τον ημιχώρο, αποκλίνοντας πολύ από την σωστή κατανομή της αντίστασης.

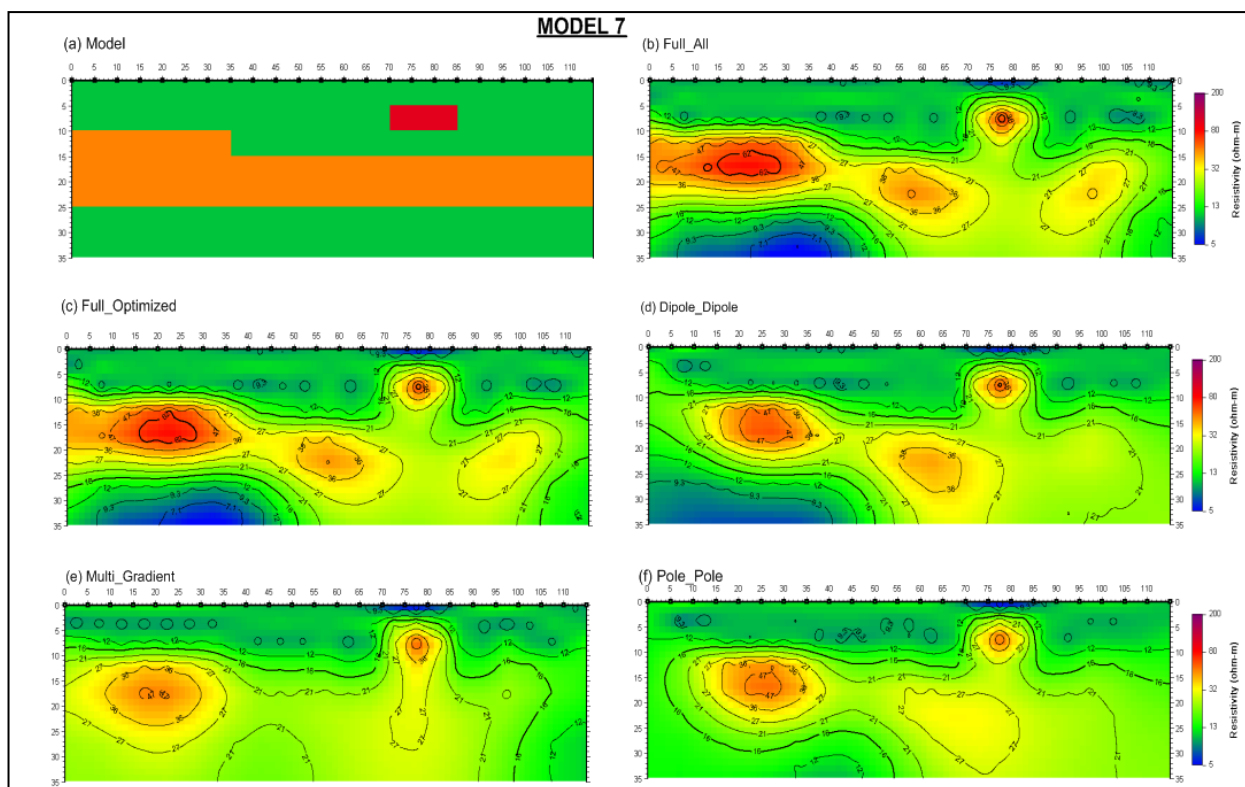
Ο ημιχώρος δεν παρουσιάζεται ομογενής και η γεωφυσική ανωμαλία δεν διατηρεί καθόλου το σχήμα της, ενώ στο μεγαλύτερο τμήμα της ανωμαλίας η αντίσταση είναι μεγαλύτερη από ότι θα έπρεπε. Αξιοσημείωτο είναι ότι ο ημιχώρος φαίνεται να επηρεάζεται από την ανωμαλία σε κατά τόπους τμήματα μακριά από αυτή εμφανίζοντας μικρότερη τιμή αντίστασης. Τελικά, με βάση τον πίνακα 4.5 προκύπτει ότι η συσχέτιση των διατάξεων με το πρωταρχικό μοντέλο είναι μέτρια, ενώ η μορφή της γεωφυσικής ανωμαλίας δεν σχηματίζεται εύκολα. Εκτός της διάταξης πόλου-πόλου που έχει την ελάχιστη συσχέτιση με 46%, οι υπόλοιπες διατάξεις κυμαίνονται περίπου μεταξύ 56-58%, με την διάταξη ολικών δεδομένων να έχει την μέγιστη με 57,9%.

