

ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ ΛΙΑΣΚΟΙΗΣΗ: ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΧΩΡΟ¹

Κάρμης, Π.¹, Τζάνης, Α.² και Λάγιος, Ε.²

¹ Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών, Λιεύθουση Γεωφυσικής, Μεσογείων 57, Αθήνα.
² Τομέας Γεωφυσικής και Γεωθερμίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Πανεπιστημιούπολη, Πλάσα, 15784 Αθήνα.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι διασκόπησης αποτελούν σημαντικότερη κατηγορία γεωφυσικών τεχνικών με μεγάλη διεθνή διάδοση και ευρύτητα πεδία εφαρμογών σε κάθε τομέα γεωερευνητικής δραστηριότητας. Στην παρούσα εργασία επιχειρείται συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων και ενημερωτική επισκόπηση της αντίστοιχης ερευνητικής δραστηριότητας στον Ελληνικό χώρο. Τόσο θεωρητικά, όσο και εφαρμοσμένα στοιχεία των χρησιμοποιούμενων στην Ελλάδα ηλεκτρομαγνητικών μεθόδων παρουσιάζονται σε κάποια έκταση και σε *ερευνητικό επίπεδο*, σε μία προσπάθεια καταγραφής αναλυτικών και ερμηνευτικών πληροφοριών, χρήσιμων για τον μέσο γεωφυσικό μελετητή.

ABSTRACT

Electromagnetic methods comprise an important and extensively used group of geophysical investigation techniques, which enjoy a wide range of applications in almost every branch of solid earth sciences. This study attempts a concise presentation of their physical principles and a review of their applications in Greece. Discussion is reserved for methods commonly used in this country; both theoretical and applied information is given *at the research level*, in an attempt to summarise the most important analytical and interpretational aspects which may be useful to the field geophysicist and interpreter.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ηλεκτρομαγνητικές (ΗΜ) μέθοδοι διασκόπησης αποτελούν πολυειδή και ευρύτητα διαδεδομένη κατηγορία γεωφυσικών τεχνικών, εφαρμοζόμενων σε κάθε τομέα γεωερευνητικής δραστηριότητας, με έμφαση στην έρευνα μεταλλευμάτων και υδρογονανθράκων, γεωθερμία, υδρογεωλογία, αρχαιομετρία και, προσφάτως, περιβαλλοντολογικές μελέτες και αντικείμενα τεχνικής γεωλογίας. Παράλληλα, νέα πεδία εφαρμογών διαφαίνονται σε ευαίσθητους τομείς όπως η έρευνα πρόγνωσης σεισμών.

Οι ΗΜ μέθοδοι διασκόπησης χαιρούν σημαντικότερων πλεονεκτημάτων έναντι των ηλεκτρικών μεθόδων σταθερού ρεύματος, εμφανίζουσες αυξημένη αξιοπιστία, πολύ χαμηλό λειτουργικό κόστος, μεγάλη παραγωγικότητα και βελτιωμένη εργονομία. Πολλές ΗΜ μέθοδοι τυπικώς επιτυγχάνουν μεγάλο εύρος βαθών διασκόπησης, (της τάξης πολλών km) και ανιχνεύουν κατακόρυφες και πλευρικές μεταβολές της δομής με σημειακές μετρήσεις: σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος και την υψηλή αξιοπιστία, η ιδιότητα αυτή δίδει πρόσθετα πλεονεκτήματα στις ΗΜ τεχνικές.

Οι ΗΜ μέθοδοι δεν έχουν τύχει εκτεταμένων εφαρμογών στην Ελλάδα, όπως τουλάχιστον γίνεται διεθνώς όπου αποτελούν την δεύτερη κατά σειρά μεγαλύτερη ομάδα γεωφυσικών τεχνικών μετά τις σεισμικές μεθόδους. Δεν θα ήταν ίσως υπερβολή να γράψουμε ότι στην Ελλάδα, οι ΗΜ μέθοδοι είναι μάλλον παρεξηγημένες, τόσο ως προς την φύση τους, όσο και ως προς την δυναμική προσφορά τους στην γεωερευνητική δραστηριότητα. Οι μόνοι γνωστοί συστηματικοί χρήστες ΗΜ μεθόδων είναι το ΓΓΜΕ και ο Τομέας Γεωφυσικής και Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, ενώ σποραδικές μόνον εφαρμογές είναι γνωστές εκ μέρους άλλων Δημοσίων φορέων και του Ιδιωτικού Τομέα.

¹ ELECTROMAGNETIC METHODS OF GEOPHYSICAL INVESTIGATION: A REVIEW AND THEIR APPLICATIONS IN GREECE, by Karmis, P.¹, Tzanis, A.² and Lagios, E.²

Στην παρούσα εργασία, επιχειρούμε συνοπτική παρουσίαση των ΗΜ μεθόδων γεωφυσικής έρευνας και επισκόπηση της αντίστοιχης ερευνητικής δραστηριότητας στον Ελληνικό χώρο. Έχοντας σαφή αντίληψη ότι η Ελληνική γεωφυσική βιβλιογραφία είναι περιορισμένη στον τομέα αυτό, επιθυμούμε να αποτελέσει το παρόν κείμενο ουσιαστικότερη συμβολή στον εμπλουτισμό της και όχι μόνον απλή ιστορική αναδρομή και παράθεση πεπραγμένων. Για τον λόγο αυτό παρουσιάζουμε σε κάποια έκταση και σε ερευνητικό επίπεδο, τόσο θεωρητικά, όσο και εφαρμοσμένα στοιχεία των κυριωτέρων μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί στην Ελλάδα, με γνώμονα την καταγραφή αναλυτικών και ερμηνευτικών πληροφοριών, χρήσιμων για τον μέσο γεωφυσικό μελετητή.

Η παρουσίαση των ΗΜ μεθόδων διασκόπησης, έστω και μόνο των εφαρμοσθεισών στην Ελλάδα, είναι ομολογουμένως θέμα αχανές και πολύπλοκο· η ανάπτυξή του θα είναι αναγκαστικώς συνοπτική και ίσως χωρίς την οφειλόμενη διδακτικότητα. Παρ' όλα αυτά, οι συγγραφείς ελπίζουν ότι η παρούσα θα αποτελέσει μιιά χρήσιμη αρχική βάση πληροφοριών και ευελπιστούν θα συμβάλλει στην περαιτέρω κατανόηση και διάδοση των ΗΜ τεχνικών στον Ελληνικό χώρο. Η εργασία είναι οργανωμένη ως εξής:

- Κατ' αρχάς παρουσιάζεται συνοπτική γενική επισκόπηση της διάδοσης ΗΜ κυμάτων και πεδίων σε αγωγή μέσα (Γη), με σκοπό να εισάγει τον αναγνώστη στις θεμελιώδεις έννοιες και την φυσική βάση των ΗΜ μεθόδων διασκόπησης. Έπονται
- Επισκόπηση των ΗΜ μεθόδων φυσικών πεδίων (ΗΜΦΠ), ανασκόπηση των εφαρμογών τους στον Ελληνικό χώρο και παράδειγμα εφαρμογής σε ερευνητικό επίπεδο.
- Επισκόπηση των ΗΜ μεθόδων ελεγχόμενης πηγής (ΗΜΕΠ) και ανασκόπηση των εφαρμογών τους στον Ελληνικό χώρο. Παρουσιάζονται μόνον οι χρησιμοποιηθείσες στην Ελλάδα μέθοδοι με στοιχειώδη περιγραφή και σχολιασμό των κυριωτέρων χαρακτηριστικών και ερευνητικών προβλημάτων τους λόγω του μεγάλου αριθμού εφαρμογών των συγκεκριμένων ΗΜΕΠ, η αναδρομή περιορίζεται στις πρότυπες ή παραδειγματικές εργασίες.
- Παρουσίαση της σημερινής κατάστασης και επιπέδου ανάπτυξης των ΗΜ μεθόδων διασκόπησης, καθώς και των γενικών ερευνητικών προσανατολισμών χωριστά για τις ΗΜΦΠ και ΗΜΕΠ.

ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Οι ΗΜ μέθοδοι διασκόπησης βασίζονται σε φαινόμενα ΗΜ επαγωγής, λαμβάνοντα χώρα όταν ένα εξωτερικό πρωτεύον (πηγαίο) μαγνητικό πεδίο κυματικής μορφής εισέρχεται εντός της Γης και παράγει ηλεκτρικά (πρωτεύοντα) ρεύματα και δευτερεύοντα (ανώμαλα) μαγνητικά πεδία σε γεωηλεκτρική δομή ελεύθερη πηγών ή καταναλωτών ΗΜ ενεργειάς. Σε καρτεσιανό (ορθοκανονικό) σύστημα συντεταγμένων (x, y, z) το ΗΜ πεδίο προσδιορίζεται από τα μεγέθη:

Ηλεκτρικό πεδίο: $E(x, y, z, t)$ ένταση (σε V/m) και $D(x, y, z, t)$, διηλεκτρική μετατόπιση (σε C/m²)

Μαγνητικό πεδίο: $H(x, y, z, t)$, ένταση (σε A/m) και $B(x, y, z, t)$, μαγνητική επαγωγή (σε Wb/m²)

Θεωρούμε γεωηλεκτρική δομή εξ' ανομοιογενούς (μακροσκοπικώς ανισοτροπικού) κάτω ημιχώρου, με οροφή την μονωτική ατμόσφαιρα. Απλούστερα, η δομή απαρτίζεται από γειτνιάζοντα μεγάλα τεμάχια² έκαστο των οποίων είναι ομογενές και ιστροπικό, ωστέ εντός αυτών να ισχύει

$$B = \mu H, \quad D = \epsilon E, \quad J = \sigma(x, y, z)E$$

οπου μ είναι η σχετική μαγνητική διαπερατότητα του μέσου διάδοσης, ϵ η σχετική διηλεκτρική σταθερά, $\sigma(x, y, z)$ η αγωγιμότητα και J είναι η πυκνότητα ρεύματος σε A/m². Εάν επι πλέον θεωρήσουμε αρμονική χρονική εξάρτηση $\exp(i\omega t)$, (οπότε $d/dt = i\omega$), η διάδοση των ΗΜ κυμάτων περιγράφεται από τις εξισώσεις του Maxwell, οι οποίες στο πεδίο χρόνου και συχνότητων γράφονται αντιστοίχως,

Πεδίο χρόνου	Πεδίο συχνότητων
$\nabla \times E = -\mu dH/dt$	$\nabla \times E = -i\omega \mu H$
$\nabla \times H = \sigma(x, y, z)E + \epsilon dE/dt$	$\nabla \times H = [\sigma(x, y, z) + i\omega \epsilon]E$
$\nabla \cdot H = 0$ και $\nabla \cdot E = 0$	

(1)

(2)

Οι δυο πρώτες εξισώσεις περιγράφουν την σύζευξη των μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων, υπό την έννοια ότι η χρονική μεταβολή του ενός παράγει την χωρική μεταβολή (στροβιλισμό) του άλλου. Οι

² Ο όρος "μεγάλο δομικό τεμάχιο" είναι σχετικός και νοείται εξαρτώμενος από το μήκος κύματος του πεδίου.

ισοδύναμοι όροι $\epsilon dE/dt$ και $i\omega\epsilon E$ περιγράφουν τα ρεύματα μετατόπισης. Λπαλειφή των E ή H οδηγεί στις εξισώσεις διάδοσης των ΗΜ κυμάτων

$F = E \text{ ή } H$	
$\nabla^2 F - \mu\epsilon \frac{d^2 F}{dt^2} - \mu\sigma(x, y, z) \frac{dF}{dt} = 0$	$\nabla^2 F + [\mu\epsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma(x, y, z)]F = 0$ $k^2 = \mu\epsilon\omega^2 - i\omega\mu\sigma(x, y, z)$

(3)

Στο απλούστερο περιγράψιμο πεδίο συχνότητας, k^2 παριστά τον (ανυσματικό) *κυματαριθμό* του ΗΜ πεδίου, το *πραγματικό μέρος* του οποίου αντιστοιχεί στα ρεύματα μετατόπισης, ενώ το *φανταστικό στα ρεύματα αγωγιμότητας*, περιλαμβάνον και τις καθαρές ωμικές απώλειες ισχύος.

Η Γη συμπεριφέρεται σαν καλός αγωγός ρευμάτων αγωγιμότητας. Εν γένει, τα φυσικά πετρώματα δύνανται να θεωρηθούν διηλεκτρικά και παραμαγνητικά στερεά, με $\epsilon \approx 9 \times 10^{-11}$ F/m και $\epsilon/\epsilon_0 \approx 10$ (ϵ_0 η διηλεκτρική σταθερά του κενού), ενώ $\mu \approx \mu_0 \approx 1.3 \times 10^{-6}$ H/m (μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού). Επιπλέον, στην ΗΜ διασκόπηση χρησιμοποιούνται συνήθως συχνότητες $f < 20$ kHz ($\omega = 2\pi f < 2 \times 10^5$). Υπό τις ανωτέρω συνθήκες διαπιστώνεται ότι $\epsilon\omega^2 \ll \omega\sigma$. Ένα αριθμητικό παράδειγμα δίδεται κατωτέρω, για την απλή περίπτωση μεταβολής της αγωγιμότητας κατά την κατακόρυφο μόνο διεύθυνση - $\sigma(x, y, z) = \sigma(0, 0, z) = \sigma(z)$. Έστω $\omega = 2 \times 10^4$. Τότε,

- για $\sigma(z) = 0.001$ S/m (1000 Ωm) $\Rightarrow k^2 \approx 4 \times 10^{-8} + j2.5 \times 10^{-5}$
- για $\sigma(z) = 1000$ S/m (0,001 Ωm) $\Rightarrow k^2 \approx 4 \times 10^{-8} + j25$

Όπως αποδεικνύεται, τα ρεύματα μετατόπισης είναι πολύ ασθενή, έως σχεδόν αμελητέα σε σύγκριση με τα ρεύματα αγωγιμότητας και δυνάμει να τα παραλείψουμε, θεωρώντας το ΗΜ πεδίο ευρισκόμενο σε *σχεδόν-στάσιμη ηλεκτροδυναμική κατάσταση*, όπου μόνον τα ρεύματα αγωγιμότητας έχουν σημασία και η μετατόπιση δεν προκαλεί μεταβολές φάσης. *Επίσης είναι προφανές ότι μόνο σε αγωγίμους γεωλογικούς σχηματισμούς λαμβάνουν τα ρεύματα αγωγιμότητας αξιόλογες τιμές.* Από την παρατήρηση αυτή συνάγεται η θεμελιώδης ιδιότητα των ΗΜ μεθόδων διασκόπησης, ότι έχουν δηλαδή εκ φύσεως καλύτερη δυνατότητα ανίχνευσης αγωγίμων, και όχι αντιιστατικών γεωλογικών δομών - τα ΗΜ πεδία αποσβένονται ελάχιστα εντός ύλης χαμηλής αγωγιμότητας, ενώ αντιθέτως αποσβένονται ταχύτατα εντός ύλης υψηλής αγωγιμότητας. Χωρίς ρεύματα μετατόπισης οι εξισώσεις (3) ανάγονται στις *ανυσματικές εξισώσεις διάχυσης Helmholtz*:

$\nabla^2 F - \mu\sigma(x, y, z) \frac{dF}{dt} = 0$	$\nabla^2 F - i\omega\mu\sigma(x, y, z)F = 0$ $k^2 = i\omega\mu\sigma(x, y, z)$
---	--

(4)

Οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι διασκόπησης βασίζονται στην επίλυση των εξισώσεων (3) ή (4), με ορισκές ουθικές *Dirichlet* μεταξύ των δομικών τεμαχίων της γεωηλεκτρικής δομής και *Neumann* στο όριο Γης-ατμοσφαιράς.

Θεωρούμε τώρα τις σπουδαιότερες μορφές της συνάρτησης κατανομής αγωγιμότητας $\sigma(x, y, z)$, με εκτεταμένες εφαρμόγες στην ΗΜ διασκόπηση

Μονοδιάστατη (1Δ) γεωηλεκτρική δομή ορίζεται η περίπτωση μεταβολής της αγωγιμότητας κατά την κατακόρυφο μόνο διεύθυνση, με συνάρτηση μεταβολής $\sigma(z)$, η οποία σε περίπτωση ασυνεχούς μεταβολής της αγωγιμότητας αποτελείται από σωρό στρωμάτων διαφορετικών ηλεκτρικών ιδιοτήτων. Το αμετάβλητο της αγωγιμότητας κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις εξαλείφει τις οριζόντιες μερικές χωρικές παραγώγους και ανάγει τις εξισώσεις (1) και (2) στα *αμοιβαίως ασύζευκτα ζεύγη*

$$dE_x/dz = -i\omega\mu_0 H_y \quad dH_x/dz = \sigma(z)E_x \quad (5a)$$

$$dE_y/dz = i\omega\mu_0 H_x \quad dH_y/dz = -\sigma(z)E_y \quad (5b)$$

περιγράφοντα τον *εγκάρσιο ηλεκτρομαγνητικό τρόπο* διάδοσης, έκαστο των οποίων οδηγεί στην *ομογενή μονόμετρο εξίσωση Helmholtz*

$$\frac{d^2 F(z, \omega)}{dz^2} - k^2 F(z, \omega) = 0, \quad \text{με λύσεις της μορφής} \quad F(z, \omega) = A \exp(-kz) + B \exp(+kz)$$

όπου A και B σταθερές και ο εκθέτης έχει πρόσημο αρνητικό (-) για διάδοση κατά τον άξονα $+z$ (πρός τα κάτω). Το αριστερό σκέλος του αθροίσματος $F(z, \omega)$ αντιπροσωπεύει ένα κατακορύφως κατερχόμενο και το αριστερό ένα κατακορύφως ανερχόμενο κύμα.

Ομογενής Ημιχώρος. Η διδακτικότερη ίσως περίπτωση 1Δ διάδοσης ΗΜ κυμάτων λαμβάνει χώρα εντός *ομογενούς κάτω ημιχώρου*, ο οποίος απαρτίζεται από ένα μόνο δομικό τέμαχος σταθερής

αγωγιμότητας και απείρου βάθους ($\sigma(z)=\sigma$). Θεωρώντας ότι το ΗΜ πεδίο διαδίδεται και εξασθενεί κατά τον $+z$ άξονα, θέτουμε $B=0$, εφόσον δεν υπάρχει ανερχόμενο (σκεδασμένο) κύμα. Τότε $E(\omega, z) = \exp(-kz)$ και από εκάστη των εξισώσεων (5) λαμβάνομε

$$E(\omega, z) = E_0 \exp(-kz), \quad H(\omega, z) = \frac{k}{i\omega\mu} \exp(-kz) = H_0 \exp(-kz), \quad k = \frac{1}{\delta}(1-i) = \sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}}(1-i)$$

όπου $E_0(\omega)$ και $H_0(\omega)$ είναι το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο στην επιφάνεια του ημιχώρου αντιστοιχώς. Επιπλέον, ο λόγος

$$\zeta(\omega, z) = \frac{E(\omega, z)}{H(\omega, z)} = \frac{i\omega\mu}{k} = \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}(1+i) = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}} \exp(i\frac{\pi}{4})$$

παριστά την *χαρακτηριστική εμπέδηση* του ημιχώρου.

Η φυσική έννοια των ανωτέρω είναι ότι εντός του ημιχώρου, τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία βρίσκονται σε σταθερή χρονική υστέρηση (*διαφορά φάσης*) ίση προς $\pi/4$, ενώ αποσβένονται υφιστάμενα ελάττωση πλάτους κατά $1/e$ στο βάθος $\delta = (2/\mu\sigma\omega)^{1/2}$ (ονομαζόμενο *επιδερμικό βάθος*). Για σταθερή γωνιακή συχνότητα ω , στην περίπτωση αντιστατικών δομών, (μικρές τιμές σ , μεγάλες τιμές δ), τα πεδία εισδύουν σε μεγάλο βάθος χωρίς αξιόλογη εξασθένηση στην περίπτωση αγωγίμων δομών, (μεγάλες τιμές σ , μικρές τιμές δ), το μαγνητικό πεδίο αποσβένεται ταχέως χωρίς να εισδύσει βαθειά. Για την περίπτωση του πεδίου χρόνου το ΗΜ πεδίο δίδεται από τις σχέσεις

$$H(t, z) = \frac{1}{2} - \operatorname{erf}\left(\frac{z\sqrt{\mu\sigma}\cdot 2t}{\sqrt{2}}\right), \quad E(t, z) = \frac{\sqrt{2}}{\sigma\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\mu\sigma}{2t} \exp\left[-\frac{z^2(\mu\sigma\cdot 2t)}{2}\right]$$

Ο παράγων $d = (2t/\sigma\mu)^{1/2}$ με διαστάσεις μήκους ονομάζεται *βάθος διάχυσης*. Αντιπροσωπεύει το βάθος στο οποίο το πεδίο λαμβάνει την μέγιστη τιμή για δοθέντα χρόνο. Η ταχύτητα διάδοσης της μέγιστης τιμής του πεδίου δίδεται από την σχέση $v = 1/(2\sigma\mu t)^{1/2}$. Η αναλογία μεταξύ επιδερμικού βάθους και βάθους διάχυσης είναι προφανής: στο πεδίο συχνοτήτων, η διεύθυνση είναι ανάλογη του $1/\sqrt{\omega}$, ενώ στο πεδίο χρόνου είναι ανάλογη της \sqrt{t} .

