

**ΜΕΡΟΣ ΔΕΥΤΕΡΟ :** Μαγνητοτελλουρικές καταγραφές στην λεκάνη του  
Σπερχειού Ποταμού.

**ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

1	Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Επαγωγής .....	2
1.1	Ομογενής Ημιχώρος .....	7
1.2	Οριζόντια Στρωματογραφία.....	9
1.3	Τανυστής εμπέδησης (Impedance) και διάνυσμα διεύθυνσης (Tipper). Δισδιάστατο μοντέλο .....	12
1.4	Σύνοψη των μορφών του τανυστή εμπέδησης.....	17
2	Μαγνητοτελλουρικές καταγραφές στην λεκάνη του Σπερχειού Ποταμού.....	19
2.1	Επεξεργασία και ερμηνεία MT καταγραφών.....	20
3	Συμπεράσματα .....	47
4	Βιβλιογραφία .....	48

## 1 Ηλεκτρομαγνητικές Μέθοδοι Επαγωγής

Σε ισότροπο και ομογενές μέσο οι εξισώσεις του Maxwell μπορούν να γραφούν με την παρακάτω μορφή

$$\nabla^2 E = \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t}, \quad (\text{Εξισώσεις Τηλέγραφου}) \quad (1)$$

$$\nabla^2 H = \mu\epsilon \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t},$$

όπου  $E$ , ένταση ηλεκτρικού πεδίου [ $Vm^{-1}$ ],

$\mu$ , μαγνητική διαπερατότητα [ $Hm^{-1}$ ],

$\epsilon$ , ηλεκτρική διαπερατότητα [ $Fm^{-1}$ ],

$\sigma$ , ειδική αγωγιμότητα [ $Sm^{-1}$ ],

$H$ , ένταση μαγνητικού πεδίου, [ $Am^{-1}$ ],

Θεωρώντας αρμονική ( $\propto e^{i\omega t}$ ) μεταβολή των πεδίων (Ηλεκτρικού -  $E$ , και μαγνητικού -  $H$ ) με τον χρόνο έχουμε

$$E = E_0 e^{i\omega t},$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = i\omega E_0 e^{i\omega t} = i\omega E, \quad \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = -\omega^2 E_0 e^{i\omega t} = -\omega^2 E, \quad (2)$$

όπου  $\omega$ , γωνιακή συχνότητα.

Από τα παραπάνω εύκολα συμπεραίνουμε,

$$\nabla^2 E = -\omega^2 \mu\epsilon E + i\omega\mu\sigma E, \quad \nabla^2 E + k^2 E = 0, \quad (\text{Εξισώσεις Helmholtz}) \quad (3)$$

$$\nabla^2 H = -\omega^2 \mu\epsilon H + i\omega\mu\sigma H \quad \nabla^2 H + k^2 H = 0$$

όπου,  $k^2 = \omega^2 \mu\epsilon - i\omega\mu\sigma$ , μιγαδικός κυματάριθμος.

Στις υψηλές συχνότητες ο όρος  $\omega^2$  παίρνει πολύ μεγάλη τιμή, και επομένως η εξίσωση τηλεγράφου δίνει

$$\nabla^2 E \approx \mu\epsilon \frac{\partial^2 E}{\partial t^2}. \quad (4)$$

Η σχέση αυτή είναι η εξίσωση κύματος που ισχύει στη μέθοδο Γεωραντάρ.

Στις χαμηλές συχνότητες η μεταβολή της πρώτης παραγώγου των πεδίων με το χρόνο είναι παρα πολύ μικρή, οπότε  $\frac{\partial^2}{\partial t^2} E, H (\approx 0)$  και οι εξισώσεις τηλεγράφου δίνουν

$$\nabla^2 E \approx \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t}. \quad (5)$$

Η παραπάνω σχέση περιγράφει το φαινόμενο διάχυσης και είναι η εξίσωση που κυριαρχεί στις Επαγόμενες Ηλεκτρομαγνητικές Μεθόδους.

Εάν δεν υπάρχει μεταβολή με το χρόνο, ή είναι πολύ μικρή έχουμε  $\frac{\partial}{\partial t} E, H (\approx 0)$  και οι εξισώσεις τηλεγράφου δίνουν την εξίσωση Laplace

$$\nabla^2 E \approx 0 \quad (6)$$

η οποία διαίπει της ηλεκτρικές, γαλβανικές (DC) μεθόδους.

Αναλυτικότερα για τις ηλεκτρομαγνητικές μεθόδους επαγωγής (Σχ. 1), οι εξισώσεις του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι

$$\nabla^2 E = \mu\sigma \frac{\partial E}{\partial t} \text{ και } \nabla^2 H = \mu\sigma \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (7)$$

Θεωρώντας ότι  $E = E_0 e^{i\omega t}$ ,  $H = H_0 e^{i\omega t}$ , μονοδιάστατο μοντέλο για το μέσο διάδοσης και καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων (όπου,  $z$  είναι η κατακόρυφη διεύθυνση και λαμβάνεται θετική προς το κέντρο της γης), οι σχέσεις (7) δίνουν

$$E = E_0 e^{-\alpha z + i(\omega t - \beta z)} \Leftrightarrow E = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \quad (8)$$

$$\text{όπου } \alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = \delta^{-1},$$

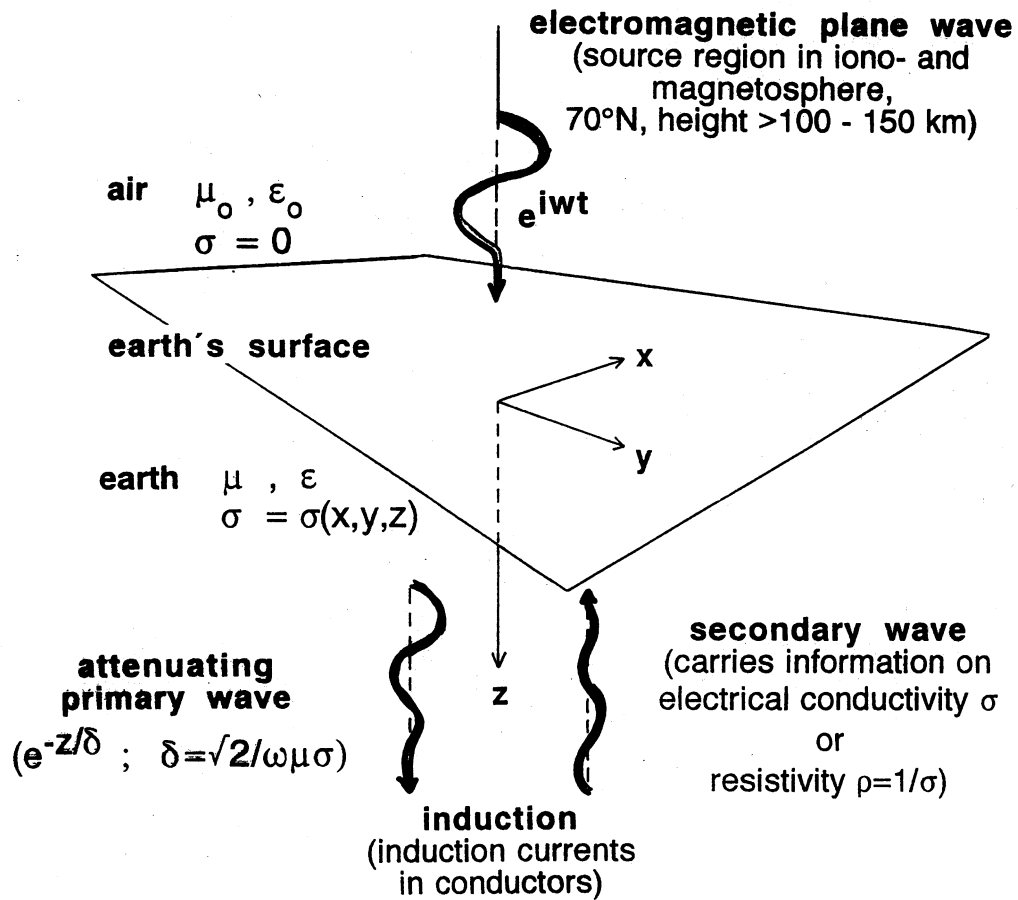
$\omega$ , η γωνιακή συχνότητα,

$$\delta, \text{ το επιδερμικό βάθος, } \delta[\text{km}] \approx 0.5\sqrt{\rho[\Omega\text{m}]\text{T[s}]}$$

$e^{-\alpha z}$ , η εκθετική απόσβεση κατά την διεύθυνση  $z$

$e^{-i(\omega t - \beta z)}$ , είναι ένα αρμονικό κύμα το οποίο διαδίδεται κατά την διεύθυνση  $z$  και μεταβάλλεται αρμονικά ( $e^{-i\omega t}$ ) με τον χρόνο (Σχ. 2).

## Electromagnetic induction in the Earth



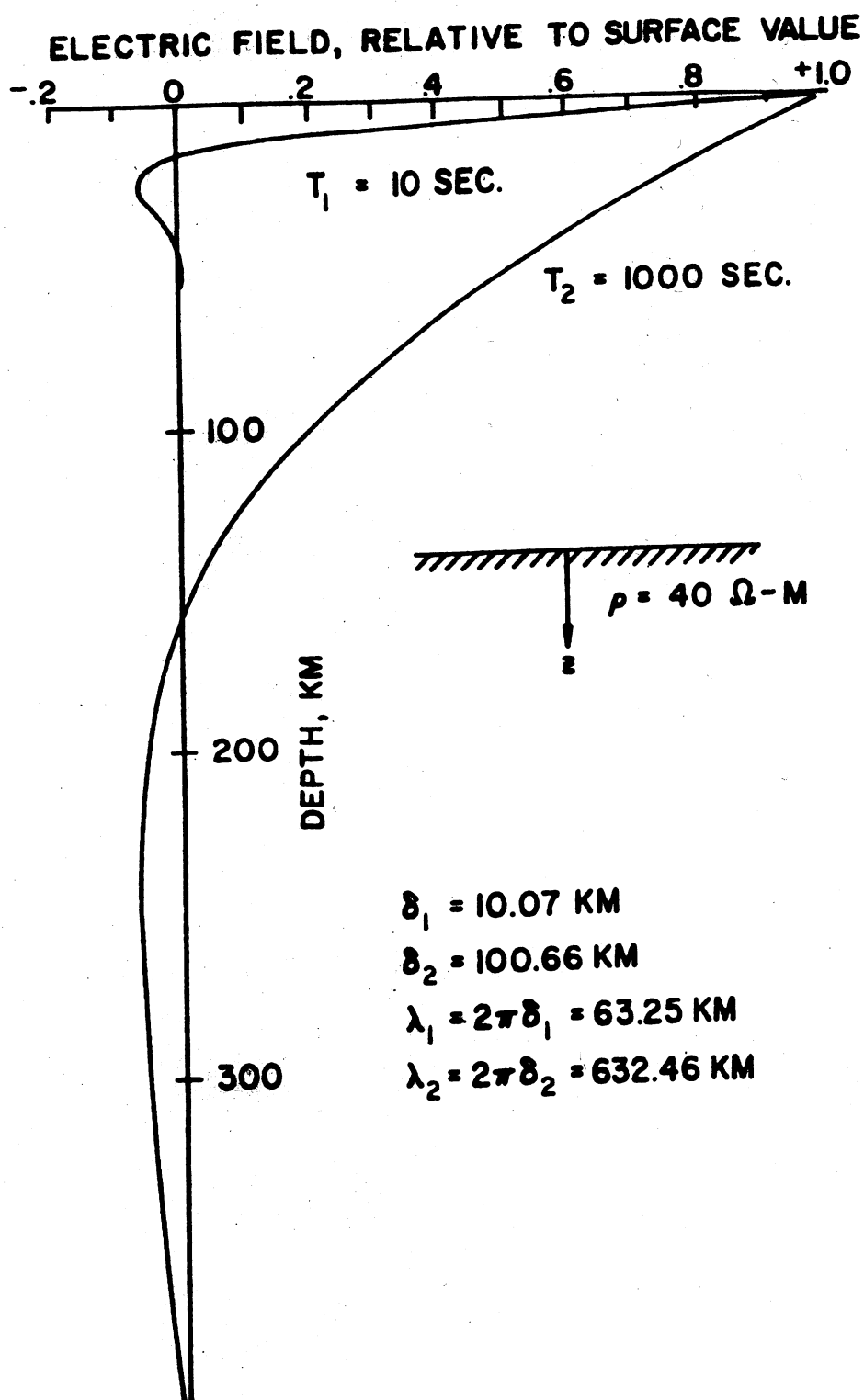
Σχήμα 1. Σχηματική παράσταση της λειτουργίας των επαγόμενων ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων.

Από το νόμο του Snell έχουμε ότι

$$k_0 \sin \theta_0 = k_1 \sin \theta_1, \quad (9)$$

όπου  $k_0, k_1$  είναι οι μιγαδικοί κυματάρημοι αέρα και γης αντίστοιχα και  $\theta_0, \theta_1$  είναι η γωνία πρόσπτωσης και διάθλασης αντίστοιχα.

Εάν παραλείψουμε τα ρεύματα μετατόπισης στον αέρα (οπότε έχουμε  $k^2 = -i\omega\mu\sigma$ ) έχουμε  $k_0 \approx 0$ , οπότε  $\theta_1 = 0$ . Η προσέγγιση αυτή (ημιστατική) είναι αληθής για συχνότητες μικρότερες από  $10^5$  Hz. Όλα αυτά έχουν ως συμπέρασμα ομογενή και ομοιόμορφα επίπεδα κύματα τα οποία ταξιδεύουν κατακόρυφα μέσα στην γη ανεξάρτητα από την γωνία πρόσπτωσης.



Σχήμα 2. Η απόσβεση με το βάθος της ισχύς του ηλεκτρικού πεδίου δύο σημάτων διαφορετικής περιόδου, το ένα στα 10 δευτερόλεπτα (sec) και το άλλο στα 1000 δευτερόλεπτα (sec), σε ομογενή γη αντίστασης 40 Ωm. Το βάθος διείσδυσης για τα 10sec είναι  $\delta_1=10\text{km}$ , και το βάθος διείσδυσης για τα 1000sec είναι  $\delta_2=1000\text{km}$ .

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονισθεί ότι στη μαγνητοτελλουρική μέθοδο ο μιγαδικός κυματάριθος  $k^2$  αναφέρεται χωρίς τον παράγοντα  $\omega^2\mu\epsilon$  (ρεύματα

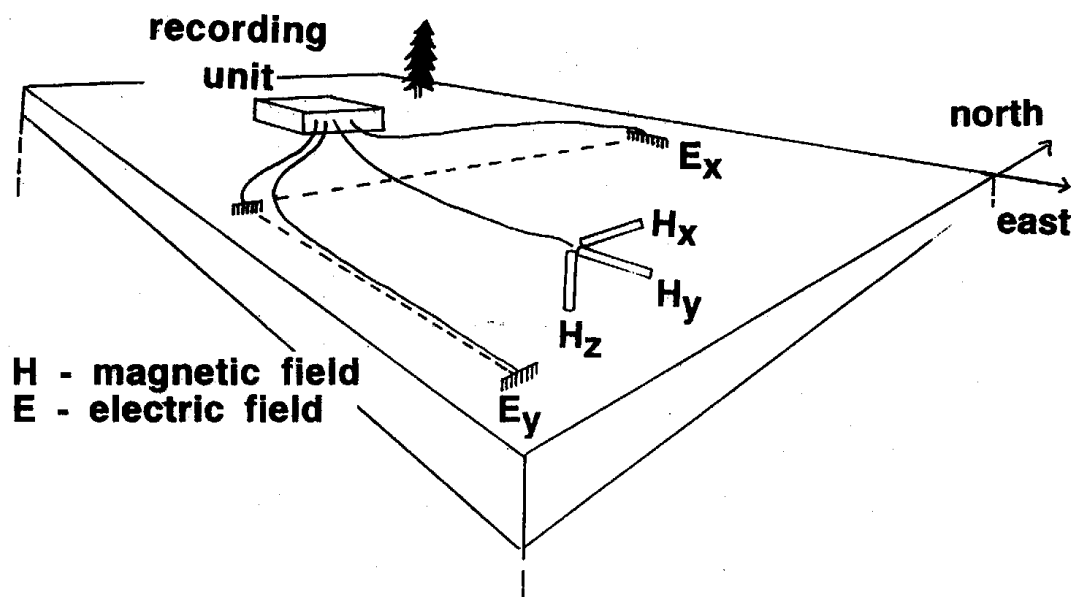
μετατόπισης) διότι θεωρούμε ότι έχουμε ημιστατική μεταβολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου οπότε τα ρεύματα μετατόπισης είναι αμελητέα.

Στο ύπαιθρο γίνεται συνήθως καταγραφή πέντε συνιστωσών, δύο ηλεκτρικών ( $E_x, E_y$ ) και τριών μαγνητικών ( $H_x, H_y, H_z$ ), όπου οι διευθύνσεις  $x, y$  είναι κάθετες μεταξύ τους και η διεύθυνση  $x$  ταυτίζεται με την διεύθυνση Βορράς-Νότος, ενώ η διεύθυνση  $z$  είναι κατακόρυφη και θετική από την επιφάνεια προς το κέντρο της γης. Όπως σε όλες τις γεωφυσικές μεθόδους έτσι και στις ηλεκτρικές μεθόδους επαγωγής μπορούμε στις εργασίες υπαίθρου να έχουμε σταθερή την γωνιακή συχνότητα ( $\omega$ ) και να μεταβάλλεται η θέση των φορατών, οπότε πραγματοποιούμε χαρτογράφηση. Στην περίπτωση που μεταβάλλεται η γωνιακή συχνότητα και διατηρείται σταθερή η θέση των φορατών πραγματοποιούμε βυθοσκοπήση. Μπορούν να γίνουν καταγραφές διαφόρων συνιστωσών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Ανάλογα με το ποιές συνιστώσες καταγράφονται έχουμε και τις αντίστοιχες τεχνικές, οι οποίες δίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε στο παρών ερευνητικό έργο είναι η MTS.

**Πίνακας 1.** Μαγνητοτελλουρικές και Γεωμαγνητικές τεχνικές και συνιστώσες οι οποίες καταγράφονται κατά περίπτωση.

Μέθοδος	Συνιστώσες	Κυκλική Συχνότητα	Θέση
MAGNETOTELLURIC SOUNDING (MTS) (Σχ. 3)	$E_x, E_y, H_x, H_y$	$\omega: \omega_1 \rightarrow \omega_N$	$x: x = x_1$
MAGNETOTELLURIC PROFILING (MTP)	$E_x, E_y, H_x, H_y$	$\omega: \omega = \omega_1$	$x: x_1 \rightarrow x_N$
TELLURIC CURRENT MAPPING (TCM)	$E^1_x, E^1_y, E^2_x, E^2_y$	$\omega: \omega = \omega_1$	$x: x_1 \text{ \& } x_2$ μαζί
MAGNETOVARIAIONAL SOUNDING (MVS) GEOMAGNETIC DEPTH SOUNDING (GDS) (Σχ. 3)	$H_x, H_y, H_z$	$\omega: \omega_1 \rightarrow \omega_N$	$x: x = x_1$
MAGNETOVARIAIONAL PROFILING (MVP)	$H_x, H_y, H_z$	$\omega: \omega = \omega_1$	$x: x_1 \rightarrow x_N$
<b><u>COMPREHENSIVE GEOELECTRIC DEEP SOUNDING (CGDS)</u></b>	$E_x, E_y, H_x, H_y, H_z$	σε παράταξη για ευρύ φάσμα συχνοτήτων	
<b><u>CGDS</u></b> REMOTE REFERENCE	$E_x, E_y, H_x, H_y, H_{xr}, H_{yr}, H_z$		

## Geoelectromagnetic measurements



$$H_x(w), H_y(w), H_z(w)$$

Magnetovariational (MV)

$$H_x(w), H_y(w), E_x(w), E_y(w)$$

Magnetotelluric (MT)

Σχήμα 3. Γεωηλεκτρομαγνητικές καταγραφές με τις τεχνικές MVS και MTS.