	full	Opt	Dd	mg	Pp
Correlation(%)	57,8876	57,2186	56,3227	56,9887	46,3557

Πίνακας 4.5: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο.

4.7 ΜΟΝΤΕΛΟ 7

Στο σχήμα 4.7a παρουσιάζεται η δομή του πρωταρχικού μοντέλου 7, όπου κατά βάση υπάρχει ένας ημιχώρος(πράσινο χρώμα) μέσης αντίστασης 100ohm/m. Σε βάθος 10m από την επιφάνεια του εδάφους παρεμβάλλεται ένας δεύτερος ημιχώρος(πορτοκαλίχρώμα)μέσης αντίστασης 50ohm/m. Μέχρι τα 35m από το σημείο μετρήσεων ο δεύτερος ημιχώρος έχει πάχος 15m, ενώ από τα 35m και πέρα το βάθος και το πάχος του ημιχώρου μειώνονται κατά 5m. Επιπλέον, σε βάθος 5m από την επιφάνεια του εδάφους και μέσα στον πρώτο ημιχώρο υπάρχει σώμα διαστάσεων 20x5m και αντίστασης 100ohm/m. Το σώμα απέχει 5m από τον παρεμβαλλόμενο ημιχώρο.



Σχήμα 4.7: (a) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (b) διάταξη ολικών δεδομένων, (c) βέλτιστη διάταξη, (d) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (e) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (f) διάταξη Πόλου-Πόλου.