Οριζοντίως ομογενής, κατακορύφως ανισοτροπικός ημιχώρος. Στην γενικότερη περίπτωση κατακορύφης μεταβολής της αγωγιμότητας, ο λόγος

$$Z(\omega, z) = E_x(\omega, z)/H_y(\omega, z) = -E_y(\omega, z)/H_x(\omega, z)$$

εκφράζει την *εμπέδηση* του μέσου διάδοσης και αποτελεί συνάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του. Συνιστά μιγαδικό μονόμετρο μέγεθος που εκφράζει τον βαθμό απόσβεσης του πηγαιού μαγνητικού πεδίου συχνότητας ω , στο βάθος z , καθώς τούτο μεταφέρει την ενέργειά του στο ηλεκτρικό πεδίο (είναι δηλ. μια *συνάρτηση μεταφοράς ενεργείας*). Η εμπέδηση πεπερασμένων αγωγών προκαλεί καθυστέρηση στην ταχύτητα διάδοσης των ΗΜ πεδίων, το ποσό της οποίας πληροφορούμεθα από το φανταστικό μέρος της και αριθμητικώς εκφράζομε με την συνάρτηση φάσης

$$\psi(\omega, z) = \tan^{-1}[\operatorname{Im}\{Z(\omega, z)\}/\operatorname{Re}\{Z(\omega, z)\}]$$

Εντός αγωγίμου ημιχώρου, $\psi = \pi/4$. Σε κάθε άλλο τύπο 1Λ δομής, τα φαινόμενα καθυστέρησης είναι εντονότερα σε υλικά υψηλής παρά χαμηλής αγωγιμότητας και συνεπώς η φάση θά στρέφεται προς $\pi/2$ όταν τα πεδία διέρχονται από α συνεχείες χαμηλής-υψηλής αγωγιμότητας και προς 0 αντίθετως. Στην επιφάνεια της γης η εμπέδηση έχει πλάτος που εξαρτάται τόσο από την συχνότητα όσο και από την υποκείμενη γεωηλεκτρική δομή, και φάση η οποία κυμαίνεται εκατέρωθεν των $\pi/4$. Η φαινομένη ειδική αντίσταση της γεωηλεκτρικής δομής συναρτάται από την φαινομένη εμπέδηση μέσω της σχέσης

$$\rho_a(\omega, z) = (\omega\mu_0)^{-1}|Z(\omega, z)|^2$$

Το ζεύγος παραμέτρων $\rho_a(\omega)$ και $\psi(\omega)$ παρέχει ισοδύναμη πληροφορία με αυτήν της εμπέδησης $Z(\omega)$, και χρησιμοποιείται συνήθως αντ' αυτής για ποσοτική ανάλυση της γεωηλεκτρικής δομής.

Ιδιόσημη (2Λ) γεωηλεκτρική δομή είναι η σημαντική εκείνη υποπερίπτωση, κατά την οποία ηλεκτρική ασυνέχεια υφίσταται κατά μήκος ενός μόνον των οριζοντίων αξόνων. Έτσι υπονοείται ότι η πλευρική ανομοιογένεια της αγωγιμότητας προκαλείται από επιμήκη σώματα ή δομές. Εάν η παράταξη της ασυνέχειας συμπίπτει με τον άξονα x του γεωηλεκτρικού συστήματος συντεταγμένων, η συνάρτηση μεταβολής της ειδικής αγωγιμότητας λαμβάνει την μορφή $\sigma(0, y, z)$, οι αντίστοιχες μερικές παράγωγοι των πεδίων ως προς x μηδενίζονται και από τις εξισώσεις (1) και (2) προκύπτει ότι το ΗΜ πεδίο εντός της Γης *διαδίδεται κατά δύο ανεξαρτήτους τρόπους* οι οποίοι διέπονται από:

	Εγκάρσιος Ηλεκτρικός (ΕΗ)	Εγκάρσιος Μαγνητικός (ΕΜ)	
(6α1)	$\partial H_x / \partial y - \partial H_y / \partial z = \sigma E_x$	$\partial E_z / \partial y - \partial E_y / \partial z = i\omega\mu_0 H_x$	(6β1)
(6α2)	$\partial E_x / \partial z = -i\omega\mu_0 H_y$	$\partial H_x / \partial z = \sigma E_y$	(6β2)
(6α3)	$\partial E_x / \partial y = i\omega\mu_0 H_z$	$\partial H_x / \partial y = -\sigma E_z$	(6β3)
	$E=[E_x, 0, 0]$ και $H=[0, H_y, H_z]$	$E=[0, E_y, E_z]$ και $H=[H_x, 0, 0]$	

Εκάστη εκ των (6α) και (6β) κατασκευάζει μία ανωματική εξίσωση Helmholtz της μορφής (4), περιγράφουσα την διάδοση των ΗΜ κυμάτων στο 2Λ μέσο. Από τις (6α2) και (6β2) παρατηρείται επίσης, ότι εκάστη οριζόντια συνιστώσα του ηλεκτρικού πεδίου E ζεύγνεται με μία μόνον εγκάρσια οριζόντια συνιστώσα του μαγνητικού πεδίου. Κατ' αναλογία προς την 1Λ περίπτωση, οι λόγοι

$$Z_{xy}(\omega, z) = E_x(\omega, z) / H_y(\omega, z) \quad \text{και} \quad Z_{yx}(\omega, z) = -E_y(\omega, z) / H_x(\omega, z)$$

(όπου $Z_{xy} \neq Z_{yx}$), παριστούν την εμπέδηση του H_y κατά την διεύθυνση x - και την εμπέδηση του H_x κατά την διεύθυνση y - αντιστοίχως. Οι προσανατολισμένες χαρακτηριστικές εμπέδησεις Z_{xy} και Z_{yx} λαμβάνονται, είτε με απ' ευθείας μετρήσεις κατά τους ΕΗ ή ΕΜ τρόπους, εάν η παράταξη της δομής είναι γνωστή³, είτε με αναλυτικές μαθηματικές τεχνικές, από μετρήσεις διευθετημένες τυχαία ως προς την παράταξη της δομής. Επιδέχονται φυσική ερμηνεία ανάλογη της μονόμετρης (1Α) εμπέδησης και μετασχηματίζονται στις προσανατολισμένες συναρτήσεις ειδικής αντίστασης και φάσης (ρ_{xy} , ψ_{xy}) και (ρ_{yx} , ψ_{yx}), οι οποίες χρησιμοποιούνται συνήθως για ποσοτική ανάλυση της γεωηλεκτρικής δομής.

Ταξινόμηση των ΗΜ μεθόδων διασκόπησης. Η κοινότερη ταξινόμηση των ΗΜ μεθόδων διασκόπησης βασίζεται στον τρόπο δημιουργίας της διαταραχής (πηγασίο ή πρωτεύον πεδίο) η οποία προκαλεί την απόκριση της Γης (δηλ. τα επαγωγικά φαινόμενα). Έτσι έχουμε ΗΜ μεθόδους φυσικής πηγής και ΗΜ μεθόδους ελεγχόμενης ή τεχνητής πηγής. Αυτές ανασκοπούνται διεξοδικότερα στα κατωτέρω.

1. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ (ΗΜΦΠ)

Τα φυσικά πηγαιά ΗΜ πεδία οφείλονται σε φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα:

1. Στον περιβάλλοντα την Γη διαστημικό χώρο (Μαγνητόσφαιρα και Ιονόσφαιρα) για συχνότητες $f < 4\text{Hz}$, γεννώνται δε από την αλληλεπίδραση του ηλιακού ανέμου με το μαγνητικό πεδίο της Γης.
 2. Στην κοιλότητα (κυματοδηγό) Ιονοσφαιρας-Γης για συχνότητες $6\text{Hz} < f < \text{μερικών kHz}$, γεννώνται δε από ηλεκτρικές εκκενώσεις εντός της ατμοσφαιρας (συντονισμοί Schumann).
- Θεμελιώδης ιδιότητα όλων των πηγαιών φυσικών ΗΜ πεδίων είναι ότι πλησίον της επιφανείας της Γης λαμβάνουν την απλούστατη μορφή κατακορύφως διαδιδόμενων οριζοντιών επιπέδων κυμάτων*

$$H(\omega, z) = H_0 \exp(i\omega t - kz).$$

Στα επόμενα κεφάλαια 1.1-1.4 θα παρατεθεί συνοπτική περιγραφή των ΗΜΦΠ. Για λεπτομέρειες, ο ενδιαφερόμενος ας ανατρέξει στον διδακτικότατο Rokityansky (1982). Ο έχων ισχυρό μαθηματικό υπόβαθρο ας αναφερθεί στους Berdichefsky and Zhdanov (1984). Τέλος, μία ευρεία συλλογή εργασιών καλυπτούσων όλο το φάσμα μαγνητοτελλουρικών εφαρμογών υπάρχει στον Vozoff (1985).

1.1. Μαγνητοτελλουρικές (ΜΤ) Μέθοδοι. Οι ΜΤ μέθοδοι βασίζονται στην επαγωγική σχέση μεταξύ των οριζοντιών εγκάρσιων συνιστωσών του φυσικού ΗΜ πεδίου και διαφοροποιούνται ουσιαδώς, αναλόγως της θεωρούμενης συνάρτησης κατανομής αγωγιμότητας $\sigma(x, y, z)$.

1.1.1 Μονόμετρα ή μονοδιάστατη ΜΤ μέθοδος (Cagniard-Tikhonov). Στην περίπτωση οριζοντιώς ομογενούς και κατακορύφως ανισοτροπικής γεωηλεκτρικής δομής της μορφής $\sigma(z)$, η επαγωγική σχέση μεταξύ των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων περιγράφεται από τα απλουστευμένα ζεύγη εξισώσεων Maxwell (5α) και (5β) και η διάδοσή τους από την ομογενή εξίσωση Helmholtz. Συνδυάζοντας, βρίσκουμε ότι οι οριζόντιες συνιστώσες του ΗΜ πεδίου συνδέονται μέσω της εμπέδησης ως

³Και προκειμένου κυρίως περί ΗΜ μεθόδων ελεγχόμενης πηγής.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \frac{i\omega\mu_0}{k} \cdot \frac{A \exp(-kz) + B \exp(kz)}{A \exp(-kz) - B \exp(kz)} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} = Z(\omega, z) \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}$$

Όταν η γεωηλεκτρική δομή απαρτίζεται από σωρό στρωμάτων με διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες, η εμπέδηση του μέσου διάδοσης στην επιφάνεια δίδεται από την αναδρομική σχέση

$$Z_n(\omega) = \zeta_n(\omega) \frac{Z_{n+1}(\omega) + i\zeta_n(\omega) \cdot \tan(k_n h_n)}{\zeta_n(\omega) + iZ_{n+1}(\omega) \cdot \tan(k_n h_n)}$$

όπου $n \in [2, N]$ είναι το n -οστό εκ N στρωμάτων, $\zeta_n(\omega)$ η χαρακτηριστική του εμπέδηση, h_n το πάχος του και k_n ο κυματριθμός του ΗΜ πεδίου εντός αυτού.

Η απεικόνιση $Z(\omega) \rightarrow \{\psi(\omega, z), \rho_\alpha(\omega, z)\}$ παρέχει ένα ισοδύναμο ζεύγος φυσικών παραμέτρων που χρησιμοποιείται συνήθως αντί της εμπέδησης για ποσοτική ανάλυση της γεωηλεκτρικής δομής.

1.1.2 Τανυστική ή πολυδιάστατη MT μέθοδος. Η απλή μονόμετρη σχέση που συνδέει τα φυσικά ΗΜ πεδία όταν υπάρχει μόνον κατακόρυφη μεταβολή της αγωγιμότητας δεν υφίσταται στην περίπτωση παρουσίας πλευρικών ασυνεχειών.

Στην περίπτωση **διδιάστατης** γεωηλεκτρικής δομής και επί του γεωηλεκτρικού συστήματος συντεταγμένων, η (αντι)συμμετρία των χαρακτηριστικών εμπέδησεων (μακράν πεδίου) Z_{xy} και Z_{yx} δύναται να τεθεί υπό γεωμετρική μορφή ως:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ -Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (7)$$

Στην γενική περίπτωση όμως, οι μετρήσεις γίνονται ούτως, ώστε το **πειραματικό σύστημα συντεταγμένων** $\{x, y, z\}$ να έχει **τυχαία διεύθυνση ως προς το γεωηλεκτρικό**. Από τις (1) και (2) προκύπτει ότι **δέν επέρχεται φυσική απόδειξη των οριζοντίων συνιστωσών του ΗΜ πεδίου κατά τους άξονες των μετρήσεων**, οπότε η επαγωγική διεργασία περιγράφεται από την

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{E} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{H} \quad (8)$$

Ο πίνακας \mathbf{Z} είναι ο **τανυστής εμπέδησης**, ο οποίος μετασχηματίζει το πεδίο \mathbf{H} στο πεδίο \mathbf{E} .

Σε περιπτώσεις **τριδιάστατης (3Δ) κατανομής αγωγιμότητας** καμία μερική παράγωγος των πεδίων δεν μηδενίζεται προς καμία διεύθυνση του γεωηλεκτρικού συστήματος συντεταγμένων, με συνέπεια να είναι **αδύνατη η απλοποίηση των εξισώσεων Maxwell κατά το πρότυπο του ΕΗ και ΕΜ τρόπου των 2Δ γεωμετριών**. Η εξίσωση διάδοσης διατηρεί **πλήρη την ανωματική μορφή** (4) και στο πειραματικό σύστημα συντεταγμένων υπάρχουν **τρεις συνεξυγμένες συνιστώσες αμφοτέρων των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων**, η γραμμική σχέση των οποίων λαμβάνει την μορφή

$$E_j = Z_{jx}H_x + Z_{jy}H_y + Z_{jz}H_z, \quad j=x, y, z.$$

Παρατηρήσιμες είναι μόνον οι δύο πρώτες εξισώσεις, ($j=x, y$), ενώ η τρίτη ($j=z$) **απροσδιόριστη**, λόγω αδυναμίας μέτρησης της συνιστώσας E_z . **Εκ των δύο παρατηρήσιμων εξισώσεων πάλι, δύναται να ουσιαστεί ένας 2x2 τανυστής της μορφής (8), ο οποίος ουσιαστικά το χρήσιμο μέρος των 3Δ επαγωγικών διεργασιών.**

Ειδοποιός και θεμελιώδης ιδιότητα των MT τανυστών είναι ότι εμπεριέχουν ποσοτική και χωρική πληροφορία περί της μορφής και γεωμετρίας της συνάρτησης $\sigma(x, y, z)$ στην γειτονία του σημείου μέτρησης, για όλο το φάσμα των βαθών διασκόπησης. Η σύνθεση των χωρικών πληροφοριών εκ σημειακών μετρήσεων επιτρέπει την χαρτογράφηση της γεωηλεκτρικής δομής και τον διαχωρισμό των γεωηλεκτρικών δομικών τεμαχίων και πλευρικών ασυνεχειών. **Η χωροταξική ανάλυση της γεωηλεκτρικής δομής επιτυγχάνεται με μετασχηματισμό από το πειραματικό στο γεωηλεκτρικό σύστημα συντεταγμένων, συμφώνως προς την απεικόνιση $\{x, y, z\} \rightarrow \{x, y, z\}$, ούτως ώστε η μετρούμενη μορφή (8) μεταπέσει στην (7), και να ταυτιστεί με τις χαρακτηριστικές (προσανατολισμένες) εμπέδησεις της γεωηλεκτρικής δομής.** Εδώ θα συνοψίσουμε την γενικευμένη θεωρία μετασχηματισμών του παρατηρήσιμου (χρήσιμου) \mathbf{Z} , αναπτυσθέντα προοφάτως στον Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών (π.χ. Tzanis, 1992).

Στην γενική περίπτωση 3Δ γεωηλεκτρικών γεωμετριών, η αναγωγή του παρατηρήσιμου Z σε σχέση της μορφής (7) απαιτεί περιστροφές σε τριδιάστατο χώρο, εφόσον το οριζόντιο ηλεκτρικό πεδίο E μετράται *συνεξυμμένο* προς το κατακόρυφο μαγνητικό πεδίο H_z και αντιστρόφως. Επειδή όμως ο Z είναι 2x2 μιγαδικός πίνακας, η περιστροφή επιτυγχάνεται μόνον εάν πραγματοποιηθεί σε 2Δ μιγαδικό χώρο, *ισομορφικό του καρτεσιανού πειραματικού συστήματος* και είναι ατελής, περιλαμβάνει δηλαδή περιστροφές περί τον κατακόρυφο και ενός εκ των οριζοντίων αξόνων. Ο πλέον ενδεδειγμένος μιγαδικός χώρος εκφράζεται από την διανυσματική βάση

$$T = \sigma_1 x + \sigma_2 y + \sigma_3 z = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{vmatrix} x + \begin{vmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix} y + \begin{vmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{vmatrix} z = \begin{vmatrix} x & y - iz \\ y + iz & -x \end{vmatrix}$$

που ορίζουν οι σπινωρικοί τελεστές Pauli σ_j σε δεξιόστροφο σύστημα συντεταγμένων. Ο κατάλληλος τελεστής περιστροφής επιφέρει περιστροφές περί τον $y \pm iz$ άξονα του πειραματικού συστήματος, έχει δε την μορφή

$$U_{zy}(\Theta, \Phi) = \begin{vmatrix} \cos \Theta \cos \Phi + i \sin \Theta \sin \Phi & -\cos \Theta \sin \Phi - i \sin \Theta \cos \Phi \\ \cos \Theta \sin \Phi - i \sin \Theta \cos \Phi & \cos \Theta \cos \Phi - i \sin \Theta \sin \Phi \end{vmatrix} \quad (9)$$

και ανήκει στην Ειδική Μοναδιακή Ομάδα καθαρών περιστροφών $SU(2)$ των 2x2 μοναδιακών τελεστών, με Θ και Φ πραγματικές παραμέτρους (γωνίες περιστροφής). Αποδεικνύεται ότι η περιστροφή του παρατηρήσιμου Z καταλήγει στην απουσύνθεση

$$Z = U_E(\Theta_E, \Phi_E) \cdot M \cdot U_H^+(\Theta_H, \Phi_H) = U_E(\Theta_E, \Phi_E) \cdot \begin{vmatrix} 0 & \mu_1 \\ \mu_2 & 0 \end{vmatrix} \cdot U_H^+(\Theta_H, \Phi_H) \quad (10)$$

οπου + δηλώνει τον μιγαδικό σιζυγί πίνακα, η οποία μετασχηματίζει το πειραματικό σύστημα συντεταγμένων $\{x, y, z\}$ σε δύο καρτεσιανά (γεωηλεκτρικά) συστήματα οριζόμενα από τις γωνίες Θ_E, Φ_E και Θ_H, Φ_H αντιστοίχως, τα οποία φέρουν τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Η γωνία Φ αναπαριστά την αξιμουθιακή διεύθυνση δεξιόστροφως ως προς τον μαγνητικό βορρά και η γωνία Θ την έγκλιση, η οποία επιδέχεται και ισοδύναμη αναπαράσταση ως *ελλειπτικότητα* των οριζοντίων συνιστωσών των HM πεδίων στον πραγματικό καρτεσιανό χώρο ($=\tan \Theta$). M είναι αντιδιαγώνιος πίνακας περιέχων τις χαρακτηριστικές (ακραίες) τιμές μ_1 και μ_2 ($\mu_1 > \mu_2$) του ταυνοστή εμπέδησης, οι οποίες αναπαριστούν τις *γενικευμένες (3Δ) προσανατολισμένες εμπέδησεις*. Οι ηλεκτρικές και μαγνητικές συνιστώσες στα γεωηλεκτρικά συστήματα συντεταγμένων συνδέονται ως

$$E(\Theta_E, \Phi_E) = \mu_1 H(\Theta_H, \Phi_H + \pi/2) \quad \text{και} \quad E(\Theta_E, \Phi_E + \pi/2) = \mu_2 H(\Theta_H, \Phi_H)$$

και αποτελούν τις δύο *ιδιοκαταστάσεις* του ταυνοστή (μέγιστη και ελάχιστη αντιστοίχως).

- Για 3Δ κατανομές αναμένεται, στην γενική περίπτωση, $\Phi_E \neq \Phi_H$ και $\Theta_E \neq \Theta_H \neq 0$.
- Για 2Δ γεωηλεκτρικές γεωμετρίες ευκόλως διαπιστώνεται ότι $\Phi_E = \Phi_H$, $\Theta_E = \Theta_H = 0$, $\mu_1 = Z_{xy}$ και $\mu_2 = Z_{yx}$ (τα δύο γεωηλεκτρικά συστήματα ταυτίζονται και οριζοντιώνονται, ώστε να συμέσουν με τους ΕΗ και ΕΜ τρόπους).

1.2. Γεωμαγνητική Βαθοσκόπηση (ΓΒΣ). Τα εξ επαγωγής (πρωτεύοντα) ηλεκτρικά πεδία επάγουν, με την σειρά τους, δευτερεύοντα (ανώμαλα) μαγνητικά πεδία. *Επειδή η κατακόρυφη συνιστώσα των πηγαίων μαγνητικών πεδίων είναι αμελητέα, κάθε παρατηρήσιμη κατακόρυφη συνιστώσα του ολικού μαγνητικού πεδίου οφείλεται σε δευτερεύον ή ανώμαλο μαγνητικό πεδίο και παράγεται εντός της Γής.* Στην περίπτωση 1Δ δομής, $H_z = 0$.

Η *γεωμαγνητική βαθοσκόπηση*⁴ συνίσταται στην καταγραφή ανάλυση και ερμηνεία της σχέσης μεταξύ της κατακόρυφης και των οριζοντίων συνιστωσών του μαγνητικού πεδίου. Στην συνθετώτερη και μάλλον σπάνια περίπτωση, η λήψη των δεδομένων γίνεται με *σύγχρονες διατάξεις* τριαξονικών μαγνητομέτρων και η ανάλυση των δεδομένων ακολουθεί ειδικές μεθόδους ανάλυσης στοιχείων διατάξεων. Στην απλούστερη και συνηθέστερη περίπτωση που θα μας αναφέρουμε εδώ, η λήψη των δεδομένων γίνεται με σημειακές μετρήσεις, ταυτοχρόνως με την διεξαγωγή των μαγνητοτελλουρικών μετρήσεων. Η *απλή μαγνητική συνάρτηση μεταφοράς* (ΜΛΣΜ) ουσιαστικά αποτελεί ταυνοστή βαθμοί

⁴ Geomagnetic Deep Sounding. Στην ανατολική βιβλιογραφία η μέθοδος καταχωρείται ως Magnetic Variational Profiling.