### 1.1 Ομογενής Ημιχώρος

Για να εξάγουμε πληροφορίες για την αντίσταση της γης από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι απαραίτητη η ερμηνεία των σχέσεων που συνδέουν το ηλεκτρικό (E) και μαγνητικό (H) πεδίο με την αντίσταση της γης. Χρησιμοποιώντας την υπόθεση ότι τα πεδία αποτελούν επίπεδο κύμα, για κάθε γωνιακή συχνότητα σε ομογενή Γη αγωγιμότητας  $\sigma$  (Straton 1941) έχουμε

$$\vec{H} = \frac{k}{\mu\omega} \vec{n} \times \vec{E}, \quad (10)$$

όπου

$$k = (1 - i)\alpha$$

$$\alpha = \sqrt{\omega\mu\sigma / 2} = 1 / \delta$$

$\delta$ , είναι το επιδερμικό βάθος σε μέτρα,  $k$ , ο μιγαδικός κυματάρηθος, και  $\vec{n}$  το μοναδιαίο διάνυσμα με διεύθυνση κατακόρυφη και φορά προς το κέντρο της Γης.

Ο λόγος  $E_x / H_y$  στην επιφάνεια (οι δείκτες δηλώνουν οριζόντιες καρτεσιανές συντεταγμένες) είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Πιο συγκεκριμένα

$$E_x / H_y = \omega\mu / k = (1 + i)(\omega\mu / 2\sigma)^{1/2} \quad (11)$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ακριβώς την σχέση ανάμεσα στις συνιστώσες του πεδίου που καταγράφουμε και την αγωγιμότητα. Στην πραγματικότητα, ο λόγος  $E_x / H_y$  είναι ανάλογος της  $\sqrt{\rho}$ , όπου  $\rho = 1 / \sigma$ . Θέτοντας  $E_x / H_y = Z_{xy}$  (όπου  $Z$  ονομάζουμε την εμπέδηση) έχουμε

$$Z_{xy} = \frac{\omega\mu}{k} = (1 + i)\sqrt{\frac{\rho\omega\mu}{2}} \quad (12)$$

ή, λύνοντας ως προς  $\rho$ ,

$$\rho_{xy} = \frac{Z_{xy} Z_{xy}^*}{\omega\mu} \quad (13)$$

όπου  $Z^*$  είναι ο συζυγής μιγαδικός του  $Z$ . Η φάση,  $\phi$ , του  $Z$  είναι η διαφορά ανάμεσα στις φάσεις του  $E$  και του  $H$ . Από την παραπάνω σχέση που δίνει το  $Z_{xy}$  βλέπουμε ότι το  $E_x$  πρέπει να προηγείται της φάσης του  $H_y$  κατά  $45^\circ$  για την περίπτωση ομογενή ημιχώρου.

Η παραπάνω σχέση συνήθως γράφεται με την μορφή

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2, \quad (14)$$

και η  $\rho_{xy}$  παίρνει την φάση της εμπέδησης. Μετατρέποντας το  $E_x$  και το  $H_y$  σε μονάδες millivolts/km και gamma (ή nanotesla), αντίστοιχα, έχουμε

$$\frac{1}{5f} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = \rho_{xy} \quad (15)$$

Η σχέση (15) δηλώνει ότι για ομογενή ημιχώρο, η ειδική ηλεκτρική αντίσταση θα είναι ίδια για όλες τις συχνότητες.

Στην βιβλιογραφία συναντώνται και άλλοι δύο ορισμοί της εμπέδησης. Αυτοί είναι ο λόγος  $E / B$ , και  $c = Z / i\mu_0\omega$ . Η χρήση τους δεν δημιουργεί καμία διαφορά. Πρέπει όμως να είναι συνεχής από την αρχή μέχρι το τέλος της επεξεργασίας για να αποφεύγονται η συγχύσεις.



## 1.2 Οριζόντια Στρωματογραφία

Τα πραγματικά μοντέλα της Γης είναι πιο πολύπλοκα απ'ότι ο ομογενής και ισότροπος ημιχώρος. Τέτοια μοντέλα είναι η οριζόντια διαστρωμένη Γη ή η δισδιάστατη ή και τρισδιάστατη δομή της Γης. Στην περίπτωση αυτή οι σχέσεις μεταξύ του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου γίνονται όλο και πιο περίπλοκες. Στην περίπτωση που η Γη αποτελείται από οριζόντια στρώματα, κάποιο ποσοστό της ενέργειας ανακλάται σε κάθε διαχωριστική επιφάνεια και εσωτερικές ανακλάσεις εκδηλώνονται σε κάθε στρώμα. Η μαθηματική διατύπωση του  $\vec{E}$  και του  $\vec{H}$  περιλαμβάνει δύο παράγοντες για κάθε στρώμα, της μορφής

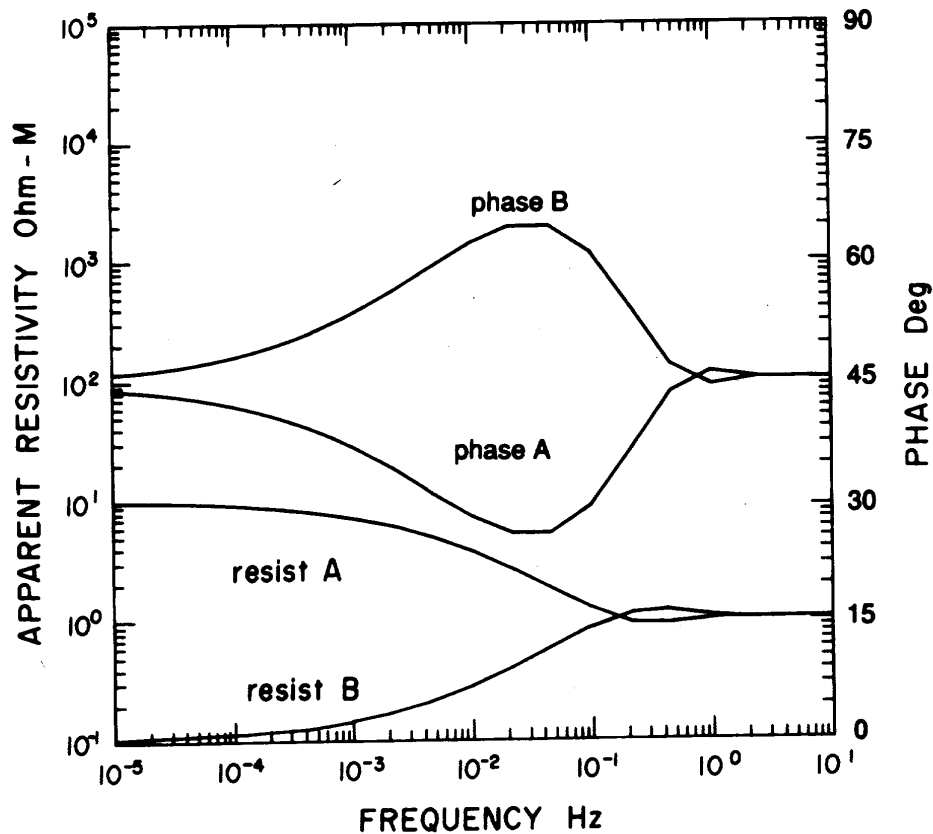
$$Ae^{+ikz} + Be^{-ikz},$$

ο ένας για την ενέργεια που οδηγείται προς τα πάνω και ο άλλος για αυτήν που οδηγείται προς τα κάτω. Τα πεδία παραμένουν οριζόντια και κάθετα μεταξύ τους εκτός εάν παρατηρούνται φαινόμενα ανισotropίας στο οριζόντιο επίπεδο. Είναι δυνατό και πάλι να χρησιμοποιήσουμε το  $E_x$  και το  $H_y$  και να υπολογίσουμε την μεταβολή της αντίστασης σε σχέση με την συχνότητα, (εξίσωση 14) αλλά τώρα η αντίσταση που υπολογίζεται καλείται φαινόμενη ειδική αντίσταση (apparent resistivity)  $\rho_a(f)$ . Η φαινόμενη ειδική αντίσταση θα ήταν ίση με την πραγματική αντίσταση εάν το σώμα κάτω από την επιφάνεια της γης ήταν ομογενές και ισότροπο.

Για να γίνει πιο κατανοητή η συμπεριφορά της φαινόμενης ειδικής αντίστασης ως θεωρήσουμε την περίπτωση μονοδιάστατου μοντέλου δύο στρωμάτων (Σχ. 4). Το ανώτερο στρώμα είναι το ίδιο και για τα δύο μοντέλα, αλλά στην μία περίπτωση  $\rho_2 = 10\rho_1$ , ενώ στη άλλη περίπτωση  $\rho_2 = (1/10)\rho_1$ . Στις υψηλές συχνότητες τέτοιες ώστε το επιδερμικό βάθος στο πρώτο στρώμα να είναι πολύ μικρότερο από το πάχος του, έχουμε  $\rho_a = \rho_1$  και για τις δύο περιπτώσεις. Όσο η συχνότητα μειώνεται και το επιδερμικό βάθος αυξάνεται μέχρι το σημείο να είναι μεγαλύτερο από το  $d$ , η  $\rho_a$  τείνει στο 0.1 για την μία περίπτωση και στο 10 για την άλλη περίπτωση, και παραμένει σε αυτές τις τιμές όσο η συχνότητα τείνει στο μηδέν. Ιδιαίτερης σημασίας στο σχήμα (4) είναι η μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης και της φάσης με την μείωση της συχνότητας. Επίσης η μεταβολή της φάσης στις υψηλότερες συχνότητες σε σχέση με την αντίστοιχη μεταβολή της φαινόμενης ειδικής αντίστασης. Η φάση είναι ασύμπτωτη των  $45^\circ$  και για τις υψηλές αλλά και για τις χαμηλές συχνότητες για ένα πεπερασμένο πλήθος στρωμάτων.

MODEL A	MODEL B
$\rho_1 = 1 \text{ ohm} - \text{m}$	$\rho_1 = 1 \text{ ohm} - \text{m}$
$\rho_2 = 10 \text{ ohm} - \text{m}$	$\rho_2 = .1 \text{ ohm} - \text{m}$
1000m	1000m

## 2 LAYER MODELS



Σχήμα 4. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης ενός μοντέλου δύο οριζόντιων στρωμάτων. Μοντέλο A με μη αγώγιμο ημιχώρο. Μοντέλο B με αγώγιμο ημιχώρο.

Στο σχήμα (5) παρουσιάζεται το ίδιο μοντέλο με αυτό του σχήματος (4) αλλά τώρα το πάχος μεταβάλλεται και οι αντιστάσεις  $\rho_1$  και  $\rho_2$  παραμένουν ίδιες. Η συχνότητα τώρα πρέπει να πάρει χαμηλότερη τιμή για να γίνει αντιληπτό το δεύτερο στρώμα.

Σε ένα μονοδιάστατο μοντέλο με τρία στρώματα, η φαινόμενη ειδική αντίσταση  $\rho_a$  είναι ασύμπτωτη της  $\rho_1$  στις υψηλές συχνότητες, και της  $\rho_3$  στις χαμηλές συχνότητες. Για τις ενδιάμεσες συχνότητες πλησιάζει την  $\rho_2$ . Πόσο κοντά φτάνει στην  $\rho_2$  εξαρτάται από τα πάχη και τις αντιστάσεις και των δύο στρωμάτων 1 και 2 (Σχ. 6). Όπως είναι προφανές η “εύρεση” διαφόρων στρωμάτων εξαρτάται από τις αντιστάσεις, τα πάχη τους, το εύρος του φάσματος καταγραφής και τέλος από την διασπορά των σημείων στις καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης.

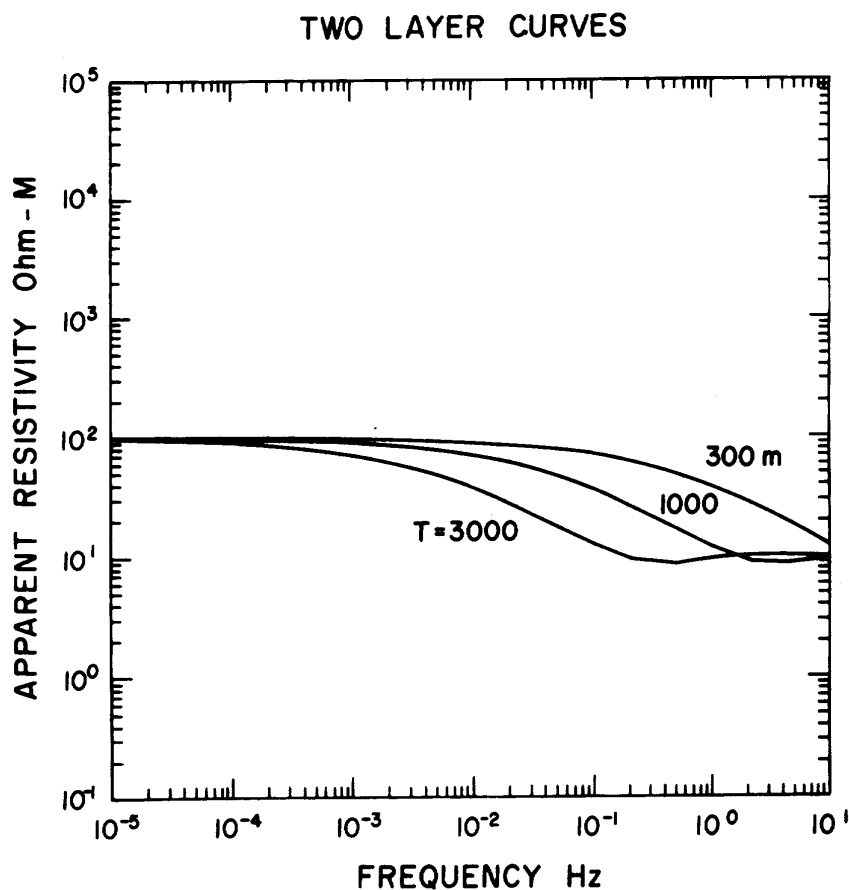
Η εμπέδηση στην περίπτωση των οριζόντιων στρωμάτων δίνεται με την μορφή:

$$Z_{xy} = E_x(z) / H_y(z)$$

$$Z_{yx} = -E_y(z) / H_x(z) \quad (16)$$

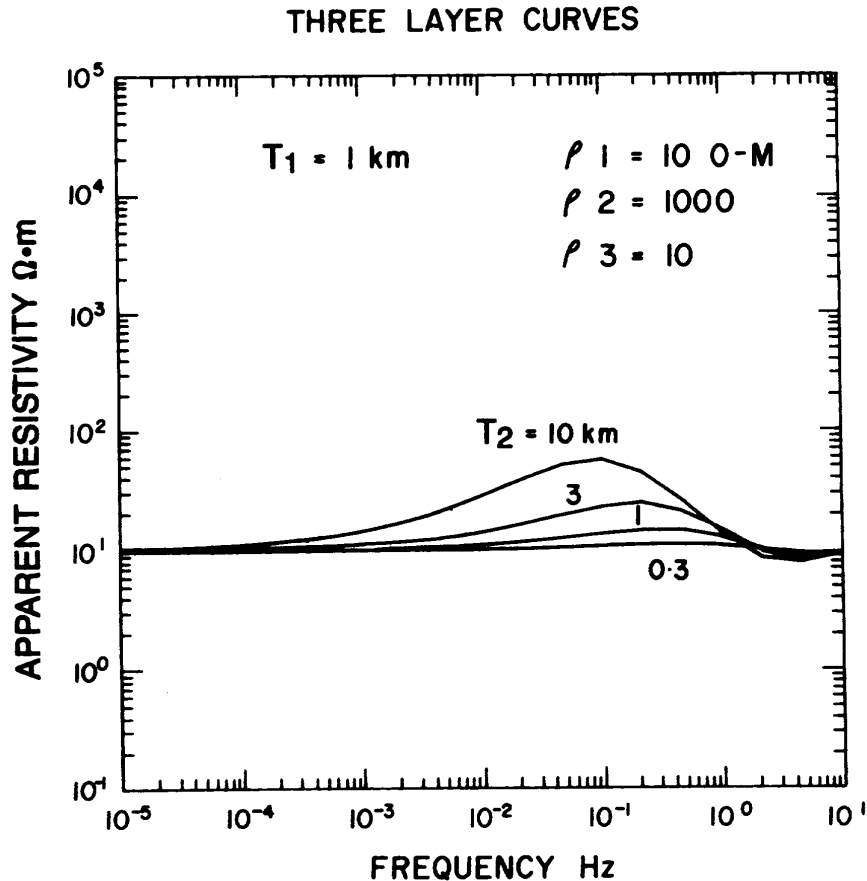
Η μορφή αυτή αποτελεί την βασική προσέγγιση των Tikhonov-Cagniard, (Tikhonov 1950, Cagniard 1953) όπου η εμπέδηση,  $Z$ , ισούται με τον λόγο του ηλεκτρικού με το μαγνητικό πεδίο, και έχει διαστάσεις volts/ampere, ή ohms.

$$\begin{array}{c} \rho_1 = 10 \text{ } \Omega\text{-m} \\ \hline \rho_2 = 100 \text{ } \Omega\text{-m} \end{array} \quad T$$



Σχήμα 5. Μεταβολές στην απόκριση του μαγνητοτελλουρικού σήματος (MT) για το μοντέλο που φαίνεται στο πάνω μέρος του σχήματος όταν το βάθος της ασυνέχειας  $T$  παίρνει 3 διαφορετικές τιμές, για μονοδιάστατο μοντέλο δύο στρωμάτων.

$\rho_1 = 10 \ \Omega \cdot m$	$\updownarrow T_1$
$\rho_2 = 1000 \ \Omega \cdot m$	$\updownarrow T_2$
$\rho_3 = 10 \ \Omega \cdot m$	



Σχήμα 6. Μεταβολές στην απόκριση του μαγνητοτελλουρικού σήματος (MT) για μοντέλο τριών στρωμάτων με μεταβαλλόμενο το πάχος του μεσαίου στρώματος

### 1.3 Τανυστής εμπέδησης (Impedance) και διάνυσμα διεύθυνσης (Tipper). Δισδιάστατο μοντέλο

Οι σχέσεις μεταξύ των συνιστωσών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε ένα μαγνητοτελλουρικό σταθμό καταγραφής περιέχουν την εμπέδηση και το διάνυσμα διεύθυνσης (tipper). Αυτές είναι οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία της γεωηλεκτρικής δομής. Γενικά, η  $H_x$  συνιστώσα συσχετίζεται με την  $E_y$  συνιστώσα και εν μέρει με την  $E_x$ . Ομοίως, η  $H_y$  συνδέεται με την  $E_x$  και εν μέρει με την  $E_y$ . Έτσι για κάθε συχνότητα έχουμε ένα γραμμικό σύστημα της μορφής

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xy} H_y + Z_{xx} H_x \\ E_y &= Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y \end{aligned} \quad (17)$$

όπου κάθε παράγοντας,  $Z_{ij}$  εξαρτάται από την συχνότητα. Αυτό συνήθως δίνεται με την μορφή

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

ή

$$\vec{E} = \underline{Z} \vec{H}.$$

(18)

Σε μία ομοιογενή ή μονοδιάστατη γη, τα  $Z_{xx}$  και  $Z_{yy}$  είναι ίσα με μηδέν ενώ  $Z_{yx} = -Z_{xy}$ , και οι παραπάνω εξισώσεις μετατρέπονται σε

$$\begin{aligned} E_x &= Z_{xy} H_y \\ E_y &= Z_{yx} H_x = -Z_{xy} H_x \end{aligned} \quad (19)$$

Για δισδιάστατο μοντέλο, εάν ο  $x$  ή ο  $y$  άξονας είναι κατά μήκος της διεύθυνσης παράταξης έχουμε

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0$$

τότε

(20)

$$Z_{xy} \neq -Z_{yx}.$$

Εάν κανένας από τους δύο άξονες δεν είναι κατά μήκος της διεύθυνσης παράταξης τότε έχουμε

$$Z_{xx} = -Z_{yy} \neq 0. \quad (21)$$

Η σχέση (18) προτάθηκε από τον Cantwell (1960) και από τον Rokityanski (1961 in Vozoff 1993), που θεώρησαν ότι το σύστημα είναι γραμμικό έτσι ώστε το ηλεκτρικό πεδίο να οφείλεται μόνο στο μαγνητικό πεδίο, και η συμβολή του θορύβου αγνοήθηκε.

