

**ΔΡΑΣΗ ΕΘΝΙΚΗΣ ΕΜΒΕΛΕΙΑΣ  
« ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΕΣ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΦΟΡΕΩΝ- ΚΡΗΠΙΣ»**



**ΙΔΡΥΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑΣ**

**Έργο ΠΕΦΥΚΑ: Περιβάλλον και Φυσικές Καταστροφές: Νέες μέθοδοι για τη μέτρηση και βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος και για την αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών**

**ΠΑΡΑΔΟΤΕΟ Π2.2.1.4**

**Τίτλος: Τεχνική έκθεση των αποτελεσμάτων της μαθηματικής μοντελοποίησης και αντιστροφής.**

**Υπεύθυνος Φορέας/Ινστιτούτο: ΙΜΣ**

**Ονόματα συμμετεχόντων: Κλεάνθης Σιμουρδάνης**

**Ανθρωπομήνες που αντιστοιχούν: 2**

**Κόστος που αντιστοιχεί: 3.400 Ευρώ**

**Ημερομηνία: 31/10/2014**



**η περιφέρεια στο επίκεντρο της ανάπτυξης**

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης - Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης (ΕΤΠΑ), στο πλαίσιο του Ε.Π. Ανταγωνιστικότητα και Επιχειρηματικότητα (ΕΠΑΝ ΙΙ) και των Π.Ε.Π. Αττικής, Π.Ε.Π. Μακεδονίας - Θράκης

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή.....	3
Ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης .....	4
Μεθοδολογία .....	5
Πρωτόκολλα .....	5
Βέλτιστα Πρωτόκολλα.....	6
Εκ των προτέρων πληροφορία ('A priori').....	6
Συνθετικά Δεδομένα & Δοκιμές .....	6
Πρόγραμμα αντιστροφής .....	7
Εξοπλισμός (μετρήσεις πεδίου).....	7
Αποτελέσματα Συνθετικής Μοντελοποίησης .....	9
Βέλτιστο Πρωτόκολλο Μέτρησης.....	9
Επίδραση Ύψους Στήλης Νερού (D) .....	13
Βάθος Ταφής Στόχου (d) .....	13
Μέγεθος Στόχου.....	15
Εκ των προτέρων' (A priori) πληροφορία.....	16
Λανθασμένη 'εκ των προτέρων' πληροφορία (Υπο-, Υπέρ- εκτίμηση) .....	18
Αντίθεση στόχου με το περιβάλλον .....	19
Βέλτιστα πρωτόκολλα μετρήσεων .....	19
Χρήση προγράμματος «2DInvCode».....	21
Μοντέλο 2 .....	22
Γενικά Συμπεράσματα.....	25
Αναφορές.....	26

## Εισαγωγή

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την εφαρμογή της ηλεκτρικής τομογραφίας για την ανίχνευση υπεδάφινων αρχαιολογικών δομών σε θαλάσσιο ρηχό περιβάλλον. Η μελέτη της συγκεκριμένης μεθόδου, πριν εφαρμοσθεί σε πραγματικές συνθήκες, εστιάστηκε αρχικά στη δημιουργία συνθετικών γεωηλεκτρικών μοντέλων σύμφωνα με τις ιδιότητες πραγματικών θαλάσσιων συνθηκών, εστιάζοντας σε στόχους αρχαιολογικού ενδιαφέροντος. Κύριος στόχος των πειραμάτων μαθηματικής μοντελοποίησης είναι να παραχθεί ένας αποτελεσματικός και αξιόπιστος τρόπος συλλογής και επεξεργασίας τομογραφικών γεωηλεκτρικών δεδομένων που θα μπορεί να εφαρμοστεί σε πειραματικά δεδομένα και πραγματικές συνθήκες. Ταυτόχρονα με την επεξεργασία των δεδομένων αναπτύσσονται πειραματικοί αλγόριθμοι για την επιλογή των βέλτιστων διατάξεων μέτρησης, επιτυγχάνοντας με αυτόν τον τρόπο να μειώνεται ο αριθμός των δεδομένων διατηρώντας την αξιοπιστία της μεθόδου και των αποτελεσμάτων αυτής.

Η ηλεκτρική μέθοδος διασκόπησης αποτελεί από τις πρώτες τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν ήδη από την δεκαετία του 1930 για την ανίχνευση δομών οικονομικού ενδιαφέροντος (π.χ. μεταλλεύματα). Η ώθηση στην ανάπτυξή της πραγματοποιήθηκε το κατά την δεκαετία του 1990 με την ανάπτυξη της δισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας (Griffiths και Barker, 1993) δίνοντας την δυνατότητα πιο ρεαλιστικής απεικόνισης των σύνθετων υπεδάφινων δομών. Επιπλέον τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και τεχνικές τρισδιάστατης ηλεκτρικής τομογραφίας για την πιστότερη αναπαράσταση του υπεδάφους.

Η εφαρμογή της μεθόδου της ηλεκτρικής αντίστασης σε παράκτια και θαλάσσια περιβάλλοντα αρχίζει να εφαρμόζεται σήμερα με μία αυξανόμενη τάση κυρίως για την περιβαλλοντικών, γεωτεχνικών και γεωλογικών προβλημάτων. Συγκρινόμενη με άλλες γεωφυσικές τεχνικές (σεισμικές, GPR), η μέθοδος της ειδικής αντίστασης έχει μικρότερη διακριτική ικανότητα αλλά θεωρητικά είναι αρκετά αποτελεσματική και δύναται να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα όταν εφαρμόζεται σε ρηχά υδάτινα περιβάλλοντα. Η χρήση της μεθόδου ηλεκτρικής τομογραφίας σε θαλάσσια-ποτάμια περιβάλλοντα είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική μιας και είναι σε θέση να ανιχνεύσει ρήγματα ή γενικότερα γεωλογικές ασυνέχειες οι οποίες κρίνονται επικίνδυνες για την κατασκευή γεφυρών ή τούνελ (Kim et al. 2002). Λόγω της ολοένα και αυξανόμενης χρήσης της ηλεκτρικής μεθόδου σε θαλάσσια περιβάλλοντα, αντίστοιχα έχουν εξελιχθεί-προσαρμοσθεί και οι αλγόριθμοι επεξεργασίας των δεδομένων οι οποίοι μπορούν με αποτελεσματικό τρόπο να ενσωματώσουν και να διαχειριστούν τις ιδιαιτερότητες των θαλάσσιων περιβάλλοντων (ανάγλυφο πυθμένα, χαμηλή αντίσταση θαλάσσιου νερού κλπ).

Η πραγματοποίηση των μετρήσεων σε αυτά τα περιβάλλοντα μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω ενός καλωδίου το οποίο είτε επιπλέει στην επιφάνεια του νερού είτε βυθίζεται στον πυθμένα. Ο τρόπος λήψης των δεδομένων δεν απαιτεί ιδιαίτερη μετατροπή στον υπάρχοντα εξοπλισμό και παράλληλα τα υπάρχοντα λογισμικά επεξεργασίας των δεδομένων χρειάζονται στοχευμένες και συγκεκριμένες βελτιώσεις. Ωστόσο πρέπει να ληφθεί υπόψη (για να γίνει και η απαραίτητη επεξεργασία) το αγωγίμο στρώμα του νερού το οποίο είναι παίζει ιδιαίτερο ρόλο αφού μειώνει την διακριτική ικανότητα της μεθόδου, λόγω πολύ υψηλής αγωγιμότητας.

Επιπλέον, κατά την επεξεργασία των δεδομένων υπάρχει η δυνατότητα να εισαχθεί εκ των προτέρων πληροφορία ('a priori') που αφορά το πάχος του νερού και την τιμή αντίστασης αυτού. Με τον τρόπο αυτό «κατευθύνουμε» την διαδικασία επεξεργασίας ώστε να βελτιωθούν τα αποτελέσματα αντιστροφής. Ωστόσο, η χρήση της 'a priori' πληροφορίας είναι δυνατόν, εάν είναι λανθασμένη, να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιείται με ιδιαίτερη προσοχή (Orlando, 2013).

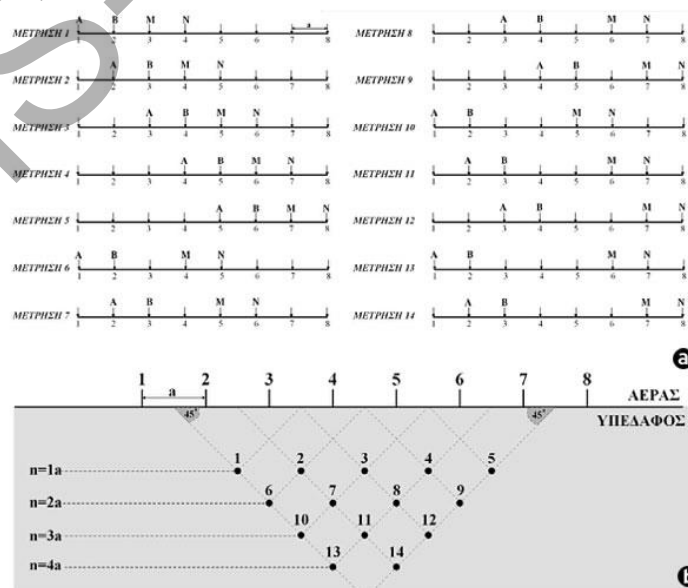
## Ηλεκτρικές μέθοδοι διασκόπησης

Η μελέτη των αρχαιολογικών δομών σε παράκτια περιβάλλοντα πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της μεθόδου της ηλεκτρικής τομογραφίας (Electrical Resistance Tomography, ERT –Εικόνα 1). Πρόκειται για μία μέθοδο η χρήση της οποίας είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη κυρίως για την μελέτη επιφανειακών στρωμάτων της γης. Κύριο χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η αυξημένη διακριτική της ικανότητα, η οποία βασίζεται στην λήψη μεγάλου αριθμού μετρήσεων.



Εικόνα 1. Μέθοδος Ηλεκτρικής Τομογραφίας (ERT) σε διαφορετικά περιβάλλοντα.

Στην Εικόνα 2α απεικονίζεται ο τρόπος διεξαγωγής μιας δισδιάστατης διασκόπησης με τη διάταξη διπόλου-διπόλου για μία διάταξη 8 ηλεκτροδίων, καθώς και η απεικόνιση των δεδομένων σε δύο διαστάσεις (Εικόνα 2b). Κάθε τιμή της αντίστασης θεωρείται ότι τοποθετείται στο σημείο τομής δύο ευθειών που έχουν ως αρχή το κέντρο των διπλών AB και MN αντίστοιχα και σχηματίζουν γωνία  $45^\circ$  με το οριζόντιο επίπεδο

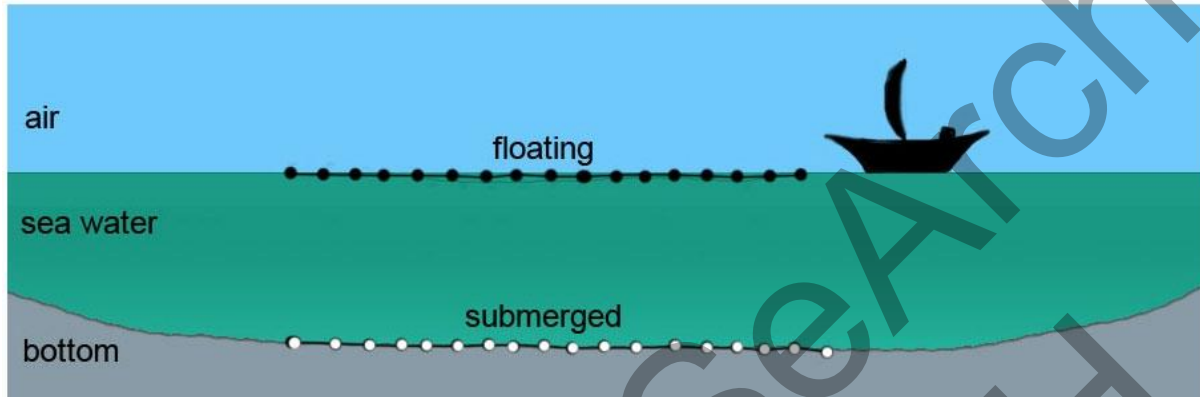


Εικόνα 2. Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικής τομογραφίας με τη διάταξη διπόλου-διπόλου για διάταξη 8 ηλεκτροδίων και μέγιστη απόσταση μεταξύ των διπλών  $n=4$  (Tsourlos, 1995).

## Μεθοδολογία

### Πρωτόκολλα

Για τη λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιείται ειδικό πολύκλωνο καλώδιο το οποίο φέρει πάνω του ειδικούς αισθητήρες (ηλεκτρόδια). Επομένως, δοκιμές πραγματοποιήθηκαν τόσο με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (floating electrodes) όσο και στον πυθμένα αυτής (submerged electrodes), όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.

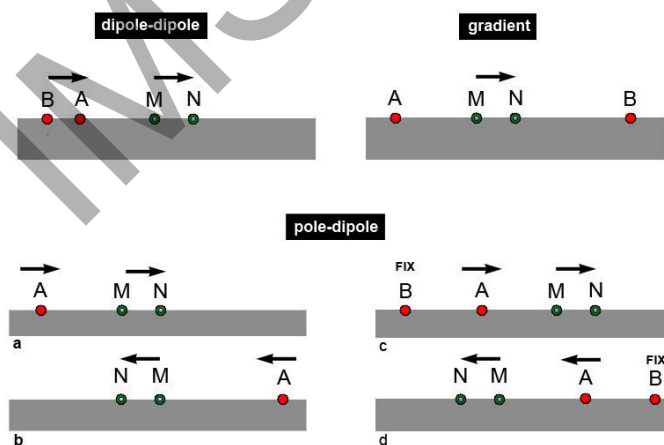


**Εικόνα 3.** Πιθανή θέση ηλεκτροδίων είτε στην επιφάνεια της θάλασσας (floating, μαύρες κουκκίδες) είτε στον πυθμένα αυτής (submerged, λευκές κουκκίδες) με σκοπό την συλλογή δεδομένων ηλεκτρική τομογραφίας.

Για την δημιουργία των πρωτοκόλλων μέτρησης θεωρήθηκαν συνολικά 48 ηλεκτρόδια τα οποία τοποθετούνται σε ισαπέχοντες μεταξύ τους αποστάσεις του 1 μέτρου. Η αλληλουχία των μετρήσεων ορίστηκε από τα πρωτόκολλα που δημιουργήθηκαν με ειδικό αλγόριθμο παραγωγής πρωτοκόλλων σε πρόγραμμα της Matlab (Σιμυρδάνης, 2013). Στην Figure 4 φαίνονται οι διατάξεις ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των πρωτοκόλλων μέτρησης και πρόκειται. Σε παρένθεση φαίνονται ο μέγιστος αριθμός μετρήσεων για κάθε πρωτόκολλο.

- Διπόλου-Διπόλου (Dipole-dipole - dd) (#1071)
- Πόλου- Διπόλου (Pole-dipole -pd) (#1336)
- Διάταξη βαθμίδας (Gradient - grd) (#1034)

Όσον αφορά το πρωτόκολλο **Πόλου- Διπόλου** χρησιμοποιήθηκε τόσο ως forward (Figure 4a, c) όσο και ως reverse (Figure 4b, d), με το ηλεκτρόδιο 'B' είτε σε αρκετά μεγάλη απόσταση (θεωρητικά «άπειρη») (Figure 4a, b) είτε σταθερά σε ένα σημείο (Figure 4c, d).