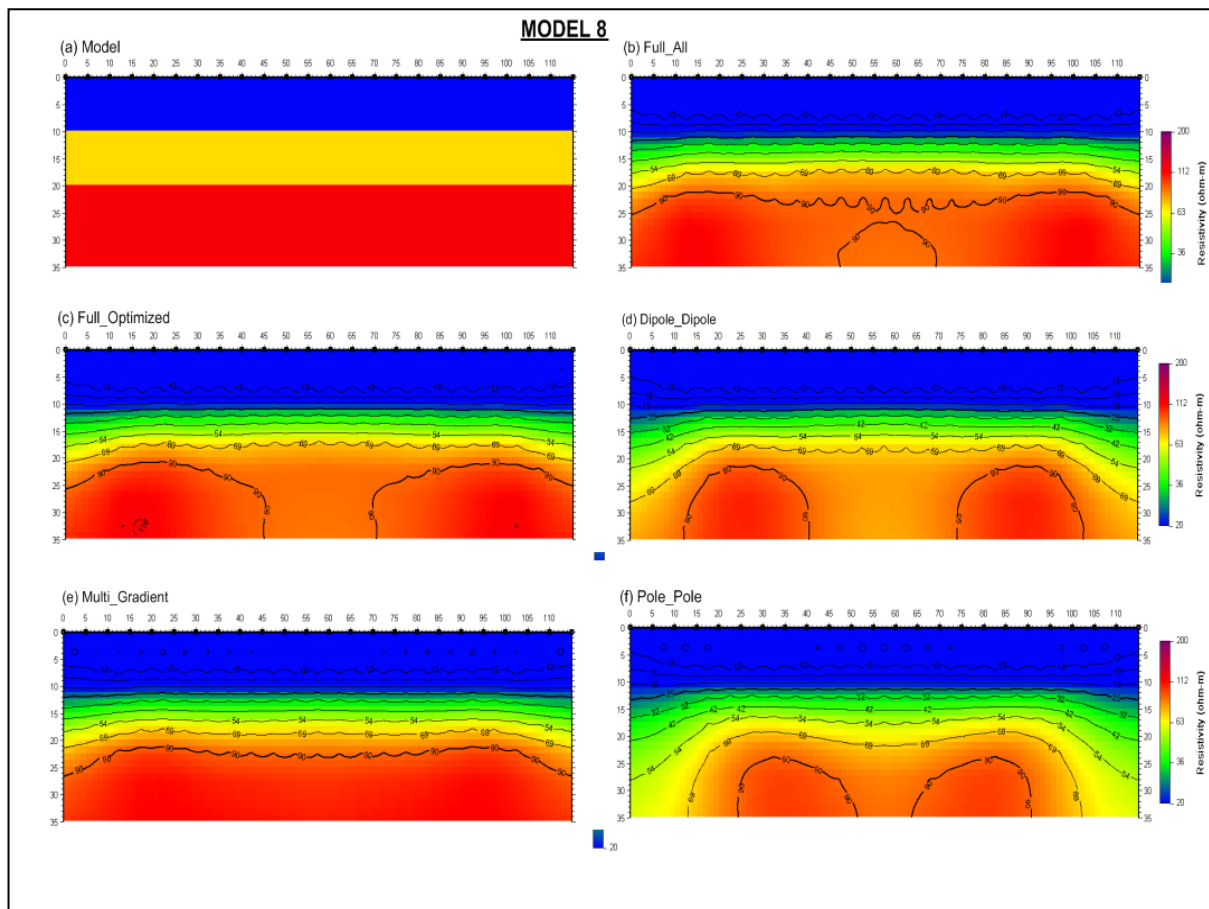
Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο σχήμα 4.7 αποκλίνουν αρκετά από την εικόνα του πρωταρχικού μοντέλου. Η διάταξη ολικών δεδομένων και η βέλτιστη διάταξη δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τις υπόλοιπες διατάξεις. Η τιμή αντίστασης του πρώτου ημιχώρου διαφέρει από σημείο σε σημείο, έχοντας την ελάχιστη τιμή του σε βάθος 30-35m, κάτω από το παρεμβαλλόμενο ημιχώρο. Το ίδιο συμβαίνει με το παρεμβαλλόμενο ημιχώρο, όπου η τιμή αντίστασης είναι μικρότερη της πραγματικής, εκτός από το τμήμα που βρίσκεται σε βάθος 10-20m και σε απόσταση 10-30m από το σημείο μετρήσεων, όπου η τιμή είναι λίγο μεγαλύτερη της πραγματικής. Η παραμόρφωση του παρεμβαλλόμενου ημιχώρου είναι μεγάλη, δείχνοντας το με μεγαλύτερο πάχος, ενώ φαίνεται να συνεχίζεται σε μεγαλύτερο βάθος από τα 35m. Το σώμα διακρίνεται σε μεγάλο βαθμό, αλλά, με πολύ μικρότερη τιμή αντίστασης από την πραγματική, ενώ δεν διαχωρίζεται από το παρεμβαλλόμενο ημιχώρο. Για τις υπόλοιπες διατάξεις η συσχέτιση με το πρωταρχικό μοντέλο είναι σαφώς μικρότερη και ισχύουν όλα τα παραπάνω, αλλά, σε μεγαλύτερο βαθμό, κάνοντας δυσκολότερο τον διαχωρισμό των δύο ημιχώρων και την εμφάνιση του μεγάλης αντίστασης σώματος. Στον πίνακα 4.7 επιβεβαιώνεται η συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο, με καλύτερες τις δύο πρώτες (σχήμα 4.7b,c).

	Full	Opt	Dd	mg	Pp
Correlation(%)	72,8948	71,8037	65,6397	62,5951	65,637

Πίνακας 4.7: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο.