Είναι πιο πρακτικό να βλέπουμε στο ύπαιθρο τα πεδία και τα στοιχεία του τανυστή σαν να είχαν μετρηθεί σε κάποιο άλλο σύστημα συντεταγμένων. Για παράδειγμα, η διεύθυνση παράταξης πολύ σπάνια είναι γνωστή με ακρίβεια την ώρα που γίνεται η δουλειά υπαίθρου. Εάν στρέψουμε το διάνυσμα του ηλεκτρικού πεδίου  $E$  κατά γωνία  $+\theta$  δεξιόστροφα, ως προς κατακόρυφο άξονα περιστροφής, τότε οι νέες συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου είναι

$$\begin{pmatrix} E'_x \\ E'_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix}$$

ή

(22)

$$E' = \underline{R} E.$$

Με τον ίδιο τρόπο,

$$\vec{H}' = \underline{R} \vec{H} \quad (23)$$

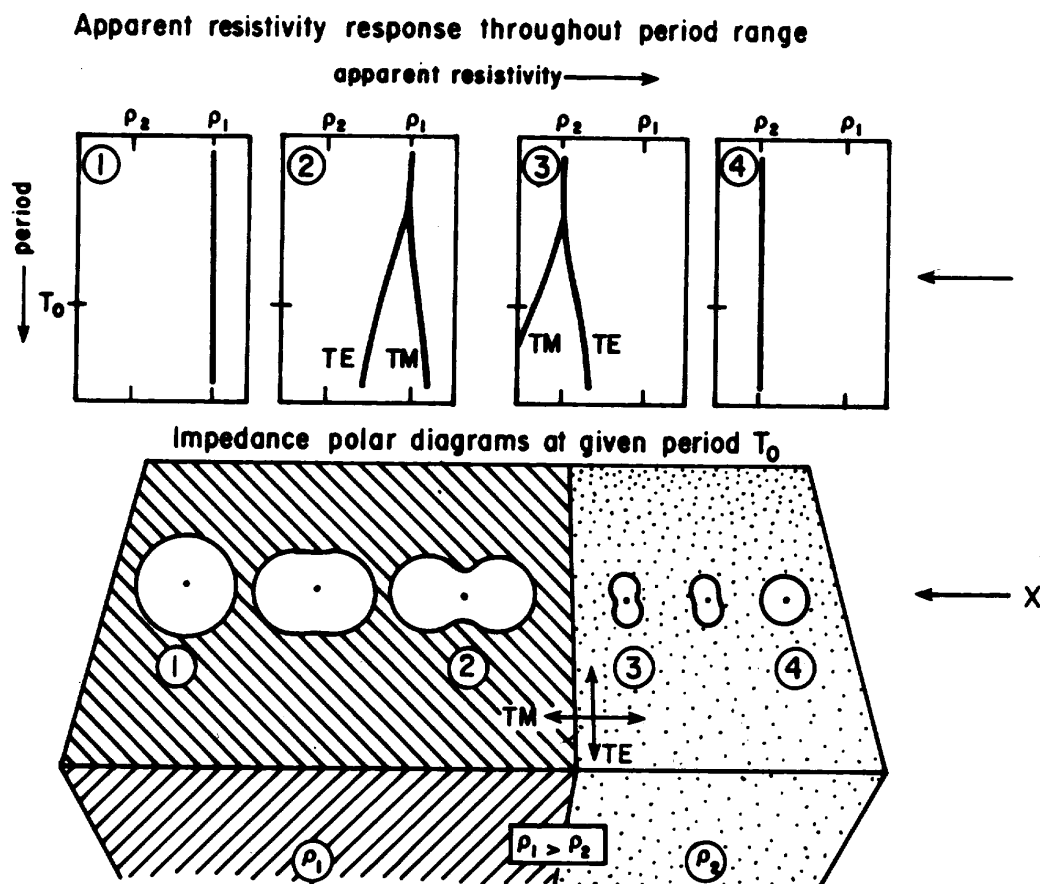
και

$$\underline{Z}' = \underline{R} \underline{Z} \underline{R}^T, \quad (24)$$

όπου  $\underline{R}^T$ , είναι ο ανάστροφος του  $\underline{R}$ , δηλαδή ο πίνακας

$$\underline{R}^T = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (25)$$

Διάφοροι τρόποι χρησιμοποιούνται για την εύρεση της γωνίας στροφής,  $\theta_0$ , μεταξύ της διέυθυνσης των μετρήσεων και της διέυθυνσης παράταξης. Μία από αυτές τις μεθόδους είναι η στροφή του  $Z_{ij}$  σε βήματα ( έστω  $5^\circ$ ), και η χαρτογράφηση του σε πολικά διαγράμματα, απ'όπου γίνεται η επιλογή της διέυθυνσης παράταξης. Η βέλτιστη γωνία μεγιστοποιεί ή ελαχιστοποιεί κάποιους συνδυασμούς του  $Z_{ij}$ . Τα πολικά διαγράμματα, ή όπως ονομάζονται αλλιώς, πολικά διαγράμματα εμπέδησης, κατασκευάζονται συνήθως για διαφορετικές συχνότητες, διότι στην πράξη η διέυθυνση παράταξης αλλάζει με το βάθος. Στο σχήμα (7) φαίνονται τέτοια διαγράμματα για συνθετικά δεδομένα που παρήχθησαν από ένα δισδιάστατο μοντέλο (μόνο η  $Z_{xy}$ ). Ένα παράδειγμα με πραγματικά δεδομένα φαίνεται στο σχήμα (8). Τα διανύσματα αυτά κατασκευάστηκαν για τις συνιστώσες  $Z_{xy}$  και  $Z_{xx}$ .



Σχήμα 7. Πολικά διαγράμματα εμπέδησης ( για μία συχνότητα ) και καμπύλες φαινομένων ειδικών αντιστάσεων για τέσσερις θέσεις που προέκυψαν από συνθετικά δεδομένα χρησιμοποιώντας ένα απλό δισδιάστατο μοντέλο. Τα TE και TM αναφέρονται αντίστοιχα σε ηλεκτρική συνιστώσα παράλληλη στην διεύθυνση παράταξης (Transverse Electric) και κάθετη στην διεύθυνση παράταξης (Transverse Magnetic).

Ένας ακόμη τρόπος για την εύρεση της  $\theta_0$  είναι η χρήση μίας από τις λύσεις που προτάθηκαν από τον Swift (1967), όπου οι εξίσωσεις που δίνουν το  $Z_{xy}(\theta)$  και

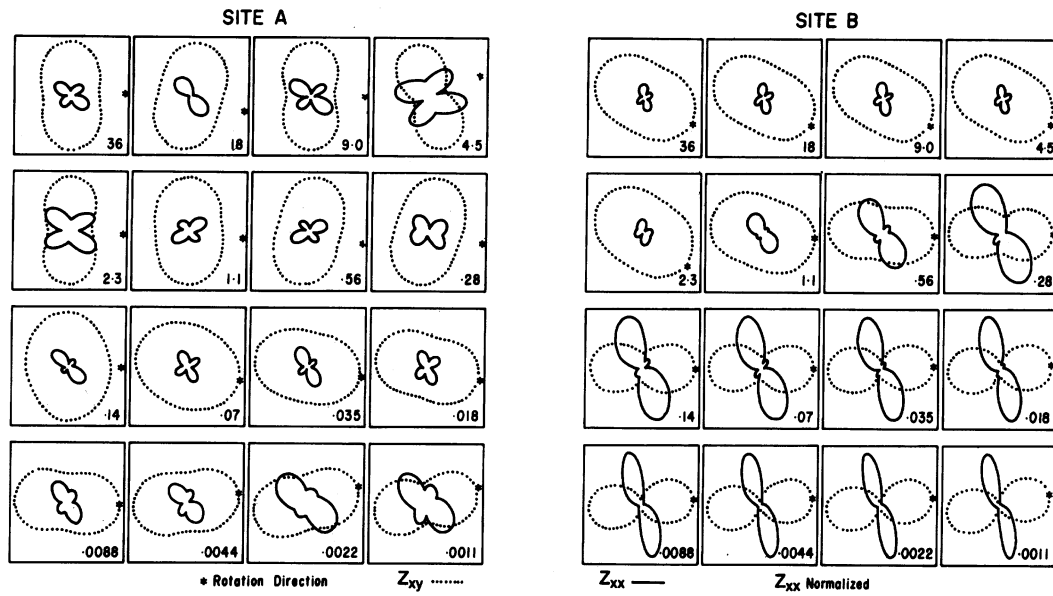
το  $Z_{yx}(\theta)$  διαφορίζονται ως προς το  $\theta$  για να δώσουν μία γωνία  $\theta_0$  η οποία μεγιστοποιεί την ποσότητα

$$\left|Z'_{xy}(\theta_0)\right|^2 + \left|Z'_{yx}(\theta_0)\right|^2 \quad (26)$$

για κάθε συχνότητα. Η λύση που δώθηκε από τον Swift (1967) είναι

$$4\theta_0 = \tan^{-1} \frac{(Z_{xx} - Z_{yy})(Z_{xy} + Z_{yx})^* + (Z_{xx} - Z_{yy})^*(Z_{xy} + Z_{yx})}{|Z_{xx} - Z_{yy}|^2 - |Z_{xy} + Z_{yx}|^2} \quad (27).$$

Η γωνία που προκύπτει από τη σχέση (27) μεγιστοποιεί επίσης το  $|Z_{xy}|$  και



ελαχιστοποιεί το  $|Z_{xx}|^2 + |Z_{yy}|^2$ .

Σχήμα 8. Πολικά διαγράμματα εμπέδησης σε δύο θέσεις (A και B) για 16 συχνότητες χρησιμοποιώντας αληθινά δεδομένα. Οι σπικτές καμπύλες αντιστοιχούν στο μη-διαγώνιο στοιχείο ( $Z_{xy}$ ), ενώ οι συνεχείς καμπύλες στο διαγώνιο στοιχείο ( $Z_{xx}$ ). Ο αστερίσκος δείχνει την διεύθυνση στροφής όπως υπολογίζεται από τον Swift (1967) (After Phoenix Geophysics Inc.).

Ο Swift (1967) έδειξε ότι δεν υπάρχει λύση για την περίπτωση μονοδιάστατου μοντέλου, ενώ για δισδιάστατο μοντέλο η λύση έχει πολύ καλά καθορισμένη τιμή. Για τρισδιάστατο μοντέλο η έννοια της  $\theta_0$ , όπως αυτή υπολογίζεται από τα παραπάνω είναι αμφισβητίσιμη και γίνεται σημαντική έρευνα για την σύνδεση του τανυστή  $Z_{ij}$  με την δομή. Από τις δύο πιθανές λύσεις μεταξύ  $0^\circ$  και  $180^\circ$ , η επιλογή της διεύθυνσης παράταξης ξεκινάει με την θεώρηση από την εξίσωση (27), μίας ελάχιστης και μίας μέγιστης τιμής. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε δύο πιθανές λύσεις με διαφορά  $90^\circ$ , ή δύο πιθανές διευθύνσεις παράταξης. Η επιλογή ανάμεσα σε αυτές τις δύο λύσεις μπορεί να γίνει μόνο από ανεξάρτητες πληροφορίες. Οι πληροφορίες αυτές είναι συνήθως η σχέση που συνδέει τις οριζόντιες με την κατακόρυφη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου ή διάφοροι γεωλογικοί περιορισμοί, αλλά κυρίως τα πολικά διαγράμματα εμπέδησης.

Στην συνέχεια αναφέρονται διάφορες ιδιότητες του τανυστή εμπέδησης. Όταν οι συντεταγμένες στρέφονται, συγκεκριμένοι γραμμικοί συνδυασμοί των στοιχείων του τανυστή εμπέδησης παραμένουν αναλλοίωτοι παρότι οι τιμές τους μεταβάλλονται. Οι συνδιασμοί αυτοί είναι

$$\begin{aligned} Z_{xx} + Z_{yy} &= c_1, \\ Z_{xy} - Z_{yx} &= c_2, \end{aligned} \quad (28)$$

και

$$Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx} = c_3, \quad (29)$$

όπου η απόλυτη τιμή του αριστερού τμήματος της σχέσης (27) αποτελεί την ορίζουσα του τανυστή εμπέδησης. Ο λόγος  $c_1 / c_2$  είναι η λοξότητα του τανυστή εμπέδησης,  $\alpha$  (skew). Το  $c_1$  θα είναι ίσο με μηδέν στην μονοδιάστατη και δισδιάστατη περίπτωση όταν τα δεδομένα είναι χωρίς θόρυβο. Δηλαδή, η λοξότητα χρησιμοποιείται ως ένδειξη ύπαρξης τρισδιάστατων δομών και δεν μεταβάλλεται με την στροφή του συστήματος συντεταγμένων.

Μία ποσότητα η οποία μεταβάλλεται με την στροφή του συστήματος συντεταγμένων είναι η ελλειπτικότητα του τανυστή εμπέδησης,

$$\beta(\theta) = \frac{Z_{xx}(\theta) - Z_{yy}(\theta)}{Z_{xy}(\theta) + Z_{yx}(\theta)}. \quad (30)$$

Η ελλειπτικότητα παίρνει τιμή ίση με το μηδέν για μονοδιάστατο μοντέλο. Για δισδιάστατο μοντέλο μηδενίζεται όταν ο  $x$  ή ο  $y$  άξονας είναι κατά μήκος της διεύθυνσης παράταξης (δεδομένα χωρίς θόρυβο). Η ελλειπτικότητα αποτελεί επίσης ένδειξη ύπαρξης τρισδιάστατων δομών σε μία θέση. Συνήθως χρησιμοποιείται η λοξότητα στις υψηλές συχνότητες ενώ η ελλειπτικότητα στις χαμηλές συχνότητες διότι για τις αντίστοιχες ζώνες συχνοτήτων είναι πιο σταθερές.

Μπορεί πολύ εύκολα να αποδειχθεί ότι  $H_z \approx 0$  εκτός από τις περιοχές που βρίσκονται κοντά σε πλευρικές αλλαγές της αγωγιμότητας, όπου το διάνυσμα  $\nabla \times E$  έχει κατακόρυφη συνιστώσα. Στην περίπτωση αυτή, η σχέση που συνδέει το  $H_z$  και τις συνιστώσες του οριζόντιου μαγνητικού πεδίου για κάθε συχνότητα μπορεί να γραφτεί ως

$$H_z = AH_x + BH_y \quad (31)$$

όπου  $A, B$  είναι μιγαδικές σταθερές και περιέχουν τις αλλαγές της φάσης. Στην περίπτωση δισδιάστατης δομής με διεύθυνση παράταξης κατά  $x'$ , θα έχουμε για εκείνη την διεύθυνση

$$H_z = B'H'_y. \quad (32)$$

Στην παραπάνω σχέση το  $B'$ , αντιπροσωπεύει ένα μετασχηματισμό του διανύσματος  $H$  έξω από το οριζόντιο επίπεδο και ονομάζεται διάνυσμα διεύθυνσης (tipper). Το  $B'$  είναι προφανώς ίσο με το μηδέν για την περίπτωση μονοδιάστατης δομής. Το μέτρο του  $B'$  είναι σπάνια μεγαλύτερο της μονάδας με πιά συχνές τιμές από .1 έως .5. Η απαιτούμενη γωνία στροφής  $\phi$  γαι το  $x'$  υπολογίζεται από τα δεδομένα υπαίθρου βρίσκοντας την οριζόντια διεύθυνση  $y'$  κατά την οποία το  $H(\phi)$



είναι σε συνάφεια με το  $H_z$ . Για την περίπτωση δισδιάστατης δομής η φάση των  $A, B$  είναι ίδια, ο λόγος  $B/A$  είναι ένας πραγματικός αριθμός και

$$\phi = \arctan(B/A). \quad (33)$$

Μία άλλη χρήση του διανύσματος διεύθυνσης, εκτός από την χρήση του στην άρση της ασάφειας όσον αφορά την διεύθυνση παράταξης, είναι η ένδειξη σχετικά με το ποιά πλευρά μίας επαφής είναι περισσότερο αγωγίμη. Κοντά στο όριο μεταξύ ενός αγωγού και ενός μονωτή, πολύ κοντά στην επιφάνεια η πυκνότητα ρεύματος, παράλληλα με την διεύθυνση παράταξης, είναι μεγαλύτερη από την πιο αγωγίμη πλευρά. Αυτό αποδεικνύεται εύκολα εάν μελετήσουμε το απλό πρόβλημα ενός στατικού μαγνητικού πεδίου που οφείλεται στα ηλεκτρικά φορτία που ρέουν στο σώμα. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday το μαγνητικό πεδίο που βρίσκεται στο κατακόρυφο επίπεδο που είναι κάθετο στο επίπεδο της επαφής, στο όριο του αγωγίμου στρώματος θα παρουσιάσει μία ισχυρή συνιστώσα παράλληλη προς την επαφή. Έτσι η κατακόρυφη μαγνητική συνιστώσα θα έχει φορά προς τα κάτω όταν η οριζόντια συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου έχει φορά προς τα έξω. Αντίστροφα, όταν η οριζόντια συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου έχει φορά προς τα μέσα τότε η κατακόρυφη μαγνητική συνιστώσα θα έχει φορά προς τα πάνω. Σε μία πραγματική περίπτωση, η φάση της  $H_z$  εξαρτάται από τις αγωγιμότητες, την συχνότητα και την απόσταση από την επαφή. Εν τούτοις στην πραγματικότητα οι σχέσεις μπορούν συχνά να χρησιμοποιηθούν για να υποδείξουν την διεύθυνση προς μία αγωγίμη περιοχή.

#### 1.4 Σύνοψη των μορφών του τανυστή εμπέδησης

Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω θα ήταν σκόπιμο να τονιστούν οι μορφές του τανυστή εμπέδησης και των συγγενών του παραμέτρων για μονοδιάστατα, δισδιάστατα αλλά και τρισδιάστατα μοντέλα.

Στην περίπτωση μονοδιάστατου μοντέλου, 1-D, τα διαγώνια στοιχεία του τανυστή εμπέδησης είναι ίσα με μηδέν, ενώ τα μη διαγώνια είναι αντίθετα. Η κατακόρυφη συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου είναι ίση με μηδέν, πράγμα που συνεπάγεται ότι τα  $A$  και  $B$  είναι μηδέν. Επίσης μηδέν είναι η λοξότητα και η ελλειπτικότητα.

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0$$

$$Z_{xy} = -Z_{yx}$$

$$H_z = 0$$

$$A = B = 0$$

$$s = 0, \beta = 0.$$

Στην περίπτωση δισδιάστατου μοντέλου, (2-D), στην γενική περίπτωση ισχύει ότι,

$$Z_{xx} + Z_{yy} = 0$$

$$Z_{xy} + Z_{yx} \neq 0.$$

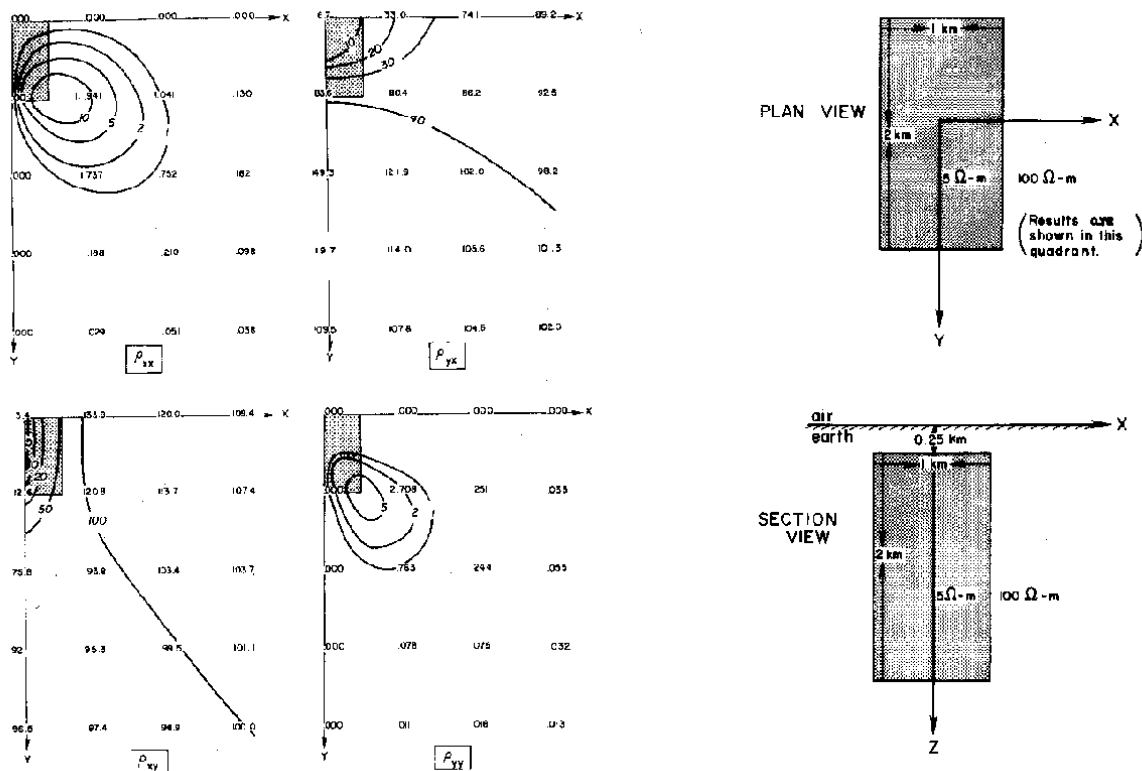
$$A \neq B \neq 0$$

Όταν όμως γίνει στροφή του τανυστή εμπέδησης έτσι ώστε ο άξονας  $y$  να ταυτίζεται με την διεύθυνση παράταξης, τότε,

$$\begin{aligned} Z_{xx} = Z_{yy} &= 0 & s &= 0 \\ Z_{xy} &\neq -Z_{yx} & \beta &= 0, \\ B &= 0, A \neq 0 & \phi_T &\perp \text{strike} \end{aligned}$$

όπου  $\phi_T$ , η διεύθυνση που δείχνει το διάνυσμα της επαγωγής.