**Figure 4.** Διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία των πρωτοκόλλων που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη των μετρήσεων: διπόλου-διπόλου (dipole-dipole), βαθμίδα (gradient) και πόλου-διπόλου (pole-dipole).

## Βέλτιστα Πρωτόκολλα

Εκτός από τα βασικά πρωτόκολλα, δοκιμάστηκαν και βέλτιστα πρωτόκολλα η δημιουργία των οποίων βασίζεται στον πίνακα ευαισθησίας (ή Ιακωβιανό πίνακα) (Αθανασίου κ.α., 2009). Ως 'Ιακωβιανός' καλείται ο δισδιάστατος εκείνος πίνακας του οποίου οι γραμμές αντιπροσωπεύουν το σύνολο των μετρήσεων του πρωτοκόλλου και οι στήλες αντιπροσωπεύουν το σύνολο των παραμέτρων του μοντέλου βάσει του οποίου έχει διακριτοποιηθεί ο χώρος. Εάν αθροισθούν για κάθε μία παράμετρο (στήλη του Ιακωβιανού πίνακα) οι απόλυτες τιμές όλων των μετρήσεων, τότε ως «βέλτιστες» επιλέγονται εκείνες οι μετρήσεις που έχουν την υψηλότερη τιμή ευαισθησίας σε κάθε μία παράμετρο. Σε περίπτωση που μία μέτρηση έχει ήδη επιλεγεί από μία προηγούμενη παράμετρο τότε επιλέγεται η αμέσως επόμενη μεγαλύτερη τιμή. Με τον τρόπο αυτό επιλέγονται οι αρχικές βέλτιστες μετρήσεις (που είναι ισάριθμες με το σύνολο των παραμέτρων) κάθε μίας παραμέτρου. Έπειτα, για να «ενισχυθεί» το βελτιστοποιημένο πρωτόκολλο προστίθενται επιπλέον μετρήσεις για τις λιγότερο «φωτισμένες» περιοχές του μοντέλου, χρησιμοποιώντας την τιμή μέσης εκτίμησης του L1-μέτρου της κάθε μίας παραμέτρου.

## Εκ των προτέρων πληροφορία ('A priori')

Κατά την διαδικασία αντιστροφής των δεδομένων, υπάρχει η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί επιπλέον πληροφορία που αφορά το θαλάσσιο στρώμα, η οποία εισάγεται στον αλγόριθμο αντιστροφής βελτιώνοντας με τον τρόπο αυτό τα αποτελέσματα. Ως «πληροφορία» ορίζεται το πάχος του νερού (D) και η τιμή αντίστασης αυτού του στρώματος ( $\rho_{water}$ ). Η τιμή αντίστασης του θαλάσσιου νερού μπορεί να μετρηθεί επί τόπου με τη χρήση ειδικού οργάνου (αγωγιμόμετρο).

Η εκ των προτέρων πληροφορία εισάγεται στον αλγόριθμο αντιστροφής είτε έχοντας σταθερή (fixed) τιμή αντίστασης νερού στις παραμέτρους του μοντέλου που αντιστοιχούν στο θαλάσσιο στρώμα, είτε με μεταβαλλόμενη τιμή «βαρύτητας» (weighting variable) της τιμής αντίστασης του νερού. Στην πρώτη περίπτωση, η τιμή αντίστασης των παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν το στρώμα του νερού παραμένει σταθερή σε όλη την διάρκεια της διαδικασίας αντιστροφής, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η επίδραση της τιμής αυτής μειώνεται σταδιακά (variable value) σε κάθε επανάληψη της αντιστροφής (δηλαδή μειώνεται η «επίδραση» της πληροφορίας) αρχίζοντας από μία αρχική τιμή (initial value) που ορίζεται από τον χρήστη. Η αρχική αυτή τιμή, βάσει δοκιμών έχει ορισθεί ως 0.2.

## Συνθετικά Δεδομένα & Δοκιμές

Για την μελέτη της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν αρκετά μοντέλα και από τα περισσότερα αντιπροσωπευτικά παρουσιάζονται παρακάτω. Κατά βάση, αποτελούνται από ένα ανώτερο στρώμα με τιμή αντίστασης θαλάσσιου νερού και έναν στόχο υψηλής αντίστασης μέσα σε ομογενές περιβάλλον. Για την καλύτερη προσομοίωση των πραγματικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε και ένα στρώμα (overburden) χαμηλότερης αντίστασης από τον στόχο στον πυθμένα της θάλασσας.

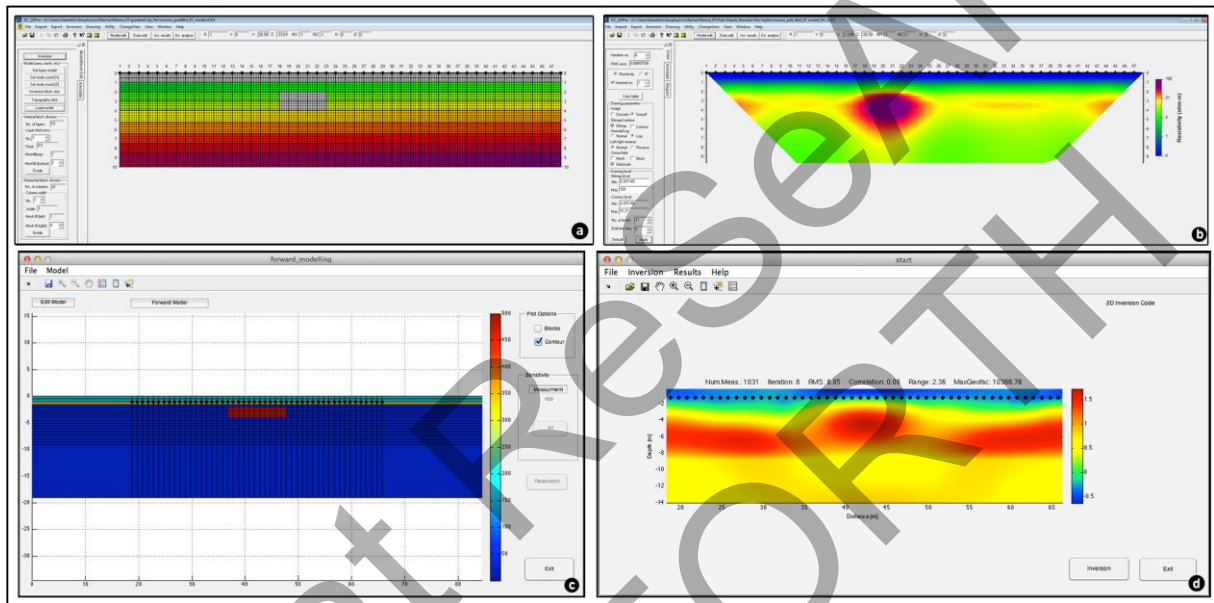
Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν περιλαμβάνουν την εξέταση διαφορετικών σεναρίων σχετικά με τα παρακάτω:

- Διαφορετικά πάχη του αγωγίμου στρώματος του θαλασσινού νερού (D).
- Σύγκριση των διαφορετικών πρωτοκόλλων από διαφορετικές διατάξεις (dd, pd, grad).
- Ανίχνευση στόχου σε διαφορετικά βάθη από την επιφάνεια (d) του πυθμένα.
- Ικανότητα ανίχνευσης στόχων διαφορετικών μεγεθών.
- Σύγκριση μετρήσεων με ηλεκτρόδια στην επιφάνεια (floating) και στον πυθμένα (submerged) της θάλασσας.
- Εισαγωγή εκ των προτέρων πληροφορίας (variable και fix)
- Εισαγωγή «εσφαλμένων» εκ των προτέρων τιμών αντίστασης ή πάχους νερού κατά την αντιστροφή.

- Ανίχνευση στόχων με διαφορετικές τιμές αντίθεσης αντιστάσεων από τον περιβάλλοντα χώρο.
- Χρήση βέλτιστων μετρήσεων και σύγκριση αυτών με τις αρχικές
- Δοκιμή αλγόριθμου αντιστροφής «2DInvCode» (Matlab)

### Πρόγραμμα αντιστροφής

Τόσο για την δημιουργία όσο και για την αντιστροφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα αντιστροφής «DC2D\_Pro» (Kim & Yi, 2010) και «2DInvCode» (Simyrdanis, 2013) (Εικόνα 5). Και τα δύο προγράμματα κατά την επίλυση του ευθέως προβλήματος χρησιμοποιούν τα πεπερασμένα στοιχεία (Finite Element Analysis) και για την επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος την μέθοδο της εξομαλυσμένης αντιστροφής (Occam).



**Εικόνα 5.** Προγράμματα αντιστροφής τόσο για την δημιουργία συνθετικών δεδομένων όσο και για την αντιστροφή των δεδομένων (a, b) «DC2D\_Pro» (Kim & Yi, 2010), (c, d) 2DInvCode (Simyrdanis, 2013).

### Εξοπλισμός (μετρήσεις πεδίου)

Για την λήψη των μετρήσεων σε θαλάσσιο περιβάλλον χρησιμοποιήθηκε το “Syscal Pro” (Iris Instruments) με πολυπλέκτη το “Switch Pro 96”, το οποίο έχει τη δυνατότητα χρήσης 96 ηλεκτροδίων και χρησιμοποιεί 10-κάναλο σύστημα λήψης δεδομένων, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα γρήγορο στην ολοκλήρωση των μετρήσεων. Για την τροφοδοσία του οργάνου εκτός από την εσωτερική μπαταρία χρησιμοποιείται για περισσότερη αυτονομία και εξωτερική μπαταρία (Εικόνα 6a).



**Εικόνα 6.** (a) Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε παράκτιο περιβάλλον, (b) καλώδιο με αισθητήρες (ηλεκτρόδια) που τοποθετείται στη θάλασσα για την λήψη των μετρήσεων.

Απαραίτητη κρίνεται και η χρήση φορητού υπολογιστή για την εισαγωγή στο όργανο μέτρησης των απαραίτητων αρχείων για τη λήψη των μετρήσεων αλλά και για την ανάκτηση αυτών μετά το πέρας των μετρήσεων. Επιπλέον με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, όπως το «Fieldview» (Iris Instruments) καθίσταται δυνατή η απεικόνιση real-time των δεδομένων έτσι ώστε να είναι πιο άμεσος και αποτελεσματικός ο έλεγχος των μετρήσεων. Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις είναι ειδικά καλώδια για θαλάσσιο περιβάλλον (Iris), οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο υλικό κατάλληλο για μετρήσεις σε πολύ αγώγιμα περιβάλλοντα και ανθεκτικότητα σε διάβρωση λόγω αλατότητας (Εικόνα 6b) .

Κατά την διαδικασία των μετρήσεων είναι απαραίτητο να ληφθούν επί τόπου μετρήσεις της αγωγιμότητας του Θαλασσινού νερού καθώς η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την μετέπειτα επεξεργασία των μετρήσεων. Η τιμή αυτή εισάγεται κατά την διαδικασία αντιστροφής και η ακριβής τιμή της ιδιότητας αυτής είναι σημαντική για την αξιόπιστη επεξεργασία των δεδομένων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το αγωγιμόμετρο Pro1030 Field της YSI.

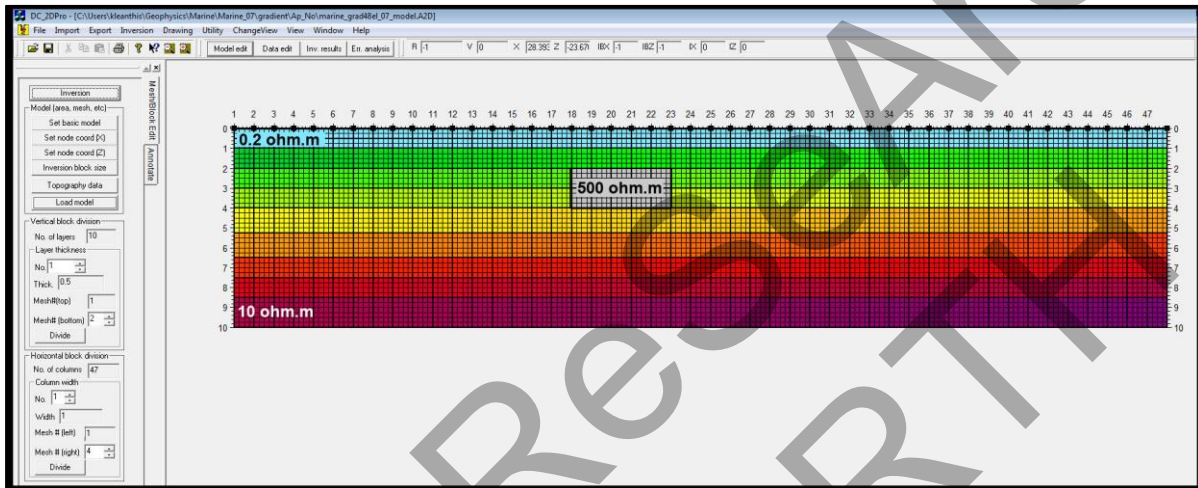
Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε μία αυτοσχέδια βέργα συνολικού ύψους 2 μέτρων βαθμονομημένη έτσι ώστε να καταγράφεται το ακριβές πάχος του νερού σε κάθε θέση του αισθητήρα. Πρόκειται για πληροφορία η οποία επίσης χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του αναγλύφου του πυθμένα της θάλασσας κατά την διαδικασία της αντιστροφής των δεδομένων.



## Αποτελέσματα Συνθετικής Μοντελοποίησης

### Βέλτιστο Πρωτόκολλο Μέτρησης

Για την σύγκριση των πρωτοκόλλων με τις διαφορετικές διατάξεις ηλεκτροδίων (διπόλου-διπόλου, πόλου-διπόλου, βαθμίδας) χρησιμοποιήθηκε αρχικά ένα απλό μοντέλο όπως αυτό απεικονίζεται στο Εικόνα 7. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (floating electrodes) με εσωτερική απόσταση  $a=1\text{m}$ . Το ύψος της στήλης της θάλασσας είναι  $D=1\text{m}$  με τιμή αντίστασης  $\rho_{\text{water}}=0.2\text{ ohm-m}$  και ο στόχος έχει διαστάσεις  $5\times 2\text{m}$  με τιμή αντίστασης  $\rho_{\text{Target}}=500\text{ ohm-m}$ . Σε όλα τα συνθετικά δεδομένα έχει εισαχθεί θόρυβος της τάξης του  $\text{noise}=\pm 0.05\text{mV/V}$ , ο οποίος προστίθεται στις τιμές δυναμικού των δεδομένων.