4.8 ΜΟΝΤΕΛΟ 8

Το μοντέλο 8 (Σχήμα 8a) αποτελείται από τρεις παράλληλους ημιχώρους με αύξουσα τιμή αντίστασης με το βάθος. Ο ανώτερος ημιχώρος φτάνει μέχρι το βάθος των 10 m και έχει αντίσταση 10 Ohm, ο μεσαίος ημιχώρος φτάνει μέχρι τα 20 m με αντίσταση 50 Ohm, ενώ ο κατώτερος έχει αντίσταση 100 Ohm και φτάνει μέχρι τα 35 m.



Σχήμα 4.8: (a) Αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή σύνθετων δεδομένων, (b) διάταξη ολικών δεδομένων, (c) βέλτιστη διάταξη, (d) διάταξη Διπόλου-Διπόλου, (e) διάταξη πολλαπλής βαθμίδας, (f) διάταξη Πόλου-Πόλου.

Όπως φαίνεται από το σχήμα 4.8, οι πέντε διατάξεις δίνουν σχεδόν τέλεια αποτελέσματα, απεικονίζοντας το μοντέλο σε μεγάλο βαθμό. Οι τρεις ημιχώροι εμφανίζονται χωριστά το ένα από το άλλο και κοντά στην τιμή αντίστασης τους, ενώ διατηρούν την ομοιογένεια τους. Το μέγεθος των ημιχώρων παραμένει σχεδόν το ίδιο, με μικρή αύξηση του πρώτου.

	Full	Opt	Dd	mg	Pp
Correlation(%)	96,2686	96,2158	94,8309	96,9949	93,422

Πίνακας 4.8: Η% συσχέτιση της κάθε διάταξης με το πρωταρχικό μοντέλο.

Με την βοήθεια του πίνακα 4.8, η διάταξη πολλαπλής βαθμίδας συσχετίζεται περισσότερο με το πρωταρχικό μοντέλο με ποσοστό 97%, ενώ οι υπόλοιπες διατάξεις δεν πέφτουν κάτω από 93%. Ωστόσο, οι διατάξεις διπόλου-διπόλου και πόλου-πόλου εμφανίζουν μια μικρή παραμόρφωση του μεσαίου ημιχώρου προς τα κάτω, επηρεάζοντας ελαφρά την επαφή μεταξύ των δύο τελευταίων ημιχώρων.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΠΟΣΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Με βάση τα αποτελέσματα (βλ. Κεφάλαιο 4) των διατάξεων, αλλά, και των μοντέλων προσομοίωσης συμπεραίνεται η δυσκολία απεικόνισης γεωφυσικών ανωμαλιών σε βάθος. Αντιθέτως, οι επιφανειακές ανωμαλίες εμφανίζονται σε μεγάλο βαθμό, προσεγγίζοντας μάλιστα, την τιμή αντίστασης τους. Σε μεγάλο βαθμό, τα αποτελέσματα εξαρτώνται από την κατανομή των ανωμαλιών μέσα στο κάθε μοντέλο και από την αντίθεση των αντιστάσεων τους.

Όταν η κατανομή της αντίστασης του πρωταρχικού μοντέλου είναι ομοιόμορφη με το βάθος, όπως στο μοντέλο 8 (βλ. Σχήμα 4.8a), οι διατάξεις δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα (Πίνακας 5-mod8) με την διάταξη πολλαπλής βαθμίδας (multi-gradient) να δίνει το βέλτιστο. Ενώ, όταν η αντίθεση της αντίστασης μέσα στο μοντέλο είναι μεγάλη, όπως για παράδειγμα στο μοντέλο 2 (βλ. Σχήμα 4.2a), όπου υπάρχουν τρεις γεωφυσικές ανωμαλίες με 10, 500 και 5000 Ohm-m αντίστοιχα, τότε οι διατάξεις δίνουν ανακριβή αποτελέσματα και συσχετίζονται ελάχιστα με το πρωταρχικό μοντέλο (Πίνακας 5-mod2).