1, απεικονίζοντα τις οριζόντιες συνιστώσες του ολικού (πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) μαγνητικού πεδίου επί της κατακόρυφης, σύμφωνα με την σχέση

$$H_z = X_{zx} H_x + X_{zy} H_y, \quad \mathbf{X} = [X_{zx} \quad X_{zy}]$$

Η κοινότερη μέθοδος αναπαράστασης των ΜΛΣΜ είναι το *επαγωγικό άνυσμα*, το οποίο αποτελείται από μέγεθος και αξιμούθιο οριζόντια την κάθετο επί την τοπική γεωηλεκτρική βαθμίδα παράγουσα κάποια ανώμαλη συγκεντρώση ρευμάτων. Λύο τέτοια ανύσματα ορίζονται για κατακόρυφα πεδία αποκρινόμενα εν φάσει (πραγματικό) και εκτός φάσεως (φανταστικό) με την οριζόντιο συνιστώσα, με την οποία το κατακόρυφο πεδίο εμφανίζει μέγιστη συμφωνία. Εάν x και y είναι δύο οριζόντια μοναδιαία ανύσματα στο γεωηλεκτρικό σύστημα $\{x, y, z\}$, τα επαγωγικά ανύσματα ορίζονται ως

$$G_R = \text{Re}(X_{zx})x + \text{Re}(X_{zy})y \quad \text{και} \quad G_I = \text{Im}(X_{zx})x + \text{Im}(X_{zy})y$$

από όπου είναι δυνατός ο προσδιορισμός του μεγέθους και του αξιμουθίου των (το αξιμουθιο ορίζεται δεξιότροφα ως προς τον μαγνητικό βορρά).

Στην περίπτωση 2Λ γεωηλεκτρικής δομής, η συνιστώσα H_z υπάρχει μόνον κατά τον ΕΗ τρόπο, οπότε θα ισχύει $X_{zx} = 0$ και $X_{zy} = H_z/H_y$ τα επαγωγικά ανύσματα θα είναι παράλληλα, ομόρροπα ή αντίρροπα και κανονικά (κάθετα) επί την παράταξη της γεωηλεκτρικής αουνεχείας.

Στην περίπτωση 3Λ δομών ισχύει $X_{zx} \neq 0$ και $X_{zy} \neq 0$. Τότε, τα επαγωγικά ανύσματα είναι μεν κανονικά επί την τοπική παράταξη της ανωμάλου συγκεντρώσεως ρευμάτων που παράγουν την H_z , αλλά όχι απαραίτητως και επί την πραγματική διεύθυνση της γεωηλεκτρικής δομής. Η ερμηνεία τους δεν είναι πάντοτε απλή και σε μερικές περιπτώσεις ο διαχωρισμός σε πραγματικό και φανταστικό μέρος δυνατόν να είναι τεχνητός. Στην περίπτωση αυτή καταφεύγουμε στην *ανάλυση μέγιστης απόκρισης* (ΑΜΑ), στοχεύουσα στον διαχωρισμό από την παρατηρηθείσα 3Λ ΜΛΣΜ του μέρους εκείνου, το οποίο είναι συμβατό με την 2Λ γεωηλεκτρική παραδοχή, ή, απλούστερα, του μέρους εκείνου που προσδιορίζει τις πρωτεύουσες γεωηλεκτρικές δομικές τάσεις στην γειτονία του σημείου παρατήρησης. Η ΑΜΑ πραγματοποιείται με περιστροφή της παρατηρηθείσας ΜΛΣΜ, μέχρις ότου εντοπισθεί το τοπικό γεωηλεκτρικό σύστημα συντεταγμένων. Η περιστροφή δυνατόν να πραγματοποιηθεί και με τελεστή της μορφής (9), απολήγουσα στην αλοσύνθεση

$$H_z = \mathbf{X}(\Theta, \Phi) \cdot \mathbf{H}(\Theta, \Phi), \quad \mathbf{X} = \mathbf{I} \cdot \mathbf{X}(\Theta, \Phi) \cdot \mathbf{U}^+(\Theta, \Phi) = |\mu \quad 0| \cdot \mathbf{U}^+(\Theta, \Phi).$$

Οι παράμετροι Θ και Φ ερμηνεύονται ακριβώς όπως και για τον ταυνοτή εμπέδησης. Το μέτρο $|\mathbf{X}| = |\mathbf{X}(\Theta, \Phi)|$ ονομάζεται *κάμψη* (upset) και είναι χρησιμώτατος δείκτης της ύπαρξης και μεγέθους πλευρικών μεταβολών της γεωηλεκτρικής δομής.

Απλές παραλλαγές της 1ΒΣ είναι οι μέθοδοι VLF (ελεγχόμενης πηγής) και LF-MAG (Audio-Frequency Magnetics) προκειμένου περί φυσικών πεδίων υψηλών συχνοτήτων.

1.3 Η Τελλουρική Μέθοδος, (π.χ. Yungul, 1966), είναι αμιγώς ηλεκτρική, χρησιμοποιούσα την *τελλουρική συνιστώσα των ΜΤ πεδίων* μόνον και βασισμένη στην σχέση μεταξύ των εραπτομενικών συνιστωσών του ηλεκτρικού πεδίου, μετρούμενων ταυτοχρόνως σε δύο διαφορετικές τοποθεσίες επί της επιφάνειας της Γης, εκ των οποίων η μία ονομάζεται *βάση* (B) και η άλλη *δουρυφόρος* (Λ). Οι εραπτομενικές συνιστώσες $\mathbf{E}_B = [E_{xB} \quad E_{yB}]^T$ και $\mathbf{E}_\Lambda = [E_{x\Lambda} \quad E_{y\Lambda}]^T$ συνδέονται με την σχέση

$$\mathbf{E}_\Lambda = \mathbf{T} \cdot \mathbf{E}_B \Leftrightarrow \begin{vmatrix} E_{x\Lambda} \\ E_{y\Lambda} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} T_{xx} & T_{xy} \\ T_{yx} & T_{yy} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} E_{xB} \\ E_{yB} \end{vmatrix}$$

Τ είναι ο *τελλουρικός ταυνοστής μεταφοράς (ΤΤΜ)* και προφανώς είναι συνάρτηση της γεωηλεκτρικής δομής κείμενης μεταξύ βάσης και δουρυφόρου τοποθεσιών. Ο ΤΤΜ εμπεριέχει πληροφορία περί της χωροταξίας της γεωηλεκτρικής δομής μεταξύ βάσης και δουρυφόρου, η οποία δύναται να αποληφθεί με χωρική ανάλυση κατά τα πρότυπα της αντίστοιχης ανάλυσης του ΜΤ ταυνοτή εμπέδησης Z , χρησιμοποιώντας τελεστή περιστροφής της μορφής (9). Ο ΤΤΜ εμπεριέχει επίσης πληροφορία περί του μεγέθους των αντιθέσεων αγωγιμότητας μεταξύ της βάσης και δουρυφόρου θέσεων, η οποία δύναται να αναλυθεί ποσοτικά (π.χ. Niceto et al, 1986).

Ως αναγνωριστικό βοήθημα στην γεωφυσική διασκόπηση, η τελλουρική μέθοδος προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα όπως δωρεάν σήματα, ταχύτητα και χαμηλό κόστος εκτέλεσης, πολύ φθηνά όργανα και μεθόδους ανάλυσης και βαθεία διεύθυνση χωρίς την χρήση μακρών καλωδιακών γραμμών. Για τον λόγο αυτό, παλαιότερα (πρό των μέσων της δεκαετίας '70), η μέθοδος έχαιρε πολλών

εφαρμογών, ιδίως στην Ευρώπη. Με την ανάπτυξη και διάδοση της κατά πολύ πληρέστερης ΜΓ μεθόδου, η τελλουρική βαθμιαίως εγκαταλείπεται. Ένα πρόσθετο πρόβλημα είναι ότι, οσάκις υπάρχουν γαλβανικές παραμορφώσεις του τελλουρικού πεδίου, η μέθοδος καθίσταται αναξιόπιστη αφού δεν υπάρχει τρόπος διόρθωσης ή αναγωγής των μετρήσεων (όπως π.χ. συμβαίνει με την ΜΓ μέθοδο).

1.4 Τελλουρική-Μαγνητοτελλουρική (T-MT) Μέθοδος, (π.χ. Hermance and Thayer, 1975), αποτελεί προσπάθεια συνδυασμού ενός ΜΤ σταθμού βάσης και πολλών περιφερειακών τελλουρικών σταθμών και βασίζεται στην παραδοχή ύπαρξης κοινού ομογενούς πηγαιού μαγνητικού πεδίου, υπεράνω όλων των σταθμών μετρήσεων, ΜΤ και τελλουρικών. Στην βάση (Β) μετρώνται όλες οι συνιστώσες του ΜΤ πεδίου $E_B = [E_{xB} \ E_{yB}]^T$ και $H_B = [H_{xB} \ H_{yB}]^I$, από τις οποίες υπολογίζεται ο τανυστής εμπέδησης Z_B . Στους δορυφόρους μετρώνται μόνο οι συνιστώσες του τελλουρικού πεδίου $E_A = [E_{xA} \ E_{yA}]^I$, και εξ αυτών ο τελλουρικός τανυστής μεταφοράς T . Τότε:

$$E_A = T \cdot E_B \Leftrightarrow E_A = T \cdot Z_B \cdot H_B \Leftrightarrow E_A = Z_M \cdot H_B$$

Z_M είναι ο τανυστής μεταφοράς εμπέδησης, μεσω του οποίου το δορυφόρο τελλουρικό πεδίο E_A αναφέρεται στο μαγνητικό πεδίο H_B . Εφόσον οι βασικές παραδοχές της μεθόδου ισχύουν, δηλαδή όταν $H_A = H_B$, τότε $Z_A = Z_M$. Η λοιπή ανάλυση χωρεί κατά τα πρότυπα της ΜΤ μεθόδου.

Η T-MT μέθοδος φαίνεται ότι προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, συνδυάζοντας την ποσοτική και ποιοτική πληρότητα της ΜΤ μεθόδου με μεγάλη ταχύτητα εκτέλεσης εργασιών υπαίθρου, λόγω των πολλαπλών περιφερειακών σταθμών. Η βασική της παραδοχή (ομογενές πηγαιό μαγνητικό πεδίο) είναι ισχυρή, ιδίως δε όταν η ΜΤ βάση και οι τελλουρικοί δορυφορικοί σταθμοί δεν απέχουν αλληλών μεγάλες αποστάσεις⁵. Η εφαρμογή της όμως απαιτεί σημαντική προσοχή και πεπειραμένο ερευνητή, διότι τα βασικά μειονεκτήματα της τελλουρικής μεθόδου δεν εξαλείφονται (π.χ. πιθανές γαλβανικές παραμορφώσεις) και, επιπλέον, εάν μεταξύ της βάσης και των δορυφόρων παράγονται ισχυρά δευτερεύοντα μαγνητικά πεδία, $H_A \neq H_B$ και η φυσική βάση της μεθόδου καταπίπτει. Για τους ανωτέρω λόγους, η T-MT μέθοδος δεν διεδόθη ευρέως και οι περισσότεροι ερευνητές προτίμησαν την αυξημένη αξιοπιστία της ΜΤ.

1.5. Εφαρμογές ΗΜΦΠ στον Ελληνικό χώρο

1.5.1 Ιστορική Αναδρομή.

Η χρήση ΗΜΦΠ εισήχθη στην Ελλάδα μόλις κατά την διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας με κύριους άξονες δραστηριότητας:

1. Λεπτομερή διερεύνηση της βαθείας δομής γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας του Ελληνικού Ηφαιστειακού Γόζου.
2. Εφαρμογές ΗΜ αναγνώρισης χώρου, όπου με τον όρο αυτό εννοείται η προσεγγιστική αξιολόγηση της γεωηλεκτρικής δομής, γενικών ιδιοτήτων του ΗΜ πεδίου και καθεστώτος θορύβου επιλεγμένων τοποθεσιών για ειδικούς σκοπούς, (π.χ. εγκατάσταση παρατηρητηρίων ΗΜ πεδίου).
3. Έρευνα πρόγνωσης σεισμών (νέα εφαρμογή υπό εξέλιξη).

1. Μελέτη γεωθερμικών πεδίων.

Η διερεύνηση του γεωθερμικού δυναμικού των Ελληνικών χωρών με ΗΜΦΠ άρχισε μόλις το 1985, στα πλαίσια του πολυεθνικού πολυκλαδικού προγράμματος ΕΝ-3G της ΕΟΚ. Περιελάμβανε μελέτη σκοπιμότητας (1985), ενώ οι εργασίες υπαίθρου για το κυρίως ερευνητικό έργο διεξήχθησαν το 1986 με συμμετοχή του Πανεπιστημίου του Εδιμβούργου (Ηνωμένο Βασίλειο), του Τεχνικού Πανεπιστημίου Braunschweig και του Ελευθέρου Πανεπιστημίου του Βερολίνου (Ο.Λ.Γερμανίας,) και του Γαλλικού Β.Ρ.Γ.Μ. (Ορλεάνη). Τα αποτελέσματά του προγράμματος παρουσιάζονται σε ειδικό τεύχος του περιοδικού *Geothermics, Special Issue, v18, No4, 1989*, και επίσης στους Galanopoulos et al, (1991).

Η ουστηματική και επισταμένη διερεύνηση των Ελληνικών γεωθερμικών πεδίων υψηλής ενθαλπίας με ΗΜΦΠ συνεχίστηκε από τον Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών

⁵ Υπενθυμίζεται ότι η έννοια του γραμμικού μεγέθους και απόστασης στον Ηλεκτρομαγνητισμό έχει κλασματική διάσταση και νοείται πάντοτε ως συνάρτηση του κυματισμού (ή του μήκους κύματος ή συχνότητας) του πεδίου.

(ΤΓΓ/ΠΑ), είτε σε συνεργασία με το Τμήμα Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου Εδμβούργου, είτε με όργανα ενοικιαζόμενα από το αυτό ίδρυμα και, πάντοτε με λογισμικό ανάλυσης και ερμηνείας που αναπτύχθηκε ιθαγενώς, στον ΤΓΓ/ΠΑ. Συγκεκριμένως:

- Στην ανατολική νήσο **Κω** διεκοπήθη η περιοχή Βολκανίων-Αντιμάχειας κατά τον Οκτώβριο-Νοέμβριο 1988, στα πλαίσια προγράμματος συγχρηματοδότησης της ΓΓΕΤ, με φορέα-χρήστη το Π.Μ.Ε. Αρκετά αποτελέσματα της υπ' όψη διασκόπησης έχουν ήδη συζητηθεί από τους Λάγιος (1989), Lagios et al (1989), Tzanis et al (1991) και Λάγιος (1992).
- Η διερεύνηση του γεωθερμικού πεδίου της νήσου **Νισύρου** επ' ωφελεία της Λιεύθουσης Εναλλακτικών Μορφών Ενέργειας/ΛΕΗ, πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις, (Ιούνιος 1989 και Μάιος 1991). Οι τεχνικές εκθέσεις, (Lagios and Dawes, 1989; Lagios et al. 1991), έχουν αξιολογηθεί από την Α.Ε.Μ.Ε ως εξόχως επιτυχείς. Ορισμένα αποτελέσματα έχουν συζητηθεί από τους Λάγιος (1991), Dawes and Lagios (1991), Tzanis et al (1992), Γζάνης και Λάγιος (1992).
- Η διερεύνηση των γεωθερμοπιθανών περιοχών **Σουσακίου Κορινθίας** και **χερσονήσου Μεθάνων** έλαβε χώρα το φθινόπωρο 1991, στα πλαίσια του προγράμματος 90ΠΣ5 της ΓΓΕΤ/ΥΒΕΤ, με φορέα χρήστη την Α.Ε.Μ.Ε/ΛΕΗ. Η πλήρης τεχνική έκθεση έχει ήδη παραδοθεί (Λάγιος, 1992). Μια πρώτη αναφορά στα αποτελέσματα της διασκόπησης του Σουσακίου έχει περιλαμβάνεται στα πρακτικά του 2ου Συνεδρίου Συλλόγου Γεωφυσικών Ελλάδας, (Tzanis and Lagios, 1993). Ορισμένα προκαταρκτικά πορίσματα εκ της χερσονήσου Μεθάνων έχουν ήδη δοθεί από τους Vohli et al (1992), ενώ υποτελέσματα προχωρημένου σταδίου ανάλυσης συνοψίζονται στην παρούσα.

2. ΗΜ αναγνώριση χώρου. Έργοιου τύπου εφαρμογές στην Ελλάδα συνεδέθησαν, κατά τον ένα ή τον άλλο τρόπο με την έρευνα πρόγνωσης σεισμών.

Η πρώτη μελέτη από το Τμήμα Σεισμολογίας του Πανεπιστημίου της Ουπάλα (Σουηδία), διενεργήθη σε δυο φάσεις (1983 και 1984) με χρηματοδότηση του Ελληνικού ΥΠΕΧΩΔΕ και του ΟΑΣΠ, προς υποστήριξη του δικτύου BAN (18 θέσεις). Τα αποτελέσματα αναφέρονται στους Chouliaras and Rasmussen, (1986). Μερικά πορίσματα αυτής της μελέτης, καταδεικνύοντα την χρησιμότητα εφαρμογής ΗΜΠΠ στην έρευνα πρόγνωσης σεισμών, θα μελετηθούν στους Chouliaras and Rasmussen, (1988).

Οι επόμενες εφαρμογές αναγνώρισης χώρου διενεργήθησαν μόλις το 1992, βάσει του προγράμματος ΕΡΟC-CΤ91 (ΕΟΚ),

α. Στην ΝΑ Θεσσαλία (περιοχή Βελεστίνου- Νέας Αγχιάλου- Βόλου), από τον ΤΓΓ/ΠΑ και την Γαλλική εταιρεία SPÉG⁶. Ορισμένα από τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης περιλαμβάνονται στα πρακτικά του 2ου Συνεδρίου Συλλόγου Γεωφυσικών Ελλάδας, (Tzanis et al., 1993).

β. Στην Μήλο και Κερατέα Αττικής από την SPÉG και τον Τομέα Φυσικής Στερεάς Κατάστασης του Πανεπιστημίου Αθηνών (ΤΦΣΚ/ΠΑ). Η ανάλυση των δεδομένων ευρίσκεται εν εξελίξει.

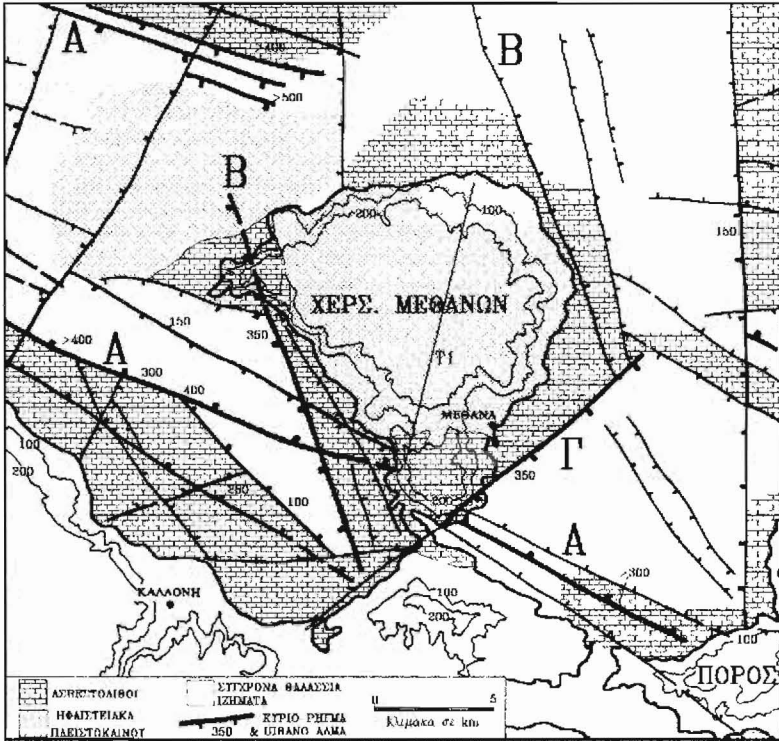
3. Έρευνα πρόγνωσης σεισμών. Στο πλαίσιο Ευρωπαϊκών (ΕΡΟC-CΤ91) και Ελληνικών εθνικών προγραμμάτων (ΟΑΣΠ), εγκαθίσταται δίκτυο παρακολούθησης του ΗΜ πεδίου στην περιοχή ΝΑ Θεσσαλίας με συνεργασία των Εργαστηρίων Γεωφυσικής Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, ΤΓΓ/ΠΑ, Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Αστεροσκοπείου Αθηνών και του Γαλλικού ΙΡG (Institut de Physique du Globe) εκ Παρισιών. Σκοπός του δικτύου είναι να διερευνήσει πρόδρομα και συν-σεισμικά ΗΜ φαινόμενα σχετιζόμενα με την σεισμικότητα της ΝΑ Θεσσαλίας.

Στο πλαίσιο των αυτών Ευρωπαϊκών προγραμμάτων, ο ΤΦΣΚ/ΠΑ προχωρεί επίσης στην εγκατάσταση ΗΜ παρατηρητηρίων σε άλλες δύο περιοχές, (Μήλο και Κερατέα), και μάλιστα στην άμεσο γειτονία λειτουργούντων σταθμών του δικτύου BAN.

1.5.2. Παράδειγμα-επίδειξη εφαρμογής στην χερσονήσο Μεθάνων.

Η χερσονήσος των Μεθάνων είναι μικρό Γεαρτογενές ηφαιστειακό συγκρότημα, οικοδομηθέν δι' εξωθήσεων βασιλικής-ανδρειατικής έως δακτυλικής λάβας υπό μορφή θόλων και ρευμάτων. Θεωρείται ότι αποτελεί την δικτικότερη επιφανειακή έκφραση του Ελληνικού Ηφαιστειακού Τόξου, έχοντας δράσει και κατά τους ιστορικούς χρόνους.

⁶ Societe pour la Protection de l' Environnement et la Geothermie, B.P. 73, 95101 Argenteuil Cedex, France.



Εικόνα 1. Τεκτονικός και απλοποιημένος γεωλογικός χάρτης της χερσονήσου Μεθάνων, από Παπανικολάου κ.ά. (1989) και Φυτίκα κ.ά. (1984). Α, Β και Γ οι μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες της περιοχής, με σημειωμένα άλματα ρηγιμάτων, όπου αυτά έχουν μετρηθεί. Τ1 είναι η ΜΤ τομή της εικόνας 3.