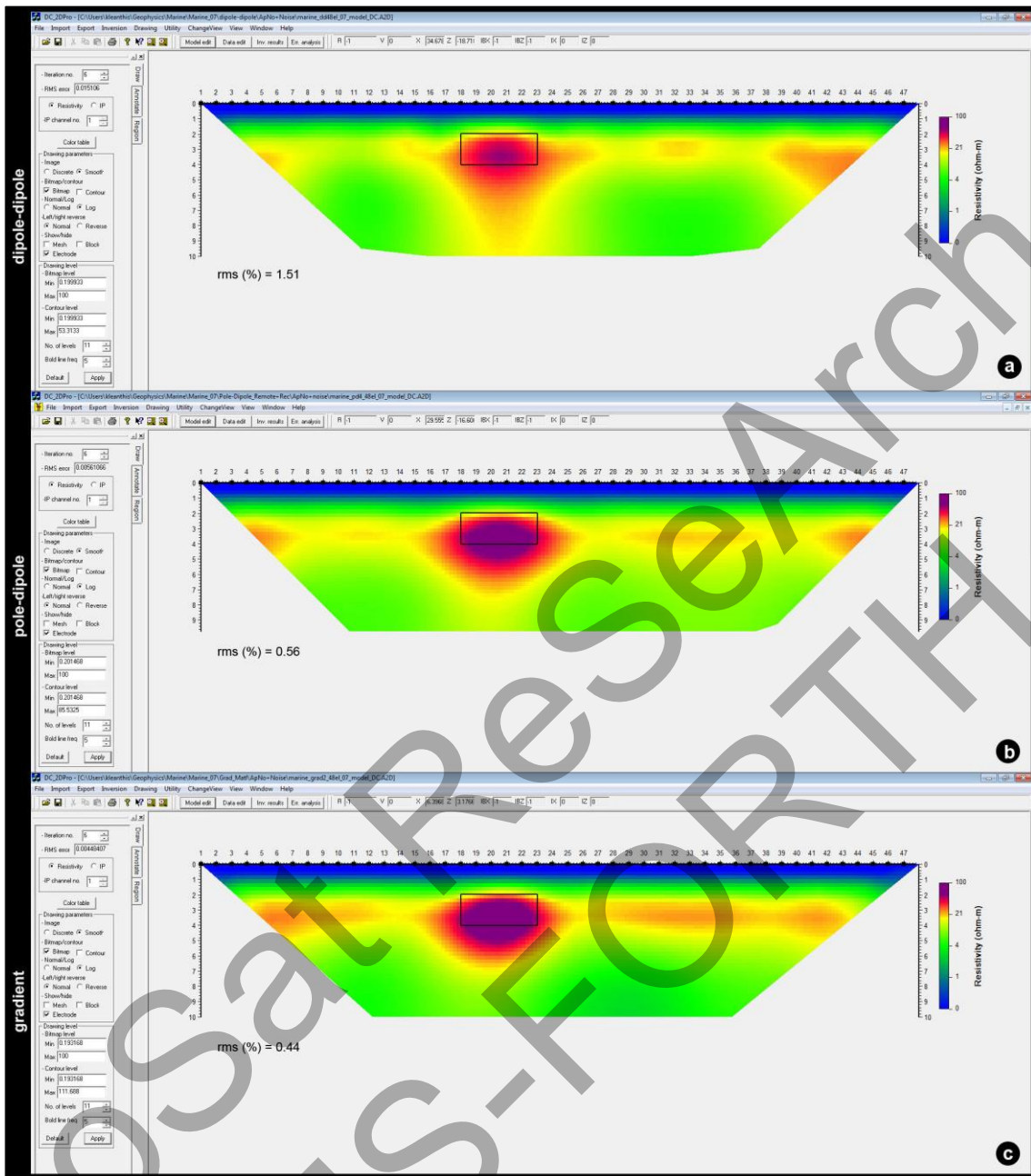


**Εικόνα 7. (Μοντέλο 1)** Απόσταση ηλεκτροδίων  $a=1\text{m}$ ,  $D_{\text{SeaWater}}=1\text{m}$ ,  $\rho_{\text{SeaWater}}=0.2\text{ ohm-m}$ ,  $\rho_{\text{Background}}=10\text{ ohm-m}$ ,  $\rho_{\text{Target}}=500\text{ ohm-m}$  (dimensions:  $5\times 2\text{m}$ ),  $d_{\text{target}}=1\text{m}$  κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας.

Στην περίπτωση αυτή από τις εικόνες αντιστροφής (Εικόνα 8) φαίνεται να υπερισχύει το πρωτόκολλο role-dipole, με το οποίο ο περιβάλλον χώρος παρουσιάζεται περισσότερο ομοιόμορφος σε σχέση με τα άλλα πρωτόκολλα (dipole-dipole και gradient). Το πρωτόκολλο gradient έχει εξίσου καλά αποτελέσματα αντιστροφής με το role-dipole, μόνο που εμφανίζει πιο έντονα τα τεχνουργήματα (ανωμαλίες) εκατέρωθεν του στόχου. Με τα πρωτόκολλα role-dipole και gradient ο στόχος (μαύρο περίγραμμα) περιγράφεται καλύτερα (ιδιαίτερα το κάτω μέρος αυτού). Το πρωτόκολλο dipole-dipole φαίνεται να υστερεί περισσότερο στην αναπαράσταση του στόχου σε σχέση με τα άλλα πρωτόκολλα.

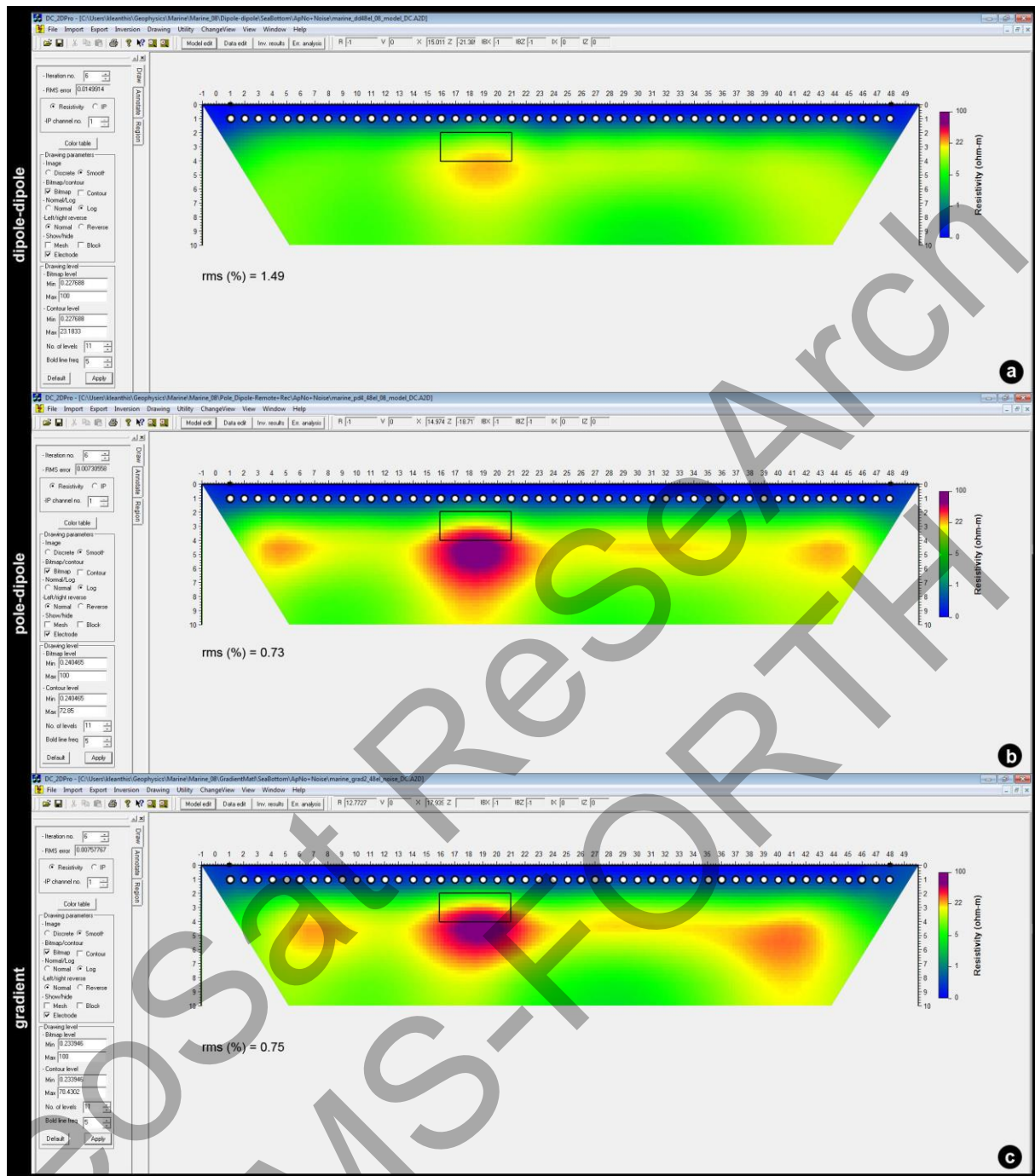
Ο λόγος για τον οποίο παρουσιάζονται τεχνουργήματα εκατέρωθεν του στόχου σε όλα τα πρωτόκολλα είναι γιατί ο αλγόριθμος αντιστροφής προσπαθεί να «διαχειρισθεί» τιμές αντιστάσεων οι οποίες έχουν πολύ μεγάλη αντίθεση μεταξύ τους ( $500\text{ohm-m}/0.2\text{ohm-m}=2500$ ). Η «προσπάθεια» αυτή οδηγεί σε δημιουργία περιοχών υψηλής αντίστασης (τεχνουργήματα) που δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

Επιπλέον παρατηρείται ότι ο στόχος ενώ εντοπίζεται σωστά στην διεύθυνση  $x$  (οριζόντια), είναι ελαφρά μετατοπισμένος προς τα κάτω στην διεύθυνση  $z$  (κατακόρυφα) σε όλες τις σχετικές περιπτώσεις.



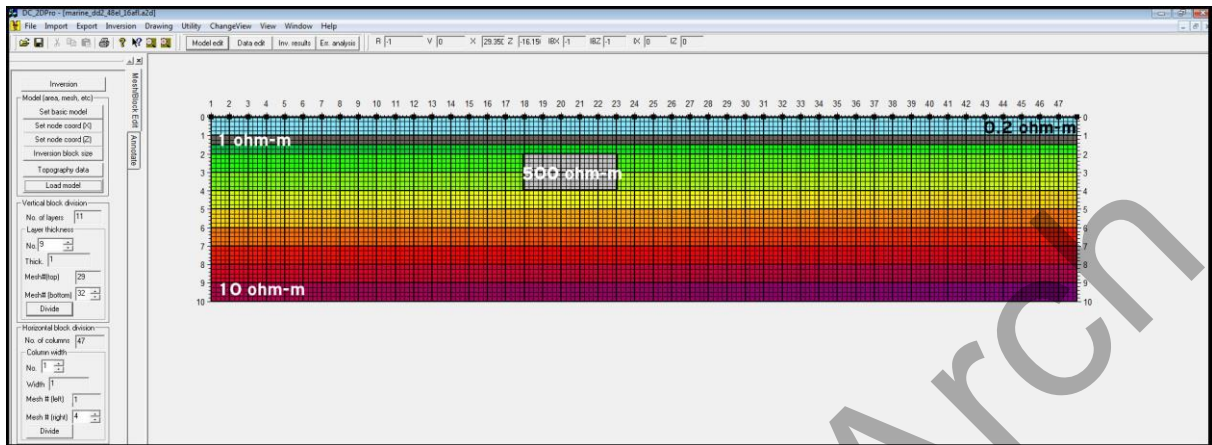
**Εικόνα 8. (Μοντέλο 01α)** Εικόνες αντιστροφής από πρωτόκολλα (a) *dipole-dipole*, (b) *pole-dipole* και (c) *gradient*. Τα ηλεκτρόδια (μαύρες κουκκίδες) είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (*floating*).

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αντιστροφής με τον ίδιο στόχο αλλά τα ηλεκτρόδια αυτή τη φορά είναι τοποθετημένα στον πυθμένα της θάλασσας (*submerged*). Σε αυτήν την περίπτωση φαίνεται να υπερισχύει πάλι το πρωτόκολλο *role-dipole*. Ιδιαίτερα το πρωτόκολλο *dipole-dipole* καταφέρνει να αναπαραστήσει τον στόχο αμυδρά και ταυτόχρονα έχει το μεγαλύτερο σφάλμα rms (1.49%). Στο πρωτόκολλο *gradient* παρουσιάζονται έντονες ανωμαλίες υψηλής αντίστασης κοντά στα πρώτα και τα τελευταία ηλεκτρόδια. Παρατηρείται ωστόσο σε όλα τα πρωτόκολλα μία σημαντική μετατόπιση του στόχου προς τα κάτω σε σχέση με την θέση που ορίστηκε αρχικά σύμφωνα με το συνθετικό μοντέλο.



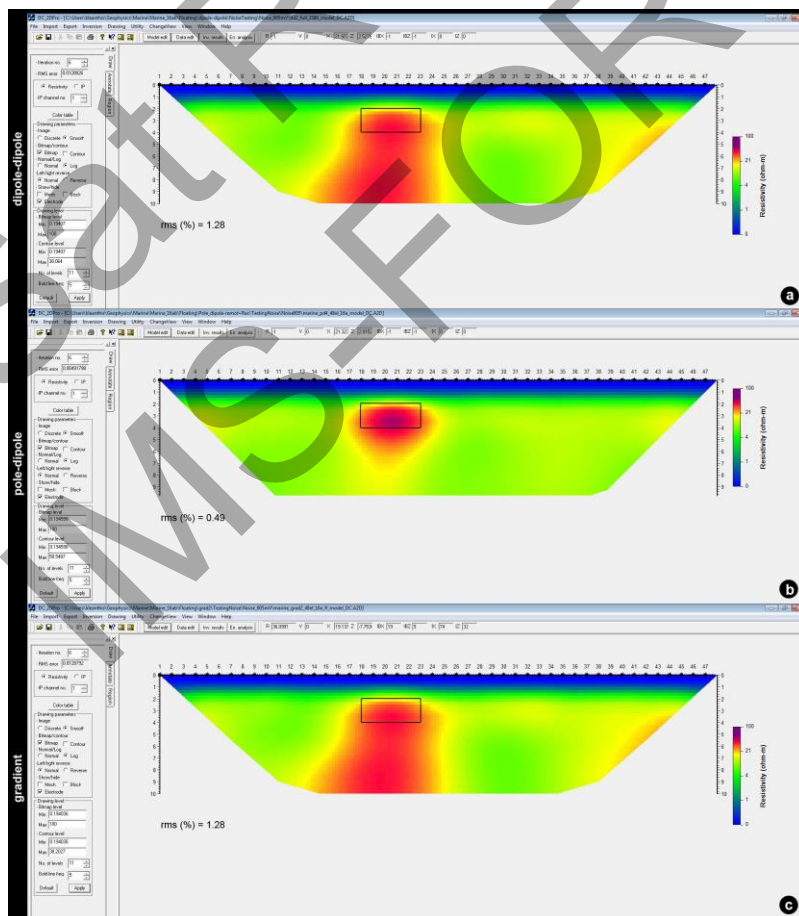
**Εικόνα 9. (Μοντέλο 01b)** Εικόνες αντιστροφής από πρωτόκολλα (a) dipole-dipole, (b) pole-dipole και (c) gradient. Τα ηλεκτρόδια (λευκές κουκκίδες) είναι τοποθετημένα στον πυθμένα της θάλασσας (submerged) σε βάθος  $D=1$  μέτρου όσο είναι και το ύψος της στήλης του νερού.

Ένα επιπλέον μοντέλο (Model 2) παρουσιάζεται στην Εικόνα 10, όπου κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας υπάρχει ένα στρώμα πάχους 0.5m και αντίστασης  $\rho_{\text{overb}}=5$  ohm-m. Στα αποτελέσματα των εικόνων αντιστροφής (Εικόνα 11), το πρωτόκολλο role-dipole παρουσιάζει την πιο αξιόπιστη εικόνα αντιστροφής. Τα πρωτόκολλα dipole-dipole και gradient είναι ισοδύναμα αφού και τα δύο αδυνατούν να αναπαραστήσουν τον στόχο (ανιχνεύεται το πάνω μέρος του αλλά δεν μπορεί να καθορισθεί το συνολικό του σχήμα).