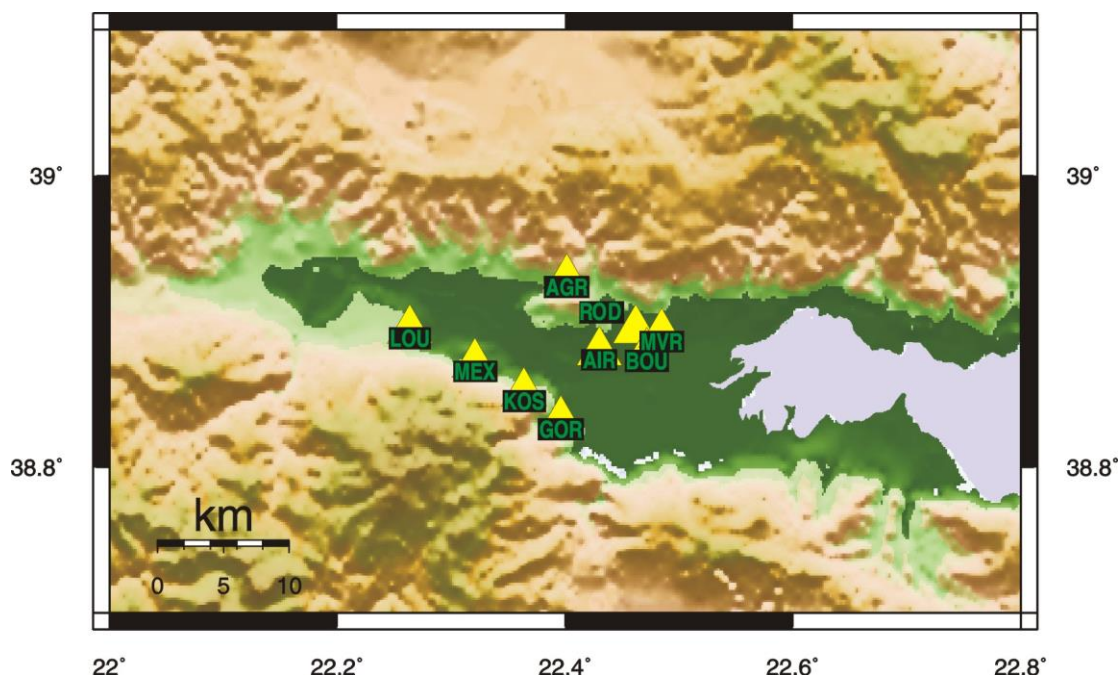
Τέλος, στην περίπτωση τρισδιάστατου μοντέλου, (3-D) (Σχ. 9), ο τελεστής  $Z_{xy}$ , γίνεται μέγιστος κατά μήκος της επιμηκυνσμένης πλευράς του παραλληλεπιπέδου σώματος, ενώ κατά την ίδια διεύθυνση ο τελεστής  $Z_{xx}$  ελαχιστοποιείται. Γενικώς τα  $s, \beta$  είναι διάφορα του μηδενός, ενώ τείνουν προς το μηδέν κατά μήκος της επιμηκυνσμένης πλευράς. Το  $\phi_T$ , δείχνει μακριά από το αγωγίμο σώμα.



Σχήμα 9. Συνιστώσες της φαινόμενης ειδικής αντίστασης για συχνότητα 0.1 Hz οι οποίες καταγράφονται στην επιφάνεια όταν η υπεδάφια κατάσταση προσομοιάζεται από το μοντέλο που φαίνεται στο δεξιό τμήμα του σχήματος (Ting and Hohmann 1981).

## 2 Μαγνητοτελλουρικές καταγραφές στην λεκάνη του Σπερχειού Ποταμού.

Κατά την περίοδο Μάιος-Ιούνιος 2001 πραγματοποιήθηκαν μαγνητοτελλουρικές (MT) καταγραφές στην λεκάνη του Σπερχειού ποταμού στην ευρύτερη περιοχή της πόλης της Λαμίας. Οι μετρήσεις έγιναν σε συνεργασία με το Laboratoire de geomagnetisme, Institute de physique du Globe de Paris, της Γαλλίας. Στο (Σχ. 10) που ακολουθεί παρουσιάζονται οι θέσεις των εννέα MT σταθμών. Στον Πίνακα 2 δίνονται τα πλήρη ονόματα των σταθμών καθώς και οι γεωγραφικές συντεταγμένες τους.



Σχήμα 10. Μορφολογικός χάρτης της περιοχής δοκιμών ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στην περιοχή της Λαμίας. Με κίτρινα τρίγωνα δίνονται οι θέσεις των Μαγνητοτελλουρικών (MT) σταθμών όπου έγινε καταγραφή των δύο οριζόντιων συνιστωσών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Πίνακας 2. Γεωγραφικές Συντεταγμένες των MT σταθμών.

Όνομα Σταθμού	Πλήρες Όνομα	Γεωγραφικό Μήκος	Γεωγραφικό Πλάτος
GOR	Γοργοπόταμος	22.3964	38.8315
KOS	Κωσταλέξη	22.364	38.8509
MEX	Μεξάταις	22.3209	38.8712
LOU	Λουτρά Υπάτης	22.2637	38.894
AGR	Αγριλιά	22.4017	38.9289
ROD	Ροδίτσα	22.462	38.8941
BOU	Εργοστάσιο Μπουρογιάννη	22.4717	38.8782
MVR	Μεγάλη Βρύση	22.4846	38.8915
AIR	Αεροδρόμιο	22.43	38.879

## 2.1 Επεξεργασία και ερμηνεία MT καταγραφών

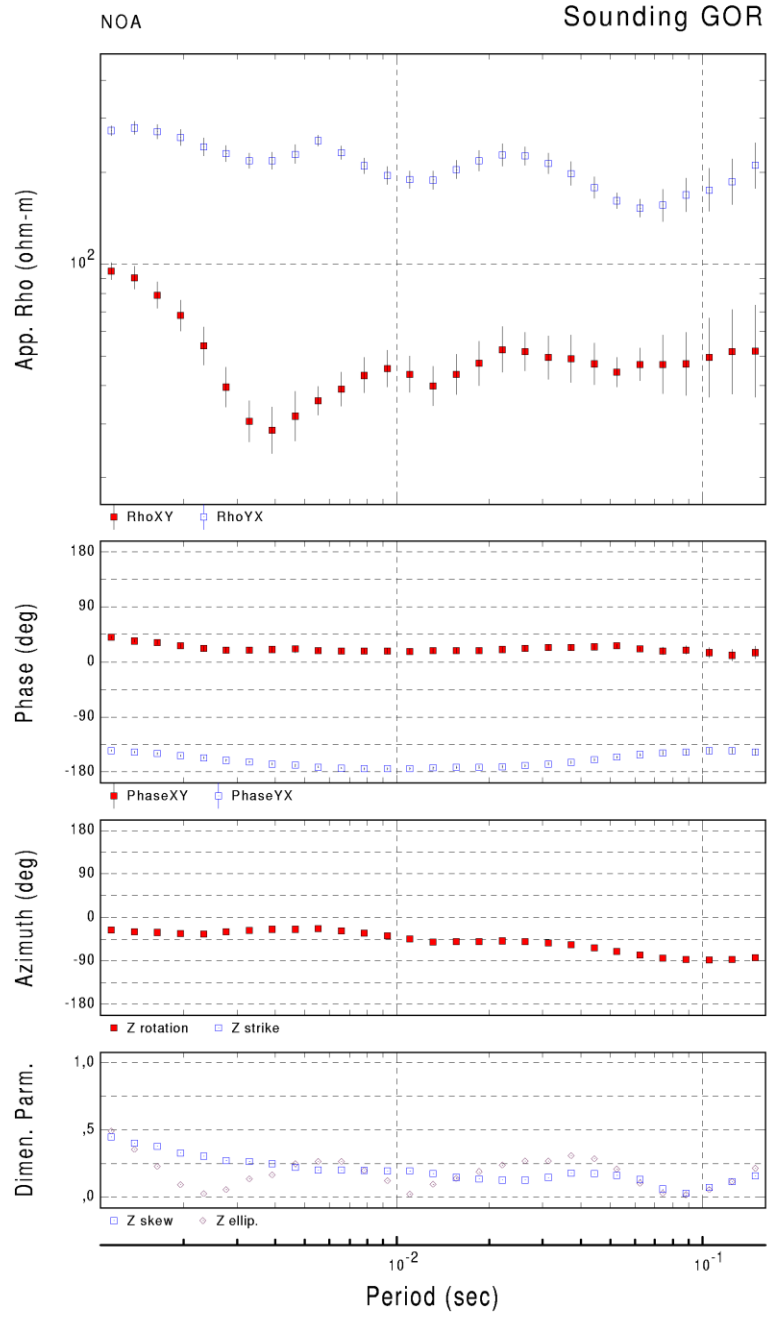
Η επεξεργασία των χρονοσειρών έγινε με την χρήση του προγράμματος “uprspro-run” σε περιβάλλον LINUX (Smirnov 2002, in press). Τα δεδομένα από τον σταθμό KOS είχαν πολύ θόρυβο και για αυτό τον λόγο δέν ήταν δυνατός ο υπολογισμός των καμπυλών φαινόμενης ειδικής αντίστασης με την συχνότητα για τον σταθμό αυτό.

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης καθώς και τα πολικά διαγράμματα για κάθε σταθμό. Στις περιπτώσεις όπου ήταν δυνατός ο υπολογισμός μονοδιάστατου μοντέλου παρουσιάζεται η προτεινόμενη δομή.

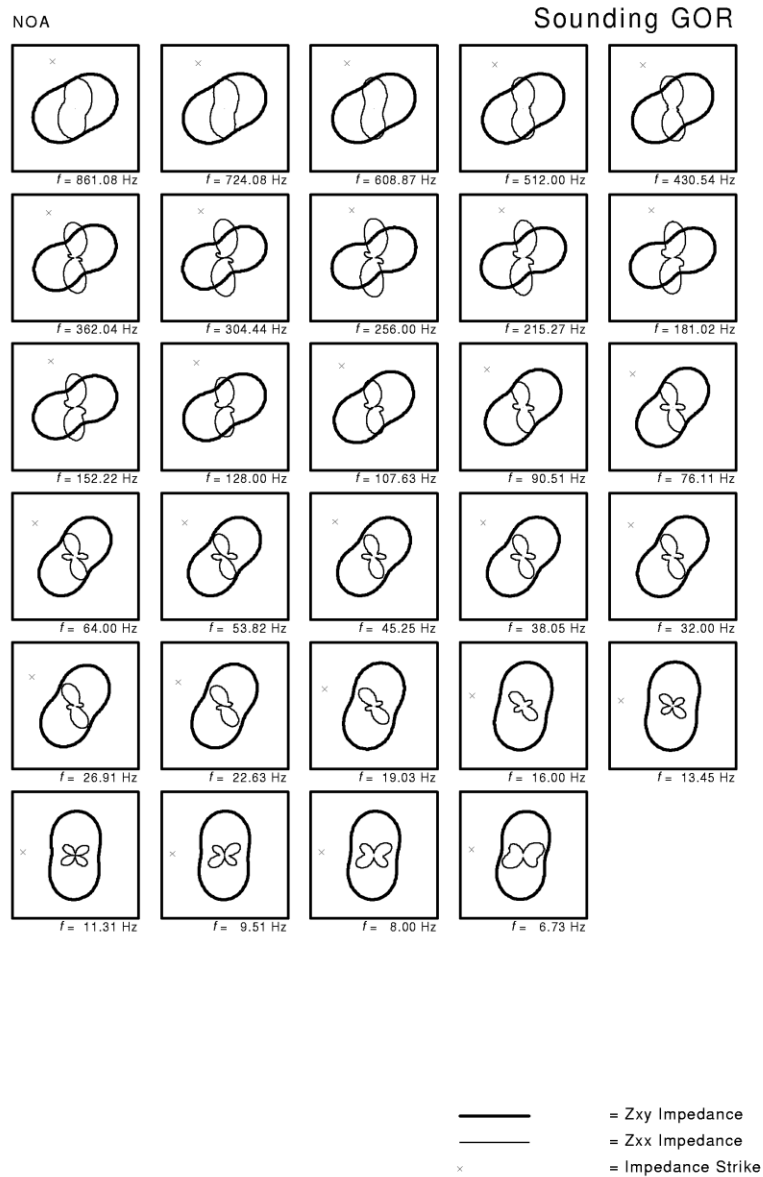
Στα σχήματα 11 και 12 δίνονται οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης, διάφοροι συντελεστές ερμηνείας των MT δεδομένων καθώς και τα πολικά διαγράμματα, για τον σταθμό GOR. Όπως φαίνεται από την κλίση του τανυστή εμπέδης (Zstrike-Impedance strike) στα πολικά διαγράμματα, η παράταξη των γεωλογικών/τεκτονικών επαφών στην περιοχή είναι ίση με N10-20°W, για τα επιφανειακά στρώματα (υψηλές συχνότητες, 1000Hz) ενώ φτάνει στα βαθύτερα στρώματα (μεσαίες συχνότητες, 6Hz) της N70-90°W. Αυτή η στροφή στην διεύθυνση παράταξης οφείλεται στο ότι η μέγιστη ροή ρεύματος ακολουθεί στα επιφανειακά στρώματα (υψηλές συχνότητες) την τοπική παράταξη (N10-20° W) ενώ στα βαθύτερα στρώματα ακολουθεί την γενικότερη παράταξη του νότιου τμήματος της λεκάνης του Σπερχειού. Όπως παρατηρούμε στα διαγράμματα πόλωσης οι τιμές του στοιχείου  $Z_{xx}$  του τανυστή εμπέδησης είναι υψηλές για τα επιφανειακά στρώματα, δείκτης τρισδιάστατης δομής. Εξαιτίας αυτών των υψηλών τιμών του  $Z_{xx}$  δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός μονοδιάστατου μοντέλου για την θέση GOR.

Στα σχήματα 13 και 14 δίνονται οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης, διάφοροι συντελεστές ερμηνείας των MT δεδομένων καθώς και τα πολικά διαγράμματα, για τον σταθμό MEX. Όπως φαίνεται από την κλίση του τανυστή εμπέδησης η παράταξη των γεωλογικών/τεκτονικών επαφών κυμαίνεται από N5°W, για τις υψηλές συχνότητες (1000Hz), μέχρι N70°W για τις χαμηλές συχνότητες (0.6 Hz). Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι εξαιτίας των υψηλών σφαλμάτων σε κάποιες τιμές στις καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης ήταν απαραίτητη η επέμβαση και διαγραφή κάποιων δεδομένων καθώς και στην συνέχεια η εφαρμογή αλγορίθμου αποσυνέλιξης (La Toracca Decomposition) για την απομάκρυνση των επιφανειακών τρισδιάστατων δομών. Οι μικρές τιμές του διαγώνιου στοιχείου του τανυστή εμπέδησης  $Z_{xx}$ , επιτρέπουν τον υπολογισμό μονοδιάστατου μοντέλου για την θέση της βυθοσκοπήσης. Στα σχήματα 15 και 16 δίνονται τα μονοδιάστατα μοντέλα για τις πολώσεις TE και TM, αντίστοιχα.

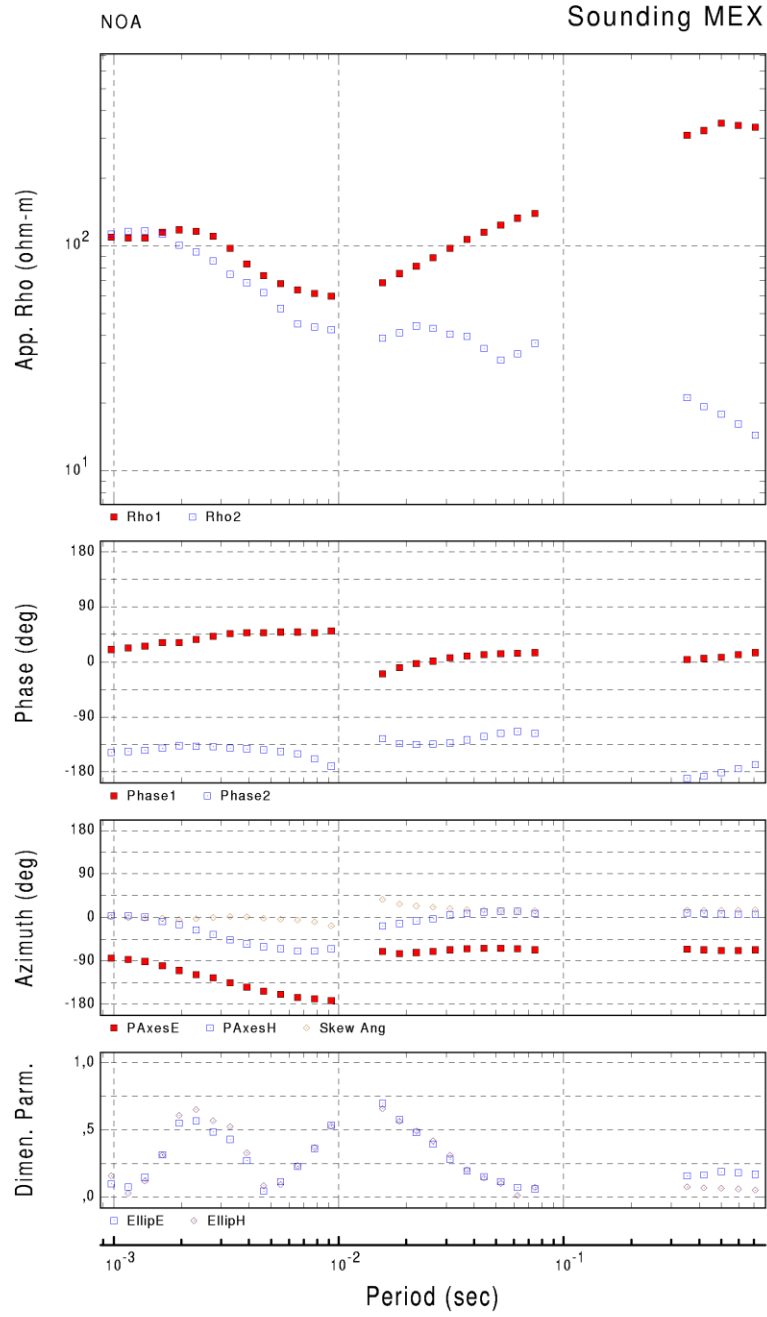
Στα σχήματα 17 και 18 δίνονται οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης, διάφοροι συντελεστές ερμηνείας των MT δεδομένων καθώς και τα πολικά διαγράμματα, για τον σταθμό LOU. Όπως φαίνεται από την κλίση του τανυστή εμπέδησης η παράταξη των γεωλογικών/τεκτονικών επαφών κυμαίνεται από N5°E, για τις υψηλές συχνότητες (1000Hz), μέχρι N60°E για τις χαμηλές συχνότητες (0.03Hz). Οι παραπάνω τιμές οφείλονται κυρίως στην επιφανειακή δομή όπως φαίνεται και από τον μορφολογικό χάρτη της περιοχής. Στον σταθμό αυτό όπως και στον σταθμό MEX έγινε επέμβαση στις καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης καθώς και εφαρμογή αλγορίθμου αποσυνέλιξης. Τα μονοδιάστατα μοντέλα που υπολογίστηκαν για τις πολώσεις TE και TM δίνονται στα σχήματα 19 και 20, αντίστοιχα.