Το γεωλογικό και τεκτονικό περιβάλλον της χερσονήσου παρουσιάζεται σινοπτικός στην εικόνα 1, σχεδιασθείσα βάσει των Παπανικολάου κ.α. (1989) και Φυτίκα κ.α. (1984). Εμφαση δίδεται στα περιφερειακά τεκτονικά στοιχεία τα οποία απεικονίζονται λεπτομερώς, ενώ η κατανομή των λιθολογικών σχηματισμών παρουσιάζεται απλουστευμένη, με σκοπό να δείξει τον τρόπο εμφάνισης των ηφαιστειακών σχηματισμών μέσω των ιζηματογενών ανθρακικών πετρωμάτων (αοβεστόλιθοι Τριαδικού-Ηωκαίνου). Η περιφερειακή νεοτεκτονική δομή ελέγχεται από τρεις μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες διευθύνσεων Β-70°-Α (ζώνη Α), Β-20°-Α (ζώνη Β) και Β-50°-Α (ζώνη Γ), οι οποίες επίσης φαίνονται να οριοθετούν την πλευρική ανάπτυξη του ηφαιστειακού οικοδομήματος. Στην άμεση γειτονία της χερσονήσου, οι τρεις ζώνες εμφανίζονται με άλματα της τάξης 350m. Η σημαντικότερη εκ των τριών ζώνη Α πολλακώς εμφανίζεται άλματα >400-500m και συμβάλλει θεμελιωδώς στην νεοτεκτονική εξέλιξη της ευρύτερης περιοχής.

Οι πιθανότητες ύπαρξης αψθόνου ταμιευμένης γεωθερμικής ενέργειας στην χερσονήσο Μεθάνων εκ πρώτης όψεως φαίνονται μάλλον δυσοίωνες. Τα γεωχημικά και πετρολογικά χαρακτηριστικά των ηφαιστειακών πετρωμάτων μαρτυρούν ότι οι διεργασίες διαφοροποίησης του μάγματος έχουν λάβει χώρα σε μεγάλα βάθη, (πλησίον της βάσης της λιθσφαίρας, ή στο όριο λιθσφαίρας-μανδύα) και όχι πλησίον της επιφάνειας (Geotermica Italiana, 1984). Εν τούτοις, η νεαρή ηλικία της ηφαιστειακής δραστηριότητας, ακόμα και κατά τους ιστορικούς χρόνους, δεν αποκλείει την ύπαρξη κάποιας σημαντικής γεωθερμικής ανωμαλίας σε προσελάσιμα βάθη υπό την επιφάνεια της χερσονήσου: η έρευνα προς ανακάλυψη αυτής της ανωμαλίας παρουσιάζει αρκετά προβλήματα.

Η ερμηνεία των γεωχημικών αναλύσεων ρευστών εκ των θερμοπηγών των Μεθάνων δυσκολεύεται, ενίοτε μέχρις αποπροσανατολισμού, από την εντονώτατη ανάμιξη των γεωθερμικών ρευστών με

θαλάσσια ύδατα (Geotermica Italiana, 1984): ωρισμένες εξ αυτών εν τούτοις, υποδεικνύουν ότι τα επιφανειακά θερμά ρευστά πιθανόν να έχουν αρχική θερμοκρασία 100-120°C, υπό την προϋπόθεση ότι πριν εκφορτισθούν κυκλοφορούν εντός του ασβεστολιθικού υποστρώματος, ή, προέρχονται από ταμειυτήρα εντός ανθρακικών πετρωμάτων (Geotermica Italiana, 1984). Η ίδια πηγή κρίνει την ύπαρξη γεωθερμικών ταμειυτήρα αμφίβολη, αλλά δεν αποκλείει την συγκέντρωση θερμών ρευστών εντός ρηξίγενών δομών σε μεγάλο βάθος.

Πέραν τούτου, η χερσόνησος των Μεθάνων είναι γεωγραφικώς περιορισμένη και στενόχωρη, η δε τοπογραφία του ηφαιστειακού οικοδομήματος δύσβατη (έως άβατη σε ωρισμένα σημεία), δυσχεραίνουσα μέχρι απαγόρευσης την διεξαγωγή πολυκλαδικών γεωφυσικών ερευνών. Επιπλέον, δεν υπάρχουν ενδείξεις τεκτονικών δομών, (βυθίσματα, τάφροι), που θα μπορούσαν να χρησιμεύσουν ως ταμειυτήρες και να είναι ανιχνεύσιμες με βαρυτικές και μαγνητικές μεθόδους. Ενεργητικές σεισμικές μέθοδοι δεν είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν και οι σεισμολογικές είναι αμφίβολο ότι θα αποδώσουν, λόγω απουσίας σεισμικού θορύβου και/ή μικροσεισμών παραγομένων από το γεωθερμικό σύστημα· ίσως ορισμένες σεισμολογικές τεχνικές να έχουν δυνατότητα εκμετάλλευσης σημάτων εκ παραπλησίον σεισμών. Οι γεωηλεκτρικές (DC) μέθοδοι περιορίζονται δραστηκώτατα, είτε λόγω τοπογραφικών περιορισμών (Schumberger και Wenner), είτε λόγω γεωγραφικής στενότητας (π.χ. δίπολο-δίπολο, περιπλανώμενο δίπολο). Δεν είναι λοιπόν τυχαίο ότι στην περιοχή Μεθάνων μόνον γεωλογικές και γεωχημικές μελέτες έχουν γίνει, της γεωφυσικής περιοριζόμενης στην μέθοδο Ιδίου Λυναμικού.

Οι ΗΜΦΗ (ΜΤ και ΓΒΣ στην περίπτωση Μεθάνων), δίνονται να υπερβούν πολλούς από τους ανωτέρω περιορισμούς για τρεις κυρίως λόγους. Επιτυγχάνουν βαθιά διείσδυση από σημειακές μετρήσεις, από τις οποίες συνθέτουν την τριδιάστατη γεωηλεκτρική δομή σε μεγάλη έκταση και βάθος. Δεν απαιτούν ανάπτυξη μακρών καλωδιακών γραμμών και δύνανται να εκμεταλλεύονται τοπικές βελτιώσεις των τοπογραφικών συνθηκών. Γέλος, χρησιμοποιούν δωρεάν σήματα παρεχόμενα από την φύση και δεν χρειάζονται, ούτε περιορίζονται από διατάξεις παραγωγής σήματος: τα όργανα είναι σχετικά μικρά σε όγκο, ελαφρά και ευκίνητα.

Αποτελέσματα

Η χωροταξική ανάλυση της γεωηλεκτρικής δομής συνοψίζεται στις εικόνες 2α,β. Στην Εικόνα 2α παρουσιάζονται οι Μέγιστες Ιδιοκαταστάσεις των πειραματικών Τανυστών Εμπέδησης (ΜΙΤΕ), δηλαδή οι εξισώσεις $|E(\Theta_E, \Phi_E)| = |\mu_1 H(\Theta_H, \Phi_H + \pi/2)|$, ως μέσοι όροι υπεράνω του εύρους επιδερμικών βαθών 1-5km. Στην Εικόνα 2β παρουσιάζονται τα Ανεστραμμένα Πραγματικά Επαγωγικά Ανύσματα (ΑΠΕΑ), επίσης υπό μορφή μέσων όρων υπεράνω του εύρους επιδερμικών βαθών 1-5km. Το επιδερμικό βάθος υπελογισθή από την *δραστηκή, αξιμουθιακώς αμετάβλητη εμπέδηση* $Z_d(\omega) = (Z_{yx}(\omega) - Z_{xy}(\omega))/2$, η οποία ενέχει την φυσική έννοια εξομάλυνσης των προσανατολισμένων εμπέδησεων προς μία ισοδύναμο 1Α μεταβολή της γεωηλεκτρικής δομής συναρτήσει του βάθους. Λεδομένου ότι η γεωηλεκτρική δομή προκύπτει *σχεδόν* 2Α, (οι ελλειπτικότητες Θ_E, Θ_H των πεδίων είναι γενικώς πολύ μικρές και $\Phi_E \approx \Phi_H$), η χωροταξική ανάλυση ακολουθεί τους εξής απλούς κανόνες.

- Το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο $E(\Theta_E, \Phi_E)$ είναι *παράλληλο* προς την τοπική διεύθυνση της μέγιστης ειδικής αντίστασης (αυτό ισχύει για όλους τους τύπους κατανομών $\sigma(x,y,z)$, ανεξαιρέτως).

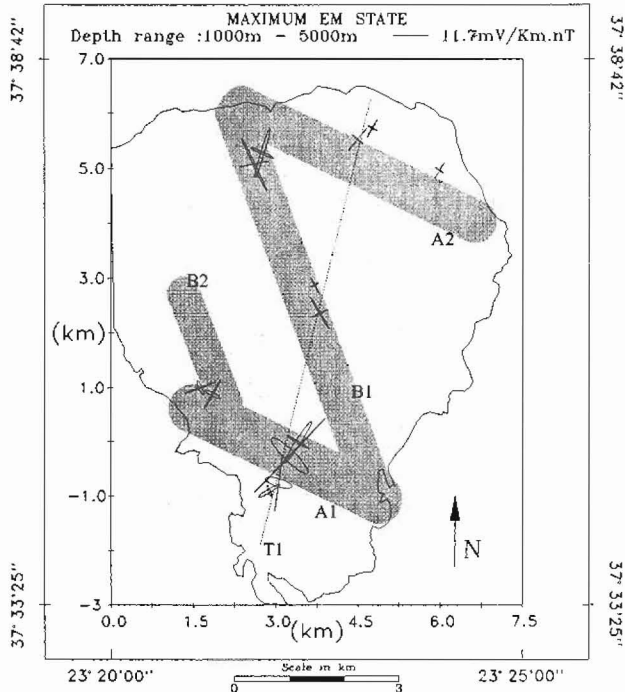
Εξ αυτού και των εξισώσεων Maxwell προκύπτει ότι:

- Στην αγωγήμη πλευρά μιας 2Α γεωηλεκτρικής α συνεχείας, οι ηλεκτρικοί άξονες των ΜΙΤΕ θα είναι παράλληλοι προς την παράταξη της (μ_1 αντιπροσωπεύει τον ΕΗ τρόπο διάδοσης).

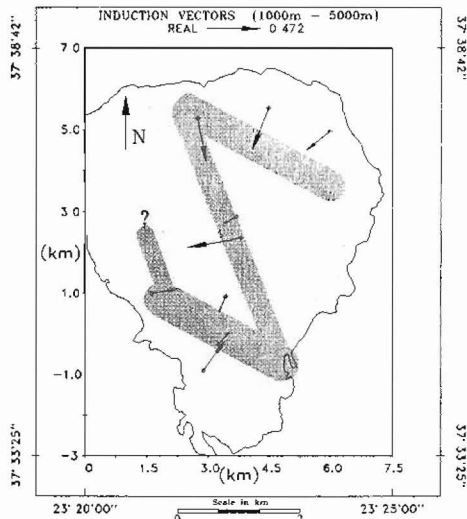
- Στην αντιστατική πλευρά μιας 2Α γεωηλεκτρικής α συνεχείας, οι ηλεκτρικοί άξονες των ΜΙΤΕ θα είναι ορθοί επί την παράταξη της (μ_1 αντιπροσωπεύει τον ΕΜ τρόπο διάδοσης).

- Επιπλέον, το ΑΠΕΑ είναι ορθογώνιο και φέρει επί τα κατάντι πλευρικής γεωηλεκτρικής βαθμίδας (τείνει προς τις συγκεντρώσεις ρευμάτων).

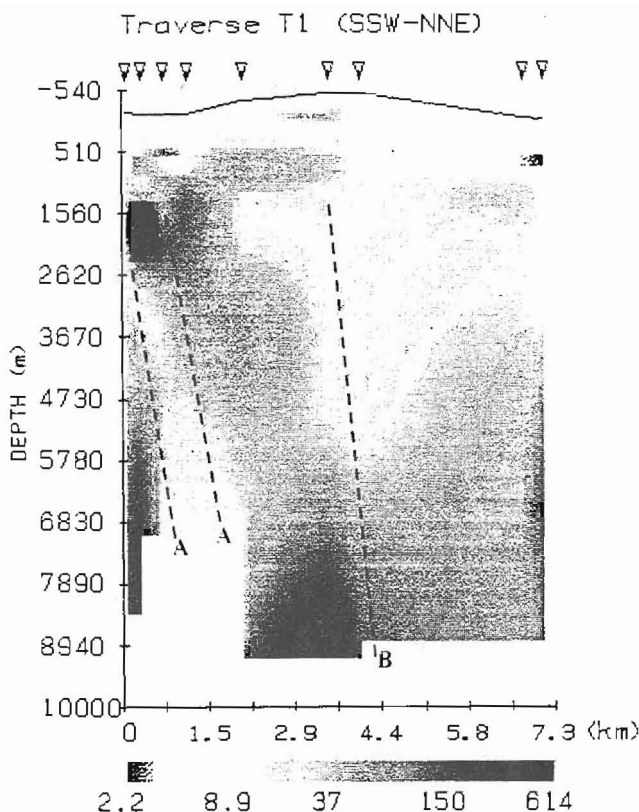
Τα πειραματικά δεδομένα επιτρέπουν τον μονοσήμαντο εντοπισμό της θέσης και διεύθυνσης γραμμικών αγωγίων ζωνών, οι οποίες στην Εικόνα 2α χαρτογραφούνται με ανοικτότεφρη μελανοσκίαση. Σε ένα τεκτονικώς ελεγχόμενο γεωθερμικό σύστημα όπως αυτό των Μεθάνων, οι βαθείς γραμμικοί αγωγοί αντιπροσωπεύουν διαρρηξίσεις μέσω των οποίων κυκλοφορούν γεωθερμικά ρευστά. Όπως είναι προφανές, οι εντοπισθέντες γραμμικοί αγωγοί παρατάσσονται παράλληλως προς τις περιφερειακές ρηξίγενεις ζώνες Α και Β και συνεπώς δύνανται να αποδοθούν σ' αυτές. Λόγω της σχετικώς ανεπαρκούς οριζοντιώδους κατανομής των μετρήσεων, (τοπογραφικές συνθήκες), μόνον η νοτιότερη ζώνη (Α1) περιορίζεται αμφιπλευρώς και μόνον από τα ΑΠΕΑ. Οι υπόλοιπες εντοπίζονται



Εικόνα 2α. Χωροταξική ανάλυση των τανυστών εμπέδησης στην χερσόνησο Μεδάνων (ΜΙΤΕ.). Οι παχιές ανοικτότερες γραμμές καταδεικνύουν συγχυθέντα ρήγματα. T1 είναι η τομή της Εικ. 3.



Εικόνα 2β. Χωροταξία των ανεστραμμένων πραγματικών επαγωγικών ανυσμάτων στην χερσόνησο Μεδάνων



Εικόνα 3. Κατακόρυφος κατανομή της ειδικής αντίστασης (Ωm), κατά μήκος της τομής T1 (NNΔ-BBA, βλέπε εικόνες 1 και 2α).

μεν με βεβαιότητα, αλλά μόνον από μονόπλευρες παρατηρήσεις. Η ζώνη Γ δεν εμφανίζεται επί της χερσονήσου, τουλάχιστον στην άμεση γειτονία των μετρήσεων.

Ποσοτική εκτίμηση της κατακόρυφης κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας παρουσιάζεται στην Εικόνα 3, κατά μήκος της τομής T1, η οποία προέκυψε από σύνθεση 1Δ αντιστροφών της $Z_{\delta}(\omega)$ με τον αλγόριθμο των Constable et al (1987), ο οποίος εγγυάται ότι η πραγματική γεωηλεκτρική δομή θα εμπεριέχει, τουλάχιστον όλους τους χαρακτήρες που εμφανίζονται στην τελική (αντίστροφη) λύση και οπωσδήποτε όχι λιγότερους. Το νότιο ήμισυ της τομής T1, από 0km έως 4.4km, παρουσιάζει ικανοποιητική πυκνότητα παρατηρήσεων και ερμηνεύεται με ευκολία. Διακρίνονται καθαρά οι μεγάλες διαρρήξεις (A1 και B1) που εντοπίστηκαν από την χωροταξική ανάλυση, ως υποκατακόρυφες αγωγίμες ($<20\Omega\text{m}$) ζώνες, κατερχόμενες μέχρι βάθους 9km τουλάχιστον, με φαινόμενη κλίση συμβατή προς την αναμενόμενη για κανονικές διαρρήξεις. Είναι επίσης αξιοσημείωτο ότι οι δύο διαρρήξεις πιθανώς επικοινωνούν σε βάθος $>7\text{km}$. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο αγωγίμος θύλακας περι το κέντρο της χερσονήσου, σε βάθος 1200-2500m. Πιθανότατα πρόκειται για ζώνη(ες) οριζοντίου και κατακόρυφου κυκλοφορίας ρευστών, οι οποία ίσως ενέχει θέση γεωθερμικού ταμειυτήρα. Στο βόρειο ήμισυ της T1, από 4,5km έως 7.3km, η πυκνότητα μετρήσεων είναι ανεπαρκής εξ αιτίας της αβάτου τοπογραφίας. Αποτελέσματα υπάρχουν μόνον για τις δύο βορειώτατες θέσεις μετρήσεων, με συνέπεια να εκφράζεται αδυναμία ικανοποιητικής ερμηνείας της γεωηλεκτρικής δομής για το διάστημα 4.5-6.5km και περιορισμένες δυνατότητες για το υπόλοιπο, μέχρι τέλους της τομής.

Συνοψίζοντας τα ανωτέρω, σημειώνεται ότι στην χερσόνησο Μεθάνων η ΜΤ και Ι ΒΣ μέθοδοι:

- Επεβεβαίωσαν τον έλεγχο της περιφερειακής ρηξιγενούς τεκτονικής επί του γεωθερμικού συστήματος και τοποθέτησαν τα ίχνη ρηξιγενών ζωνών, εκεί όπου η γεωλογική ή δομορφική επισκόπηση δεν είχε την δυνατότητα να διακρίνει (δηλαδή συνέβαλλαν στην τεκτονική ανάλυση της περιοχής).
- Επεβεβαίωσαν τις προβλέψεις της Geotermica Italiana (1984), εντοπίσασες κυκλοφορία ρευστών εντός ρηξιγενών ζωνών σε μεγάλα βάθη, ταυτοχρόνως απεικονίσασες την οριζόντια χωροθέτηση και την κατακόρυφη ανάπτυξη των. Επιπλέον,
- Εντόπισαν σχετικούς εκτεταμένους θύλακα υψηλής αγωγιμότητας σε προσπελάσιμα βάθη περί το κέντρο της χερσόνησου, πιθανότατα αντιπροσωπεύοντα ζώνη κυκλοφορίας και/ή ταμίευσης ρευστών εντός εντόνως διερρηγμένου πετρώματος.

Εν κατακλείδι, σε μία περιοχή 'δύσκολη' όπως η χερσόνησος Μεθάνων, η ΗΜΦΙΙ εφαρμογή επέτυχε τους περισσότερους στόχους γεωθερμικής έρευνας, εντοπίσασα την θέση και το πιθανό μέγεθος των δομών κυκλοφορίας και ταμίευσης ρευστών για μεγάλο εύρος βαθμών. Στην συγκεκριμένη περιοχή, τέτοια αποτελέσματα δεν ήταν επιτεύξιμα με καμία άλλη μέθοδο. Το κόστος της παρουσιασθείσας εφαρμογής υπήρξε εξαιρετικώς χαμηλό. Για τις εργασίες υπαίθρου των χρησιμοποιηθεισών στην παρούσα 14 βαθσοσκοπήσεων, απαιτήθηκαν 2 οχήματα και 9 ημερολογιακές ημέρες από συνεργείο 3-4 ατόμων, (περί τις 40 ανθρώπινες-όπου 1 ανθρωποημέρα = 8 εργάσιμες ώρες), με συνολικό κόστος μικρότερο των δρχ 400Κ. Εάν συνοπολογισθεί η ενοίκιαση των οργάνων, το συνολικό κόστος ανέρχεται σε δρχ 1800Κ. Με το αυτόματο λογισμικό που έχει αναπτυχθεί στον Τομέα Γεωφυσικής Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, η επεξεργασία ανάλυση και ερμηνεία των μετρήσεων διήρκεσε περί τις 30 ανθρώπινες-όπου 1 ανθρωποημέρα = 8 εργάσιμες ώρες), με συνολικό κόστος είναι εξαιρετικώς υψηλός και ενοϊκός υπέρ των ΗΜΦΙΙ, ιδίως εάν συγκριθεί με το αντίστοιχο κόστος των άλλων μεθόδων έρευνας, οι περισσότερες εκ των οποίων ούτε καν διανοούνται να επιτύχουν λεπτομερή ανάλυση σε βάθη της τάξης 10km (ή μεγαλύτερα).

Π. ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗΣ ΠΗΓΗΣ (ΗΜΕΠ)

Για λεπτομερή μελέτη της φυσικής και μαθηματικής βάσης των ΗΜΕΠ, ο αναγνώστης ας ανατρέξει στον Wait (1982). Οι ΗΜΕΠ στηρίζονται στην έξης επαλληλία ΗΜ επαγωγικών διεργασιών:

- Τεχνητώς εκπεμπόμενο, μεταβαλλόμενο πηγαίο (πρωτεύον) μαγνητικό πεδίο, διεγείρει την αγωγή της Γ ή και επάγει (πρωτεύοντα) ηλεκτρικά ρεύματα εντός υπεδάφους ελειθέρου πηγών ή καταναλωτών ΗΜ ενεργείας.
- Τα εξ επαγωγής πρωτεύοντα ηλεκτρικά ρεύματα επάγουν, με την σειρά τους, δευτερεύοντα μαγνητικά πεδία λαμβανόμενα (μετρούμενα) από κατάλληλο δέκτη.
- Από την σχέση μεταξύ των πρωτεύοντων και δευτερεύοντων μαγνητικών πεδίων, οι ΗΜΕΠ αποπειράονται να προσδιορίσουν την γεωηλεκτρική δομή στην γειτονία των μετρήσεων.

Επειδή υπάρχουν πολλοί τρόποι εκπομπής του πρωτεύοντος πεδίου και προσδιορισμού της σχέσης πρωτεύοντος-δευτερεύοντος, έχουν αντιστοιχώς επινοηθεί πολλές τεχνικές και τεχνολογίες ΗΜΕΠ, εκάστη των οποίων βασίζεται σε διαφορετικό σύστημα πομπού και δέκτη. Για τον λόγο αυτό, στις ΗΜΕΠ η μέθοδος και το σύστημα είναι όροι αλληλένδετοι και σε πολλές περιπτώσεις συνώνυμοι.