**Εικόνα 10. (Μοντέλο 02)** Electrodes spacing  $a=1m$ ,  $D_{water}=1 m$ ,  $\rho_{water}=0.2 \text{ ohm-m}$ ,  $\rho_{background}= 10 \text{ ohm-m}$ ,  $\rho_{Target}: 500 \text{ ohm-m}$  ( $5 \times 2m$ ), overburden:  $0.5 m$  thick,  $\rho_{overb} = 5 \text{ ohm-m}$ ,

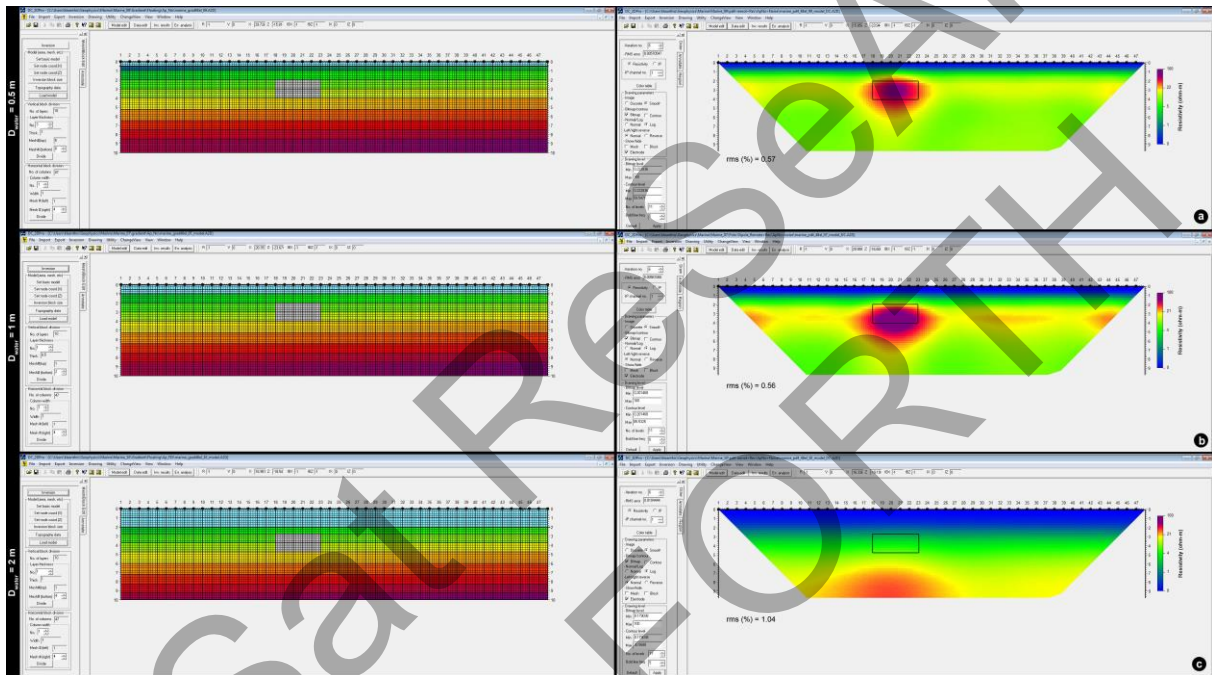
Από τα παραπάνω φαίνεται ότι τα πρωτόκολλα που είναι σε θέση να εντοπίσουν στόχους αρχαιολογικού ενδιαφέροντος σε μικρή απόσταση από τον πυθμένα της θάλασσας ( $d \sim 1m$ ) λαμβάνοντας υπόψη και τον θόρυβο στις μετρήσεις είναι το pole-dipole και το gradient. Το πρωτόκολλο dipole-dipole λόγω πολύ χαμηλού σήματος προς θόρυβο, δεν είναι αξιόπιστο για μετρήσεις σε θαλάσσιο περιβάλλον αφού με τον επιπρόσθετο θόρυβο τα δεδομένα (οι τιμές των οποίων είναι της τάξης μεγέθους του θορύβου) μολύνονται σε μεγάλο βαθμό καθιστώντας αδύνατη την έγκυρη αναπαράσταση του στόχου.



**Εικόνα 11. (Μοντέλο 02)** Εικόνες αντιστροφής από πρωτόκολλα (a) dipole-dipole, (b) pole-dipole και (c) gradient. Τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (floating).

## Επίδραση Ύψους Στήλης Νερού (D)

Η διακριτική ικανότητα των πρωτοκόλλων γενικά περιορίζεται όσο αυξάνεται το βάθος της στήλης του νερού. Η μείωση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το θαλάσσιο νερό ως πολύ αγωγίμο μέσο απορροφάει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας του παραχθέντος από τον εξοπλισμό ρεύματος που διοχετεύεται από τα ηλεκτρόδια. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκε το μοντέλο 3 (**Error! Reference source not found.**) στο οποίο γίνεται προσπάθεια να ανακατασκευασθεί στόχος υψηλής αντίστασης ( $R_{\text{target}}=500 \text{ ohm-m}$ ) με εφαρμογή του πρωτοκόλλου role-dipole (ως το καλύτερο δυνατό πρωτόκολλο σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο) σε περιπτώσεις με διαφορετικά πάχη στήλης του νερού ( $D_{\text{water}}=0.5, 1 \text{ και } 2\text{m}$ ). Από τα αποτελέσματα είναι φανερό ότι μέχρι το πάχος  $D=1\text{m}$  ο στόχος οριακά διακρίνεται (είναι εμφανή η παραμόρφωση του στόχου), ενώ για πάχος 2 μέτρων δεν είναι δυνατή η αναπαράσταση του στόχου.



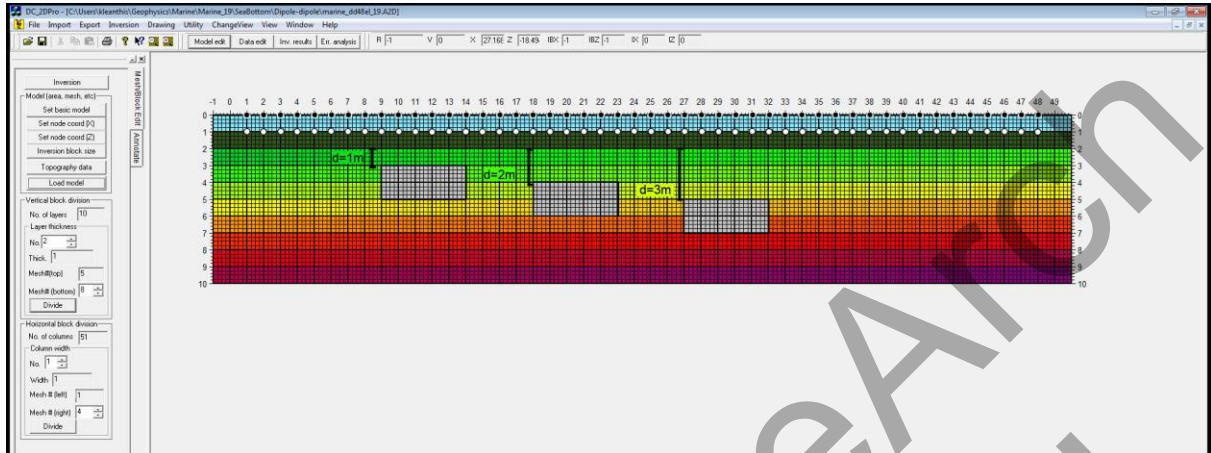
**Εικόνα 12. (Μοντέλο 3)** Εικόνες αντιστροφής για διαφορετικά πάχη στήλης νερού:  $D_{\text{water}}=0.5\text{m}$  (a),  $1\text{m}$  (b),  $2\text{m}$  (c) χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο role-dipole

## Βάθος Ταφής Στόχου (d)

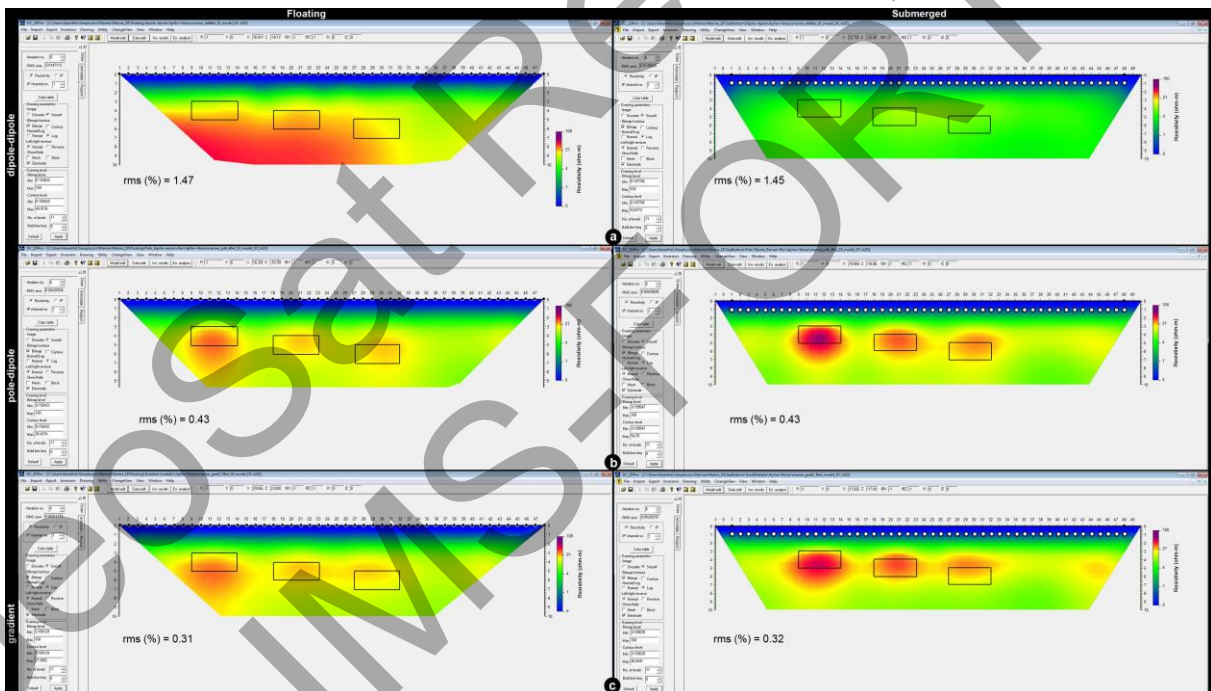
Το βάθος στο οποίο είναι δυνατόν να ανιχνευθεί ο στόχος εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από το ύψος της στήλης του νερού (D). Με βάση το συμπέρασμα της προηγούμενης παραγράφου (όπου το ελάχιστο επιτρεπτό πάχος νερού είναι 1m), επιλέχθηκε ύψος στήλης νερού  $D=1\text{m}$  και ο στόχος τοποθετήθηκε σε διάφορα βάθη (2, 3 και 4 μέτρα) κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Τα ηλεκτρόδια τοποθετήθηκαν τόσο στην επιφάνεια της θάλασσας όσο και στον πυθμένα αυτής (Εικόνα 13).

Το πρώτο συμπέρασμα αφορά το πρωτόκολλο dipole-dipole για το οποίο είτε τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας είτε στον πυθμένα αυτής, δεν μπορεί να ανιχνεύσει τον στόχο ακόμα και όταν βρίσκεται σε βάθος 1 μέτρου κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Το πρωτόκολλο gradient, όταν τα ηλεκτρόδια είναι στην επιφάνεια της θάλασσας, είναι σε θέση να εντοπίσει αμυδρά τον στόχο ακόμα και όταν αυτός βρίσκεται σε βάθος 3 μέτρων κάτω από τον πυθμένα. Να επισημανθεί ότι το πρωτόκολλο gradient έχει μικρή οριζόντια διακριτική ικανότητα καθώς οι στόχοι σε βάθη 2 και 3 μέτρα με δεν διακρίνονται μεταξύ τους ξεκάθαρα. Για το πρωτόκολλο role-dipole ο στόχος ανακατασκευάζεται αμυδρά στην εικόνα αντιστροφής όταν τα ηλεκτρόδια είναι στην επιφάνεια της θάλασσας αλλά όταν αυτά βρίσκονται στον πυθμένα ο στόχος διακρίνεται πολύ καλύτερα

ακόμα και όταν αυτός είναι σε βάθος 2 ή 3 μέτρα κάτω από τον πυθμένα. Σε αντίθεση με το πρωτόκολλο gradient, το πρωτόκολλο pole-dipole διακρίνει ξεκάθαρα τους στόχους τόσο με floating όσο και με submerged ηλεκτρόδια (Εικόνα 14).



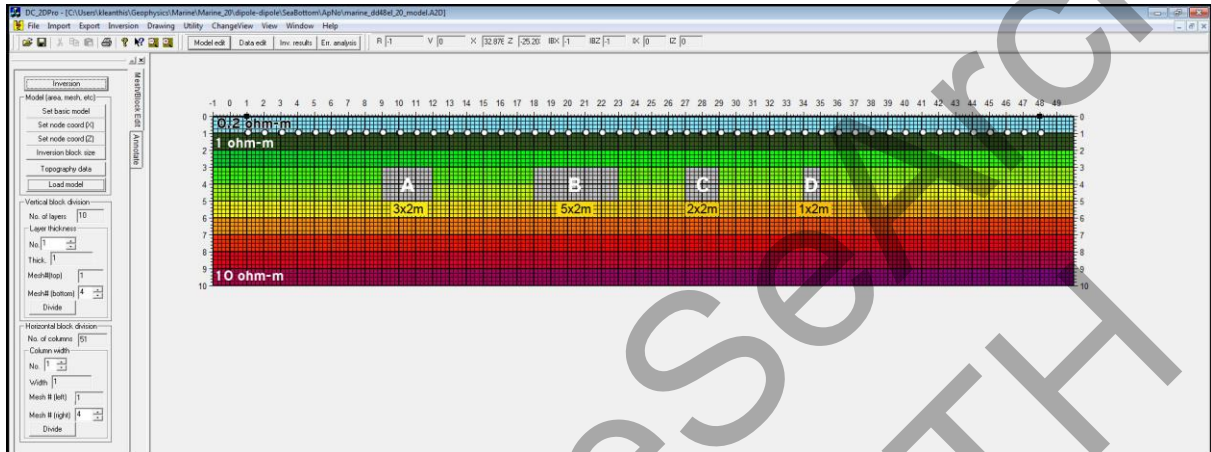
**Εικόνα 13. (Μοντέλο 4)** Στόχος αντίστασης  $\rho_{target}=500 \text{ ohm-m}$  ( $5 \times 2 \text{m}$ ) τοποθετημένος σε διαφορετικά βάθη  $d=1, 2$  και  $3$  μέτρα, μέσα σε ομογενές μέσο αντίστασης  $\rho_{background}=10 \text{ ohm}$ . Ακριβώς κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας υπάρχει ένα στρώμα πάχους  $1$  μέτρου και αντίστασης  $\rho_{overb}=1 \text{ ohm-m}$ . Δοκιμές έχουν γίνει με ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (μαύρες κουκκίδες) ή στον πυθμένα αυτής (άσπρες κουκκίδες).