	full_all	full_optimized	dipole-dipole	multi-gradient	pole-pole
mod1	81,995	82,163	85,673	69,789	67,371
mod2	12,739	12,809	14,823	10,875	13,413
mod2_noise	12,739	12,809	14,823	10,875	13,413
mod2_L2	11,399	12,283	14,937	12,639	15,537
mod3	51,636	47,98	47,171	38,278	23,562
mod4	20,49	20,522	21,804	17,491	21,197
mod4_noise	20,49	20,522	21,804	17,491	21,197
mod4_L2	17,784	17,745	17,054	11,386	10,658
mod5	83,078	82,635	80,051	79,656	80,058
mod5_noise	83,078	82,635	80,051	79,656	80,058
mod5_L2	73,987	76,455	82,265	81,142	65,903
mod6	57,888	57,219	56,323	56,989	46,356
mod7	72,895	71,804	65,64	62,595	65,637
mod8	96,269	96,216	94,831	96,995	93,422

Πίνακας 5: Συσχετισμός των διατάξεων % με το κάθε μοντέλο. Με κόκκινο χρώμα είναι η καλύτερη διάταξη και με μπλε η χειρότερη.

Συμπερασματικά, από Πίνακα 5, οι καλύτερες διατάξεις ηλεκτροδίων ήταν η διάταξη ολικών δεδομένων (full_all) και η διάταξη διπόλου-διπόλου (dipole-dipole), καθώς εμφάνισαν τα περισσότερα μέγιστα συσχέτισης και σχεδόν κανένα ελάχιστο. Εν αντιθέσει, των διατάξεων

πολλαπλής βαθμίδας(multi-gradient) και πόλου-πόλου(pole-pole) όπου η συσχέτιση τους με το πρωταρχικό μοντέλο ήταν πολλές φορές η κατώτερη. Η βέλτιστη διάταξη(full_optimized) δεν εμφάνισε κανένα μέγιστο ή ελάχιστο, ωστόσο σχεδόν σε κάθε μοντέλο η συσχέτιση με το πρωταρχικό ήταν λίγο πιο κάτω από το μέγιστο ποσοστό. Τέλος, με την ύπαρξη θορύβου στα μοντέλα υπάρχουν μηδαμινές μεταβολές στην προσομοίωση τους, διατηρώντας –ως καλύτερη– την ίδια διάταξη με το πρωταρχικό μοντέλο, σε αντίθεση με τα μοντέλα που αναλύθηκαν με την χρήση ελαχίστων τετραγώνων, όπου σε σχέση με τα αποτελέσματα κανονικής αντιστροφής αλλάζουν κάθε φορά οι διατάξεις με τις οποίες παρουσιάζονται καλύτερα αποτελέσματα, ωστόσο τα ποσοστά συσχέτισης της κάθε διάταξης μειώνονται. Για παράδειγμα, το μοντέλο 5(Πίνακας 5-mod5)για όλες τις διατάξεις έχει ποσοστά πάνω από 79%, ενώ για το ίδιο μοντέλο, αλλά, με την χρήση ελαχίστων τετραγώνων (Πίνακας 5-mod5_L2) τα ποσοστά κυμαίνονται από 65% μέχρι 82%. Το ίδιο συμβαίνει και για τα μοντέλα 2 και 4.

ΠΟΙΟΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Εκτός από την ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων, που βασίζεται στην επί τοις εκατό συσχέτιση με το πρωταρχικό μοντέλο, πραγματοποιήθηκε ποιοτική ανάλυση με την οποία γίνεται συσχέτιση των διατάξεων με το πρωταρχικό μοντέλο μόνο οπτικά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την σχετική εύρεση της απόκλισης της φαινόμενης συσχέτισης από την πραγματική βασιζόμενη σε απλή παρατήρηση.