Τα πηγαία πεδία δημιουργούνται συνήθως με διοχέτευση εναλλασσομένου ρεύματος ή ακολουθίας παλμών ρεύματος δια κυκλικών πηνίων, ή γειωμένων καλωδίων μεγάλου μήκους, ή ορθογωνίων βρόχων μεγάλων διαστάσεων (μερικών εκατοντάδων μέτρων). Οι ανωτέρω γεωμετρίες πομπών καθορίζουν την γεωμετρία του πρωτεύοντος και εξ αυτής τις θεμελιώδεις φυσικές ιδιότητες των ΗΜΕΠ και την διαφορά τους από τις ΗΜΦΙΙ.

- Όλες ανεξαιρέτως οι ΗΜΦΙΙ είναι μέθοδοι μακράν πεδίου, στις οποίες η πηγή ευρίσκεται σε απόσταση πολλαπλάσια του μήκους κύματος του πρωτεύοντος, το οποίο λαμβάνει την μορφή επιπέδου κύματος, περιγραφόμενο καλύτερα σε καρτεσιανές συντεταγμένες.
- Αντιθέτως, οι ΗΜΕΠ είναι μέθοδοι εγγύς πεδίου⁷, όπου η πηγή ευρίσκεται σε απόσταση συγκρίσιμη με το μήκος κύματος του πρωτεύοντος, το οποίο διατηρεί την αρχική διπολική ή πολυπολική γεωμετρία του και περιγράφεται καλύτερα σε σφαιρικές και/ή κυλινδρικές συντεταγμένες.

⁷ Εξάιρεση αποτελούν οι μέθοδοι VLF και AMT- Ελεγχόμενης Πηγής.

Η διαφορά είναι θεμελιώδης, διότι τα επίπεδα κύματα υπακούουν διαφορετικούς νόμους διάδοσης και απόσβεσης από κύματα με καμπυλόγραμμο μέτωπο. Για παράδειγμα, η πιο συνήθης μορφή ελεγχόμενης πηγής είναι μικρό κυκλικό πηλίο διαρρέσιμο από ρεύμα I , που συμπεριφέρεται σαν μαγνητικό δίπολο με ροπή $m = \mu_0 I a^2 n$, όπου a η ακτίνα του, και n ο αριθμός των σπειρών του. Το παραγόμενο μαγνητικό πεδίο, (ακτινικό και μεσημβρινό αντιστοίχως), δίδεται από:

$$H_r = \frac{m}{4\pi} \cdot \frac{2\cos\theta}{r^3} \quad \text{και} \quad H_\theta = \frac{m}{4\pi} \cdot \frac{\sin\theta}{r^3}$$

και εξασθενεί ανάλογα με τον αντίστροφο κύβο της απόστασης (r) από την πηγή. Για πηγές τύπου γειωμένων καλωδίων και βρόχων μεγάλων διαστάσεων, το πρωτεύον πεδίο το πεδίο εξασθενεί με πολύ βραδύτερο ρυθμό ($\propto 1/r$).

Ο δέκτης είναι συνήθως μικρό πηλίο ή υπερεισάθιτο μαγνητόμετρο.

Για ΗΜ συστήματα ελεγχόμενης πηγής κατατάσσονται αναλόγως του τρόπου δημιουργίας και λήψης του πεδίου, στα συστήματα *πεδίου συχνότητας* (HΣ) και στα συστήματα *πεδίου χρόνου* (HΧ). Στα συστήματα πεδίου συχνότητας το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο εκπέμπεται σαν συνεχής κυματομορφή καθορισμένης συχνότητας και το δευτερεύον πεδίο λαμβάνεται παρούσα του πρωτεύοντος. Στα συστήματα πεδίου χρόνου το πρωτεύον μαγνητικό πεδίο εκπέμπεται σαν ασυνεχής ακολουθία παλμών και η λήψη του δευτερεύοντος πραγματοποιείται απουσία του πρωτεύοντος (κατά το διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών παλμών).

Μια δευτερή μέθοδος ταξινόμησης βασίζεται στην τρόπο σύζευξης του πρωτεύοντος πεδίου με τον (αγωγίμο) στόχο της διασκόπησης και κατατάσσει τις ΗΜΕΠ σε *σταθερές και κινητές πηγής*. Στα πρώτα, ο πομπός παραμένει ακίνητος, διατηρώντας σταθερή την σύζευξη πηγής-υπεδάφους, ενώ ο δέκτης κινείται ερευνώντας τον περιβάλλοντα χώρο. Στα δεύτερα, η σύζευξη μεταξύ πομπού-υπεδάφους μεταβάλλεται σε κάθε σημείο μέτρησης (πομπός και δέκτης μετακινούνται).

Στοιχεία που χαρακτηρίζουν ένα ΗΜ σύστημα είναι:

- α. Η ισχύς του παραγόμενου πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου, η οποία πρέπει να είναι ικανή να διεγείρει επαρκώς τον στόχο, ώστε το δευτερεύον πεδίο να μετρηθεί με την απαιτούμενη ακρίβεια.
- β. Κατάλληλη περιοχή συχνότητας ή χρόνων καθυστέρησης, που να καλύπτουν το εύρος αγωγιμοτήτων των ερευνητών στόχων.
- γ. Η μέθοδος διαχείρισης σήματος/θορύβου και εργονομία του συστήματος.
- δ. Ο τρόπος διαχωρισμού του πρωτεύοντος-δευτερεύοντος πεδίου, ο οποίος γίνεται με πολλούς τρόπους, συνθέστεροι των οποίων είναι:

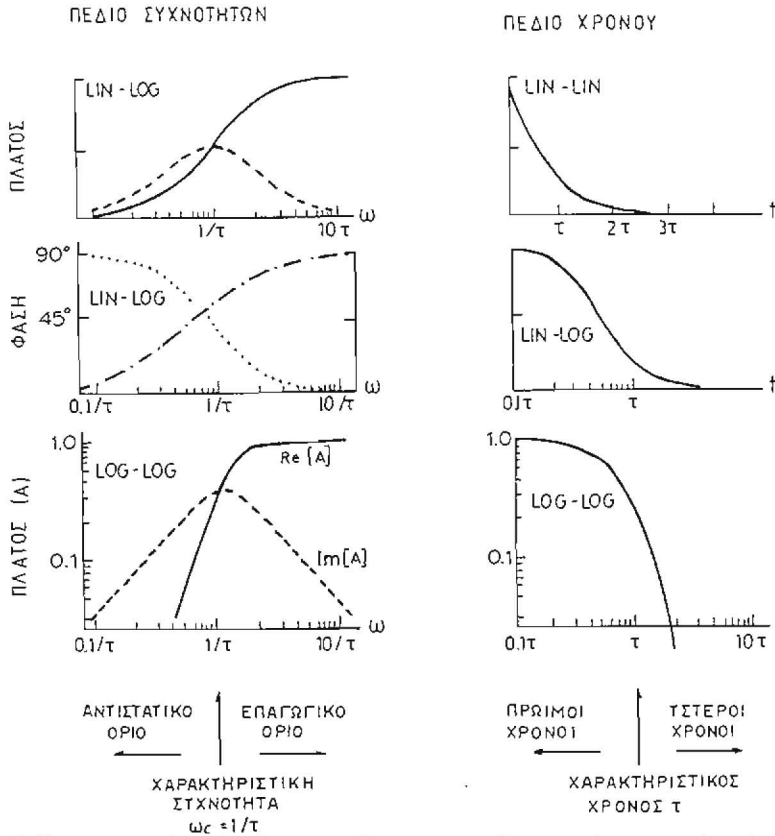
- *Διαχωρισμός φάσης*, κατά τον οποίο μετρώνται μόνον οι ανιστάσεις του δευτερεύοντος πεδίου που βρίσκονται εκτός φάσης (90°) με το πρωτεύον (συστήματα τύπου Slingram).
- *Διαχωρισμός χρόνου* όπου οι μετρήσεις γίνονται κατά την απουσία του πρωτεύοντος πεδίου, (Παροδικά-transient-συστήματα).
- Χρήση χαμηλής συχνότητας για τον υπολογισμό της ισχύος του πρωτεύοντος, (I_{uam}).
- *Διαχωρισμός πόλωσης*. Το δευτερεύον γίνεται αντιληπτό από την επίδραση του στα χαρακτηριστικά πόλωσης του πρωτεύοντος (γραμμικός πολωμένο πρωτεύον - ελλειπτικός πολωμένο ολικό πεδίο, π.χ. μέθοδος VLF).

Η μεγάλη ποικιλία του τρόπου διαχωρισμού των πεδίων είναι και η αιτία ύπαρξης μεγάλου αριθμού ΗΜΕΠ και ΗΜ συστημάτων. Επι πλέον, πολλά από τα συστήματα αυτά είναι σχεδιασμένα να καλύπτουν συγκεκριμένες εφαρμογές για εντοπισμό στόχων με καθορισμένο εύρος αγωγιμοτήτων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών.

Αναφορικά με τον τρόπο εκτέλεσης της διασκόπησης, οι μέθοδοι ΗΜΕΠ ταξινομούνται στις μεθόδους *οριζοντιογραφικής όδευσης* (*profiling*), όπου μελετάται η πλευρική κατανομή της γεωηλεκτρικής δομής και στις μεθόδους *βαθοσκόπησης* (*sounding*), όπου προσδιορίζεται η κατακόρυφη κατανομή της. Η διάκριση αυτή καθίσταται ασαφής όταν χρησιμοποιούνται συστήματα με μεγάλο εύρος χρόνου ή συχνότητας, τα οποία μπορούν καλύψουν και τους δυο τρόπους έρευνας.

11.1 Επαγωγή - Συνάρτηση απόκρισης

Η ύπαρξη αγωγίμο σχηματισμού γίνεται αντιληπτή από την ανίχνευση του δευτερεύοντος πεδίου, το οποίο έχει την ίδια συχνότητα, αλλά παρουσιάζει διαφορά φάσης με το πρωτεύον. Τα χαρακτηριστικά του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου γίνονται αντιληπτά αν θεωρήσουμε την



Σχήμα 4. Χαρακτηριστικά της συνόρτησης απόκρισης στο πεδίο συχνοτήτων και χρόνου (τραποποιηθέν από τους West and MacNae, 1982).

απλουστευμένη περίπτωση τριών συνεξυγμένων πηνίων RL (ωμικής και επαγωγικής αντίστασης), που παριστούν το σύστημα πομπού, αγωγού και δέκτη.

Το πηνίο 1 (ο πομπός), εκπέμπει πρωτεύον μαγνητικό πεδίο $H_p = \kappa I_p \sin(\omega t)$, όπου I_p η ένταση του ρεύματος που το διαρρέει και κ ο συντελεστής σύζευξης μεταξύ πηνίων 1 και 2 (πομπού-αγωγού)

Το πηνίο 2 (ο αγωγός-στόχος), δέχεται την επίδραση του πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου και αναπτύσσει ηλεκτρεγερτική δύναμη

$$E_s = -M dI_p/dt = -i\omega M H_p / \kappa,$$

όπου M ο συντελεστής αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των πηνίων 1 και 2, ενώ διαρρέεται από επαγωγικά ρεύματα

$$I_s = E_s / Z_s = E_s / (R_s + i\omega L_s)$$

όπου R_s και L_s είναι αντίστοιχα η ωμική και επαγωγική αντίστασή του.

Το πηνίο 3 (δέκτης) ανιχνεύει δευτερεύον πεδίο

$$H_s = \frac{-\kappa M H_p}{L_s} \cdot \frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2}$$

όπου κ συντελεστής εξαρτώμενος από την γεωμετρία του συστήματος και $Q = \omega L_s / R_s$ είναι γνωστή σαν παράμετρος απόκρισης. Για τα συστήματα πεδίου συχνοτήτων μετρούμενες παράμετροι στον δέκτη

είναι, συνήθως, ο λόγος H_s/H_p (ή ισοδυνάμως οι αντίστοιχες τάσεις E_s/E_p) και η διαφορά φάσης ψ μεταξύ H_s και H_p . Γενικά ισχύει

$$C = \frac{E_s}{E_p} = \frac{K_{CR}K_{IC}}{K_{IR}} \cdot \frac{Q^2 + iQ}{1 + Q^2}$$

όπου K_{CR} , K_{IC} , K_{IR} οι συντελεστές σύζευξης μεταξύ αγωγού-δέκτη, πομπού-αγωγού και πομπού-δέκτη αντίστοιχως. Η διαφορά φάσης είναι

$$\psi = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \frac{\omega L_s}{R_s} = \frac{\pi}{2} + \varphi$$

Η γωνία $\pi/2$ υπεισέρχεται από την επαγωγική σύζευξη των πηνίων και η πρόσθετη γωνία φ προορίζεται από τις ηλεκτρικές και γεωμετρικές ιδιότητες του αγωγού. Η φάση κυμαίνεται μεταξύ 90° και 180° για αγωγό μικρής και μεγάλης αγωγιμότητας αντίστοιχως. Η παράμετρος C είναι γνωστή σαν *συνάρτηση απόκρισης*. Στον ορισμό της, ο πρώτος όρος του γινομένου εκφράζει την γεωμετρική σύζευξη των πηνίων αγωγού-δέκτη με το αγωγίμο σώμα· αυτή είναι η μόνη παράμετρος που μεταβάλλεται κατά την κίνηση του ΗΜ συστήματος πάνω απο τον στόχο και υπολογίζεται βάσει του νόμου Βιοι-Savart. Ο δεύτερος όρος εξαρτάται απο την συχνότητα και την αγωγιμότητα του σώματος και για αγωγό απλού γεωμετρικού σχήματος είναι ανάλογος του $\omega\mu l^2$, όπου l είναι *χαρακτηριστική διάσταση* του σώματος.

Θεωρώντας το πραγματικό $A=Q^2/1+Q^2$ και φανταστικό $B=Q/1+Q^2$ μέρος της συνάρτησης απόκρισης $C = A+iB$, και θέτοντας $\tau = L/R$ μελετούμε την εξάρτηση του εξ επαγωγής δυναμικού (ή ρεύματος) από την συχνότητα ω . Στο σχήμα 4 φαίνεται η παραπάνω σχέση για διαφόρους τρόπους παρουσίας στο πεδίο συχνοτήτων και χρόνου. Το επαγόμενο ρεύμα αυξάνει με την συχνότητα μέχρι ενός *σημείου κορυφής* και η απόκριση παροσιάζει μια ομαλή μετάβαση μεταξύ του *αντιστατικού ορίου (resistive limit)* για τις χαμηλές συχνότητες και του *επαγωγικού ορίου (inductive limit)* για υψηλές συχνότητες. Η μετάβαση γίνεται στην περιοχή συχνοτήτων $\omega = 1/\tau$.

Για τα συστήματα ΗΣ που χρησιμοποιούν σαν πηγή απότομη διακοπή του ρεύματος εκπομπής I , το δεύτεριον πεδίο είναι

$$E_s/i = k u(t)/\tau \cdot \exp(-t/\tau)$$

όπου k συντελεστής σύζευξης μεταξύ πηνίων και αγωγού, $u(t)$ η συνάρτηση βαθμίδας και $\tau = L/R$ η σταθερά χρόνου. Οι αντίστοιχες περιοχές του αντιστατικού και επαγωγικού ορίου είναι γνωστές σαν *πρώτοι* και *ύστεροι χρόνοι (early και late time)*.

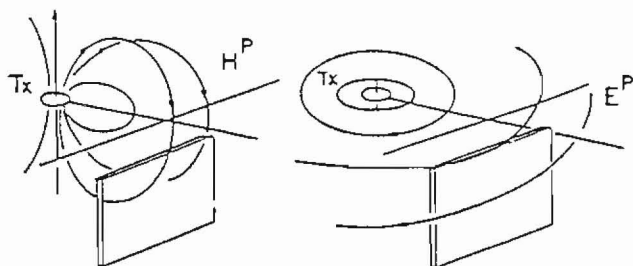
Π.2 Επίδραση του επιφανειακού μανδύα (overburden) και του ξενίζοντος πετρώματος

Η επίδραση του γεωλογικού στρώματος που καλύπτει τον αγωγό-στόχο, καθώς και του πετρώματος που τον φιλοξενεί, μπορεί να αγνοηθεί μόνο σε περιπτώσεις που η αγωγιμότητα τους είναι πολύ μικρή. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως η επίδρασή είναι σημαντική και λαμβάνεται σοβαρώς υπόψη κατά τον σχεδιασμό και στην ερμηνεία της διασκόπησης. Προκειμένου να δώσουμε μία περιγραφή, θεωρούμε ότι το βάθος του αγωγού-στόχου καθώς και η απόσταση μεταξύ πομπού-δέκτη έχουν χαρακτηριστικό μέγεθος S και το πάχος του επιφανειακού μανδύα είναι h ($\ll S$).

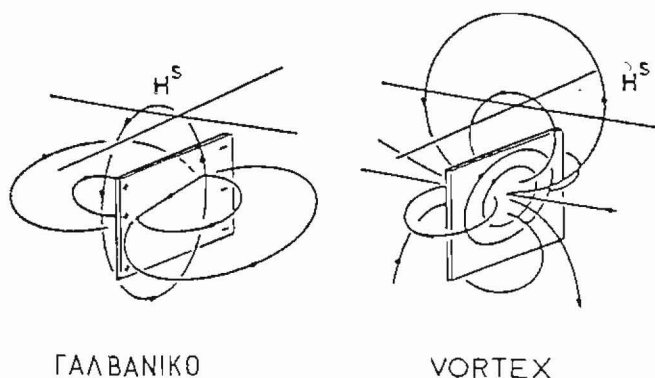
Για τα συστήματα πεδίου συχνοτήτων και για συχνότητες τέτοιες ώστε το επιδερμικό βάθος δ να είναι συγκρίσιμο ή μικρότερο του h , το αγωγίμο επιφανειακό στρώμα εμποδίζει την διεύθυνση του πεδίου με αποτέλεσμα την ανεπαρκή διέγερση του στόχου. Για χαμηλές συχνότητες όπου $\delta \gg S$ η επίδραση του επιφανειακού μανδύα θα είναι μηδαμινή. Σε ενδιάμεσες καταστάσεις επέρχεται εξασθένηση του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πεδίου και μετατόπιση φάσης κατά την διέλευσή τους μέσω του επιφανειακού μανδύα. Η απόκριση του στόχου θα είναι πολλαπλασιασμένη με συντελεστή της μορφής $\exp(-i\sigma\omega S)$, όπου σ σταθερά εξαρτώμενη απο την γεωμετρία και σ η αγωγιμότητα του επιφανειακού μανδύα. Η μετατόπιση φάσης θα είναι ανάλογη της συχνότητας και προς το μέρος του επαγωγικού ορίου.

Στα συστήματα πεδίου χρόνου το ίδιο στρώμα θα επιφέρει εξομάλυνση και χρονική καθυστέρηση στην απόκριση κατά $t = 2\pi/\sigma\mu S^2$. Σε πρώτους χρόνους (υψηλές συχνότητες), το πρωτεύον πεδίο κυρίως ανακλάται, ενώ σε ύστερους χρόνους (χαμηλές συχνότητες), διαπερνά τον επιφανειακό μανδύα.

ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΑ ΠΕΔΙΑ



ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΑ ΠΕΔΙΑ ΚΑΙ ΕΠΑΓΟΜΕΝΑ ΡΕΥΜΑΤΑ



ΓΑΛΒΑΝΙΚΟ

VORTEX

Σχήμα 5. Σκαριφηματική απεικόνιση πρωτεύοντος μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου (H_p, E_p), καθώς και των δύο τύπων επαγομένων ρευμάτων και μαγνητικών πεδίων σε επίπεδο αγωγό (τροποποιηθέν από τους West and MacNae, 1982)

Η επίδραση αγωγίμου ξενιστή παρουσιάζει ιδιαιτερότητες που σχετίζονται με την ανάπτυξη άλλου τύπου μαγνητικού πεδίου, πλὴν αυτού που δημιουργείται από επαγωγικά φαινόμενα στον ίδιο τον αγωγό. Στο σχήμα 5 φαίνεται το πρωτεῖον Μαγνητικό πεδίο, το πρωτεῖον ἐξ επαγωγῆς Ηλεκτρικό καθώς και το δευτερεύον Μαγνητικό με τους δυο τύπους επαγωγικῶν ρευμάτων. Εκτός του δακτυλιοειδούς επαγωγικού ρεύματος⁸ υπάρχει ροή γαλβανικῶν ρευμάτων δια μέσου του αγωγού. Τα γαλβανικά ρεύματα δημιουργούνται λόγω της αυξημένης αγωγιμότητας του περιβάλλοντος τον στόχο χώρου και με την σειρά τους δημιουργοῦν ἐξ επαγωγῆς μαγνητικό πεδίο. Όταν ο αγωγίμος στόχος βρίσκεται σε καλή σύζευξη με το πρωτεῖον ΗΜ πεδίο, αυτό συμβάλλει δημιουργικά στην μετρούμενη απόκριση του αγωγίμου σώματος, αυξάνοντας την πιθανότητα διάκρισης του. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις καταστροφικής συμβολῆς, κατά τις οποίες η πραγματική απόκριση του στόχου καθίσταται δυσδιάκριτη και η ποσοτική ερμηνεία αδύνατη. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται συνήθως σε 2Δ γεωηλεκτρικές δομές, όπου το μήκος παράταξης είναι η κύρια γεωμετρική παράμετρος του σώματος (διαυλικά φαινόμενα).

Είναι πλέον γενικά παραδεκτό ότι για μικρές διαφορές αγωγιμότητας στόχου-ξενιστή, όπου ἐπέρχεται πύκνωση των γαλβανικῶν ρευμάτων, η επίδρασή τους υπερισχύει αυτής των ἐξ επαγωγῆς

⁸ Τα ἐξ επαγωγῆς ηλεκτρικά ρεύματα ἔχουν μορφή κλειστοῦ βρόχου ἢ δακτυλίου (vortex)

καθορίζει την απόκριση του στόχου. Σε περιπτώσεις αντιστατικού σώματος σε αγωγίμο περιβάλλον, η λαμβανόμενη απόκριση πηγάει απο την σκέδαση των γαλβανικών ρευμάτων μακράν του σώματος.