**Εικόνα 14. (Μοντέλο 4)** Εικόνες αντιστροφής για στόχο αντίστασης  $R_{target}=500 \text{ ohm-m}$ , τοποθετημένο σε διαφορετικά βάθη με  $d=1, 2$  και  $3$  μέτρων κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα (a) dipole-dipole, (b) pole-dipole και (c) gradient και τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα τόσο στην επιφάνεια της θάλασσας (αριστερή στήλη) όσο και στον πυθμένα αυτής (δεξιά στήλη).

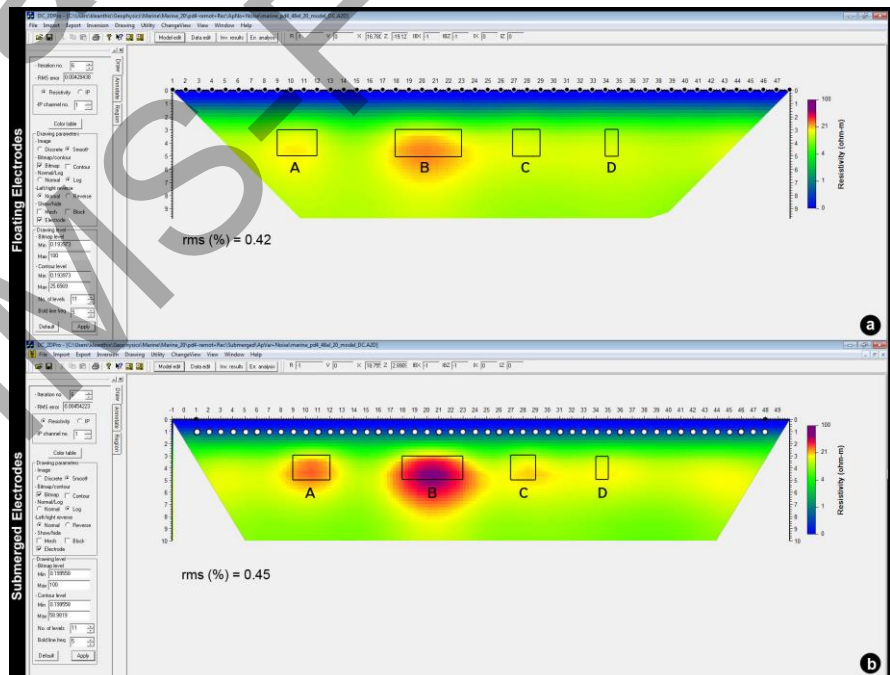
## Μέγεθος Στόχου

Για την αξιολόγηση του πρωτοκόλλου role-dipole σχετικά με την διακριτική του ικανότητα σχετικά με στόχους διαφορετικών διαστάσεων χρησιμοποιήθηκε ένα συνθετικό μοντέλο με στόχους διαφόρων μεγεθών (A, B, C, D), σύμφωνα με τ Εικόνα 15. Όλοι οι στόχοι βρίσκονται στο ίδιο βάθος (2 μέτρα κάτω από τον πυθμένα) και έχουν την ίδια τιμή αντίστασης ( $\rho_{\text{Targets}}=500 \text{ ohm-m}$ ). Ανάμεσα στους στόχους και το θαλάσσιο νερό παρεμβάλλεται ένα στρώμα πάχους 1 μέτρου και αντίστασης  $\rho_{\text{overb}}=1 \text{ ohm-m}$ .



**Εικόνα 15. (Μοντέλο 5)** Στόχοι διαφορετικών μεγεθών (ίδιας αντίστασης  $\rho_{\text{Targets}}=500 \text{ ohm-m}$ ) για την μελέτη διακριτικής ικανότητας του πρωτοκόλλου role-dipole. Κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας υπάρχει στρώμα πάχους 1 μέτρου και αντίστασης  $\rho_{\text{overb}}=1 \text{ ohm-m}$ .

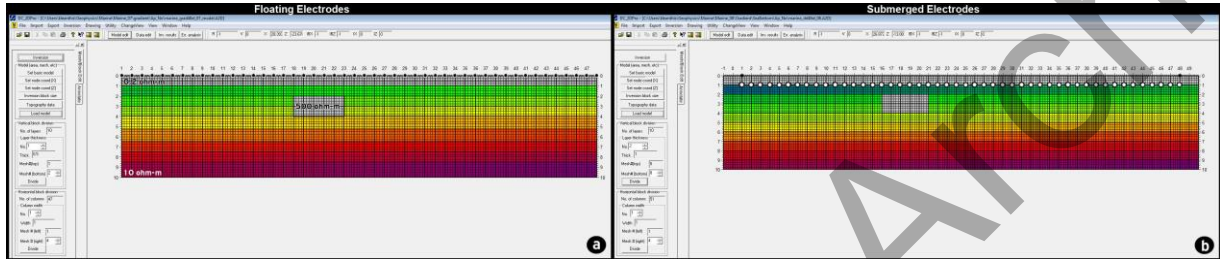
Από τα αποτελέσματα των εικόνων αντιστροφής, όπως φαίνεται στην Εικόνα16, όταν τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στον πυθμένα της θάλασσας είναι πιο αποτελεσματικός ο εντοπισμός στόχων μικρού μεγέθους (εντοπίζονται και οι στόχοι C, D). Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο αφού οι αισθητήρες (ηλεκτρόδια) βρίσκονται πλησιέστερα στους στόχους χωρίς να παρεμβάλεται το αγωγίμο στρώμα της θάλασσας, στο οποίο και αποσβένεται μεγάλη ποσότητα του ρεύματος. Όσον αφορά το μέγεθος των στόχων, προκύπτει ότι όταν ο στόχος έχει διάσταση ίση με την ελάχιστη απόσταση των ηλεκτροδίων (στόχος D) τότε είναι δύσκολο να εντοπισθεί, ακόμα και με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα στον πυθμένα της θάλασσας.



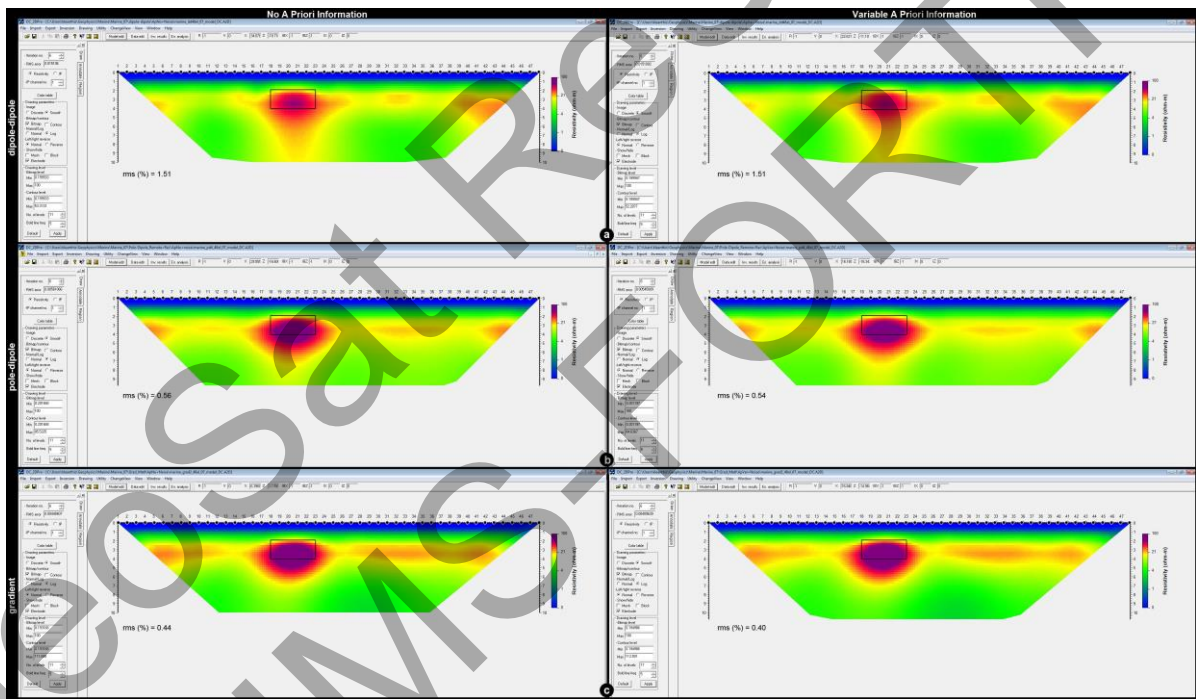
**Εικόνα16. (Μοντέλο 5)** Εικόνες αντιστροφής του πρωτοκόλλου role-dipole με χρήση ηλεκτροδίων στην επιφάνεια (a) και στον πυθμένα της θάλασσας (b) για τον εντοπισμό στόχων διαφορετικών μεγεθών.

## Εκ των προτέρων' (A priori) πληροφορία

Για την εξέταση της επίδρασης της 'εκ των προτέρων' πληροφορίας στην ανακατασκευή των τελικών γεωηλεκτρικών εικόνων έγινε χρήση ενός απλού μοντέλου (Εικόνα 17) με ένα αντιστατικό σώμα αντίστασης  $\rho_{\text{target}}=500 \text{ ohm-m}$  μέσα σε ημιχώρο αντίστασης  $\rho_{\text{background}}=10 \text{ ohm-m}$  και με στρώμα θαλάσσιου νερού πάχους  $D=1$  μέτρου και αντίστασης  $\rho_{\text{water}}=0.2 \text{ ohm-m}$ . Τα συνθετικά δεδομένα προέκυψαν με τη χρήση ηλεκτροδίων στην επιφάνεια και στον πυθμένα της θάλασσας.



**Εικόνα 17. (Μοντέλο 6)** Συνθετικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη της 'εκ των προτέρων' (a priori) πληροφορίας που εισάγεται κατά την διαδικασία αντιστροφής, με ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (a) και στον πυθμένα αυτής (b). Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα dipole-dipole, role-dipole και gradient.

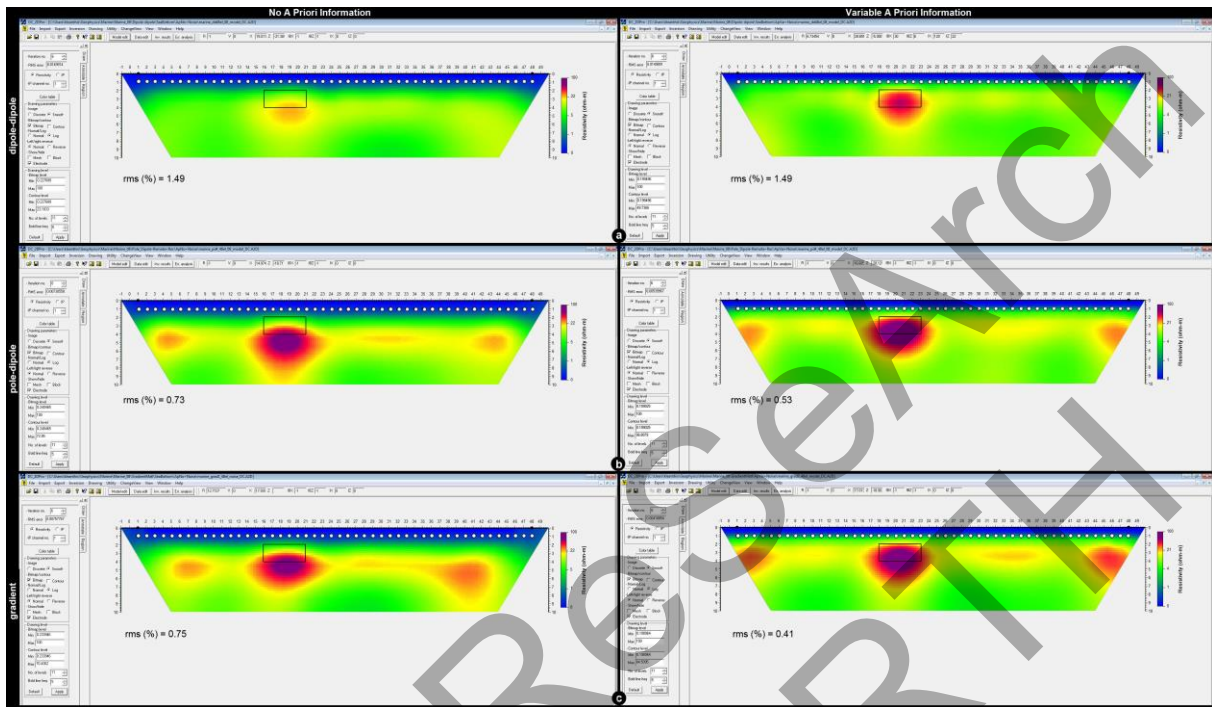


**Εικόνα 18. (Μοντέλο 6)** Εικόνες αντιστροφής όπου εισάγεται 'εκ των προτέρων' πληροφορία (δεξιά στήλη) κατά την διαδικασία της αντιστροφής με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (floating). Χρησιμοποιήθηκαν τα βασικά πρωτόκολλα: (a) dipole-dipole, (b) role-dipole και (c) gradient. Η αριστερή στήλη αναδεικνύει τα αποτελέσματα χωρίς 'εκ των προτέρων' πληροφορία.

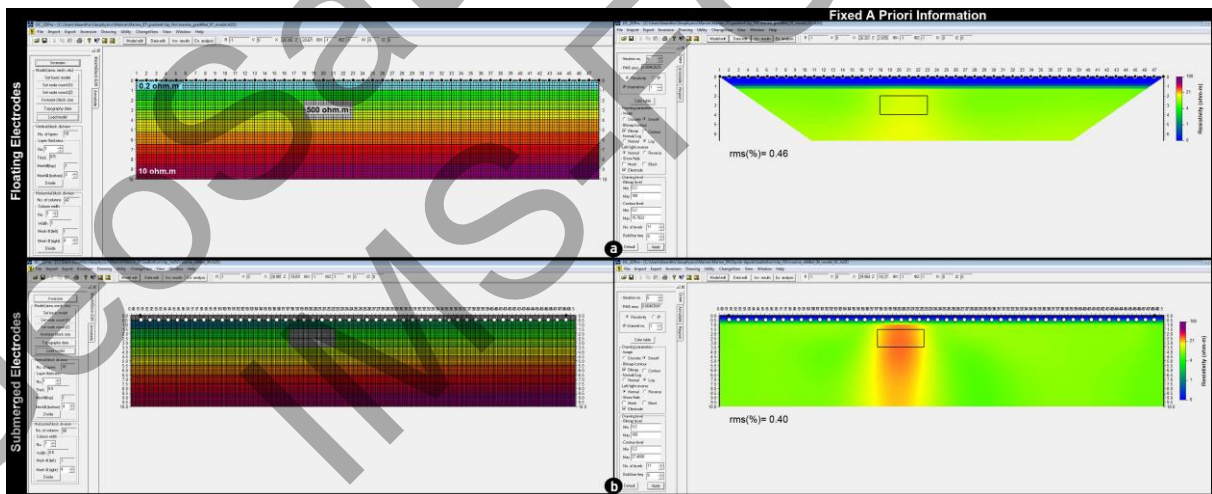
Σύμφωνα με την Εικόνα 18, όπου τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (floating), η 'εκ των προτέρων' πληροφορία γενικά δεν βελτιώνει την εικόνα αντιστροφής. Αντίθετα, στην περίπτωση που τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στον πυθμένα της θάλασσας (Εικόνα 19) τα αποτελέσματα των εικόνων αντιστροφής διορθώνονται και στα τρία πρωτόκολλα και ιδιαίτερα στην περιοχή κοντά στα ηλεκτρόδια, όπου και παρουσιάζεται πιο ευδιάκριτα το όριο της θάλασσας με τον πυθμένα. Επιπλέον, στο πρωτόκολλο role-dipole ο στόχος διακρίνεται καλύτερα, καθώς μειώνονται τα τεχνουργήματα εκατέρωθεν και στο κάτω μέρος αυτού. Το % σφάλμα στα δεδομένα επίσης



μειώνεται στα πρωτόκολλα role-dipole και gradient εκτός από το πρωτόκολλο dipole-dipole, στο οποίο ωστόσο ο στόχος διακρίνεται καλύτερα. Επιπλέον, η θέση του στόχου με την ‘a priori’ πληροφορία είναι πιο ακριβής, σε σχέση με την ελαφριά κατακόρυφη μετατόπιση που εμφανιζόταν στις δοκιμές χωρίς ‘εκ των προτέρων’ πληροφορίας.