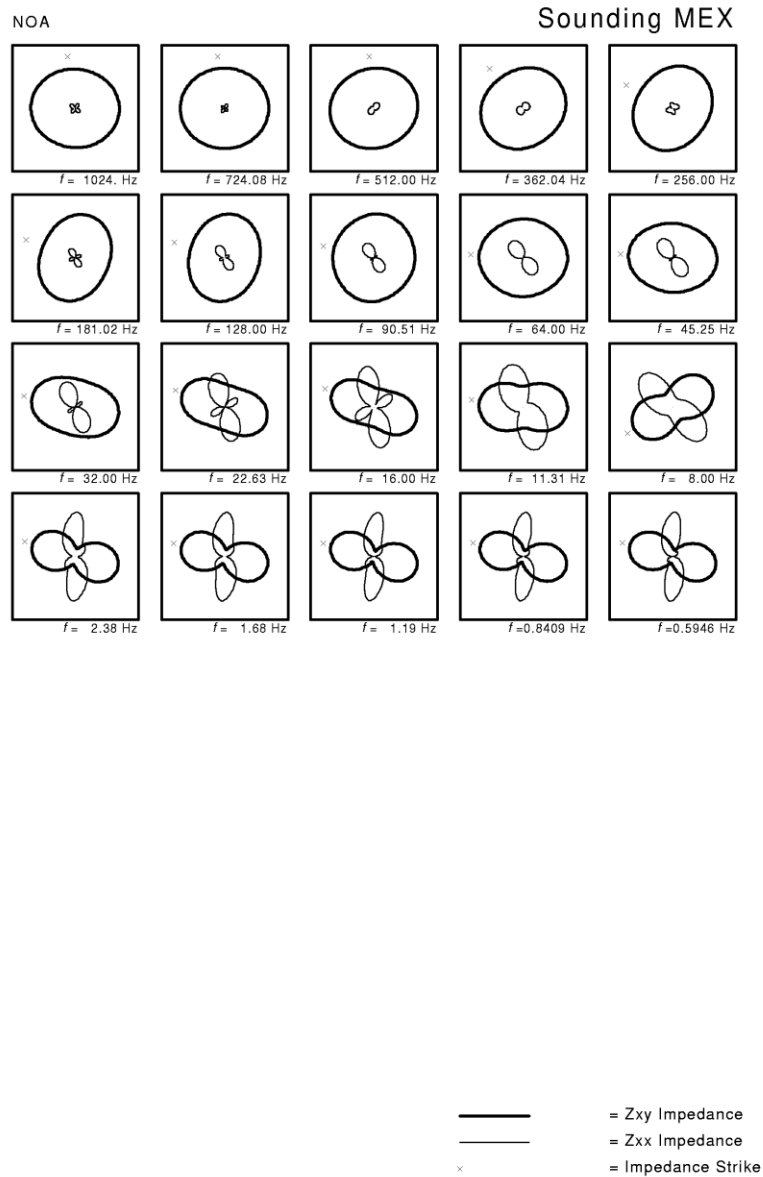
Σχήμα 11. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, φάσης και κλίσης με την περίοδο στον σταθμό GOR. Με κόκκινο παρουσιάζεται η πόλωση TM ενώ με μπλε η πόλωση TE.



Σχήμα 12. Πολικά Διαγράμματα του σταθμού GOR που δείχνουν την μεταβολή της παράταξης.

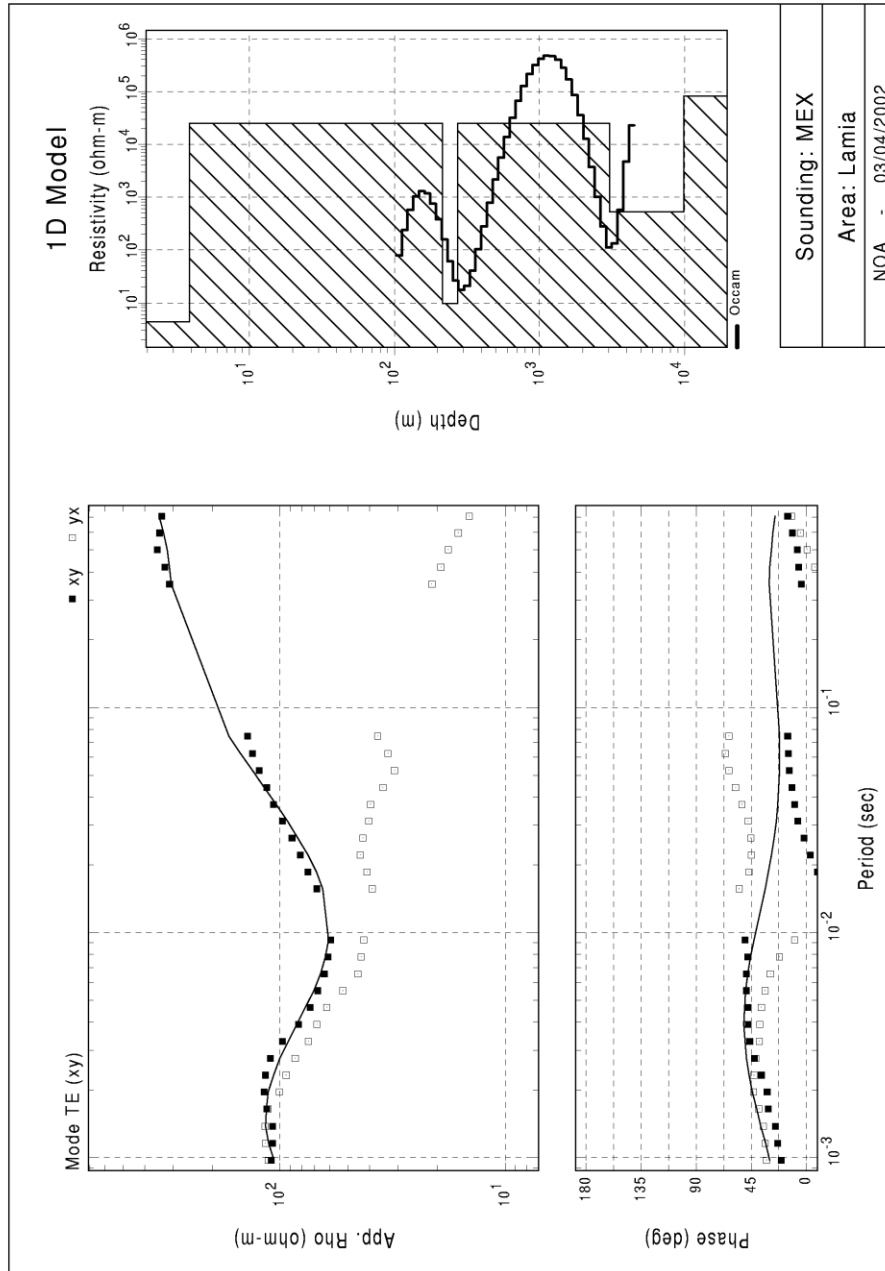


Σχήμα 13. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, φάσης και κλίσης με την περίοδο στον σταθμό MEX. Με κόκκινο παρουσιάζεται η πόλωση TE ενώ με μπλε η πόλωση TM.

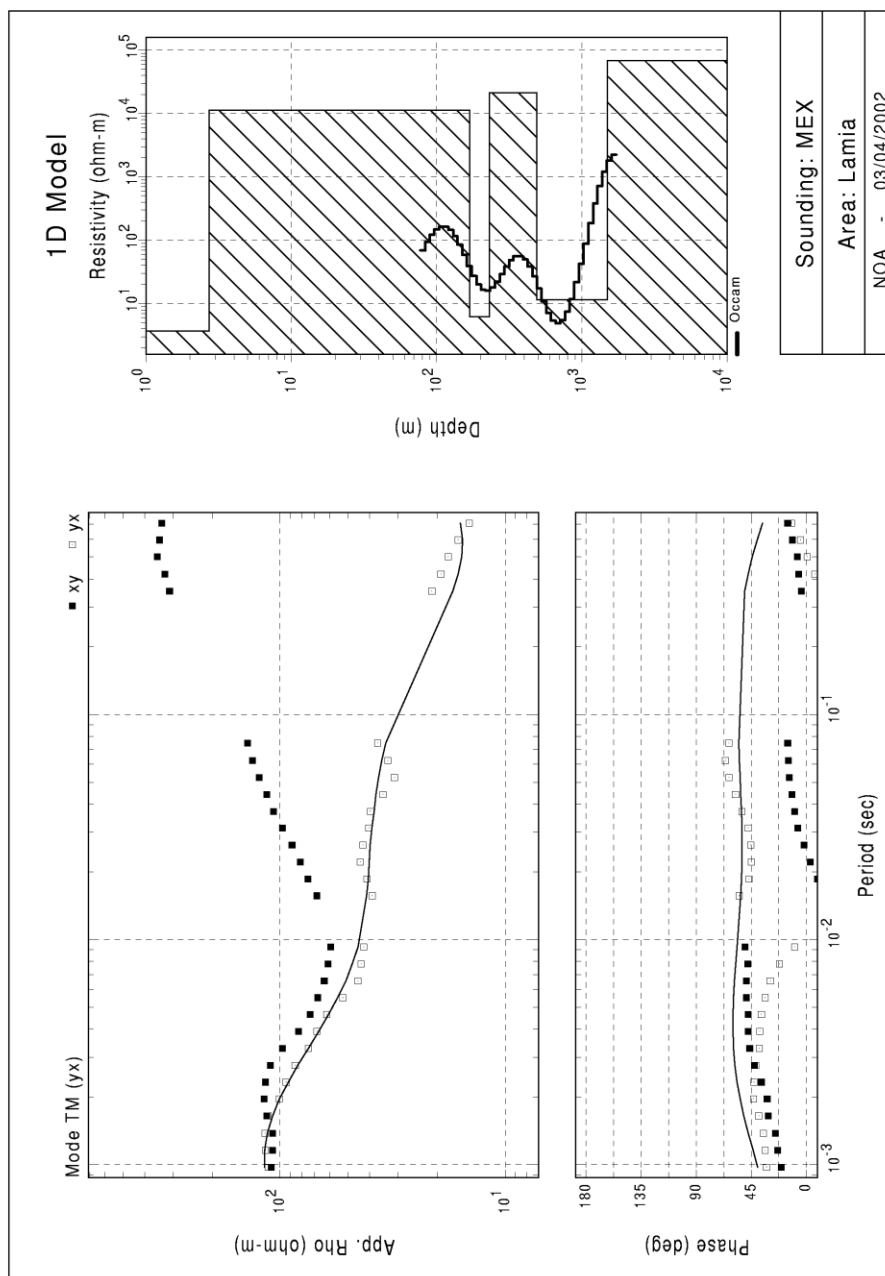


Σχήμα 14. Πολικά Διαγράμματα του σταθμού MEX που δείχνουν την μεταβολή της παράταξης.

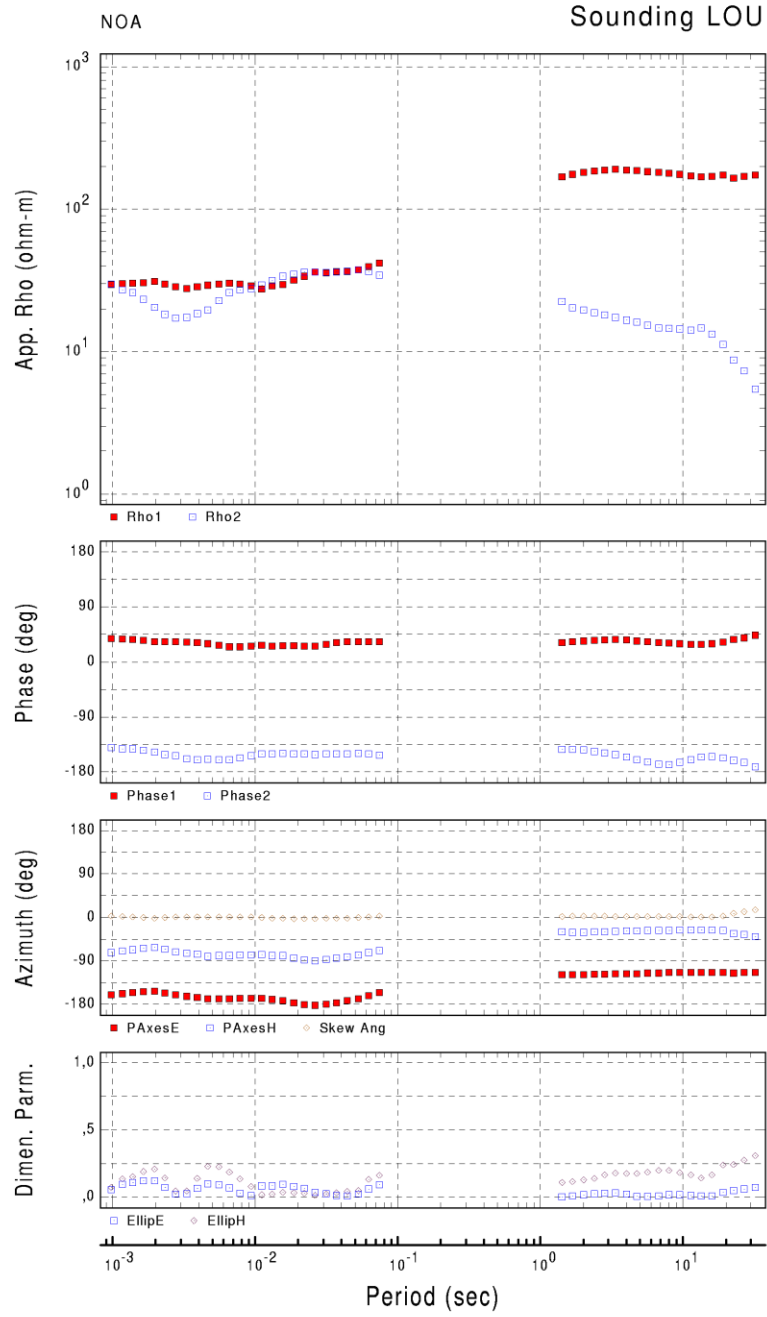




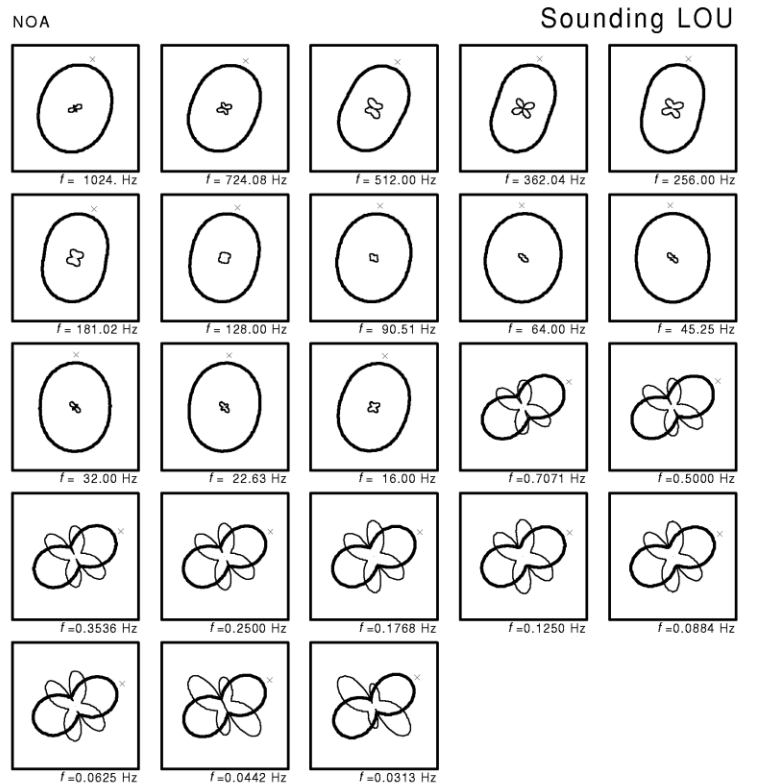
Σχήμα 15. Μονοδιάστατο Μοντέλο της πόλωσης TE του σταθμού MEX. Το γραμμοσκιασμένο μοντέλο αποτελεί την καλύτερη λύση όπως υπολογίστηκε με την πειραματική εφαρμογή διαφόρων μονοδιάστατων δομών. Η απόκριση του εν λόγω μοντέλου δίνεται με συνεχή γραμμή στο διάγραμμα φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης με την περίοδο. Με την έντονη γραμμή δίνεται το μονοδιάστατο μοντέλο όπως υπολογίστηκε μετά την εφαρμογή της αντιστροφής Occam (De-Groot Hedlin and Constable 1990).



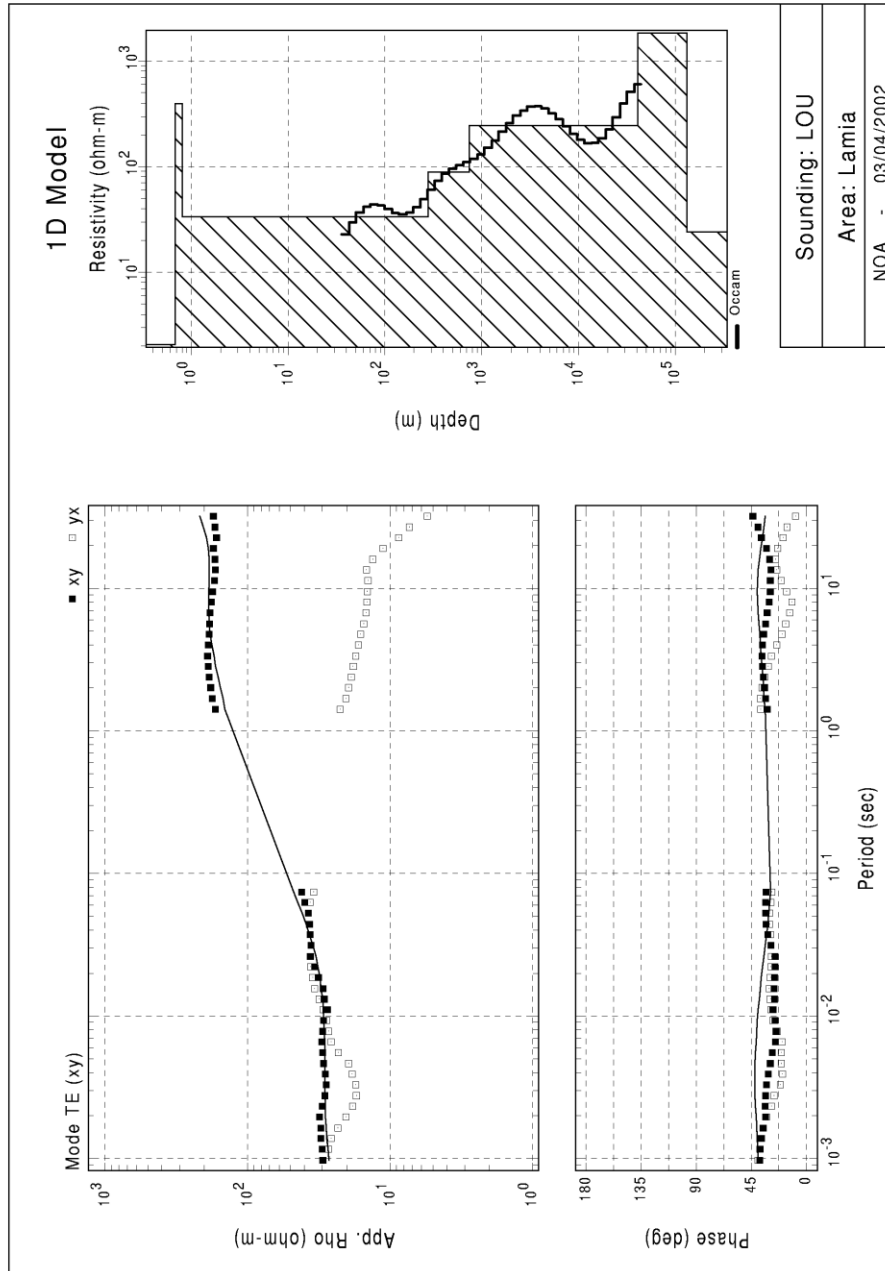
Σχήμα 16. Μονοδιάστατο Μοντέλο της πόλωσης TM του σταθμού MEX. Το γραμμοσκιασμένο μοντέλο αποτελεί την καλύτερη λύση όπως υπολογίστηκε με την πειραματική εφαρμογή διαφόρων μονοδιάστατων δομών. Η απόκριση του εν λόγω μοντέλου δίνεται με συνεχή γραμμή στο διάγραμμα φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης με την περίοδο. Με την έντονη γραμμή δίνεται το μονοδιάστατο μοντέλο όπως υπολογίστηκε μετά την εφαρμογή της αντιστροφής Occam (De-Groot Hedlin and Constable 1990).