II.3 Πεδία Εφαρμογών

Ιστορικά, οι ΗΜΕΠ ανεπτύχθησαν για χρήση στην μεταλλευτική έρευνα, κυρίως σε χώρες όπως ο Καναδάς και οι Σκανδιναβικές χώρες, όπου το γεωλογικό καθεστώς ευνοεί την εφαρμογή τους (προκάμβριες αποτίδες με περιβάλλον μεγάλης αντίστασης και μικρό πάχος επιφανειακού μανδύα). Αργότερα η χρήση των με επιφανειακά και ενσέρια συστήματα, επεκτάθηκε και σε άλλα πεδία που επιγραμματικά αναφέρονται κατωτέρω. Παρατίθεται επίσης ενδεικτική βιβλιογραφία με παραδειγματικές εφαρμογές των μεθόδων.

Μεταλλευτική έρευνα: Υπάρχει εκτεταμένη βιβλιογραφία που περιγράφει την έρευνα για εντοπισμό σιμπαγούς και μη θειούχου μεταλλοφορίας, γραφιτικών σχηματισμών κλπ. Ενδεικτικά αναφέρονται οι Whideley (1981) και Emerson (1980). Επίσης οι ΗΜΕΠ εφαρμόζονται εμμέσως στον εντοπισμό μη μεταλλοφόρων κοιτασμάτων που συνδέονται με ζώνες εξαλλοίωσης (π.χ. Κάριμς, 1991) και στον προσδιορισμό της τεκτονικής που ελέγχει μεταλλοφορία φλεβικού τύπου). Όπως με τις περισσότερες γεωφυσικές μεθόδους δεν υπάρχει τρόπος διαχωρισμού μεταξύ οικονομικού και μη τύπου μεταλλοφορίας και πολλές φορές οι ΗΜΕΠ καταλήγουν σε τεχνικές επιτυχίες, υπό την έννοια ότι εντοπίζεται μεταλλοφορία δίχως οικονομική σημασία. Προς αποφυγή τέτοιου είδους αποτελεσμάτων οι ερευνητικές εργασίες συμπεριλαμβάνουν και άλλες γεωφυσικές μεθόδους, εντασσόμενες σε ένα γενικότερο πλαίσιο γεωερευνητικών εργασιών.

Υδρογεωλογική έρευνα: Σαν αντικείμενα έρευνας αναφέρονται:

α. Ο εντοπισμός και χαρτογράφηση καταλλήλων γεωλογικών δομών που ελέγχουν την συγκέντρωση υδάτων. Αυτές μπορεί να είναι ταμειντήρες παντός τύπου, παλαιοκοίτες σε ιζηματογενείς λεκάνες, ζώνες διάρρηξης σε κρυσταλλικά πετρώματα, μεμονωμένα ρήγματα, φλέβες, καρστικοί σχηματισμοί κλπ. (Palacky et al. 1981).

β. Ο προσδιορισμός της γεωλογικής στρωματογραφίας (Fitterman, 1986) και του μετώπου υπαλιμύρωσης παρακτίων υδροφορέων (Stewart 1982).

Τεχνική Γεωλογία: Χαρτογράφηση ρηξιγενών ζωνών, μεμονωμένων ρηγμάτων και προσδιορισμός πάχους του μανδύα αποσάρθρωσης.

Έρευνα περιβάλλοντος: Η μελέτη προβλημάτων που σχετίζονται με την διαχείριση αποβλήτων, μόλυνση υδροφορών ορίζονται και άλλες ανθρωπίνες δραστηριότητες αποτελεί αντικείμενο συνεχώς αυξανόμενων εφαρμογών ΗΜΕΠ κατά τα τελευταία χρόνια. Λιαιροφή οξέων, αλάτων και γενικά δραστηριότητες που προκαλούν αύξηση της αγωγιμότητας του περιβάλλοντος πετρώματος ή των υδροφόρων σχηματισμών ανιχνεύονται με ηλεκτρικές ή ΗΜ μεθόδους. Οι τελευταίες προσφέρουν συνήθως πλεονεκτήματα αυξημένης παραγωγικότητας και ευαισθησίας (π.χ. Ward, 1991).

Αρχαιομετρία: Οι ΗΜΕΠ βρίσκουν εφαρμογές στον εντοπισμό θαμμένων μεταλλικών αντικειμένων και την χαρτογράφηση, ανιχνεύοντας διαφοροποιήσεις της αγωγιμότητας και της μαγνητικής επιδεκτικότητας του εδάφους. Οι δύο αυτές παράμετροι είναι συχνά ενδεικτικές παλαιότερων ανθρωπίνων δραστηριοτήτων.

Γεωθερμική έρευνα. Ανίχνευση και χαρτογράφηση ρηχών και ενδιαμέσων ζωνών κυκλοφορίας και ταμείωσης θερμών ρευστών.

II.4 Εφαρμογές ΗΜΕΠ στην Ελλάδα

II.4.1 Μέθοδος VLF (Very Low Frequencies)

Μια απο τις πλέον δημοφιλείς και διαδεδομένες ΗΜΕΠ είναι η VLF. Σ'αυτό συνετέλεσε, πέρα απο την αποτελεσματικότητά της, η ευρησσία, η μεγάλη παραγωγικότητα και το μικρό κόστος αγοράς του συστήματος. Η μέθοδος κάνει χρήση της ζώνης συχνοτήτων 15-30 ΚΗz, στην οποία εκτέμπουν στρατιωτικοί σταθμοί επικοινωνιών με ποντοπόρα υποβρύχια. Απο το 1964 που έκανε την εμφάνιση του το πρώτο σύστημα εδάφους (Paterson and Ronka, 1971), η μέθοδος διεδόθη ευρύτατα και από το 1969 άρχισε να χρησιμοποιείται και από αέρος.

Οι βασικές αρχές της VLF είναι όμοιες με αυτές των μεθόδων MT και ΓΒΣ, διότι όλες εντάσσονται στην κατηγορία τεχνικών μακράν πεδίου. Το πηγαιό πεδίο (σήμα) VLF διαδίδεται στην επιφάνεια της Γης και διεισδύει κατακόρυφα και ανεξαρτήτως της γωνίας πρόσπτωσης, ενώ το ολικό πεδίο διαδίδεται καθέτως προς την επιφάνεια του εδάφους.

Οι πρώτοι δέκτες VLF μετρούσαν τις παραμέτρους ελλειπτικής πόλωσης του ολικού (πρωτεύοντος και δευτερεύοντος) μαγνητικού πεδίου, ήτοι το αζιμούθιο του μέγιστου άξονα (tilt) και την ελλειπτικότητα. Τα στοιχεία αυτά εξάγονται ισοδυνάμως από μετρήσεις του πραγματικού και φανταστικού μέρους της κάθετης μαγνητικής συνιστώσας, κανονικοποιημένων ως προς το οριζόντιο μαγνητικό πεδίο. Οι νεότερες γενεές οργάνων μετρούν πρόσθετες παραμέτρους όπως τις επι μέρους συνιστώσες του πεδίου, την ισχύ και προσφέρουν την δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης τριών συχνοτήτων (σταθμών). Επι πλέον, σήμερα είναι δυνατή και η μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου.

Στην διασκόπηση VLF όπου συνηθέστερα γίνονται μετρήσεις των παραμέτρων του μαγνητικού πεδίου μόνον, επιλέγονται σταθμοί εκπομπής τέτοιοι, ώστε η διέγερση του στόχου να ακολουθεί τον ΕΗ τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι το πεδίο Ε που ακολουθεί την διεύθυνση σταθμοί-σημείο έρευνας να είναι παράλληλο προς την παράταξη του γεωλογικού στόχου και το Η πεδίο κάθετο, με την μεγαλύτερη δυνατή σύζευξη με το σώμα. Η μέθοδος έχει βρει σημαντικώτατες εφαρμογές στον εντοπισμό 2Λ δομών (διαρρήξεις, φλεβικοί σχηματισμοί) σε σχετικά μικρό βάθος (τυπικά αναφέρεται βάθος 3θ μέτρων σε περιβάλλον ειδικής αντίστασης 100 Ωm).

Στα πρώτα χρόνια εφαρμογής της μεθόδου γίνονταν προσπάθειες προσομοίωσης της απόκρισης αγωγίμου στόχου, υποθέτοντας ότι ξενίζεται σε ελεύθερο χώρο (μηδενικής αγωγιμότητας), διεγείρεται από ομογενές οριζόντιο μαγνητικό πεδίο και η απόκρισή του ελέγχεται από καθαρός επαγωγικά φαινόμενα και την παράμετρο απόκρισης. Η προσέγγιση αυτή αμέσως αποδείχθηκε ανεπαρκής να ερμηνεύσει πρακτικές ανωμαλίες VLF, οπότε χρειάστηκε να περιληφθεί στον μηχανισμό γένεσης του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου η συμβολή των γαλβανικών ρευμάτων. Πρόσφατες εργασίες, (π.χ. McNeill, 1990), αποδεικνύουν ότι τα καθαρός επαγωγικά ρεύματα έχουν πολύ μικρή συμμετοχή στην απόκριση του στόχου, εκτός αν η ειδική αντίσταση του ξενιστή είναι μεγάλη, (>10,000Ωm). Είτοι σήμερα, πλην σπανίων περιπτώσεων, θεωρούμε ότι η ανωμαλία VLF πηγάζει από τα γαλβανικά ρεύματα και μόνο. Πολλές από τις παρατηρηθείσες ανωμαλίες VLF, σε επαφές γεωλογικών σχηματισμών, αινεχείες, διαρρήξεις, αγωγίμους αλλά και αντιστατικούς στόχους, ερμηνεύονται με την θεώρηση των οριακών συνθηκών που καθορίζουν την συμπεριφορά του οριζοντίου ηλεκτρικού πεδίου δια μέσου των πλευρικών επαφών δύο γειτονικών γεωηλεκτρικών τμημάτων.

Η γενική μορφή της ανωμαλίας VLF για μετρήσεις του κάθετου μαγνητικού πεδίου είναι του τύπου crossover (αλλάγη προσήμου κατά την διέλευση υπεράνω του στόχου). Σχετικά με τον σχεδιασμό διασκοπήσεων και την ερμηνεία των μεθόδων VLF επισημαίνονται τα κατωτέρω:

- Με την μέθοδο VLF δεν μπορεί να γίνει διάκριση αγωγίμων στόχων χαμηλής ή υψηλής αγωγιμότητας: η απόκρισή φθάνει εύκολα το σημείο κόρου και δεν είναι διαγνωστική της ποιότητάς των. Ο περιορισμός αυτός έχει και θετικές συνέπειες, διότι επιτρέπει την ανίχνευση στόχων που εμφανίζουν χαμηλές αντιθέσεις αγωγιμότητας ως προς τον ξενιστή τους, πράγμα που έχει συμβάλει στην δημοτικότητα της μεθόδου στην χαρτογράφηση τεκτονικών δομών.
- **Μικρό βάθος διασκόπησης:** Λαμβανομένης υπόψη της εξασθένησης του πεδίου κατά την διείσδυση και επιστροφή στην επιφάνεια του εδάφους, το μέγιστο πρακτικό βάθος διασκόπησης θεωρείται ότι είναι περίπου το ίδιο με το ήμισυ του επιδερμικού βάθους. Για τυπικές τιμές αντίστασης 1000 και 100 Ωm το βάθος διασκόπησης είναι 55 και 18 μέτρα αντιστοίχως
- **Αγωγή επικάλυψη:** Πέρα από την μείωση του βάθους διασκόπησης διαφοροποιήσεις του πάχους ή της αντίστασης του επιφανειακού μανδύα μπορούν να δημιουργήσουν ανωμαλίες που επισκιαίνουν ανωμαλίες από αγωγούς του υποβάθρου.
- **Τοπογραφία:** Όπως έχει προαναφερθεί τα πεδία VLF διεισδύουν καθέτως προς την επιφάνεια του εδάφους. Όταν υπάρχουν τοπογραφικές ανωμαλίες, τα πεδία VLF διεισδύουν καθέτως προς την μέση τοπική κλίση του εδάφους. Το άνωμα του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου κλίνει αναλόγως, ακολουθώντας την τοπογραφία, με συνέπεια η επαλληλία του δευτερεύοντος με το μονίμως οριζόντιο πρωτεύον πεδίο να δημιουργεί κάθετες συνιστώσες. Σαν αποτέλεσμα, οι τοπογραφικές εξάρσεις δημιουργούν ψευδανωμαλίες μορφής όμοιας με ανωμαλίες αγωγίμων σωμάτων και τα τοπογραφικά βυθίσματα αντίστοιχες ανωμαλίες αντίθετου προσήμου. Σε περιπτώσεις τοπογραφικής κλίσης μεγάλου μήκους κύματος, οι ανωμαλίες των στόχων υπερτίθενται στην τοπογραφική, με

αποτέλεσμα να δυσχεραίνεται η αναγνώρισή των. Η θέση των ανωμαλιών προσδιορίζεται από το σημείο μέγιστης κλίσης της καμπύλης. Έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές διόρθωσης όπως αυτή του φίλτρου Fraser, το οποίο έχει χαρακτηριστικά ανωπερατού χωρικού φίλτρου και αφαιρεί τοπογραφικές επιδράσεις με μήκος κύματος μεγαλύτερο από τις διαστάσεις των προς εντοπισμό αγωγών. Η ασφαλέστερη ίσως προσέγγιση είναι να γίνεται λεπτομερής αλεικόνιση της τοπογραφίας κατά την διάρκεια της διασκόπησης και να απορρίπτονται ανωμαλίες VLF που συνδέονται άμεσα με έντονα τοπογραφικά χαρακτηριστικά.

Στις τεχνικές επεξεργασίας θα πρέπει οπωσδήποτε να αναφερθεί το φίλτρο Hjelt (Karous and Hjelt, 1983), το οποίο προσδιορίζει σε διάφορα βάθη, την κατανομή του ρεύματος που παράγει το ανάμало μαγνητικό πεδίο. Μια βελτίωση του φίλτρου περιγράφεται από τους Ogilvy and Lee (1991), όπου γίνεται προσομοίωση 2Α αγωγίμων σχηματισμών. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η εργασία των Ogilvy et al. (1991) οι οποίοι εντοπίζουν στοές με μετρήσεις του μαγνητικού και ηλεκτρικού πεδίου.

Στην Ελλάδα η μέθοδος εφαρμόζεται στο ΗΜΕ: ήδη από την δεκαετία '70, στην μεταλλευτική έρευνα και στην χαρτογράφηση τεκτονικών δομών (Νικολάου και Αγγελόπουλος, 1979· Νικολαΐδης, 1981). Τελευταία έχουν αναφερθεί εφαρμογές της μεθόδου και από ιδιωτικούς φορείς για ανίχνευση τεκτονικών διαρρήξεων σε κρυσταλλικό περιβάλλον, με υδρογεωλογικούς σκοπούς (π.χ. Φιλιππίδης, 1993). Μια άλλη εφαρμογή της μεθόδου VLF σε συνδυασμό με μετρήσεις του μαγνητικού πεδίου αναφέρεται από τον Κάρμη, (1991), στην έρευνα τάλκοφόρων κοιτασμάτων που εντοπίζονται σε ζώνες εξαλλοίωσης των επαφών σερπεντινικών σωματιών με γνευσίους του σχηματισμού Βερτίσκου του Ν.Κιλκίς. Η αυξημένη αγωγιμότητα των ζωνών εξαλλοίωσης σε συνδυασμό με την διαφορά μαγνήτισης μεταξύ σερπεντινίτη-γνευσίου επιτρέπει την χαρτογράφηση της ταλκοφόρου ζώνης.

Η.4.2 Μέθοδος TURAM

Η μέθοδος *Turam* εντάσσεται στις ΗΜΕΗ πεδίων συχνότητας, σταθερής πηγής, η οποία αποτελείται από μεγάλους βρόχους καλωδίων, ή γειωμένα καλώδια μεγάλου μήκους. Η χρήση τέτοιων συστημάτων συνδέεται, θεωρητικά τουλάχιστον, μεγάλο αναμενόμενο βάθος διασκόπησης λόγω της μεγάλης ισχύος και του μεγέθους του παραγόμενου πηγαίου μαγνητικού πεδίου. Επιπλέον, η ύπαρξη ακίνητου πρωτεύοντος πεδίου επιτρέπει την καλύτερη μαγνητική σύζευξη του με τον στόχο, σε περιπτώσεις που είναι γνωστή η κλίση του. Χρησιμοποιούνται τουλάχιστον δυο συχνότητες εκπομπής και οι μετρήσεις πραγματοποιούνται ταυτοχρόνως, με δυο ομοια πηνία-δέκτες σε μικρή σχετική απόσταση (20 ή 40 m).

Η σπουδαιότερη πράξη ανωγωγής των μετρήσεων είναι η εξάλειψη της απόκρισης του ισχυρού πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου. Συνήθως αυτή γίνεται με χωρική διαμόρφωση, μετρώντας τον λόγο του σήματος των δυο πηνίων-δεκτών και την διαφορά φάσης. Λόγω της μικρής απόστασης μεταξύ των δύο δεκτών όμως, η πράξη αυτή λειτουργεί ως ανωπερατό χωρικό φίλτρο, το οποίο εξαλείφει την απόκριση αγωγών μεγάλου βάθους και, παραλλήλως, σε περιπτώσεις αγωγίμης επικάλυψης ενισχύει την απόκριση του επιφανειακού μανδύα. Αποτέλεσμα είναι η εισαγωγή θορύβου στις μετρήσεις και το πρακτικά μικρότερο από το αναμενόμενο βάθος έρευνας. Μια εναλλακτική προσέγγιση είναι η χρήση ενός πηνίου, με παράλληλο αναλυτικό υπολογισμό και αφαίρεση του πρωτεύοντος πεδίου· η διαδικασία αυτή έχει αμφιλεγόμενη ακρίβεια, λόγω σφαλμάτων προσδιορισμού της θέσης και τοπογραφίας. Μία τρίτη τεχνική θεωρεί ότι η απόκριση της χαμηλής συχνότητας δεν επηρεάζεται από την επιφανειακή αγωγιμότητα και αντιπροσωπεύει την απόκριση του πρωτεύοντος· αυτή αφαιρείται από την μετρούμενη απόκριση της υψηλής συχνότητας, εξουδετερώνοντας την απόκριση του πρωτεύοντος. Το πρόβλημα που παραμένει είναι ότι αφαιρουμένης της απόκρισης χαμηλής συχνότητας, αφαιρείται και η επίδραση σωματιών μεγάλης αγωγιμότητας και μεγάλο βάθος, εντοπισμός των οποίων είναι συνήθως και ο στόχος της έρευνας. Η επίδραση των γαλβανικών ρευμάτων έχει από καιρού αναγνωρισθεί, ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιείται ως πομπός γειωμένο καλώδιο. Σαν αποτέλεσμα, τονίζεται η ανώμαλη απόκριση αγωγίμων σωματιών μικρής σχετικό αγωγιμότητας, αλλά παράλληλα, ενισχύεται η επίδραση επιφανειακών αγωγίμων ανομοιογενειών.

Η μέθοδος TURAM έχει εφαρμοσθεί από το ΗΜΕ σε πολλές περιπτώσεις μεταλλευτικής έρευνας (Νικολάου και Νικολαΐδης, 1977· Νικολαΐδης, 1981) και επίσης στην Θάσο με μετρήσεις εντός γεωτρήσεων (Webster, 1981· Μέμου, 1982)· αυτή είναι και η μόνη εφαρμογή ΗΜ μεθόδων σε διαγραφίες γεωτρήσεων στον Ελληνικό χώρο. Στον θεωρητικό τομέα, οι Σκιάνης και Νούτσης (1986),

εξεπρόνευαν αλγορίθμους υπολογισμού της τοπογραφικής επίδρασης και κανονικοποίησης του πρωτεύοντος πεδίου. Με την εμφάνιση νέων, πιο εξελιγμένων ΗΜΕΠ συστημάτων, η μέθοδος TURAM βρίσκει ολοένα μικρότερη εφαρμογή στην Ελλάδα αλλά και διεθνώς.

11.4.3 Μικρά φορητά συστήματα

Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται συστήματα κινητής πηγής που κατά το πλείστον λειτουργούν στο πεδίο συχνοτήτων. Πομποί και δέκτες είναι συνήθως πηνία μικρών διαστάσεων, τοποθετημένα σε διάταξη ομοαξονική ή οριζόντια ομοεπίπεδη, τα οποία συμπεριφέρονται ως μαγνητικά δίπολα. Κατά το πλείστο, η διασκόπηση γίνεται οριζοντιογραφικά, αν και η δυνατότητα χρήσης αρκετών διαφορετικών συχνοτήτων και αποστάσεων πομπού-δέκτη σε ορισμένα συστήματα επιτρέπει την διεξαγωγή βαθυσκοπήσεων.

Το πλέον διαδεδομένο είδος αυτών των συστημάτων είναι του τύπου Shingram (οριζοντίων βρόχων), το οποίο που έχει χρησιμοποιηθεί ευρύτατα στην μεταλλευτική έρευνα. Συνήθως γίνονται μετρήσεις του πραγματικού και φανταστικού μέρους του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου, κανονικοποιημένου ως προς το πρωτεύον. Τα σύγχρονα συστήματα Shingram με δυνατότητα χρήσης πολλών συχνοτήτων στην περιοχή 100Hz-12KHz και σχετικών αποστάσεων πομπού-δέκτη από 10-150m, παρουσιάζουν μεγάλη ευελιξία και ποικιλία εφαρμογών που εκτείνονται και στην υδρογεωλογία, έρευνα περιβάλλοντος και χαρτογράφηση αγωγίμων σχηματισμών.