	full_all	full_optimized	dipole-dipole	multi-gradient	pole-pole
mod1	4	5	3	2	1
mod2	5	4	3	2	1
mod2_noise	5	4	3	2	1
mod2_L2	5	4	2	3	1
mod3	5	4	3	2	1
mod4	5	4	3	2	1
mod4_noise	5	4	3	2	1
mod4_L2	5	4	3	2	1
mod5	3	4	2	5	1
mod5_noise	3	4	2	5	1
mod5_L2	5	4	3	2	1
mod6	3	4	5	2	1
mod7	5	4	3	1	2
mod8	4	3	2	5	1
Σύνολο	62	56	40	37	15

Πίνακας 6: Ποιοτική κλίμακα της κάθε διάταξης. Το 5 χαρακτηρίζει την καλύτερη οπτικά διάταξη, ενώ το 1 την χειρότερη.

Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ποιοτικής ανάλυσης για όλες τις διατάξεις του κάθε μοντέλου. Όπως φαίνεται οι καλύτερες διατάξεις οπτικά είναι οι full_all και full_optimized, ενώ αισθητά χειρότερη είναι η role-role. Ωστόσο, οι απεικονίσεις της role-role συγκριτικά με τις multi-gradient και dipole-dipole δεν είναι τόσο άσχημες, αφού όπως επιβεβαιώνεται από την ποσοτική ανάλυση σε γενικές γραμμές οι συσχετίσεις της κυμαίνονταν κοντά μ' αυτές. Οι δύο τελευταίες δίνουν μέτρια αποτελέσματα ποιοτικά, αλλά, στην πραγματικότητα η dipole-dipole είναι η διάταξη με τις περισσότερες μέγιστες συσχετίσεις (μαζί με την full_all), ενώ η multi-gradient είναι η διάταξη με τις περισσότερες ελάχιστες (μαζί με την role-role). Τέλος, οι διατάξεις full_all και full_optimized έχουν συγκεντρώσει την μεγαλύτερη βαθμολογία με αποτέλεσμα οι απεικονίσεις τους να συσχετίζονται περισσότερο με το πρωταρχικό μοντέλο συγκριτικά με των άλλων διατάξεων, πράγμα που επιβεβαιώνεται και από τις ποσοτικές τους συσχετίσεις. Φαινομενικά, οι δύο τελευταίες διατάξεις παρουσιάζουν ίδια αποτελέσματα με πολύ μικρές διαφορές.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ο συνολικός αριθμός των μετρήσεων της κάθε διάταξης, αφού η full_all έχει 899 μετρήσεις ενώ, η full_optimized έχει μόλις 454 μετρήσεις. Αυτό σημαίνει πως τελικά τα αποτελέσματα της full_optimized είναι καλύτερα από της full_all, αφού με τις μισές μετρήσεις παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα. Επίσης, η dipole-dipole που συγκεντρώνει μεγάλο αριθμό μέγιστων συσχετίσεων έχει μόνο 197 μετρήσεις, ενώ η role-role 186.

6.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Τσούρλος Π. (2014): Optimized protocol generator-Optcross1 cross-hole ERT.

Παπαζάχος Β.Κ. (1986). Εισαγωγή στην Εφαρμοσμένη Γεωφυσική. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Yi M-J and Kim J-H, (2010): DcDpro - 2D and 3D Inversion of ERT data.

Athanasiou, E.N., Tsourlos, P.I. and Vargemezis G.N. (2007c). Optimizing electrical resistivity array configurations for hydrogeological studies. In Proceedings, TIAC'07 International Conference on Technology of Seawater Intrusion in Coastal Aquifers, Almeria, Spain, 16-19 October 2007.

Αθανασίου Ε. (2009): Ανάπτυξη αλγορίθμων για τη βέλτιστη στρατηγική μέτρησης και αντιστροφής δεδομένων ηλεκτρικής τομογραφίας. Διδ. Διατριβή ΑΠΘ.

Loke, M.H., Acworth, I. and Dahlin, T. (2003). A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2-D electrical imaging surveys. Exploration Geophysics.

Joseph R. Inman, Jr., Jisoo Ryu, and Stanley H. Ward (1973) : Resistivity inversion. Society of exploration geophysicists.