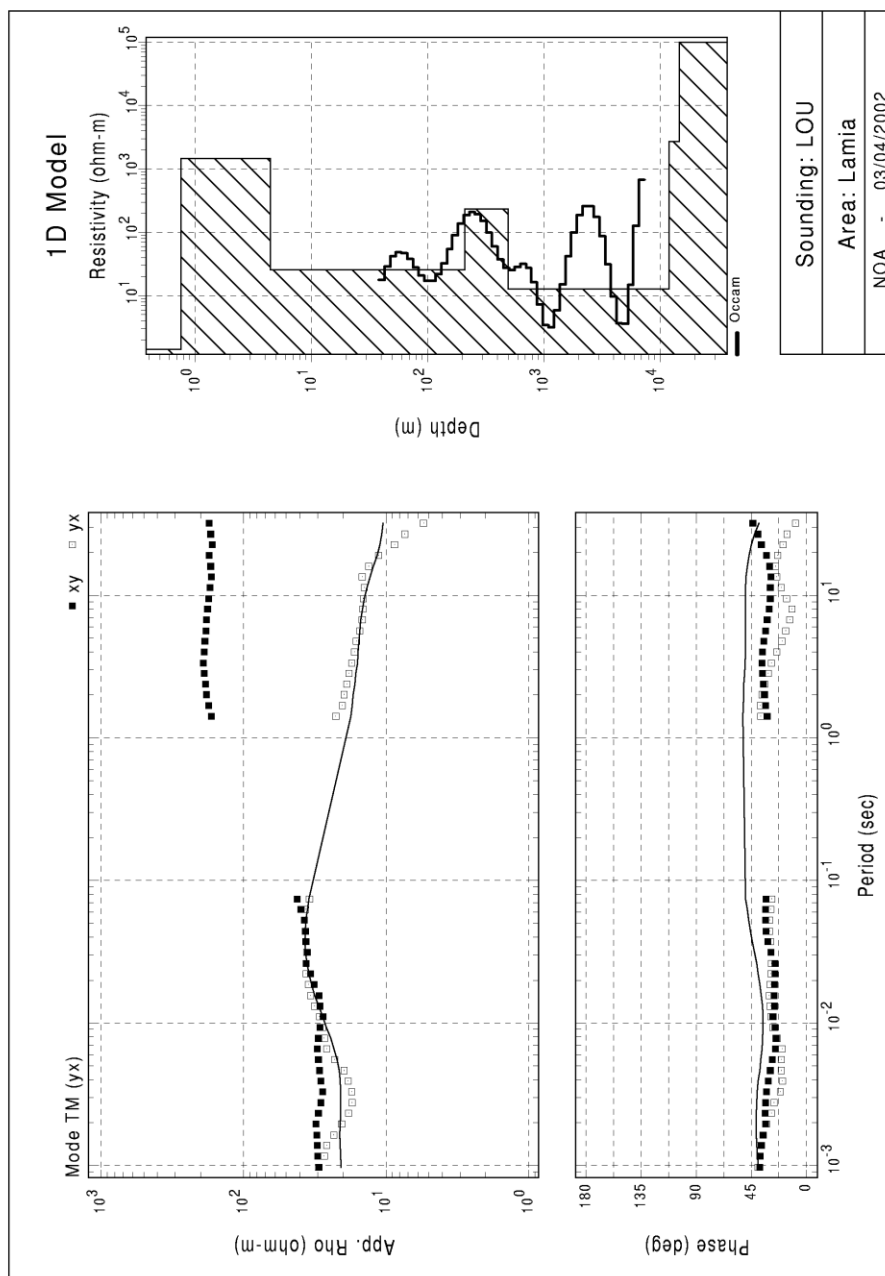
Σχήμα 17. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, φάσης και κλίσης με την περίοδο στον σταθμό LOU. Με κόκκινο παρουσιάζεται η πόλωση TE ενώ με μπλε η πόλωση TM.



Σχήμα 18. Πολικά Διαγράμματα του σταθμού LOU που δείχνουν την μεταβολή της παράταξης.



Σχήμα 19. Μονοδιάστατο Μοντέλο της πόλωσης TE του σταθμού LOU. Το γραμμοσκιασμένο μοντέλο αποτελεί την καλύτερη λύση όπως υπολογίστηκε με την πειραματική εφαρμογή διαφόρων μονοδιαστάτων δομών. Η απόκριση του εν λόγω μοντέλου δίνεται με συνεχή γραμμή στο διάγραμμα φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης με την περίοδο. Με την έντονη γραμμή δίνεται το μονοδιάστατο μοντέλο όπως υπολογίστηκε μετά την εφαρμογή της αντιστροφής Occam (De-Groot Hedlin and Constable 1990).

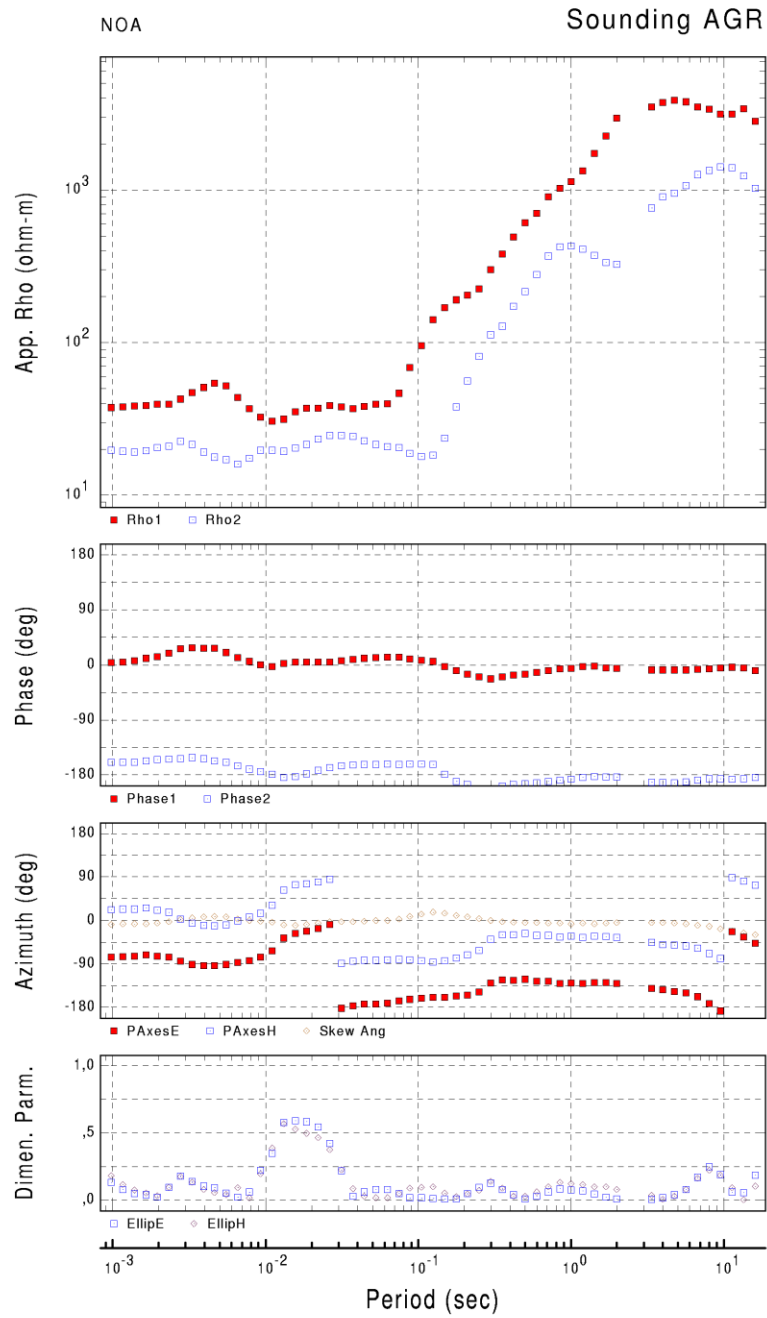


Σχήμα 20. Μονοδιάστατο Μοντέλο της πόλωσης TM του σταθμού LOU. Το γραμμοσκιασμένο μοντέλο αποτελεί την καλύτερη λύση όπως υπολογίστηκε με την πειραματική εφαρμογή διαφόρων μονοδιάστατων δομών. Η απόκριση του εν λόγω μοντέλου δίνεται με συνεχή γραμμή στο διάγραμμα φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης με την περίοδο. Με την έντονη γραμμή δίνεται το μονοδιάστατο μοντέλο όπως υπολογίστηκε μετά την εφαρμογή της αντιστροφής Occam (De-Groot Hedlin and Constable 1990).

Στα σχήματα 21, 22 και 23 δίνονται οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης, διάφοροι συντελεστές ερμηνείας των MT δεδομένων καθώς και τα πολικά διαγράμματα, για τον σταθμό AGR. Όπως φαίνεται από το σχήμα 21, οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης για συχνότητες μικρότερες από 10 Hz παρουσιάζουν κλίση μεγαλύτερη από  $45^\circ$ , δείκτης της επιρροής των μετρήσεων από μία ισχυρή πηγή που βρίσκεται στο κοντινό πεδίο. Για τον λόγο αυτό τα δεδομένα πέραν αυτής της συχνότητας δεν χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια. Οι τελικές καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης δίνονται στο σχήμα 22. Όπως φαίνεται από την κλίση του τανυστή εμπέδης (Zstrike-Impedance strike) στα πολικά διαγράμματα, η παράταξη των γεωλογικών/τεκτονικών επαφών στην περιοχή είναι ίση με N5-10°E, για τα επιφανειακά στρώματα (υψηλές συχνότητες, 1000Hz), ενώ φτάνει στα βαθύτερα στρώματα (μεσαίες συχνότητες, 10Hz) της N90-100°E. Λόγω των έντονων αλλαγών στην τεκτονική/μορφολογία στην θέση του σταθμού AGR, όπως φαίνεται και από τις έντονες μεταβολές στην κλίση του τανυστή εμπέδησης, δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός μονοδιάστατων μοντέλων για τον σταθμό αυτό.

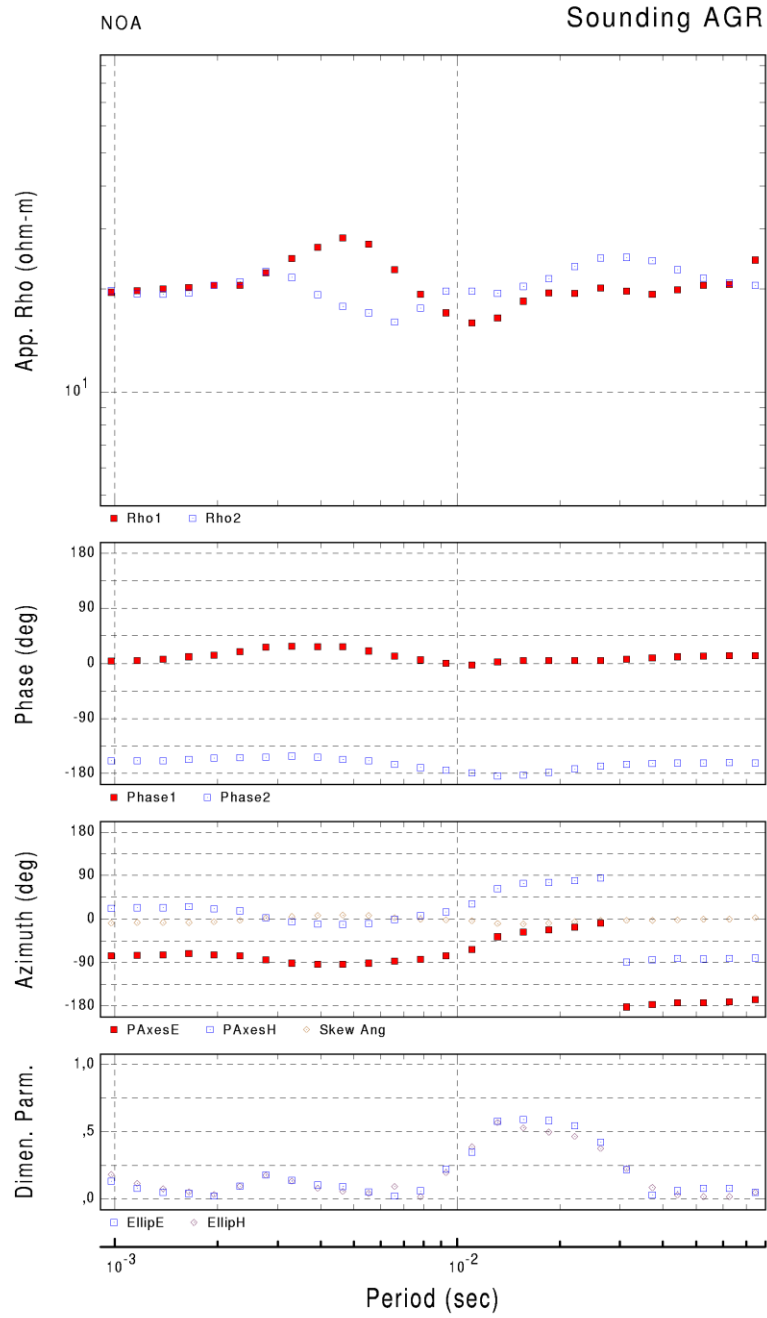
Στα σχήματα 24 και 25 δίνονται οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης, διάφοροι συντελεστές ερμηνείας των MT δεδομένων καθώς και τα πολικά διαγράμματα, για τον σταθμό ROD. Όπως φαίνεται από το σχήμα 24, οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης για όλο το φάσμα των συχνοτήτων παρουσιάζουν κλίση μεγαλύτερη από  $45^\circ$ , δείκτης της επιρροής των μετρήσεων από μία ισχυρή πηγή που βρίσκεται στο κοντινό πεδίο. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα πολικά διαγράμματα στο σχήμα 25 όπου η κλίση το τανυστή εμπέδησης (Impedance Strike) καθώς και το διάγραμμα πόλωσης του μη-διαγωνίου στοιχείου,  $Z_{xy}$ , του τανυστή εμπέδησης έχει σταθερή διεύθυνση για όλες τις συχνότητες.

Στα σχήματα 26 και 27 δίνονται οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης, διάφοροι συντελεστές ερμηνείας των MT δεδομένων καθώς και τα πολικά διαγράμματα, για τον σταθμό BOU. Όπως φαίνεται από το σχήμα 25, οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης για όλο το φάσμα των συχνοτήτων παρουσιάζουν, όπως και στον προηγούμενο σταθμό, κλίση μεγαλύτερη από  $45^\circ$ , δείκτης της επιρροής των μετρήσεων από μία ισχυρή πηγή που βρίσκεται στο κοντινό πεδίο. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τα πολικά διαγράμματα στο σχήμα 27 όπου η κλίση το τανυστή εμπέδησης (Impedance Strike) έχει σταθερή διεύθυνση για όλες τις συχνότητες. Το διάγραμμα πόλωσης του μη-διαγωνίου στοιχείου,  $Z_{xy}$ , του τανυστή εμπέδησης μεταβάλλεται με την συχνότητα γύρω από μια κεντρική γωνία N80°W. Οι μεταβολές αυτές είναι πολύ μικρές και για τον λόγο αυτό πιστεύουμε ότι υπάρχει ισχυρή(ές) πηγή(ές) στο κοντινό πεδίο του σταθμού BOU.

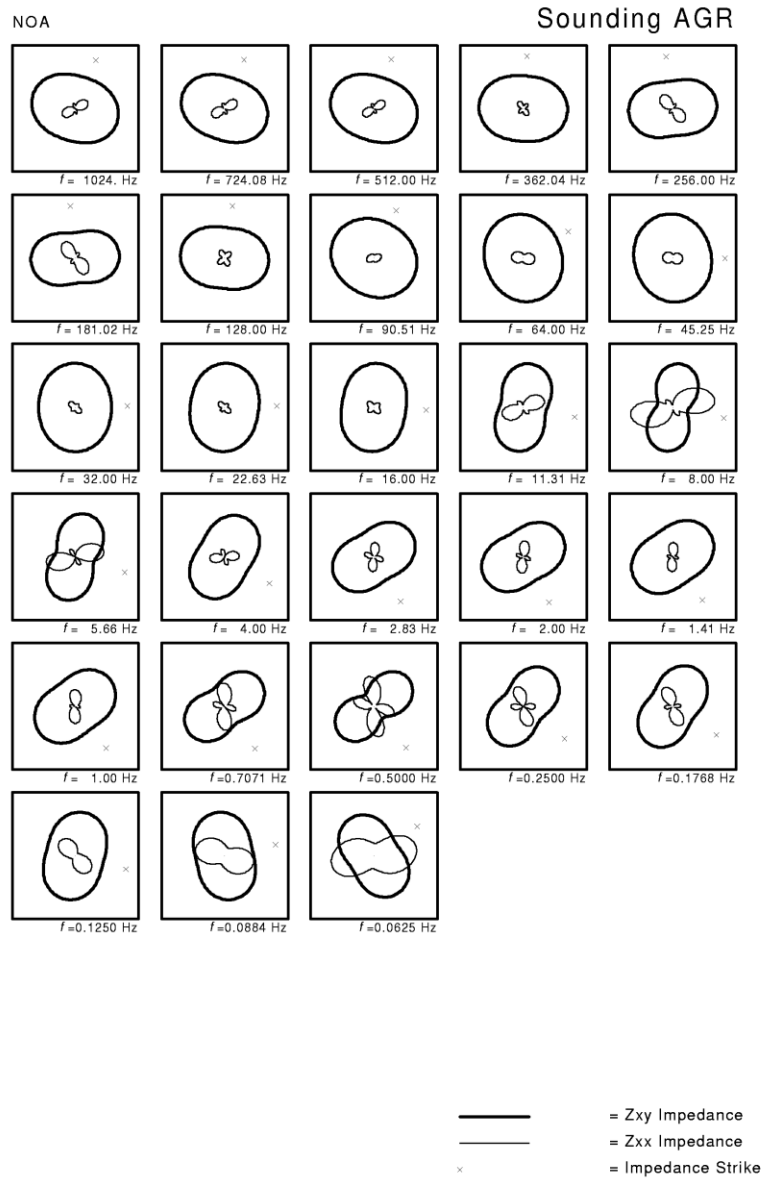


Σχήμα 21. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, φάσης και κλίσης με την περίοδο στον σταθμό AGR. Με κόκκινο παρουσιάζεται η πόλωση TE ενώ με μπλε η πόλωση TM. Στα δεδομένα έχει γίνει εφαρμογή της αποσυνέλιξης La Toracca.