**Εικόνα 19. (Μοντέλο 6)** Εικόνες αντιστροφής όπου εισάγεται ‘εκ των προτέρων’ πληροφορία κατά την διαδικασία της αντιστροφής με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα στον πυθμένα της θάλασσας (submerged). Χρησιμοποιήθηκαν τα βασικά πρωτόκολλα: (a) dipole-dipole, (b) pole-dipole και (c) gradient.



**Εικόνα 20. (Μοντέλο 7)** Εικόνες αντιστροφής όπου εισάγεται σταθερή ‘εκ των προτέρων’ πληροφορία κατά την διαδικασία της αντιστροφής με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (floating) με το πρωτόκολλο gradient (a) και στον πυθμένα αυτής (submerged) με το πρωτόκολλο dipole-dipole (b).

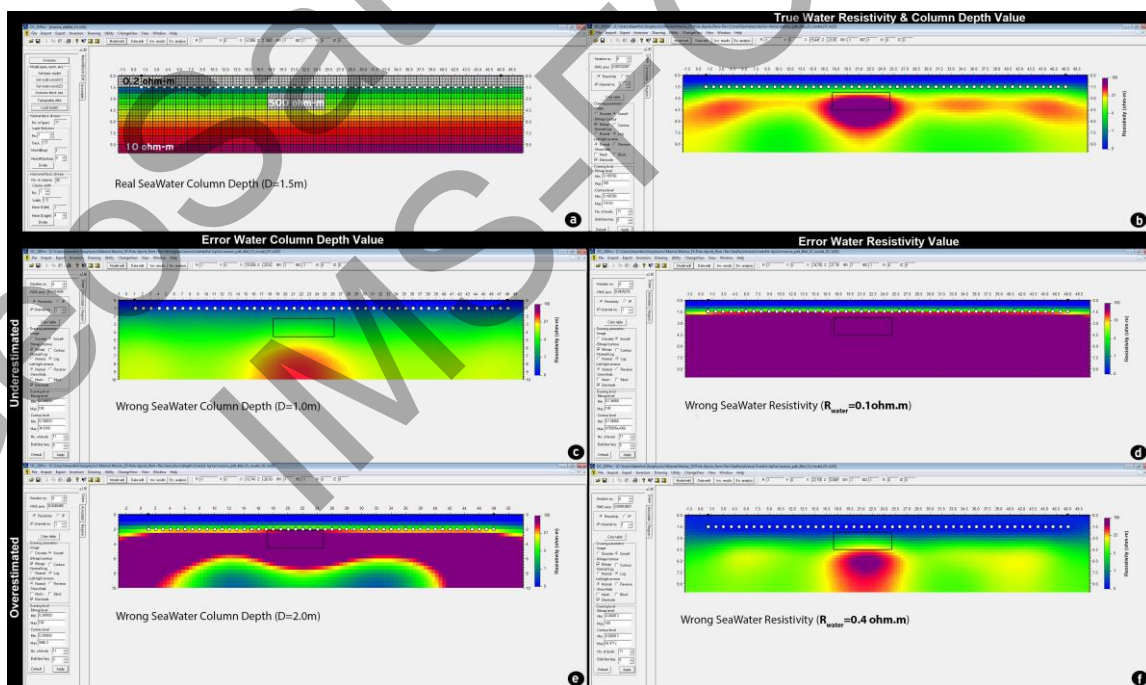
Εκτός από την μεταβαλλόμενη (variable) ‘εκ των προτέρων’ πληροφορία, πραγματοποιήθηκαν δομικές και με σταθερή (fixed) ‘εκ των προτέρων’ πληροφορία. Στην περίπτωση αυτή η τιμή της αντίστασης των παραμέτρων του μοντέλου που αντιστοιχούσε στην στήλη του θαλασσινού νερού διατηρήθηκε σταθερή σε όλη την διάρκεια της αντιστροφής. Ενδεικτικά φαίνονται αποτελέσματα στην Εικόνα 20, όπου και είναι φανερό ότι δεν προκύπτουν αξιόπιστα αποτελέσματα στις εικόνες

αντιστροφής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το θαλάσσιο νερό έχει πολύ μικρή τιμή αντίστασης (0.2 ohm-m) σε σχέση και με τον περιβάλλοντα χώρο και κατά την διαδικασία της αντιστροφής η μικρή αυτή τιμή καλύπτει μεγάλη περιοχή του μοντέλου την οποία αδυνατεί να «διαχειρισθεί» ο αλγόριθμος. Γι' αυτό και η μεταβαλλόμενη τιμή βαρύτητας (variable weighting) που μειώνεται κατά τις επαναλήψεις της αντιστροφής (δηλαδή όσο αυξάνεται ο αριθμός επαναλήψεων αντιστροφής δίνεται μεγαλύτερη «ελευθερία» στον αλγόριθμο να υπολογίσει τις τιμές των αντιστάσεων) είναι σε θέση να επιτρέψει τον αλγόριθμο να ορίσει καλύτερα τις τιμές αντίστασης στις παραμέτρους που καθορίζουν το μοντέλο.

#### Λανθασμένη 'εκ των προτέρων' πληροφορία (Υπο-, Υπέρ- εκτίμηση)

Όπως φάνηκε σε προηγούμενα παραδείγματα η 'εκ των προτέρων' πληροφορία μπορεί να φανεί χρήσιμη ειδικά όταν τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα μέσα στον πυθμένα της θάλασσας. Ωστόσο, σε περίπτωση που δεν είναι «αξιόπιστη» η πληροφορία που εισάγεται στην διαδικασία αντιστροφής προτείνεται να μην χρησιμοποιείται καθόλου γιατί μπορεί να οδηγήσει σε λάθος αποτελέσματα. Παρακάτω χρησιμοποιήθηκαν δύο περιπτώσεις λανθασμένης 'a priori' πληροφορίας: Λάθος εκτίμηση στην τιμή της αντίστασης του θαλάσσιου νερού και λάθος εκτίμηση στο ύψος της στήλης του νερού. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τόσο για υπερεκτιμημένες (overestimated) όσο και για υποεκτιμημένες (underestimated) τιμές.

Στην Εικόνα 21a, παρουσιάζεται το συνθετικό μοντέλο με ύψος στήλης νερού  $D=1.5$  μέτρο και τιμή αντίστασης  $\rho_{\text{water}}=0.2$  ohm-m. Στην Εικόνα 21b παρουσιάζεται η εικόνα αντιστροφής όπου έχουν εισαχθεί σωστά τόσο η τιμή του ύψους της στήλης του νερού όσο και η τιμή αντίστασής του. Έπειτα πραγματοποιήθηκε η διαδικασία αντιστροφής εισάγοντας υποεκτιμημένη τιμή ύψους στήλης νερού ( $D_{\text{underest}}=1\text{m}$ ) και το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 21c. Ο στόχος απεικονίζεται σε λάθος θέση στον χώρο και με μικρότερη τιμή αντίστασης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθεί υπερεκτιμημένη τιμή ύψους στήλης νερού ( $D_{\text{overest}}=2\text{m}$ ) το αποτέλεσμα στην Εικόνα 21e δείχνει ότι ο στόχος πλέον δεν μπορεί να ανακατασκευασθεί καθόλου.



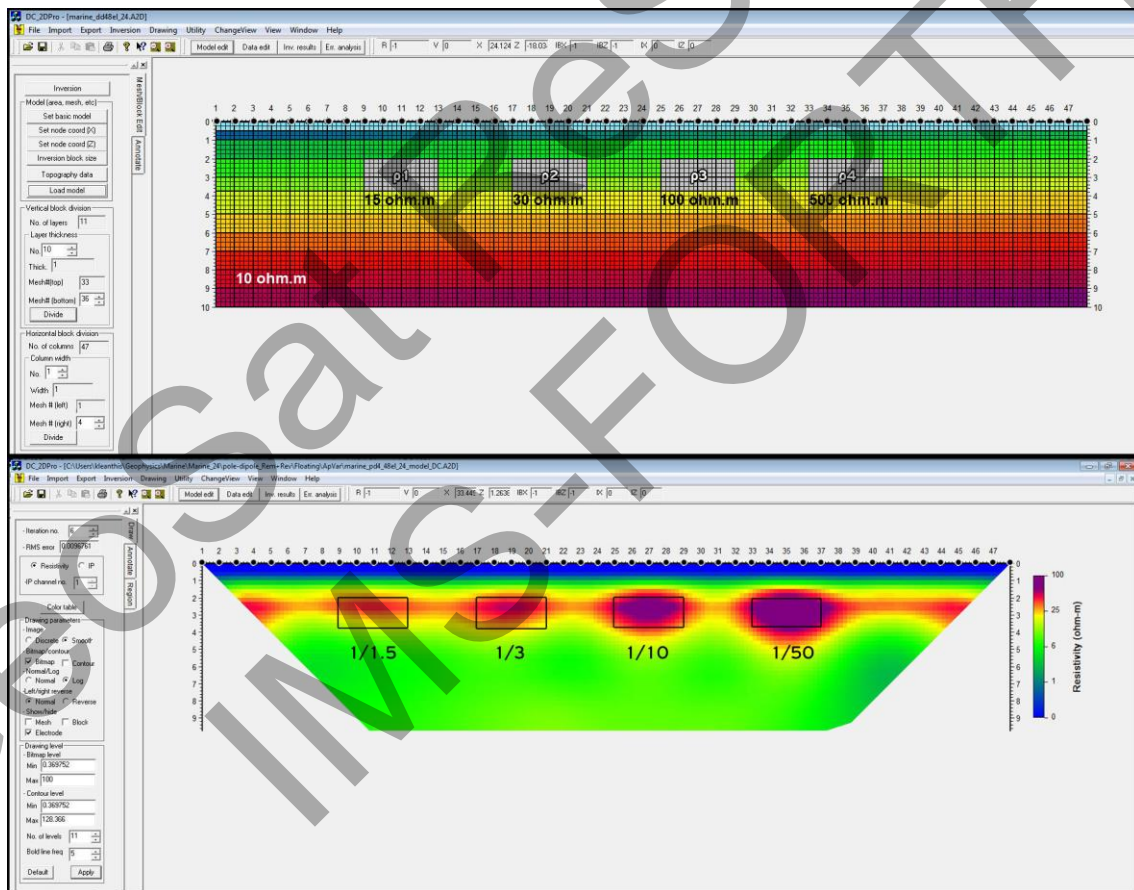
**Εικόνα 21. (Μοντέλο 8) Εικόνες αντιστροφής με τη χρήση υποεκτιμημένων ή υπερεκτιμημένων τιμών ύψους στήλης και αντίστασης του θαλάσσιου νερού. (a) Αρχικό συνθετικό μοντέλο. (b) Μοντέλο αντιστροφής με τις πραγματικές τιμές ύψους στήλης και αντίστασης του νερού. (c), (d) Μοντέλα αντιστροφής με υποεκτίμηση της πραγματικής τιμής του**

πάχους του νερού και της αντίστασής του. (ε), (φ) Μοντέλα αντιστροφής με υπερεκτίμηση της πραγματικής τιμής του πάχους του νερού και της αντίστασής του.

Για την περίπτωση που υποεκτιμηθεί η τιμή αντίστασης του νερού ( $\rho_{\text{water}}=0.1 \text{ ohm-m}$ ) τότε σύμφωνα με την Εικόνα 21d είναι αδύνατο να εμφανισθεί ο στόχος στην εικόνα αντιστροφής. Αντίθετα, εάν υπερεκτιμηθεί η τιμή αντίστασης ( $\rho_{\text{water}}=0.4 \text{ ohm-m}$ ) παρόλο που ο στόχος εντοπίζεται σύμφωνα με την Εικόνα 21f, είναι μετατοπισμένος πιο κάτω από την αναμενόμενη θέση του.

### Αντίθεση στόχου με το περιβάλλον

Στην Εικόνα 22, σε ομογενές μέσο αντίστασης  $\rho_{\text{background}}=10 \text{ ohm-m}$  έχουν τοποθετηθεί στόχοι στο ίδιο βάθος ( $d=1\text{m}$  από τον πυθμένα της θάλασσας) αλλά με διαφορετικές τιμές αντίστασης ( $\rho_{\text{target}}=15, 30, 100$  και  $500 \text{ ohm-m}$ ). Μελετώντας τους λόγους αντιστάσεων είναι δυνατόν να εκτιμηθεί ποιο είναι το όριο πέρα από το οποίο δεν είναι δυνατόν να ανιχνευθεί ένας στόχος, όταν αυτός βρίσκεται σε περιβάλλον που έχει παρόμοια τιμή αντίστασης. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι μέχρι και τον λόγο αντιστάσεων 1/10, ο στόχος μπορεί να ανακατασκευασθεί με καλή προσέγγιση. Για μεγαλύτερους λόγους (1/3 ή 1/1.5) ο στόχος παραμορφώνεται σε μεγάλο βαθμό και οι τιμές αντίστασης είναι πολύ μικρότερες από αυτές που προκύπτουν από μεγαλύτερους λόγους με κίνδυνο να ταυτιστεί με τον θόρυβο του περιβάλλοντος.

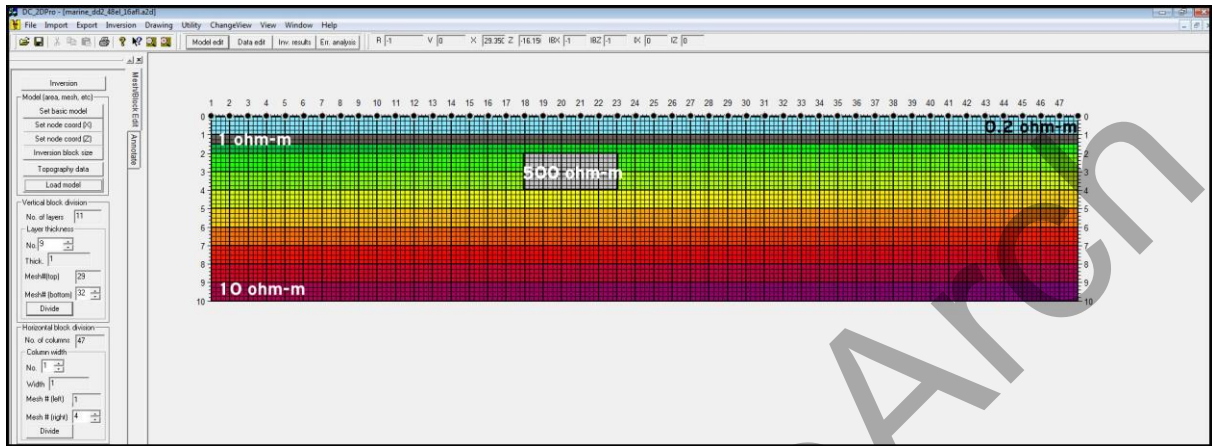


Εικόνα 22. (Μοντέλο 9) Εικόνα αντιστροφής με στόχους διαφορετικών τιμών αντίστασης σε σχέση με το περιβάλλον. Χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο role-dipole.