Παραλλαγή αυτών των συστημάτων είναι εκείνα που μετρούν την αγωγιμότητα του εδάφους και ονομάζονται συστήματα μικρού αριθμού επαγωγής (McNeill 1980a). Πρόκειται για διατάξεις στις οποίες ο αριθμός επαγωγής (λόγος της σχετικής απόστασης s των πηνίων προς το επιφανειακό βάθος δ) είναι πολύ μικρότερος της μονάδας. Τότε ισχύει $H_s/H_p = \omega\mu\sigma s^2/4$ και η φαινόμενη αγωγιμότητα του εδάφους δίδεται από την σχέση $\sigma = 4/\mu\sigma s^2 \text{Im}(H_s/H_p)$, σε απευθείας ανάγνωση από το κατάλληλα βαθμονομημένο όργανο. Η μικρή απόσταση πομπού-δέκτη έχει συνέπεια μικρό σχετικά βάθος διασκόπησης μερικών μέτρων. Οι συχνοότητες λειτουργίας είναι υψηλές, (6-14KHz), ώστε να υπάρχει αυξημένη ευαισθησία σε μικρές μεταβολές αγωγιμότητας. Απο μετρήσεις της πραγματικής συνιστώσας γίνεται υπολογισμός της μαγνητικής επιδεκτικότητας του εδάφους.

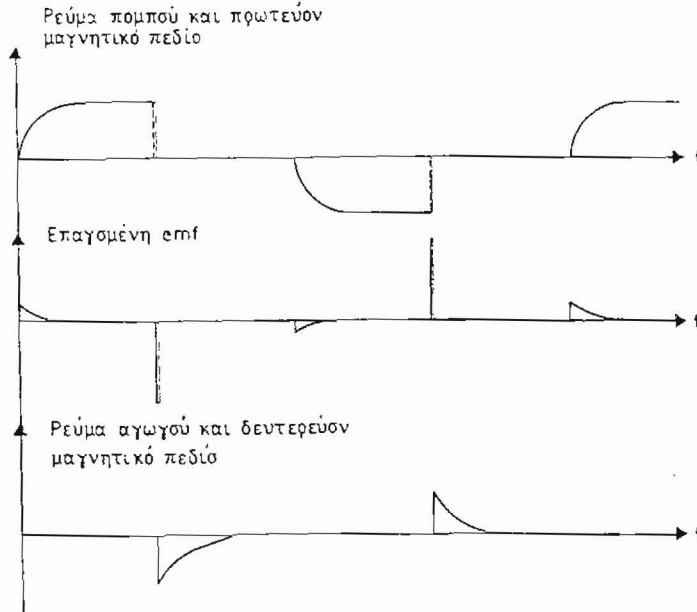
Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά καθιστούν τα συστήματα αυτά πολύτιμα εργαλεία σε εφαρμογές που απαιτούν ταχεία χαρτογράφηση της επιφανειακής αγωγιμότητας με μικρό λειτουργικό κόστος (π.χ. αρχαιομετρία, ανακάλυψη μεταλλικών αντικειμένων, περιβαλλοντικές μελέτες κλπ.). Το ΗΜΕ διαθέτει συσκευή αυτού του είδους και άλλοι φορείς εμπλεκόμενοι στην αρχαιομετρική έρευνα διαθέτουν ή πρόκειται να αποκτήσουν παρόμοια συστήματα.

11.4.4 Μέθοδοι παροδικών πεδίων (Transient EM)

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των TEM μεθόδων είναι ότι οι μετρήσεις γίνονται στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των παλμών ρεύματος και κατά την απουσία του πρωτεύοντος πεδίου. Τα συστήματα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν είτε για οριζοντιογραφικές οδεύσεις, είτε για βαθυσκοπήσεις.

Οι μέθοδοι βασίζονται στην δημιουργία παροδικών επαγωγικών ρευμάτων με αουνεχτή (διακοπτόμενη) διοχέτευση ρεύματος στον πομπό (βρόχο ή πηνίο). Παράδειγμα κυματομορφής του ρεύματος που διαρρέει την πηγή, του πρωτεύοντος μαγνητικού πεδίου και του δευτερεύοντος μαγνητικού πεδίου παρουσιάζεται στο σχήμα 6. Μετά την δημιουργία τους τα παροδικά επαγωγικά ρεύματα διαχέονται προς τα κάτω σχηματίζοντας κωνικό μέτωπο εντός στόχου πεπερασμένης αγωγιμότητας φθίνουν με ρυθμό χαρακτηριστικό της αγωγιμότητας και των γεωμετρικών διαστάσεων του. Τα φθίνοντα ρεύματα δημιουργούν μαγνητικό πεδίο που ανιχνεύεται με κατάλληλο πηνίο-δέκτη. Το δυναμικό που αναπτύσσεται στον δέκτη είναι ανάλογο του ρυθμού μεταβολής του μαγνητικού πεδίου (dB/dt).

Στο σύστημα Sirotem, χρησιμοποιούνται σαν πηγές του μαγνητικού πεδίου τετράγωνοι βρόχοι διαστάσεων 5-500m και δέκτες, είτε αυτός ο ίδιος βρόχος εκπομπής, (διάταξη ταυτών βρόχων - *coincident loop*), είτε πολύσπειρο πηνίο με ισοδύναμη επιφάνεια 10^4m^2 . Οι μετρήσεις γίνονται στο χρονικό διάστημα 50μs-164ms μετά την διακοπή του ρεύματος εκπομπής και έχουν την μορφή εμπέδησης $Z=V(t)/I$ σε χρόνο t μεταξύ πομπού και δέκτη. Το σύστημα Sirotem προσφέρει μεγάλη ευελιξία ως προς την γεωμετρία πομπού-δέκτη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν σύστημα κινητής ή σταθερής πηγής. Σε εφαρμογές μεταλλευτικής έρευνας, για οριζοντιογραφικές οδεύσεις



Σχήμα 6. Παράδειγμα ποροδικής κυματομορφής πρωτεύοντος και δευτερεύοντος ρεύματος και μαγνητικού πεδίου (τροποποιηθέν από McNeill, 1980b)

χρησιμοποιείται με σταθερή πηγή σε διάταξη Tipton και οι μετρήσεις περιλαμβάνουν τις τρεις ανιστάσεις του μαγνητικού πεδίου· επίσης χρησιμοποιείται η διάταξη ταυτών βρόχων με μέτρηση της κατακόρυφης συνιστώσας. Οι ταυτοί βρόχοι χρησιμοποιούνται και για βαθυσκοπήσεις, αν και στις τελευταίες γίνεται συνθέστερα χρήση μεγάλου πομπού, με δέκτη μικρό πηνίο τοποθετημένο στο κέντρο του (*In loop*). Λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου δίδεται από τους Kaufman and Keller, (1983).

Το ΗΓΜΕ διαθέτει σύστημα Sigotem από το 1987 και το έχει αξιοποιήσει κυρίως για εντοπισμό θειούχων μεταλλευμάτων και κοιτασμάτων γραφίτη, (π.χ. Κάρμης, 1989). Προσπάτως έγινε συνδυασμένη χρήση με ηλεκτρικές DC μεθόδους για υδρογεωλογικούς σκοπούς. Τό σύστημα Sigotem χρησιμοποιήθηκε και υποθαλασσίως (πειραματικά), κατά την διάρκεια έρευνας σε αρχαίο ναυάγιο (Στάμου και Κάρμης, 1991). Χρησιμοποιήθηκαν μικροί βρόχοι εκπομπής-λήψης, (1x1m), συμπεριφερόμενοι ως κατακόρυφα μαγνητικά δίπολα. Από τα επιτυχή αποτελέσματα, χαρτογραφήθηκε η περιοχή του ναυαγίου και διαπιστώθηκε η δυνατότητα εντοπισμού θαμμένων μεταλλικών αντικειμένων.

Έχουν γίνει με επιτυχία πειράματα, με βρόχους μικρών διαστάσεων (πλευράς 1-2m) και κανό αριθμό σπειρών, σε γεωτεχνικά προβλήματα θεμελιώσεων, όπου υπήρχε κίνδυνος από τις θαλάσσιες διεισδύσεις. Η πλέον ενδιαφέρουσα πλευρά αυτής της τεχνικής μετρήσεων είναι ότι η χρήση μικρών βρόχων, (μικρότερης μαγνητικής ροπής και ευαισθησίας), επιτρέπει την διεξαγωγή της έρευνας σε αστικό περιβάλλον φορτισμένο με υψηλό ΗΜ θόρυβο. Πρόβλημα που πρέπει να λυθεί όμως, είναι η κατασκευή αλγορίθμου προσδιορισμού ειδικών αντιστάσεων και ποσοτικής ερμηνείας. Αυτό δυσχεραίνεται περισσότερο από τον σχετικά μεγάλο χρόνο διακοπής (*turn-off time*) του ρεύματος εκπομπής του Sigotem, με αποτέλεσμα την παρουσία πρωτεύοντος σήματος στους πρώτους πρόξιμους χρόνους μέτρησης και την απώλεια των πληροφοριών για τα επιφανειακά πρώτα μέτρα.

II.4.5 Εναέριες ΗΜΕΠ

Η ανάπτυξη των ΗΜ μεθόδων από αέρα παρακολούθησε αυτήν των μεθόδων εδάφους και ιστορικά χρονολογείται από την δεκαετία του 1940. Για λεπτομερή περιγραφή των μεθόδων βλέπε τον Palacky, (1986). Οι μέθοδοι βρίσκουν εφαρμογή κυρίως στην μεταλλευτική έρευνα, ενώ τελευταίως

γίνονται προσπάθειες, επέκτασης των στην υδρογεωλογική έρευνα, (π.χ. Sengpiel, 1993) και την γεωλογική χαρτογράφηση.

Στον Ελληνικό χώρο έγινε περιορισμένης κλίμακας εφαρμογή το 1979 οι συνεργασίες του ΗΜΙ και με το Ινστιτούτο Γεωεπιστημών (BGR) της Ο.Λ Γερμανίας. Οι περιοχές που επιλεγίσκαν για την έρευνα με κριτήριο το μεταλλευτικό τους ενδιαφέρον είναι οι εξής Ανατολική Χαλκιδική, Ποντοκερασιά Κιλκίς, Αισώμη Ιβρού, Στεφανίνα Θεσσαλονίκης, Καβάλα, Σέρρες και Βαβδος Χαλκιδικής. Με συνολικό μήκος γραμμών πηγής 6.124km και σχετική απόσταση γραμμών 200m, καλύφθηκε συνολική έκταση 1.150 km². Η έρευνα διενεργήθη από ελικοπτερο με το ουστημά DIGHEM II του BGR. Οι μετρήσεις πραγματικής και φανταστικής αντιστάσεως του λόγου L_p/L_s έγιναν στις συχνότητες 900Hz και 3600Hz και επέτρεψαν τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης των επιφανειακών σχηματισμών. Από την ερμηνεία των δεδομένων της Α. Χαλκιδικής προεκυψαν συμπεράσματα για την τεκτονική δομή της περιοχής (Καρυμς, 1987 και 1988). Έτσι, εντοπίσθηκαν περιοχές με ανώμαλα χαρακτηριστικά, οι οποίες, όπως διαπιστώθηκε απο ελακόλυθη έρευνα σχετίζονται με μεταλλοφορία.

Στην περιοχή της Ποντοκερασιάς τα αποτελέσματα της έρευνας συνεβάλαν στον αναστροσαντολισμό του υπό εξέλιξη ερευνητικού προγράμματος (ΗΜΙ). Η περιοχή δομαίται απο μεταμορφωμένα πετρώματα με έντονες υδροθερμικές εξαλλοιώσεις και μεταλλοφορία σιδηροπηριτη με μικρές περιεκτικότητες χαλκού και χρυσού. Επιγραμματικό μόνον, αναφέρεται ότι απο τα αποτελέσματα της διασκόπησης χαρτογραφείται με σκρίβεια η έκταση των υδροθερμικών εξαλλοιώσεων, εντός της οποίας εντοπίζονται εντόνως αγώγιμα γραμμικά στοιχεία, ($\rho < 40\Omega$), τα οποία αποδίδονται σε τεκτονικές δομές πιθανώς περιέχουσες εμπλουτισμένη μεταλλοφορία.

III. ΠΑΡΟΝ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝ

III.1 Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι φυσικών πεδίων

Οι ΗΜΦΠ έχουν εισέλθει σε φάση ωριμότητας κατόπιν συνεχούς και αλματώδους ανάπτυξης. Η ενηλικίωση επηλθε με την ουσιαστική λύση τεχνολογικών προβλημάτων σχετικών με την ακριβή μέτρηση των φυσικών ΗΜ πεδίων και την ανάπτυξη ισχυρών αναλυτικών και ερμηνευτικών τεχνικών.

Γα σύγχρονα κρυογενικά μαγνητόμετρα και τα επαγωγικά πηνία έχουν πλέον κατώφλιο αισθησίας καλύτερα του ρT και ελάχιστο ηλεκτρονικό θόρυβο, καθιστώντας εύκολη την μέτρηση φυσικών εναλλασσομένων μαγνητικών πεδίων, η ένταση των οποίων κυμαίνεται από πολλά μT έως μερικά μT . Σημαντικότερη πρόοδος σημειώθηκε στον σχεδιασμό των αντιπολωτικών ηλεκτροδίων, με επακόλουθη μείωση φαινομένων θορύβου και ολίσθησης. Η οργανολογία των ΗΜΦΠ ακολούθησε εκ του σύνεγγυς την αλματώδη εξέλιξη της ψηφιακής τεχνολογίας, οι εφαρμογές της οποίας περιόριζαν δραστικά τον εσωτερικό ηλεκτρονικό θόρυβο των παλαιότερων ουστημάτων διαχείρισης σήματος (ενισχυτές και φίλτρα) και οδήγησαν στην ανάπτυξη συμπαγών, φορητών, πλήρως ψηφιακών ολοκληρωμένων ουστημάτων συλλογής επεξεργασίας και ανάλυσης των μετρήσεων.

Οι ΗΜΦΠ ταλανίζονται από το πρόβλημα της ανοπαξίας (εισέτι), γενικών αναλυτικών λύσεων των ανωματικών εξισώσεων διάδοσης σε κολυδιόστατα ανομοιογενή μέσα. Στην πραγματικότητα, μόνον η μονόμετρη εξίσωση Helmholtz και ορισμένες απλές μορφές της 2Α ανιομητικής εξίσωσης, (επί δομών με επίπεδα καταποτρικής συμμετρίας), χαίρουν αναλυτικών λύσεων. Λεδομένων των ανωτέρω, η γενική κατάσταση των ΗΜΦΠ από απόψεως ερμηνευτικών τεχνικών έχει ως ακολούθως.

1. Προβλήματα ικανοποιητικής προσεγγισθέντα με αναλυτικές μεθόδους περιλαμβάνουν:

- Τις αναλυτικές ιδιότητες των ΗΜ τελεστών (όπου έτσι χαρακτηρίζονται ολοι οι τύποι ταυιστών επίδοσης και ΜΑΣΜ).
- Το πρόβλημα της χωροταξικής ανάλυσης των ΗΜ τελεστών (τυπικώς, το πρόβλημα αυτό δεν εξαρτάται από την επίλυση της εξίσωσης διάδοσης και δύναται να αντιμετωπισθεί ανεξαρτήτως με αναλυτικές γεωμετρικές μεθόδους).
- Το πρόβλημα της αντιστροφής για 1Α μέσα διάδοσης, καθώς και για 2Α μέσα διάδοσης, υπό προϋποθέσεις και παραδοχές (αντιστροφες προσεγγιστικές απεικονίσεις ή γραμμικοποίηση).

2. Προβλήματα ικανοποιητικής προσεγγισθέντα με αριθμητικές μεθόδους: Οι σύγχρονοι ηλεκτρονικοί υπολογιστές έχουν δυνατότητα να λύσουν τις εξισώσεις διάδοσης των ΗΜ κυμάτων σε μέσο κάθε τύπου, υπό την προϋπόθεση ότι τους παρέχεται ένα ομοίωμα της δομής δια της οποίας

διαδίδονται (προσομοίωση -modelling), ή, σαφείς περιορισμοί επί των συνθηκών διάδοσης (π.χ. migration). Οι μέθοδοι προσομοίωσης επιλύουν προβλήματα κάθε τύπου και ορίο τους αποτελεί μόνον η χωρητικότητα και η ταχύτητα του χρησιμοποιούμενου Η/Υ.

3. Προβλήματα προς επίλυση και σύγχρονες ερευνητικές τάσεις εξειδικεύονται ως:

- *Αμύγας θεωρητικά προβλήματα*, όπως η πληρέστερη κατανόηση των αναλυτικών ιδιοτήτων των πολυδιάστατων ΗΜ τελειών, η βελτίωση των μεθόδων 2Δ συντιστροφής, η βελτίωση/αυτοματοποίηση των αριθμητικών μεθόδων 3Δ προσομοίωσης, η διερεύνηση επιδράσεων της μικροσκοπικής ανισοτροπίας στην διάδοση ΗΜ κυμάτων (και εκμετάλλευσή της), η διερεύνηση της κλασματικής (fractal) φύσης της γεωηλεκτρικής δομής κ.ά.
- *Αντιμετώπιση του προβλήματος γαλβανικών παραμορφώσεων*, οφειλομένων σε επιδράσεις παραεπιφανειακών αγωγίμων μικροδομών, οι οποίες είναι μεν διαφανείς σε πεδία μακρών περιόδων, (αρκούντως μικρές ώστε να μην προκαλούν επαγωγικά φαινόμενα), αλλά ικανές να τα σκεδιάζουν προκαλώντας ανισοκρέση στατικών (γαλβανικών) φορτίων που παραμορφώνουν όλο το φάσμα αναγραφών. Η παραμόρφωση προσβάλλει κυρίως τα ηλεκτρικά πεδία (σε σπανιότερες περιπτώσεις και τα μαγνητικά), αλλοιώνοντας την εικόνα της γεωηλεκτρικής δομής. Η πιθανότητα εμφάνισης της και η μορφή της δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί πριν από την διασκόπηση. Υπάρχουν ήδη αρκετές μέθοδοι αντιμετώπισης του προβλήματος, αλλά και πάλι καμία δεν καλύπτει όλο το φάσμα περιπτώσεων· οι γαλβανικές παραμορφώσεις παραμένουν αντικείμενο ελπισταμένης μελέτης.

Νέα Πεδία εφαρμογών.

Ιστορικό πεδίο χρήσεως των ΗΜΦΠ υπήρξε ανέκαθεν η ανίχνευση της υδαφικής κατανομής αγωγιμότητας σε ευρύτατο φάσμα βαθών.

- είτε για οικονομικούς σκοπούς, (μεταλλευτική έρευνα, ανακάλυψη υδρογονανθράκων γεωθερμική έρευνα, υδρογεωλογικές εφαρμογές κλπ.), δραστηριότητες οι οποίες έλκουν την μεγαλύτερη προσοχή).
- είτε για ακαδημαϊκούς σκοπούς μελέτης του εσωτερικού της Γης.

Κατά την διάρκεια των δεκαετιών 1960-70 αναγνωρίστηκε ότι η ανισοκρέση τάσεων κατά την προπαρασκευαστική φάση ενός μεγάλου οεισμού προκαλεί αλλαγές στις ηλεκτρικές και μαγνητικές ιδιότητες των πετρωμάτων. (π.χ. Scholz et al. 1973), οι οποίες καταγράφονται στα φυσικά ΗΜ πεδία και είναι πιθανότατα ανιχνεύσιμες πριν από την εκδίλωσή του. Η πρόοδος των τεχνολογιών ανίχνευσης και ανάλυσης των φυσικών ΗΜ πεδίων κατέστησε σαφές ότι οι ΗΜΦΠ δυνατόν να έχουν εφαρμογές στην επιστήμη πρόγνωσης σεισμών αυτές περαιτέρω εξειδικεύονται σε:

1. **Ανίχνευση και παρακολούθηση χρονικών εξαρτημένων αλλαγών των ΗΜ τελειών**, οι οποίοι καταγράφουν αντίστοιχες (μακροχρόνιες και βραχυχρόνιες) προσεισμικές αλλά και συν-σεισμικές *σ*λλαγές στην υδαφική κατανομή αγωγιμότητας, οφειλόμενες στην εξάρτηση των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων από αλλαγές στο πεδίο τάσεων, (π.χ. Beamish, 1982· Kharia, 1982), στο περιεχόμενο υγρό κλάσμα και στην θερμοκρασία (οι σεισμικές προπαρασκευαστικές διεργασίες επηρεάζουν κυρίως τους δύο πρώτους παράγοντες). Επιτυχής ανίχνευση προ- και συν-σεισμικών μεταβολών της υδαφικής κατανομής αγωγιμότητας μέσω παρατηρήσεων χρονικών μεταβολών των ΗΜ τελειών έχει επιτευχθεί σε αρκετές περιπτώσεις. Στην διεθνή βιβλιογραφία όμως, αναφέρεται περιορισμένος μόνον αριθμός παραδειγμάτων, τα οποία τονίζουν την δυνατότητα επιτυχούς παρακολούθησης αλλαγών στο πεδίο τάσεων πριν από μεγάλους σεισμούς με ΗΜ μεθόδους. Η αισιοδοξία για το μέλλον τέτοιων προσπαθειών στηρίζεται στις σύγχρονες μεθόδους εκτίμησης των ΗΜ τελειών, οι οποίες προέρχονται από την επιστήμη ψηφιακού ελέγχου ουστημάτων και υποστηρίζονται από ευρύ φάσμα προχωρημένων στατιστικών μεθοδολογιών· αβεβαιότητες (σφάλματα) της τάξεως του 5% αρχίζουν να γίνονται πολύ κοινά στην σύγχρονη βιβλιογραφία.

2. **Ανίχνευση και παρακολούθηση χρονικών εξαρτημένων αλλαγών της έντασης, έγκλισης και απόκλισης του γεωμαγνητικού πεδίου** (π.χ. Slacey and Banerjee, 1974). Αυτές είναι μακροχρόνιες (τεκτονομαγνητικά φαινόμενα) και βραχυχρόνιες (σεισμομαγνητικά φαινόμενα).

3. **Ανίχνευση και παρακολούθηση ανώμαλης δραστηριότητας των τελλουρικού πεδίου** πλησίον του στατικού ορίου έχει παρατηρηθεί ενωρίς, από αρκετούς ερευνητές (π.χ. Sobolev, 1975). Σημαντική προσπάθεια έχει επίσης καταβληθεί και στην Ελλάδα (π.χ. Varotsos and Alexopoulos, 1984· Drakopoulos et al. 1989). Οι μηχανισμοί που παράγουν αυτές τις διαταραχές δεν είναι ακόμη κατανοητοί, ούτε υπάρχει κάποια αποδεκτή μορφή ταξινόμησης και τυποποίησης των λαμβανόμενων

ομημάτων, τα οποία μάλιστα δύναται κάλλιστα να συγχέονται με εξ επαγωγής παροδικά σήματα (π.χ. Chouliaras and Rasmussen, 1988). ή ανθρώπογενή θόρυβο .