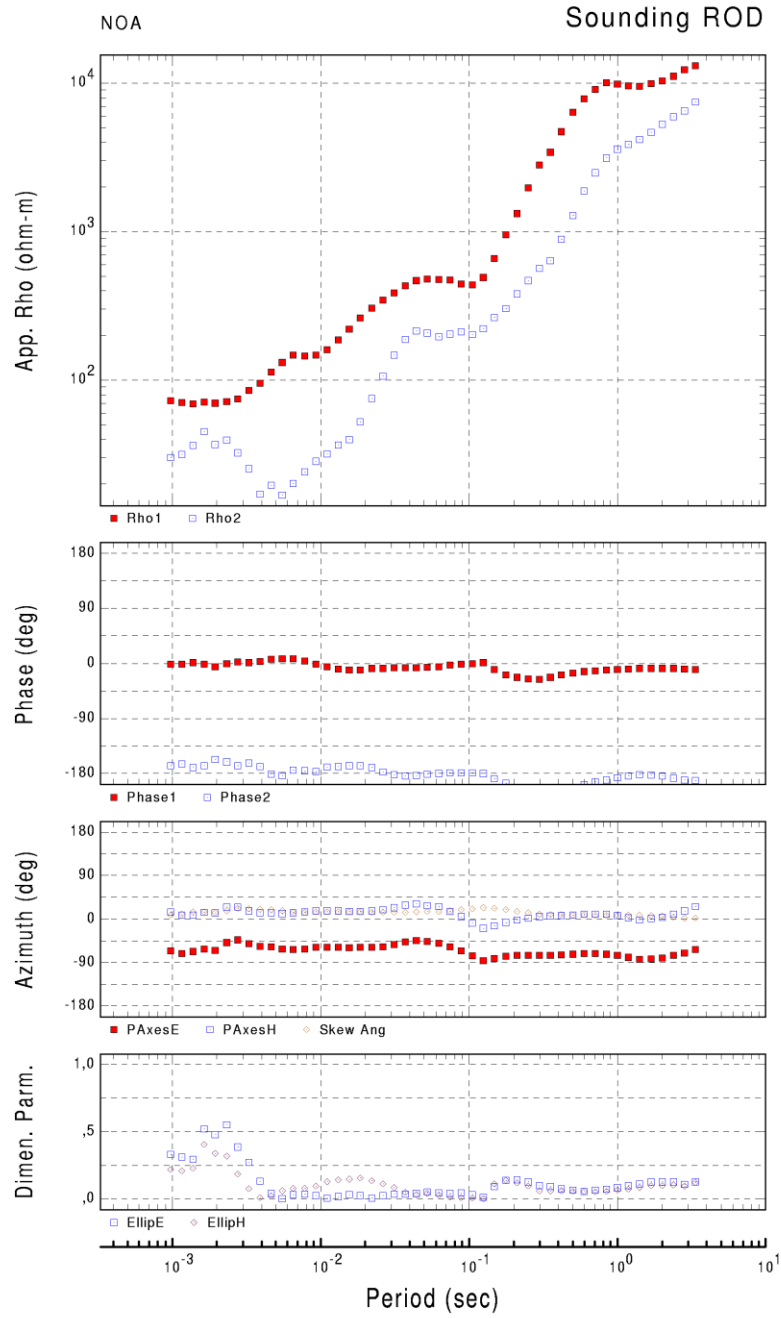




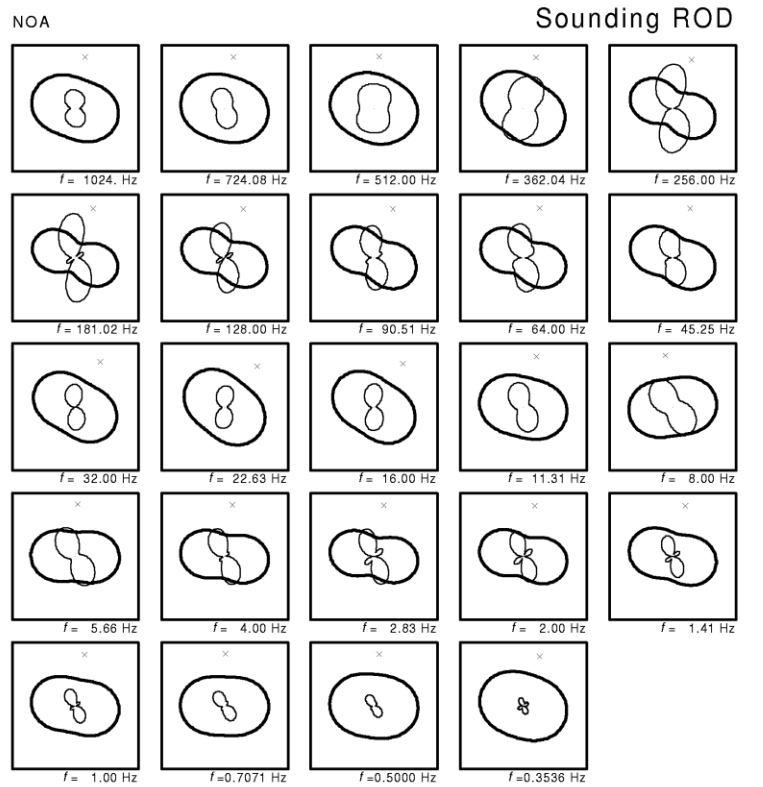
Σχήμα 22. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, φάσης και κλίσης με την περίοδο στον σταθμό AGR. Με κόκκινο παρουσιάζεται η πόλωση TE ενώ με μπλε η πόλωση TM. Στα δεδομένα έχει γίνει εφαρμογή της αποσυνέλιξης La Toracca και έχουν απομακρυνθεί τα δεδομένα για συχνότητες μικρότερες των 10 Hz.



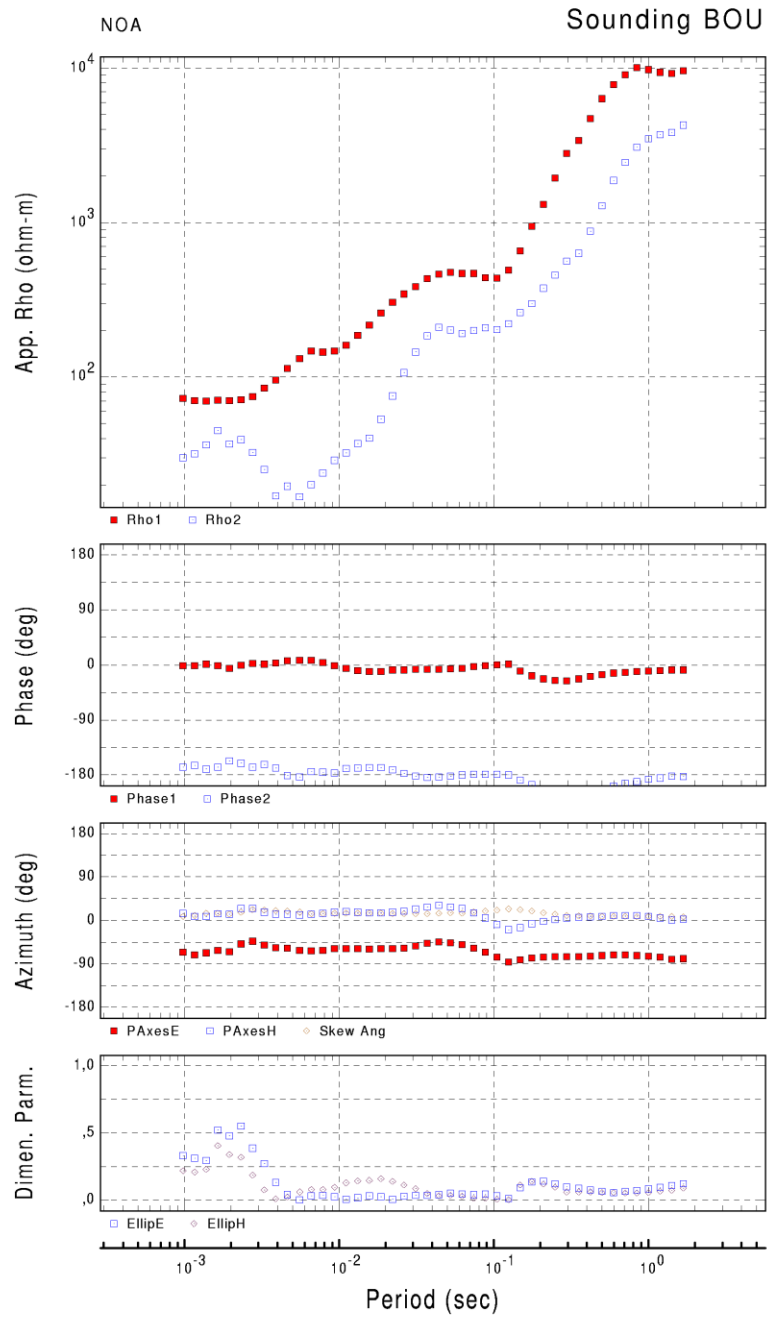
Σχήμα 23. Πολικά Διαγράμματα του σταθμού LOU που δείχνουν την μεταβολή της παράταξης.



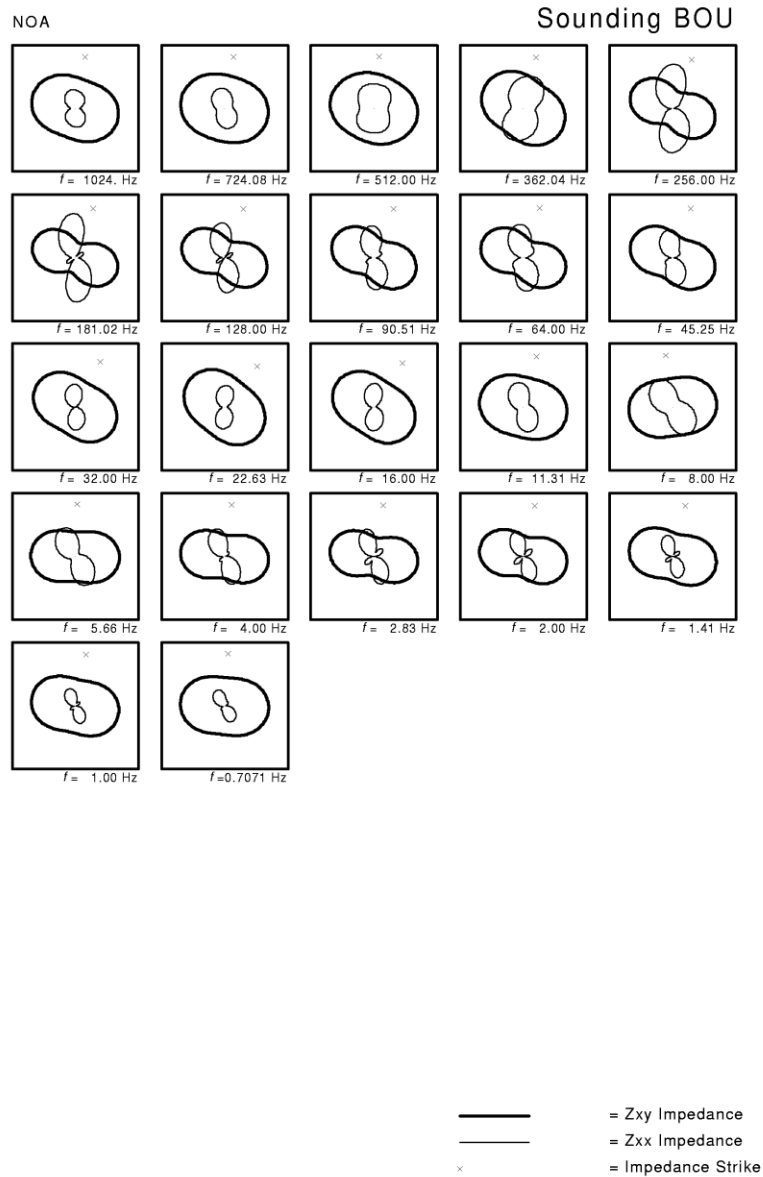
Σχήμα 24. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, φάσης και κλίσης με την περίοδο στον σταθμό ROD. Με κόκκινο παρουσιάζεται η πόλωση TE ενώ με μπλε η πόλωση TM. Στα δεδομένα έχει γίνει εφαρμογή της αποσυνέλιξης La Toracca.



Σχήμα 25. Πολικά Διαγράμματα του σταθμού ROD που δείχνουν την μεταβολή της παράταξης.



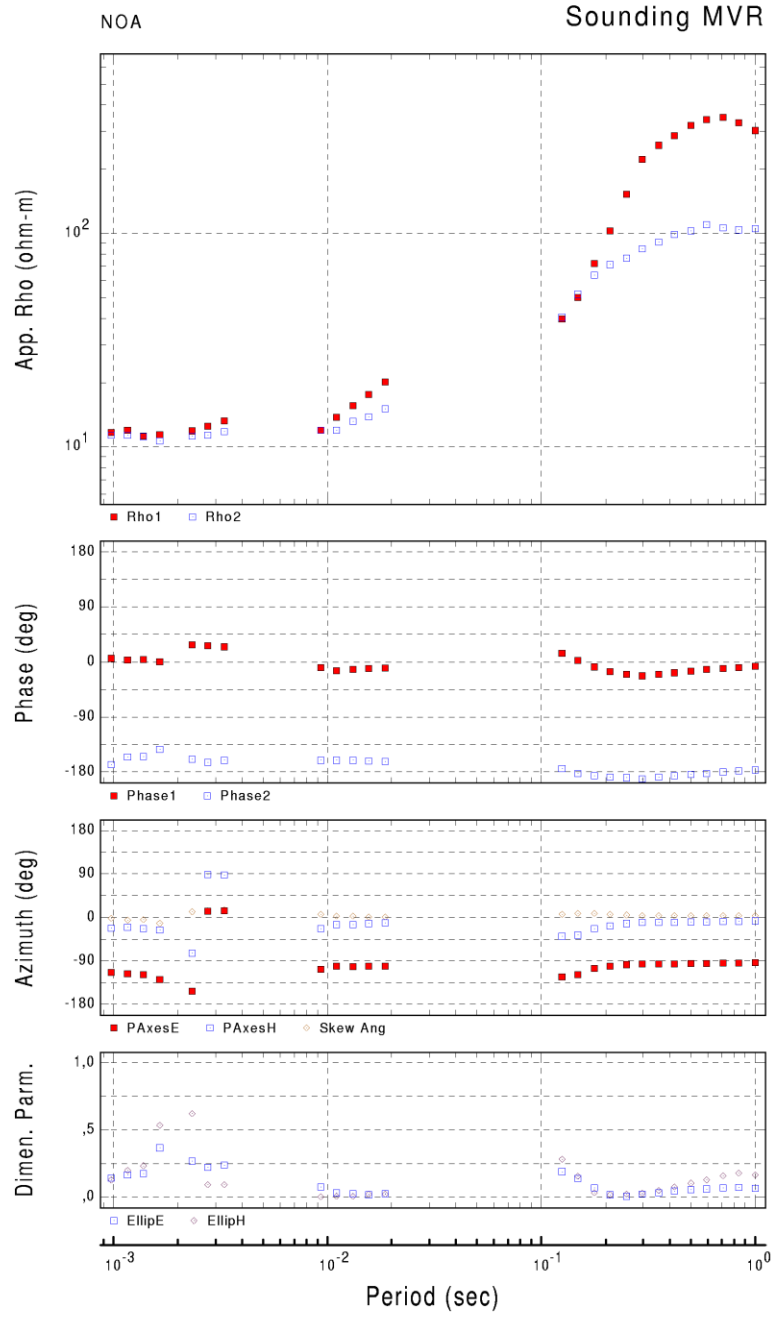
Σχήμα 26. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, φάσης και κλίσης με την περίοδο στον σταθμό BOU. Με κόκκινο παρουσιάζεται η πόλωση TE ενώ με μπλε η πόλωση TM. Στα δεδομένα έχει γίνει εφαρμογή της αποσυνέλιξης La Toracca.



Σχήμα 27. Πολικά Διαγράμματα του σταθμού BOU που δείχνουν την μεταβολή της παράταξης.

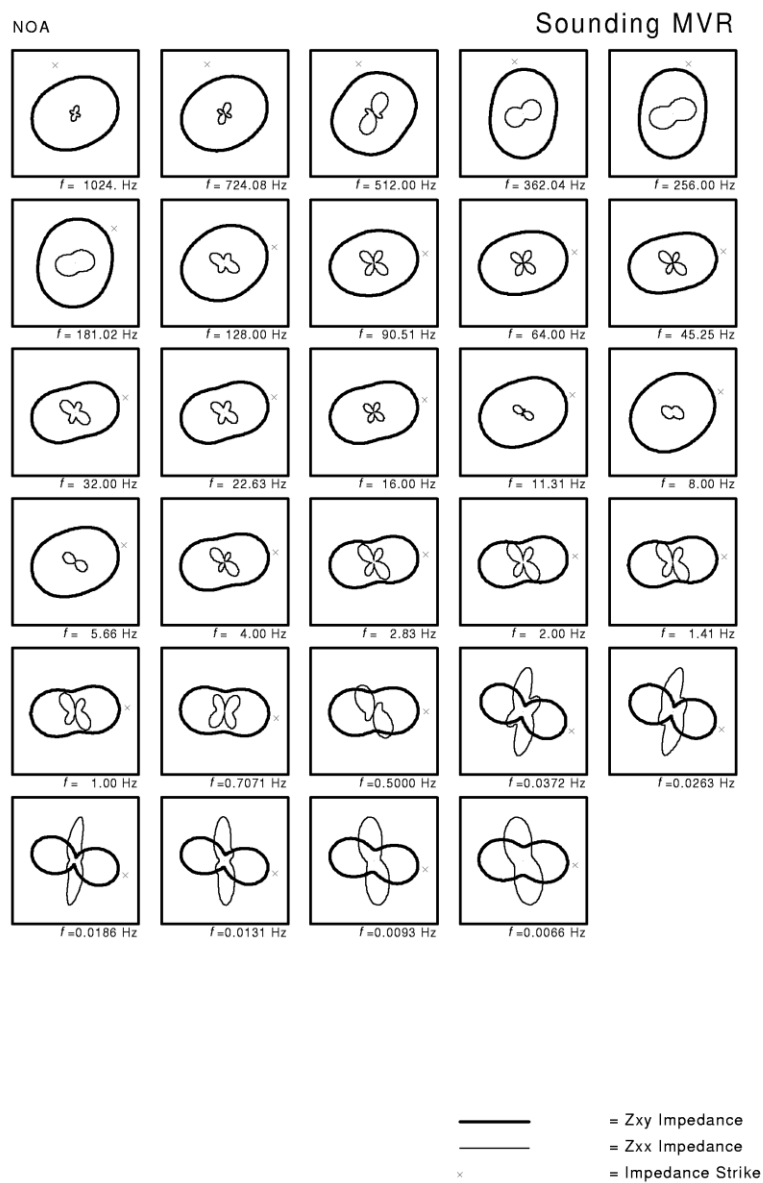
Στα σχήματα 28 και 29 δίνονται οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης, διάφοροι συντελεστές ερμηνείας των MT δεδομένων καθώς και τα πολικά διαγράμματα, για τον σταθμό MVR. Στο σχήμα 28 έχει ήδη προηγηθεί απομάκρυνση των δεδομένων που είχαν μεγάλα σφάλματα καθώς και αποσυνέλιξη La Toracca. Όπως φαίνεται και σε αυτόν τον σταθμό έχουμε επιρροή των μετρήσεων από ισχυρή(ές) πηγή(ές) στο κοντινό πεδίο. Στο σχήμα 29 όπου δίνονται τα πολικά διαγράμματα παρατηρούμε ότι και η κλίση της εμπέδησης (Impedance Strike) καθώς και το μη-διαγώνιο στοιχείο  $Z_{xy}$ , του ταχυστή, μεταβάλλονται με την συχνότητα. Αυτή η ασταθής γωνία πόλωσης δηλώνει ασθενής(είς) πηγή(ές) κοντινού πεδίου, για τον λόγο αυτό έγινε μια προσπάθεια υπολογισμού μονοδιάστατου μοντέλου από την καμπύλη φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης για την πόλωση TE (Σχήμα 30). Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό το ταίριασμα των πραγματικών δεδομένων με την απόκριση του μονοδιάστατου μοντέλου, με την καλύτερη απόκριση, δεν είναι ικανοποιητικό.

Στα σχήματα 31, 32 και 33 δίνονται οι καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης, διάφοροι συντελεστές ερμηνείας των MT δεδομένων καθώς και τα πολικά διαγράμματα, για τον σταθμό AIR. Στο σχήμα 31 παρουσιάζονται τα αρχικά δεδομένα αφού έχει προηγηθεί εφαρμογή αποσυνέλιξης La Toracca. Στο σχήμα 32 έχει ακολουθήσει απομάκρυνση των δεδομένων που είχαν μεγάλα σφάλματα. Όπως φαίνεται και σε αυτόν τον σταθμό έχουμε επιρροή των μετρήσεων από ισχυρή(ές) πηγή(ές) στο κοντινό πεδίο. Τα διαγράμματα πόλωσης του σχήματος 33 έχουν παρόμοια μορφή με αυτά του σταθμού BOU (Σχ. 27). Τέλος στο σχήμα 34 παρουσιάζεται μια προσπάθεια υπολογισμού μονοδιάστατου μοντέλου των δεδομένων της πόλωσης TE. Όπως ήταν αναμενόμενο δεν είναι δυνατό να γίνει μοντελοποίηση των δεδομένων της καμπύλης φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης με την συχνότητα.