### Βέλτιστα πρωτόκολλα μετρήσεων

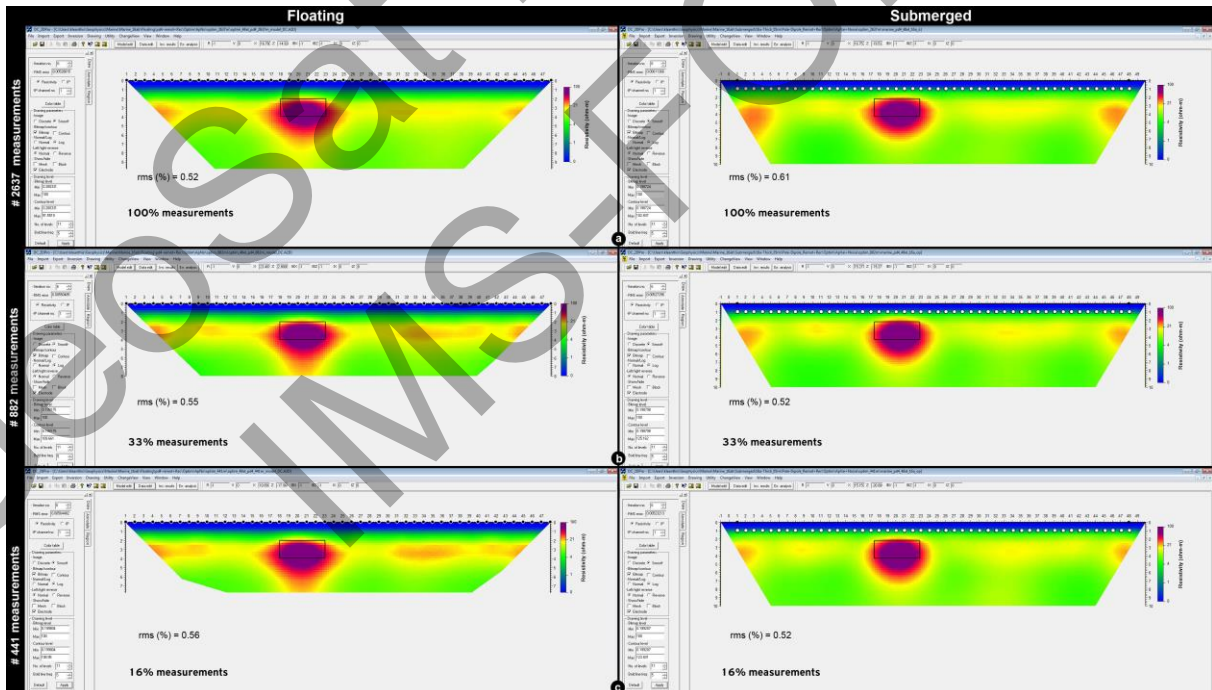
Για την μελέτη των βέλτιστων πρωτοκόλλων μετρήσεων, το πρωτόκολλο που χρησιμοποιήθηκε είναι το role-dipole με αρχικό αριθμό μετρήσεων #2637 και το μοντέλο της εικόνας 23. Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης των πρωτοκόλλων βάσει του Ιακωβιανού πίνακα

(Athanasίου et al. 2009) προέκυψαν πρωτόκολλα των οποίων ο αριθμός δεδομένων εξαρτάται από τον αριθμό των επαναλήψεων που επιλέγονται στον αλγόριθμο (για Iteration 1: #441 και Iteration 2: #882).



**Εικόνα 23. (Μοντέλο 10)** Συνθετικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την σύγκριση αποτελεσμάτων από εικόνες αντιστροφής μεταξύ βέλτιστων πρωτοκόλλων.

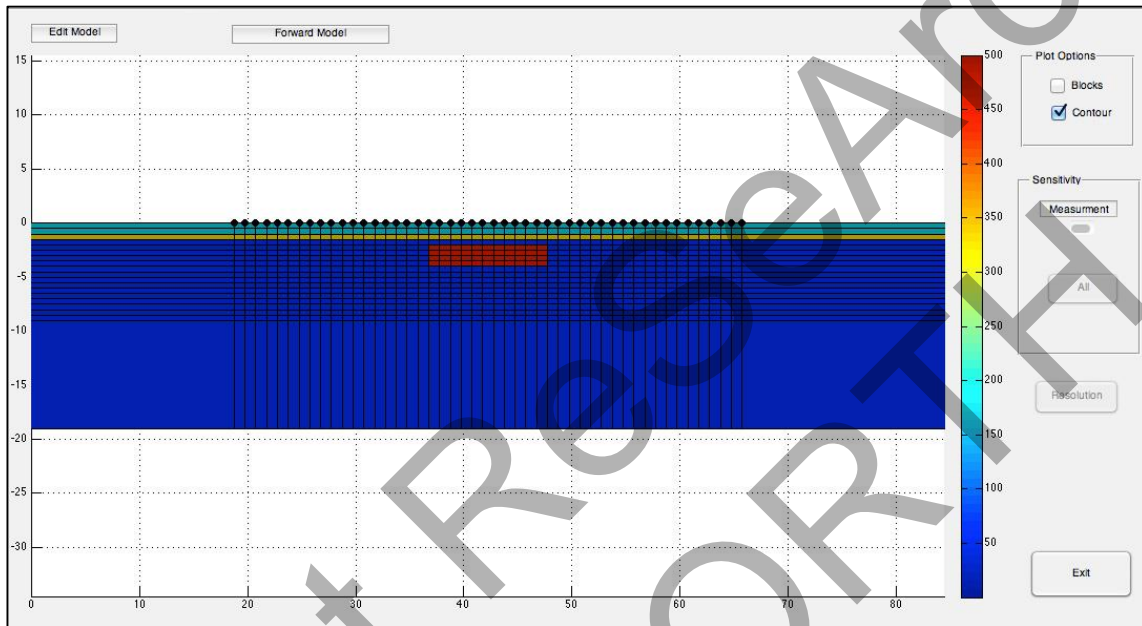
Από την Εικόνα 24, προκύπτει ότι γενικά με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης τα αποτελέσματα είναι ισάξια ακόμα και με τον ελάχιστο αριθμό μετρήσεων (#441). Όταν τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (floating) παρατηρείται ότι λόγω μείωσης των μετρήσεων μειώνεται και το βάθος διασκόπησης του πρωτοκόλλου. Επίσης όσο μειώνονται οι μετρήσεις τόσο αυξάνεται και ο θόρυβος ιδιαίτερα κοντά στην περιοχή του πυθμένα της θάλασσας. Όταν τα ηλεκτρόδια είναι τοποθετημένα απευθείας στον πυθμένα της θάλασσας, οι εικόνες αντιστροφής είναι παρόμοιες τόσο με τις #882 όσο και με τις #441 μετρήσεις.



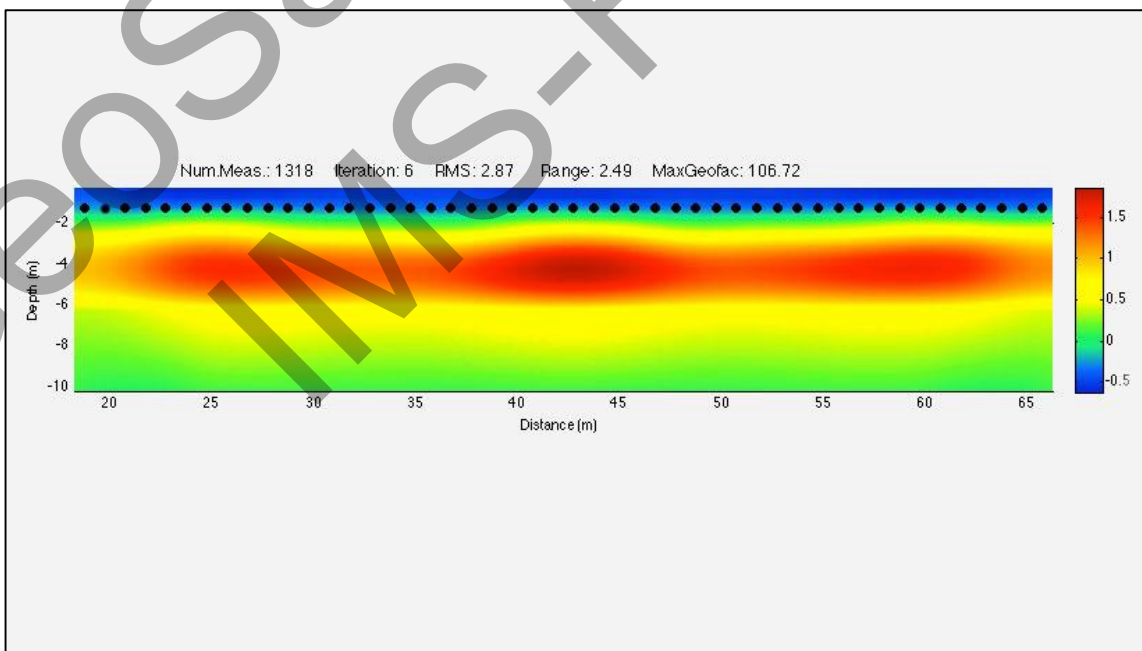
**Εικόνα 24. (Μοντέλο 10)** Αποτελέσματα αντιστροφής μεταξύ αρχικού πρωτοκόλλου (a) και μετρήσεων που προέκυψαν από διαδικασία βελτιστοποίησης αυτού (b) και (c), τόσο για ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (αριστερή στήλη) όσο και για ηλεκτρόδια τοποθετημένα στον πυθμένα της θάλασσας (δεξιά στήλη).

### Χρήση προγράμματος «2DInvCode»

Παράλληλα με το πρόγραμμα 'DC2DPro', πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με τον αλγόριθμο '2DInvCode', ο οποίος έχει βασιστεί σε προγενέστερο αλγόριθμο που δημιουργήθηκε από τον Παναγιώτη Τσούρλο (1995). Ο συγκεκριμένος κώδικας έχει την δυνατότητα επίλυσης του ευθέος και αντιστρόφου προβλήματος. Το ευθύ πρόβλημα επιλύεται με τη χρήση εξισώσεων βάσει της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis) (Εικόνα 25) και η επίλυση του αντιστρόφου προβλήματος βασίζεται σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο εξομαλυσμένης αντιστροφής (Εικόνα 26).



Εικόνα 25. Σχήμα όπου απεικονίζεται η δημιουργία του μοντέλου για την επίλυση του ευθέος προβλήματος με το πρόγραμμα '2DInvCode'.



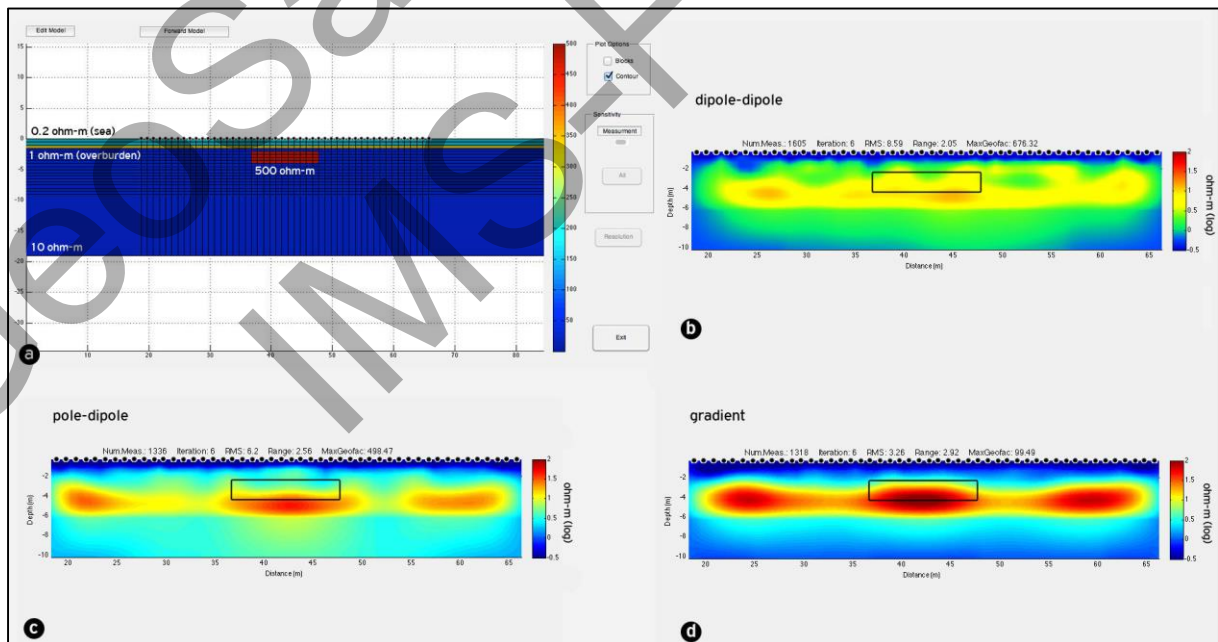
Εικόνα 26. Γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων επίλυσης του αντιστρόφου προβλήματος με το πρόγραμμα '2DInvCode'.

## Μοντέλο 2

Ενδεικτικά, μεταξύ πολλών δοκιμών, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αντιστροφής από το συνθετικό μοντέλο 2 (Εικόνα 27a), στο οποίο υπάρχει ένα στρώμα θάλασσας πάχους  $D=1$  μέτρου και αντίστασης  $\rho_{\text{water}}=0.2$  ohm-m. Ακριβώς από κάτω υπάρχει ένα στρώμα (overburden) πάχους 0.5 μέτρο και αντίστασης  $\rho_{\text{overb}}=1$  ohm-m και ένας στόχος διαστάσεων 11x2 μέτρα και αντίστασης  $\rho_{\text{target}}=500$  ohm-m. Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν (με το σύνολο των μετρήσεων) είναι: dipole-dipole (#1605), pole dipole (#1336) και gradient (#1318). Σε όλες τις μετρήσεις έχει προστεθεί θόρυβος 5%, έτσι ώστε να προσομοιαστούν καλύτερα τα συνθετικά δεδομένα με τα πραγματικά. Με μαύρο περίγραμμα επισημαίνεται η αναμενόμενη θεωρητικά θέση του στόχου. Η κλίμακα που απεικονίζει τις τιμές αντίστασης είναι κοινή σε όλες τις εικόνες αντιστροφής και με λογαριθμική αριθμηση.