Στις περιπτώσεις 2 και 3, οι τεχνικές ΗΜΦΠ συμβάλλουν, εκτός απο την καταγραφή των φαινομένων και στην *αντισυνέλιξη* των εξωγενών διαταραχών του ΗΜ πεδίου. (επαγωγικά φαινόμενα), από τις ενδογενείς διαταραχές, (προσευσμικά σήματα), παρέχοντας ούτω καλύτερες ουσθήκες παρατήρησης των τελευταίων.

III.2 Ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι ελεγχόμενης πηγής.

Γα τελευταία χρόνια έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες στον τομέα της ανάπτυξης ερμηνευτικών τεχνικών και ειδικότερα προς εκπόνηση νέων μεθόδων προσομοίωσης και αντιστροφής των παρατηρήσεων. Παρ' όλα αυτά δεν έχει ακόμη δοθεί ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα της ποσοτικής ερμηνείας της απόκρισης που παράγεται απο σύνθετη (3Λ) κατανομή αγωγιμότητας. Άρκετα συχνά, η αληθής γεωηλεκτρική δομή είναι πιο πολύπλοκη από τις δυνατότητες των ερμηνευτικών αλγορίθμων και πολλές φορές η προσπάθεια περιορίζεται στη προσομοίωση της με απλά γεωμετρικά πρότυπα (μοντέλλα) ή μονοδιάστατο (1Λ) ομορφο οριζοντίων, επιπέδων ομογενών στρωμάτων. Σπανίως καθίσταται δυνατή η εφαρμογή αυτόματης (ή αυτοματοποιημένης) ερμηνευτικής διαδικασίας που να αποφέρει ρεαλιστική εικόνα της γεωλογικής δομής και είναι ακόμη αναγκαία η εμπειρία του γεωφυσικού-ερμηνευτή, οποίος συχνά καλείται να επιλέξει μεταξύ ισοδυνάμων λύσεων.

Η σύγχρονη ερμηνευτική διαδικασία στηρίζεται σε δυο κυρίως τρόπους προσομοίωσης της γεωηλεκτρικής δομής:

Αναλογική προσομοίωση (analogue ή scale modelling). Είναι ο αρχαιότερος τρόπος εύρεσης της γεωηλεκτρικής δομής και βασίζεται στο γεγονός ότι τα ΗΜ κίματα (και οι εξισώσεις Maxwell) είναι ανεξάρτητα της φυσικής κλίμακας της ηλεκτρικής δομής την οποία διεγείρουν. Πρώτο στάδιο της αναλογικής προσομοίωσης είναι η κατασκευή ενός υλικού αναλόγου της γεωηλεκτρικής δομής υπό κλίμακα εργαστηριακών διαστάσεων, με βάση μια αρχική, όσο το δυνατόν καλύτερη ερμηνεία των μετρήσεων. Κατόπιν, ΗΜ πεδία παραγόμενα κατά τον τρόπο της δεδομένης εφαρμοσθείσας ΗΜΕΠ (και υπό την απή φυσική κλίμακα), διεγείρουν το υλικό ανάλογο και ελάγουν δευτερευόντα πεδία τα οποία μετρώνται με κατάλληλους αισθητήρες. Από την σχέση πρωτεύοντων και δευτερευόντων υπολογίζεται η ΗΜ απόκριση του αναλόγου και συγκρίνεται με τις μετρήσεις. Έτσι, με την διαδικασία δοκιμής και σφάλματος οδηγείται ο ερμηνευτής στην ανακατασκευή της πραγματικής γεωηλεκτρικής δομής. Η αναλογική προσομοίωση είναι αργή και δύσκολη εργασία, αλλά οσάκις εφαρμόζεται ουστά απολήγει σε καλό και αξιόπιστα συμπεράσματα. Η μέθοδος έχει εφαρμοσθεί ικανοποιητικά για οσάματα 2 και 3 διαστάσεων (π.χ. Ogilvy 1983).

Αριθμητική προσομοίωση. Ο τρόπος διάδοσης και απόσβεσης των ΗΜ πεδίων, καθώς και οι συναρτήσεις απόκρισης της Γης εκφράζονται, κατά κανόνα, με εξαιρετικούς πολύπλοκες αναλυτικές σχέσεις, η αριθμητική προσέγγιση των οποίων διευκολύνεται τα μέγιστα με χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αναλυτικές σχέσεις υπάρχουν για απλές γεωμετρίες της γεωηλεκτρικής δομής, όπως η 1Λ (κατακόρυφη) μεταβολή της αγωγιμότητας, αγωγή σφαίρα σε αγωγή ή μη ξενιστή, ημισπίεδο, δίσκος κλπ. Η ανάπτυξη αλγορίθμων αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων διάδοσης του ΗΜ πεδίου, (με χρήση πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων, ισοδυνάμων κυκλωμάτων κ.ά), επιτρέπει την ερμηνεία απλών 3Λ δομών. Μνείας αξίζουν και οι εφαρμογές αριθμητικών μεθόδων επίλυσης ολοκληρωτικών εξισώσεων στην μελέτη της απόκρισης κατακόρυφου επιπέδου αγωγού για τα ουστήματα Tufan και Slingram (Hannesson and West, 1984), καθώς και οι λύσεις του γενικού προβλήματος επιπέδου αγωγού και σφαίρας για όλα τα ουστήματα πεδίου χρόνου και συχνότητας (Dyck et al 1980).

Το πρόβλημα της 1Λ αντιστροφής έχει προσεγγισθεί σχεδόν ικανοποιητικά. Επιπλέον, έχουν προταθεί τεχνικές αντιστροφής για το πρόβλημα των 2 και 3 διαστάσεων, (π.χ. Hohmann, 1988, Hohmann and Raiche, 1988), κάτω απο περιορισμούς και για ωρισμένες μεθόδους (Barnett, 1984). Η σύγχρονη έρευνα επί προβλημάτων ερμηνείας προσανατολίζεται στην ανάπτυξη ταχύτερων αλγορίθμων αριθμητικής προσομοίωσης και μεθόδων αντιστροφής για σύνθετες 3Λ κατανομές αγωγιμότητας. Ένα πρόσθετο και βασικό πρόβλημα προς επίλυση, παραμένει αυτό της προσομοίωσης γαλβανικών ρευμάτων και ιδιαίτερα της αλληλεπίδρασης των με τα επαγωγικά ρεύματα.

Στον τομέα της ανάπτυξης νέων ΗΜ ουστημάτων, μεγάλη σημασία δίδεται στην δυνατότητα χρησιμοποίησης υψηλότερων συχνοτήτων και πλέον πρόϊμων χρόνων για την λεπτομερέστερη ανάλυση

μηχόν δομών με μεγάλο ενδιαφέρον για την τεχνική γεωλογία, την περιβαλλοντολογική έρευνα και την αρχαιολογία. Οι συχνότητες λειτουργίας τέτοιων συστημάτων υπολογίζεται να προσεγγίζουν αυτές των radar, με συνέπεια να λαμβάνονται υπέρψη και τα ρεύματα μετατόπισης και τα αποτελέσματα να ερμηνεύονται σε σχέση με την αγωγιμότητα αλλά και την διαπερατότητα των μέσων διάδοσης (γεωηλεκτρικής δομής).

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Οι ΗΜ μέθοδοι γεωφυσικής διασκόπησης εφαρμόζονται σε κάθε τομέα της γεωφυσικής δραστηριότητας και προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως μικρό κόστος έρευνας, αυξημένη αξιοπιστία, μεγάλο εύρος βαθών διασκόπησης και σημαντική ευαισθησία στις μεταβολές της γεωηλεκτρικής δομής. Υπάρχει μεγάλος αριθμός ΗΜ μεθόδων και συστημάτων, εκάστη των οποίων παρουσιάζει τις δικές της θεωρητικές και πειραματικές ιδιαιτερότητες. Η δικαίωση της πληθώρακής αυτής ομάδας πολυπλοκών γεωφυσικών τεχνικών, έγκειται στην δυνατότητα τους να προσφέρουν πληροφορίες υψηλής ανάλυσης και διακριτικής ικανότητας, προσαρμοζόμενες στις ειδικές ανάγκες του εκάστοτε γεωφυσικού προβλήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Barnett, C.T., 1984. Simple inversion of time-domain EM data. *Geophysics*, **49**, 925-933
- Beamish, D., (1982) The time dependence of electromagnetic response functions. *Geophysical Surveys* **4**, 405-434.
- Berdichevsky, M.N. and Zhdanov, M.S., 1984. Advanced theory of deep geomagnetic sounding. Elsevier.
- Chouliaras, G. and Rasmussen, I.M., 1986. Magnetotellurics at the VAN earthquake prediction research network in Greece Report, Seismol. Lab., Univ. of Uppsala, submitted to OASP, Greece, in fulfillment of contract SAM069-8197600.
- Chouliaras, G. and Rasmussen, I.M., 1988. The application of the magnetotelluric impedance tensor to earthquake prediction research in Greece. *Tectonophysics*, **152**, 119-135
- Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G., 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, **52**, 289-300
- Dawes, G.J.K. and Lagios, I., 1991. A magnetotelluric survey of the Nisyros Geothermal Field. *Geothermics*, **20**, 225-235 p
- Drakopoulos, J., Stavrakakis, G. and Iatoussakis, J., (1989). Physical properties of the variation of the electric field of the earth preceding earthquakes: discussion. *Tectonophysics*, **161**, 55-62. Reply by Varotsos, P. and Alexopoulos, K. in *Tectonophysics*, **161**, 58-62.
- Dyck, A.V. and Bloore, M. and Vallee, M.A., 1980. Programs PLATE and SPHERE. In "Research in applied Geophysics" No 14, 1980, Geophys. Laboratory, Univ. of Toronto.
- Emerson, D.W., 1980. The geophysics of the Elura orebody, Cobar, New South Wales. *Bull. Austr. Soc. Expl. Geophys.*, **11** (monograph).
- Fitterman, D.V. and Stewart, M.T., 1986. Transient EM sounding for groundwater. *Geophysics*, **51**, 995-1005
- Galanopoulos, D., Hutton, V.R.S. and Dawes, G.J.K., 1991. The Milos geothermal field: Modelling and interpretation of electromagnetic induction studies, *Phys. Earth & Planet. Int.*, **66**, 76-91.
- Geotermica Italiana, srl., 1984. IGME: Methana-Poros, Loutraki-Sousaki, Patystomon, Aedipsos Geothermal Projects. Final report, IGME, Athens, Greece.
- Hanneson, J.E. and West G.E., 1984. The horizontal loop response of a thin plate in a conductive earth. *Geophysics*, **49**, 411-432.
- Hernance, J.F. and Thayer, R.L., 1975. The telluric-magnetotelluric method. *Geophysics*, **40**, 664-668.
- Hohmann, G.W., 1988. Numerical modeling for EM methods of Geophysics, in "EM methods in applied Geophysics", vol.1, SEG 1988
- Hohmann, G.W. and Rache, A.P., 1988. Inversion of controlled source EM data, in "EM methods in applied Geophysics", vol.1, SEG 1988

- Hiceto, V., Malaguti, R. and Santarato, G., 1986. A model study of telluric fields in two-dimensional structures, *Geophys.J.R.astr.Soc.*, **86**, 399-412.
- Κάρμης, Π., 1991. Γεωφυσική έρευνα σε ταλκοφόρες εμφανίσεις του Ν.Κιλκίς. Γεχνική Έκθεση, Π ΜΕ.
- Κάρμης, Π., 1987. Λερωγεωφυσική έρευνα Ανατολικής Χαλκιδικής. Γεχνική Έκθεση, Π ΜΕ.
- Κάρμης, Π., και Τσόμπος, Π., 1988. Η ρηξιγενής τεκτονική της ΒΑ Χαλκιδικής: Μια συγκριτική μελέτη φωτογεωλογικών και αερωγεωφυσικών στοιχείων. Δελτίο Ελλην. Γεωλ. Εταιρίας τόμος XXIII/1, 89-100.
- Κάρμης, Π., 1989. Γεωφυσική έρευνα Μ.Βράχου Δοϊράνης. Γεχνική Έκθεση, Π ΜΕ.
- Karous, M. and Hjeft, S.L., 1983. Linear filtering of VLF dip -angle measurements. *Geophysical Prospecting*, **31**, 782-794.
- Kaufman, A.A. and Keller, G.V., 1983. Frequency and transient soundings. Elsevier.
- Kharin, E.P., (1982). Changes in transfer functions with time. *Geophysical Surveys*, **4**, 455-466
- Λάγιος, Ε., 1989. Γεωθερμική έρευνα της νήσου Κώ: Ακουστο-Μαγνητοτελλουρική (ΑΜΓ) διασκοπήση. 1ο Συνέδριο Συλλόγου Γεωφυσικών Ελλάδας, Αθήνα, Απρίλιος 1989. (περίληψη).
- Lagios, E. and Dawes, G.J.K., 1989. Audio-magnetotelluric survey of the Nissyros Geothermal Field. Γεχνική έκθεση, ΑΕΜΕ/ΑΕΗ, Αθήνα. 150 pp.
- Lagios, E., Dawes, G.J.K. and Hutton, V.R.S., 1989. Geophysical investigations along the Hellenic Volcanic Arc and their geothermal implications. Pres. IASPEI, Istanbul, Turkey, (abstract).
- Lagios, E. and Dawes, G., 1990. AMT geothermal exploration of Nissyros geothermal field. Paper pres. U.K.G.A XIV, April 19- 21, Plymouth, U.K., (abstract).
- Lagios, E., Tzaniis, A. and Dawes, G.J.K., 1991. Audio- magnetotelluric survey of Nissyros geothermal field. Greece - Phase II. Γεχνική έκθεση, ΑΕΜΕ/ΑΕΗ, Αθήνα. 200 pp.
- Λάγιος, Ε., 1991. Μαγνητοτελλουρική έρευνα δομής του γεωθερμικού πεδίου της Νισυρου. Πρακτικά, 5ο Συνέδριο Ελλην. Γεωλ. Εταιρ., στο Δελτίο Ελλην. Γεωλ. Εταιρ. XXV/3, 393-407.
- Λάγιος, Ε., 1992. Μαγνητοτελλουρικές διασκοπήσεις στις γεωθερμικού ενδιαφέροντος περιοχές Σουσακίου και Μεθάνων, Τόμοι I και II Γεχνική έκθεση, ΠΕΓΓΥΒΕΙ και ΑΙΜΕ/ΑΕΗ, πρόγραμμα 90ΠΣ5.
- McNeill, J.D., 1980a. Electromagnetic terrain conductivity measurements at low induction numbers. Geonics, Technical note TN-6.
- McNeill, J.D., 1980b. Applications of Transient EM techniques. Geonics, Technical note TN-7.
- Μέμου, Τ., 1982. Γεωφυσική έρευνα στην περιοχή Μαυρού νήσου Θάσου. Γεχνική Έκθεση ΠΜΕ.
- Nabighian, M.N., (editor), 1988. EM methods in applied Geophysics - Theory, vol.1 SI:G.
- Νικολαΐδης, Μ., 1981. Γεωφυσική έρευνα στη Βίγλα Μολαων. Γεχνική Έκθεση, Π ΜΕ.
- Νικολάου, Σ. και Νικολαΐδης, Μ., 1977. Λοκισαστική ΗΜ έρευνα Ιταπν στην Μαγγανιοφόρο περιοχή Ζερμυλιών Μεσσηνίας, Γεχνική Έκθεση ΠΜΕ.
- Νικολάου, Σ. και Αγγελόπουλος, Α., 1979. Γεωφυσική έρευνα Λιούμης. Γεχνική Έκθεση, Π ΜΕ.
- Ogilvy, R.D., 1986. Theoretical EM response curves over a thin dipping dyke in free space. *Geophysical Prospecting*, **34**, 769-788.
- Ogilvy, R.D., Cuadra, A., Jackson P.D. and Monte, J.L., 1991. Detection of an air-filled drainage gallery by the VLF resistivity method. *Geophysical Prospecting*, **39**, 845-859.
- Ogilvy, R.D. and Lee, A.C., 1991. Interpretation of VLF-EM in-phase data using current density pseudosections, *Geophysical Prospecting*, **39**, 567-580.
- Palacky, G.J., 1981. EM prospecting for ground water in Precambrian terrains in the Republic of Upper Volta, *Geophysical Prospecting*, **29**, 932-955.
- Palacky, G.J., 1986. Airborne resistivity mapping. Geol. Surv. Can., Paper 86-22.
- Παπανικολάου, Α., Χρόνης, Γ., Λυκούσης, Β., και Παυλάκης, Π., 1989. Υποθαλάσσιος νεοτεκτονικός χάρτης του Σαρωνικού κόλπου, έκδοση ΟΑΣΠ, ΕΚΘΕ και Πανεπιστημίου Αθηνών (Τομέας Λιθανομικής, Τεκτονικής και Εφαρμοσμένης Γεωλογίας).
- Poddar, M. 1982. VLF respoce of a perfectly conducting half-plane in a layered half-space. *Geophysics*, **47**, 1059-1067.
- Rokityansky, I.I., (1982). Geoelectromagnetic investigations of the Earth's Crust and Mantle. Springer Verlag
- Scholz, D.H., Sykes, L.R. and Aggarwal, Y.P. (1973). Earthquake Prediction: a physical basis. *Science*, **181**, 803-809.

- Sengpiel, K.P., 1993. Resistivity sounding by Airborne EM and its application to groundwater exploration. Πρακτικά, Α' Επιστημονικό Συνέδριο Γεωφυσικής, Αθήνα, Απρίλιος 1989.
- Σκιάνης, Γ. and Νούτσος, Β., 1983: TURAM : Πρόγραμμα υπολογισμού του ανηγμένου λόγου για ταχεία ανάπυξη του καλωδίου του πομπού. Τεχνική Έκθεση ΗΜΕ.
- Sobolev, G.A. (1975). Application of electric method to the tentative short-term forecast of Kamchatka earthquakes. *Pageoph*, **113**, 229-235.
- Stacey, F.D. and Banerjee, S.K., (1974). The physical principles of rock magnetism, Elsevier, Amsterdam.
- Στάμου, Θ., και Κάρμης, Π., 1991. Γεωφυσική έρευνα σε αρχαίο ναυάγιο. 2ο Συνέδριο Αρχαιομετρίας, Θεσσαλονίκη, 26-28 Μαρτίου 1993.
- Stewart, M.T., 1982 Evaluation of EM terrain conductivity methods for rapid mapping of salt water interfaces in coastal aquifers, *Ground Water*, **20**, 538-545.
- Tzanis, A., Lagios, E. and Dawes, G.J.K. (1991). Gravity and AMT study of the western Kos island geothermal prospect, Greece. Pres. UKGA XV, Leicester, U.K., (abstract).
- Tzanis, A., Lagios, E. and Dawes, G.J.K., (1992). Identification of active fluid circulation zones in the geothermal field of Nisyros caldera, Greece, with audiomagnetotelluric data. Pres. XVII E.G.S. Gen. Assembly, Edinburgh, UK, 6-10 April 1992, (abstract).
- Tzanis, A., (1992). Generalized rotation analysis of the magnetotelluric tensors in three dimensions: A group theoretical approach. Pres. XVII E.G.S. Gen. Assembly, Edinburgh, UK, 6-10 April 1992, (abstract).
- Τζάνης, Α. και Λάγιος, Ε., (1992). Επί της σχέσεως ενεργού τεκτονικής και κυκλοφορίας ρευστών στο γεωθερμικό σύστημα της καλδέρας Νισύρου. Πρακτικά, Τόμος 1, 6ο Συνέδριο Ελλην. Γεωλ. Έταιρ., Αθήνα 1992 (υπό εκτύπωση).
- Tzanis, A. and Lagios, E., 1993. Magnetotelluric exploration of Sousaki geothermal prospect, Corinth prefecture, Greece: The first results. 2nd Congress of Hell. Geophysical Union, 5-7 May, Florina, Greece (submitted).
- Tzanis, A., Makropoulos, K.C., Martin, J-L., Corny, G. and Drakopoulos, I., 1993. Contribution to the study of tectonic deformation in southeastern Thessaly, Greece: Geomagnetic Deep Sounding and Seismotectonic observations. 2nd Congress of Hell. Geophysical Union, 5-7 May, Florina, Greece (submitted).
- Φιλιππίδης, Σ., 1993. Εντοπισμός υδροφόρου ρήγματος σε φυλλίτη περιοχή Λαβεστοχωρίου με την μέθοδο VLF. Πρακτικά, Α' Επιστημονικό Συνέδριο Γεωφυσικής, Αθήνα, Απρίλιος 1989.
- Φυτίκας, Μ., Innocenti, F., and Mazzuoli, R., 1984. Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας (1:50.000). Φύλλο Μέθανα. ΗΜΕ, Αθήνα.
- Varotsos, P. and Alexopoulos, K., (1984). Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, 1. *Tectonophysics*, **110**, 73-98.
- Volti, Th., Dawes, G.J.K., Lagios, E. and Tzans, A., (1992). Magnetotelluric investigation of Methana Peninsula, (Aegean Volcanic Arc, Greece). Pres. XVII E.G.S. Gen. Assembly, Edinburgh, UK, 6-10 April 1992, (abstract).
- Vozoff, K., 1985. Magnetotelluric methods. SEG, Geophysics reprint series No 5.
- Wait, J.R., 1982. Geo-electromagnetism. Academic Press.
- Ward, S., (editor), 1989. Geotechnical and Environmental Geophysics, Geophysics reprint series Vol. 3, Environmental and Groundwater Geophysics.
- Webster, B., 1981. Report on Drillhole Geophysical surveys, Thassos island, Greece. Technical Report, ΗΜΕ.
- West, G.F. and Macnae, J.C., 1982 : Electromagnetics for geophysical exploration. Course notes, South African Geophysical Association
- Whiteley, R.J., 1981. Geophysical case study of the Woodlawn ore body, New South Wales, Australia. Pergamon Press.
- Yungul, S.H., 1966. Telluric Sounding - a magnetotelluric method without magnetic measurements, *Geophysics*, **31**, 185-191.