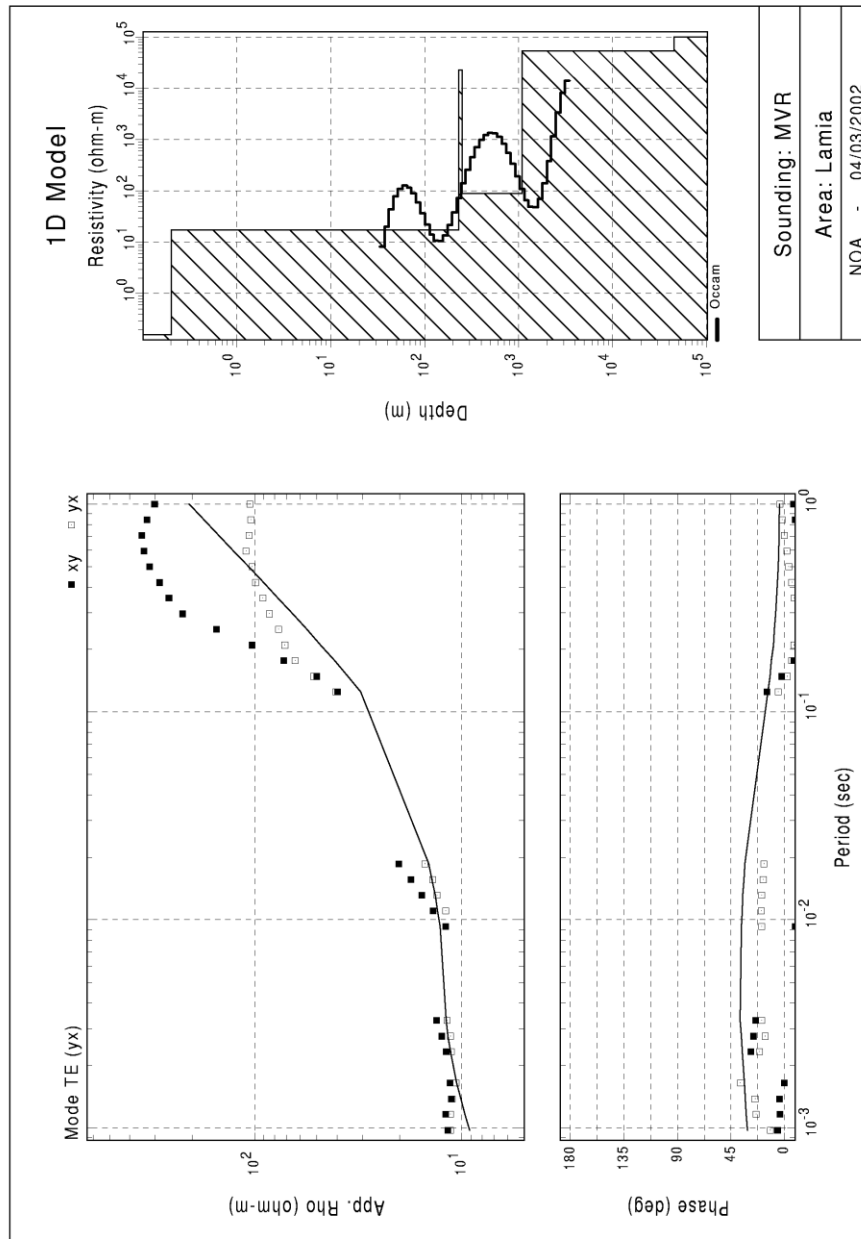


Σχήμα 28. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, φάσης και κλίσης με την περίοδο στον σταθμό MVR. Με κόκκινο παρουσιάζεται η πόλωση TE ενώ με μπλε η πόλωση TM. Στα δεδομένα έχει γίνει εφαρμογή της αποσυνέλιξης La Toracca.

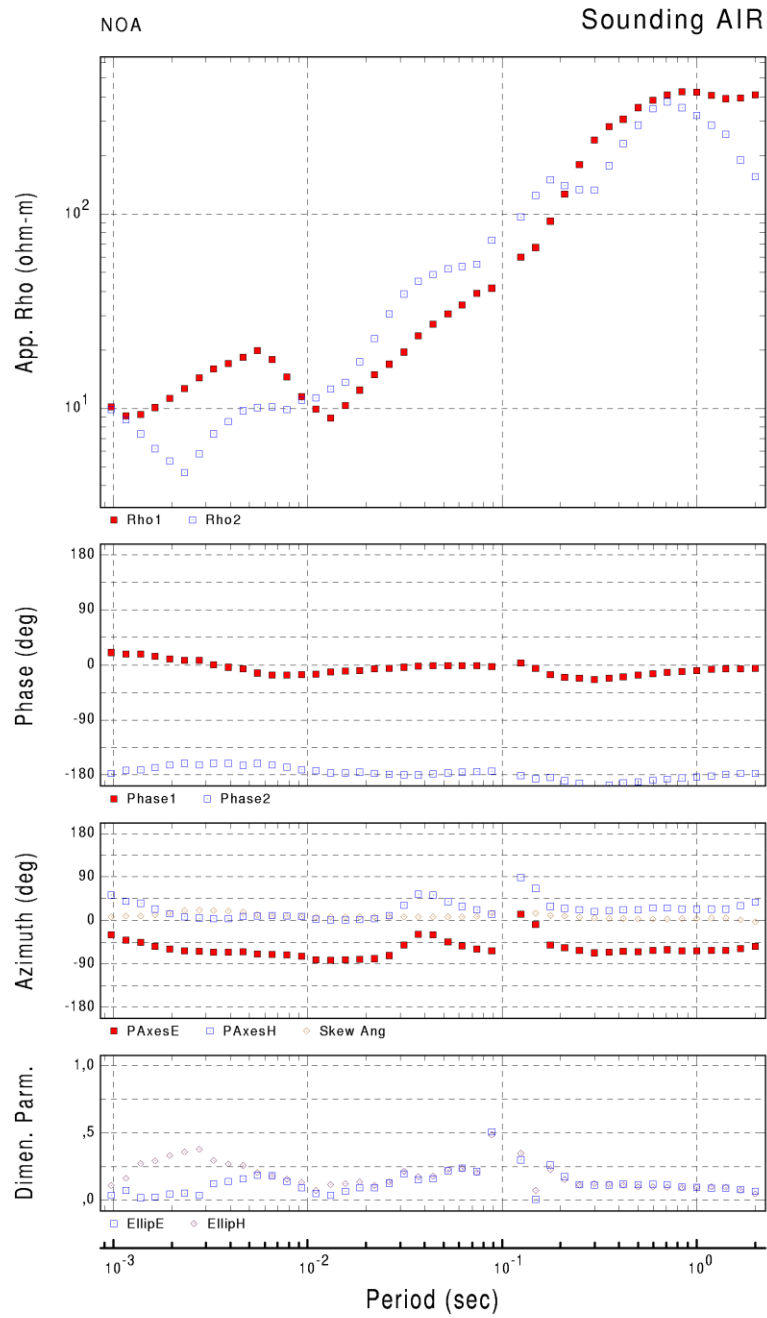




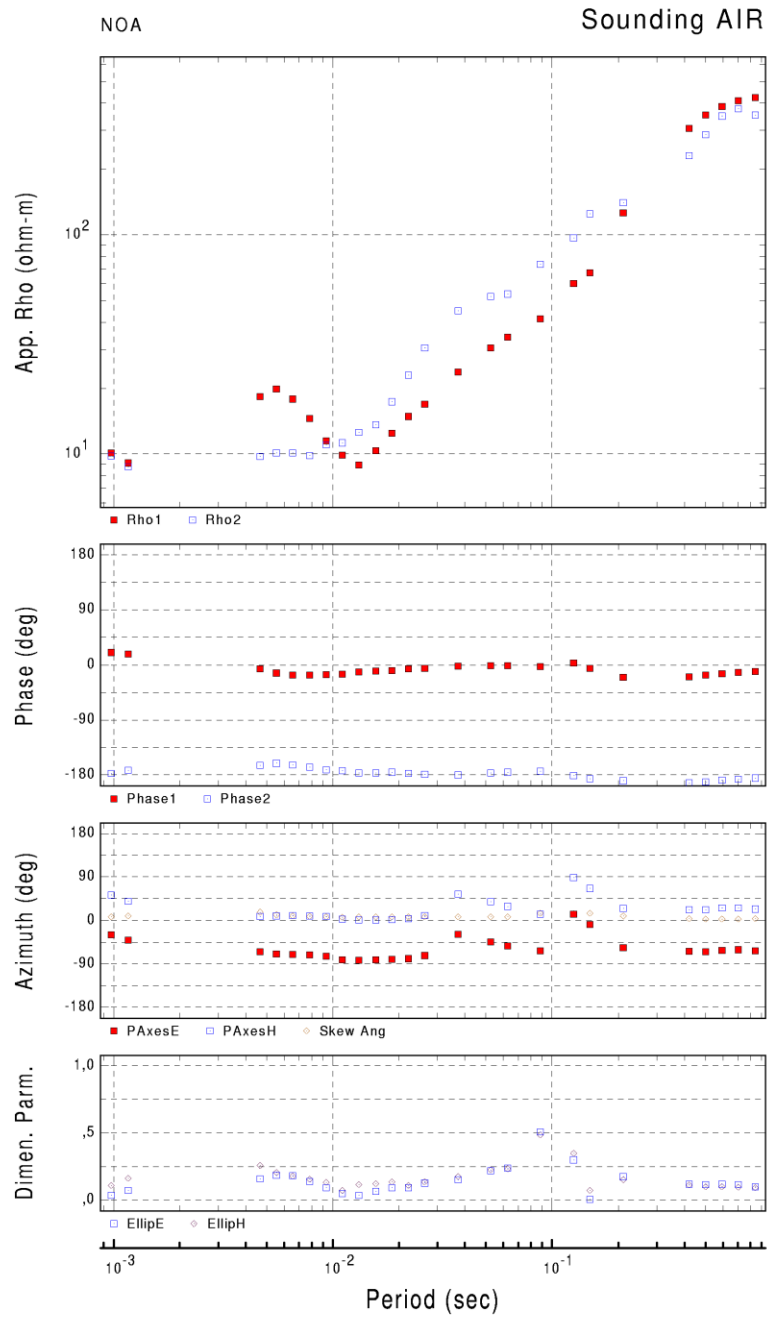
Σχήμα 29. Πολικά Διαγράμματα του σταθμού MVR που δείχνουν την μεταβολή της παράταξης.



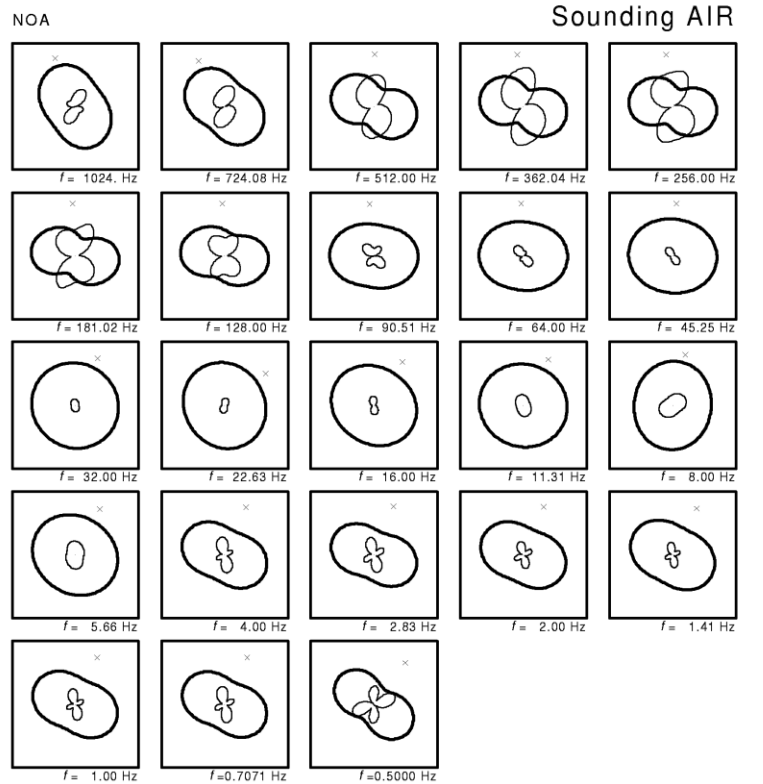
Σχήμα 30. Μονοδιάστατο Μοντέλο της πόλωσης TE του σταθμού MVR. Το γραμμοσκιασμένο μοντέλο αποτελεί την καλύτερη λύση όπως υπολογίστηκε με την πειραματική εφαρμογή διαφόρων μονοδιάστατων δομών. Η απόκριση του εν λόγω μοντέλου δίνεται με συνεχή γραμμή στο διάγραμμα φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης με την περίοδο. Με την έντονη γραμμή δίνεται το μονοδιάστατο μοντέλο όπως υπολογίστηκε μετά την εφαρμογή της αντιστροφής Occam (De-Groot Hedlin and Constable 1990).



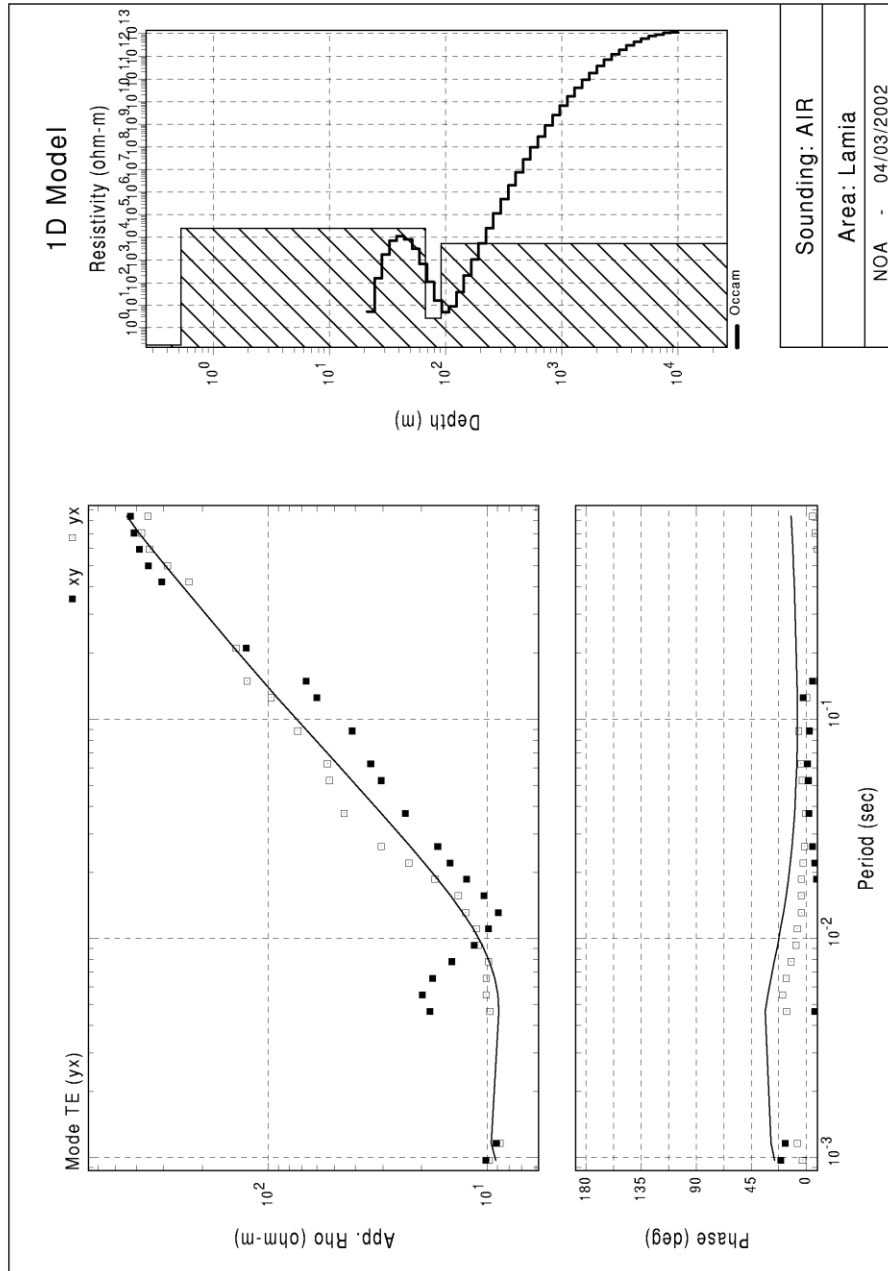
Σχήμα 31. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, φάσης και κλίσης με την περίοδο στον σταθμό AIR. Με κόκκινο παρουσιάζεται η πόλωση TE ενώ με μπλε η πόλωση TM. Στα δεδομένα έχει γίνει εφαρμογή της αποσυνέλιξης La Toracca.



Σχήμα 32. Καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης, φάσης και κλίσης με την περίοδο στον σταθμό AIR. Με κόκκινο παρουσιάζεται η πόλωση TE ενώ με μπλε η πόλωση TM. Στα δεδομένα έχει γίνει εφαρμογή της αποσυνέλιξης La Toracca.



Σχήμα 33. Πολικά Διαγράμματα του σταθμού AIR που δείχνουν την μεταβολή της παράταξης.



Σχήμα 34. Μονοδιάστατο Μοντέλο της πόλωσης TE του σταθμού AIR. Το γραμμοσκιασμένο μοντέλο αποτελεί την καλύτερη λύση όπως υπολογίστηκε με την πειραματική εφαρμογή διαφορών μονοδιαστάτων δομών. Η απόκριση του εν λόγω μοντέλου δίνεται με συνεχή γραμμή στο διάγραμμα φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης με την περίοδο. Με την έντονη γραμμή δίνεται το μονοδιάστατο μοντέλο όπως υπολογίστηκε μετά την εφαρμογή της αντιστροφής Occam (De-Groot Hedlin and Constable 1990).

### 3 Συμπεράσματα

Μετά την παρουσίαση των MT δεδομένων της ευρύτερης περιοχής της Λαμίας μπορούμε να συνοψίσουμε αναφέροντας ότι έχουμε εννέα (9) MT σταθμούς που κατανέμονται χωρικά στην περιοχή της λεκάνης του Σπερχειού ποταμού. Από του εννέα σταθμούς τα δεδομένα σε έναν από αυτούς (KOS) είναι εντελώς επηρεασμένα από θόρυβο και έτσι δεν ήταν δυνατός ο υπολογισμός χαρακτηριστικών του υπεδάφους (καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης με την συχνότητα).

Σε δύο σταθμούς, MEX και LOU ήταν δυνατός ο υπολογισμός των μονοδιάστατων γεωηλεκτρικών μοντέλων της κάθε θέσης και για τις δύο πολώσεις, TE και TM. Σε δύο σταθμούς, GOR και AGR έγινε απομάκρυνση των στοιχείων που έχουν μεγάλα σφάλματα καθώς και αποσυνέλιξη La Torracca, και στην συνέχεια ερμηνεία των στοιχείων της παράταξης των γεωλογικών/τεκτονικών δομών που αναγνωρίζονται από τα πολικά διαγράμματα. Στου υπόλοιπους σταθμούς, ROD, BOU, MVR και AIR, από τις καμπύλες φαινόμενης ειδικής αντίστασης και φάσης με την περίοδο καθώς και από τα πολικά διαγράμματα έγινε αναγνώριση της αλλοίωσης των καταγραφών από ισχυρή(ές) πηγή(ές) κοντινού πεδίου που δεν επέτρεψαν τον υπολογισμό των γεωηλεκτρικών παραμέτρων του υπεδάφους αλλά και των τεκτονικών/γεωλογικών χαρακτηριστικών για κάθε σταθμό.

Για την περαιτέρω εφαρμογή της MT μεθόδου στο νοτιότερο τμήμα, περιοχή του ρήγματος της Αταλάντης, προτείνεται η εφαρμογή της τεχνικής απομακρυσμένου σταθμού για την αποφυγή της επιρροής των μετρήσεων από πηγές θορύβου στο κοντινό πεδίο. Με τον τρόπο αυτό θα επιτύχουμε καλύτερες καταγραφές και έτσι θα είναι δυνατή η ερμηνεία των γεωτεκτονικών χαρακτηριστικών του κάθε σταθμού αλλά και ο πιθανός υπολογισμός δυδιάστατων γεωηλεκτρικών μοντέλων.

## 4 Βιβλιογραφία

- Cagniard, L., 1953: 'Basic Theory of the Magnetotelluric Method of geophysical prospecting', *Geophysics*, 18, p.605-635.
- Cantwell, T., 1960: Detection and analysis of low frequency magnetotelluric signals, Ph.D. thesis, Mass. Inst. Tech.
- Straton, J.A., 1941: 'Electromagnetic Theory', McGraw-Hill.,pp.615.
- Tikhonov, A.N., 1950: 'On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust', 2-3, in Vozoff, K., Ed., *Magnetotelluric Methods*, SEG Geophysics Reprint Series No 5.
- Rokityanski, I.I., 1961: 'On the application of the magnetotelluric method to anisotropic and inhomogeneous masses', *Izvestia*, 11, 1607-1613.
- Smirnov, M., Yu., 2002, 'Magnetotelluric data processing with robust statistical procedure having high breakdown point', *Geophys. J. Int.* (in print).
- Swift, C.M., 1967: 'A Magnetotelluric Investigation of an Electrical Conductivity Anomaly in the South Western United States', Ph.D., Thesis, Massachusetts Institute of Technology, p.211.
- Ting, S.C. and Hohmann, G.W., 1981: 'Integral equation modeling of three-dimensional magnetotelluric response', *Geophysics*, 46, 182-197.
- Vozoff, K., 1993: 'The Magnetotelluric Method', 641-711, in Nabighian, M.N., Ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics-Application*, Vol. II, SEG Investigation on Geophysics No 3.