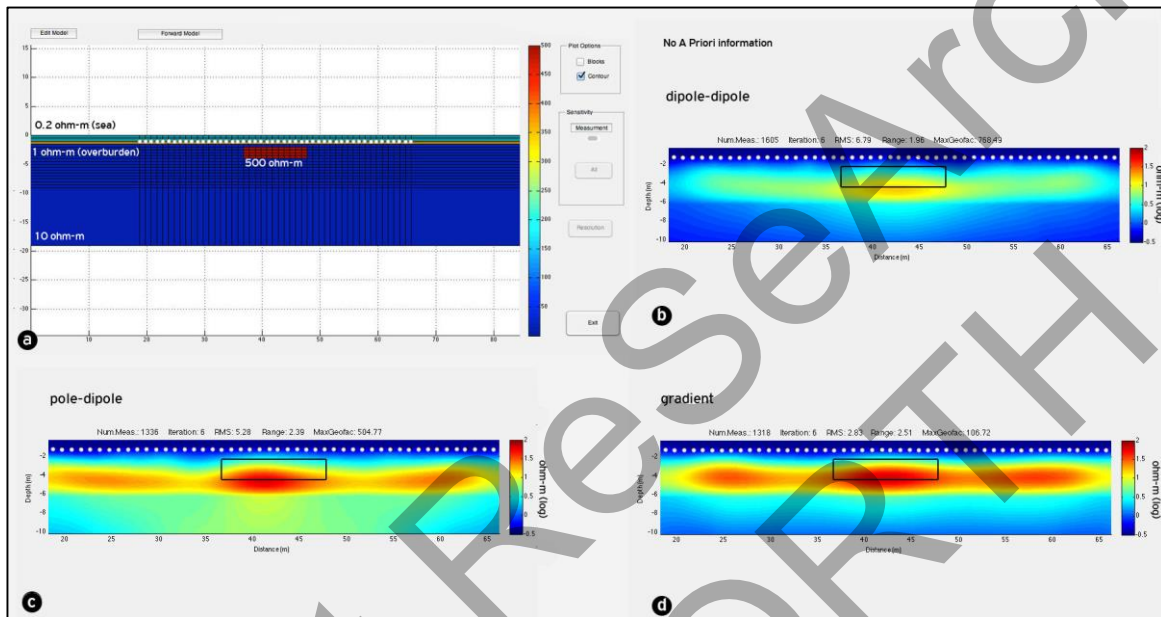
Στην Εικόνα 27 (b, c, d), απεικονίζονται τα αποτελέσματα αντιστροφής με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας (floating, μαύρες κουκκίδες). Από τις εικόνες αντιστροφής μία γενική παρατήρηση είναι ότι ο στόχος ανακατασκευάζεται σε μεγαλύτερο βάθος από την αναμενόμενη. Αυτό παρατηρείται σε όλα τα πρωτόκολλα, γεγονός που παρατηρήθηκε και με τη χρήση του προγράμματος 'DC2DPro'. Επιπλέον στις εικόνες αντιστροφής που προκύπτουν από αυτό το πρόγραμμα, όπως και στο πρόγραμμα 'DC2DPro', παρουσιάζονται ανωμαλίες εκατέρωθεν του στόχου, οι οποίες οφείλονται στην διαδικασία αντιστροφής.

Όσον αφορά την αξιολόγηση των πρωτοκόλλων, το dipole-dipole (Εικόνα 27b) επειδή έχει χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο και σε συνδυασμό και με τις πολύ χαμηλές τιμές δυναμικού που μετριοούνται (λόγω χαμηλής αντίστασης του νερού) παρουσιάζει τα χειρότερα αποτελέσματα στην εικόνα αντιστροφής. Το πρωτόκολλο gradient (Εικόνα 27d) εντοπίζει τον στόχο, ωστόσο παρουσιάζονται δύο έντονες ανωμαλίες εκατέρωθεν του. Ο περιβάλλοντος χώρος δεν αποτυπώνεται με την σωστή τιμή αντίστασης, αφού η τιμή αυτή είναι χαμηλότερη από την αναμενόμενη (ιδιαίτερα στο κάτω μέρος του στόχου). Το πρωτόκολλο pole-dipole (Εικόνα 27c) φαίνεται να αναπαριστά με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τον στόχο και τον περιβάλλοντα χώρο. Ωστόσο και σε αυτό το πρωτόκολλο παρουσιάζονται ανωμαλίες εκατέρωθεν του στόχου. Αξίζει να σημειωθεί ότι το στρώμα πάχους 0.5 μέτρου και αντίστασης 1 ohm-m δεν εμφανίστηκε σε κανένα από τα τρία πρωτόκολλα.

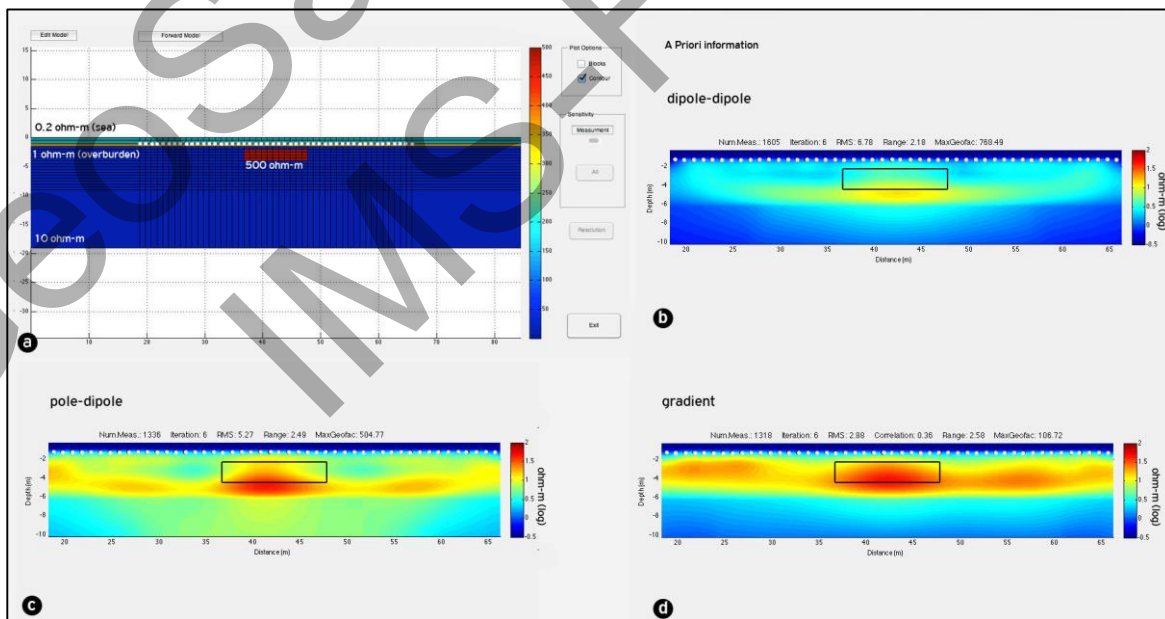


Εικόνα 27. Εικόνες αντιστροφής από το Μοντέλο 2 (a), με τα ηλεκτρόδια (μαύρες κουκκίδες) τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας με τη χρήση των πρωτοκόλλων (b) dipole-dipole, (c) pole-dipole και (d) gradient.

Στην Εικόνα 28, απεικονίζονται τα αποτελέσματα αντιστροφής με τα ηλεκτρόδια (λευκό χρώμα) τοποθετημένα στον πυθμένα της θάλασσας (submerged), χωρίς να προστεθεί 'εκ των προτέρων' πληροφορία (δηλ. το ύψος της στάθμης του νερού και η τιμή αντίστασης αυτού). Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων με την αντίστοιχη περίπτωση με τα ηλεκτρόδια τοποθετημένα στην επιφάνεια της θάλασσας, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα έχουν βελτιωθεί. Αυτό γίνεται φανερό ιδιαίτερα για το πρωτόκολλο dipole-dipole (Εικόνα 28b), όπου ο στόχος διακρίνεται καλύτερα. Το πρωτόκολλο gradient (Εικόνα 28d) δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη αλλαγή στα αποτελέσματα και στο πρωτόκολλο pole-dipole (Εικόνα 28c) η αναπαράσταση του στόχου έχει βελτιωθεί. Σε όλα τα πρωτόκολλα έχει μειωθεί ο θόρυβος εκατέρωθεν του στόχου.



**Εικόνα 28.** Εικόνες αντιστροφής από το Μοντέλο 2 (a), με τα ηλεκτρόδια (λευκές κουκκίδες) τοποθετημένα στον πυθμένα της θάλασσας με τη χρήση των πρωτοκόλλων (b) dipole-dipole, (c) pole-dipole και (d) gradient, χωρίς την προσθήκη της 'εκ των προτέρων' πληροφορίας.



**Εικόνα 29.** Εικόνες αντιστροφής από το Μοντέλο 2 (a), με τα ηλεκτρόδια (λευκές κουκκίδες) τοποθετημένα στον πυθμένα της θάλασσας με τη χρήση των πρωτοκόλλων (b) dipole-dipole, (c) pole-dipole και (d) gradient, με την προσθήκη της 'εκ των προτέρων' πληροφορίας.

Στην Εικόνα 29, με την προσθήκη της ‘εκ των προτέρων’ πληροφορίας κατά την διαδικασία αντιστροφής, παρατηρείται ότι το στρώμα της θάλασσας «περιορίζεται» πάνω από τα ηλεκτρόδια (όπως ισχύει και στην πραγματικότητα), ενώ στην προηγούμενη περίπτωση (χωρίς ‘εκ των προτέρων’ πληροφορία) δεν ήταν ξεκάθαρο το όριο θάλασσας και πυθμένα. Επιπλέον, με την ‘εκ των προτέρων’ πληροφορία, έχουν μειωθεί επιπλέον οι ανωμαλίες που εμφανίζονται εκατέρωθεν του στόχου και στα τρία πρωτόκολλα.

GeoSat Research  
IMS-FORTH



## Γενικά Συμπεράσματα

- Η μέθοδος της ηλεκτρικής τομογραφίας είναι σε θέση να εντοπίσει στόχους αρχαιολογικού ενδιαφέροντος σε ρηγά θαλάσσια περιβάλλοντα, λαμβάνοντας φυσικά υπόψιν κάποιες βασικές παραμέτρους (π.χ. το ύψος της στήλης και την αγωγιμότητα του νερού).
- Το περισσότερο αξιόπιστο πρωτόκολλο για να εφαρμοσθεί φαίνεται να είναι το pole-dipole μιας και εντοπίζει τον στόχο, έχει ελάχιστα τεχνουργήματα εκατέρωθεν του και η τιμή αντίστασης του περιβάλλοντος χώρου στις εικόνες αντιστροφής πλησιάζει με καλύτερη προσέγγιση σε σχέση με τα υπόλοιπα πρωτόκολλα.
- Για μικρά πάχη νερού ( $D < 1\text{m}$ ), εάν δεν χρησιμοποιεί 'εκ των προτέρων' πληροφορία τα αποτελέσματα με επιπλέοντα (floating) ηλεκτρόδια φαίνονται να είναι καλύτερα σε σχέση με τα καταβυθισμένα (submerged). Εάν υπάρχει 'εκ των προτέρων' πληροφορία προτείνεται να χρησιμοποιηθούν τα καταβυθισμένα ηλεκτρόδια.
- Το μέγιστο ύψος της στήλης του νερού πέρα από το οποίο ο στόχος πλέον είναι δύσκολο να εντοπισθεί είναι το 1 μέτρο με βάση τις παραμέτρους μέτρησης και τις διαστάσεις των στόχων που θέλουμε να χαρτογραφήσουμε. Πέρα από αυτό το όριο είναι δύσκολο να ανιχνευθεί οποιοσδήποτε στόχος. Το ύψος της στήλης του νερού επηρεάζει κυρίως τις μετρήσεις των ηλεκτροδίων που επιπλέουν στην επιφάνεια της θάλασσας (floating).
- Όσον αφορά το μέγιστο βάθος ταφής πέρα από το οποίο ο στόχος είναι δύσκολο να ανιχνευθεί, με δοκιμές που έγινες τόσο με επιπλέοντα όσο και με καταβυθισμένα ηλεκτρόδια αρχικά παρατηρήθηκε (όπως ήταν και αναμενόμενο) η υπεροχή των καταβυθισμένων αφού οι αισθητήρες (ηλεκτρόδια) είναι τοποθετημένοι πιο κοντά στον στόχο. Μέχρι βάθος 2 μέτρα κάτω από τον πυθμένα είναι δυνατόν με τη χρήση του πρωτοκόλλου pole-dipole να ανιχνευθεί ο στόχος.
- Σχετικά με τις διαστάσεις του στόχου, αυτός μπορεί να ανιχνευθεί εάν η μικρότερη διάσταση του είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη μεταξύ των ηλεκτροδίων απόσταση.
- Η χρήση της 'εκ των προτέρων' πληροφορίας κρίνεται απαραίτητη κατά την χρήση των καταβυθισμένων ηλεκτροδίων, αλλά εάν δεν είναι αξιόπιστη θα οδηγήσει σε μη ρεαλιστικά μοντέλα του υπεδάφους. Ωστόσο, είναι προτιμότερο να υποεκτιμηθεί το ύψος της στήλης του νερού ή να υπερεκτιμηθεί η τιμή αντίστασής του. Κατά την εφαρμογή της 'εκ των προτέρων' σε floating ηλεκτρόδια δεν παρατηρείται καμία βελτίωση στα αποτελέσματα.
- Μέχρι αντίθεση 1/10 του λόγου των αντιστάσεων μεταξύ του στόχου και του περιβάλλοντος χώρου είναι εφικτή η ανακατασκευή του στόχου. Πέρα από αυτήν την τιμή ο στόχος δύσκολα ανιχνεύεται.
- Με τη χρήση των βέλτιστων πρωτοκόλλων είναι δυνατό να προκύψουν ισοδύναμα αποτελέσματα με τα αρχικά πρωτόκολλα. Χρησιμοποιώντας τον Ιακωβιανό πίνακα, τα βέλτιστα πρωτόκολλα που προκύπτουν, λόγω μικρότερου αριθμού δεδομένων, επιταχύνουν την διαδικασία τόσο της δειγματοληψίας όσο και της αντιστροφής και αυτό τα καθιστά περισσότερο εύχρηστα από τα αρχικά πρωτόκολλα.
- Εκτός από το βασικό πρόγραμμα επεξεργασίας δεδομένων 'DC2DPro' ταυτόχρονα αξιόπιστο θεωρείται και το πρόγραμμα '2DinvCode' αφού τα αποτελέσματα των εικόνων αντιστροφής είναι συγκρίσιμα με αυτά του βασικού προγράμματος.

## Αναφορές

- Athanasίου Η., 2009, Algorithm Development for Optimum Measurements of ERT data, Unpublished PhD Thesis, University of Thessaloniki.
- Griffiths, D.H., and Barker, R.D., (1993), Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology, *Journal of Applied Geophysics*, 29, p. 211–226.
- Orlando, L., 2013, Some considerations on electrical resistivity imaging for characterization of waterbed sediments, *Journal of Applied Geophysics*, vol.95, p. 77-89
- Kim J-H, Yi M-J., 2010. ‘DC3D\_PRO’, Geoelectrical Modeling and Inversion, User’s Manual, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Korea
- Kim, J.-H., Yi, M.-J., Song, Y., Cho, S.-J., Chung, S.-H. and Kim, K.-S., 2002, DC Resistivity Survey to Image Faults Beneath a Riverbed: Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP 2002), 13IDA10, Las Vegas, USA
- Σιμυρδάνης Κ. (2013), Ανάπτυξη τομογραφικών γεωφυσικών τεχνικών για τη μελέτη γεωτεχνικών και περιβαλλοντικών προβλημάτων, Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ
- Tsourlos P.I. (1995), Modeling, Interpretation and Inversion of Multielectrode Resistivity Survey Data. Ph.D. Thesis, Department of Electronics, University of York.

Geosat Research  
IMS-FORTH