

## ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΔΟΜΗ ΔΥΟ ΣΤΡΩΜΑΤΩΝ - ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ\*

I. K. ΜΕΡΤΖΑΝΙΔΗΣ<sup>1</sup>, Γ. Ν. ΤΣΟΚΑΣ<sup>1</sup>, Ι. Ν. ΣΑΧΑΛΟΣ<sup>1</sup>

### ΣΥΝΟΨΗ

Μία νέα τεχνική παρουσιάζεται για τον προσδιορισμό του πάχους και των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων δομών δύο οριζόντιων στρωμάτων. Η μέθοδος στηρίζεται στη μελέτη της συχνοτικής απόκρισης της δομής, όταν αρμονικό, επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα προσπίπτει κάθετα στη διαχωριστική επιφάνεια του πάνω στρώματος και του αέρα. Από τη μέτρηση της αντίστασης εισόδου σε δύο συχνότητες στις οποίες παρατηρούνται δύο διαδοχικά ακρότατα της τιμής του πραγματικού της μέρους, μπορούν να προσδιοριστούν απευθείας όλες οι παράμετροι και να γίνει πλήρης ταυτοποίηση των στρωμάτων. Εξετάζεται η ακρίβεια της μεθόδου και οι δυνατότητες εφαρμογής της.

### ABSTRACT

It is well known that reflectometry offers a simple tool for determining dielectric properties of materials. For homogeneous materials the procedure is simple and only a single measurement of the reflection coefficient is enough. If the material is inhomogeneous or stratified, indirect procedures for calculating the dielectric properties are required. A direct method for determining the characteristics of a lossy two-layered medium is presented. The technique is based on the study of the frequency response of the complex reflection coefficient of a plane wave incident at the interface between the stratified media and the air (Mertzanides et al., 2000, Mertzanides et al., 2001). The input impedance  $Z_{in}$ , at the interface between air and the dielectric surface, can be found from  $R$  by (Wait, 1985):

$$Z_{in} = \eta_0 \frac{1 + R}{1 - R} \quad (1)$$

By making use of appropriate algebra manipulation we are led to the following expressions:

$$\tan \frac{\delta_i}{2} = \frac{B_i}{A_i} \quad i=1, 2 \quad (2)$$

$$\varepsilon_1 = \left( \frac{\eta_0}{Y} \right)^2 \cos \delta_1 \cos^2 \frac{\delta_1}{2} \quad (3)$$

$$l \sqrt{\varepsilon_1} = \frac{\pi c}{2(\omega_2 - \omega_1)} \frac{\sqrt{\cos \delta_1}}{\cos \frac{\delta_1}{2}} \quad (4)$$

$$\tan \left( \frac{\delta_2 - \delta_1}{2} \right) = \frac{\Delta}{\Gamma} \quad (5)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_1}{\Gamma^2 + \Delta^2} \cdot \frac{\cos \delta_2}{\cos \delta_1} \quad (6)$$

where  $\varepsilon_i$  and  $\tan \delta_i$  are the dielectric constant and tangential losses of  $i^{\text{th}}$  layer,  $l$ , is the depth of the upper

\* A DIRECT SOLUTION FOR DIELECTRIC AND GEOMETRIC PARAMETERS OF LOSSY TWO-LAYERED MEDIA - APPLICATIONS IN ENVIRONMENTAL GEOLOGY

1. ΕΡΓ. ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ Α.Π.Θ., 540 06 ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

layer,  $\omega$ , is the angular frequency and  $c$ , is the speed of light in vacuum.

Our method offers the possibility of direct calculation of the two layer parameters from two single measurements of the reflection coefficient, avoiding the use of any iterative procedure.

In summary, the inversion procedure will make the following steps:

- Measurements of the reflection coefficient  $R$  versus frequency.
- Calculation of the  $Z_{in}=A+jB$  from Eq. (1).
- Derivation of two extreme values of  $\text{Real}(Z_{in})$  in two sequential angular frequencies  $\omega_1$  and  $\omega_2$ .
- Calculation of  $\tan\delta_1$  from Eq. (2).
- Calculation of  $\epsilon_1$  from Eq. (3) and  $l$  from Eq. (4).
- Calculation of  $\epsilon_2$  and  $\tan\delta_2$  from Eqs. (5) and (6).

The range of applications includes problems in engineering and environmental geology. More specific, the method offers a useful analytical tool for interpreting remote sensing data, concerning identification of pollution in oceans caused by plankton or petroleum, inspection the use of fertilizers in cultivation areas, determination of soil moisture etc. Furthermore, it can be applied in cases like shallow stratigraphy and water table mapping, detection of organic and inorganic contaminants in underground water, checking the distortion of walls, the asphalt of roads and in archaeological prospection.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** Επίπεδο ΗΜ κύμα, μιγαδικός συντελεστής ανάκλασης, αντίσταση εισόδου, αναλυτική μέθοδος, τηλεπισκόπηση, περιβαλλοντική γεωλογία

**KEY WORDS:** Reflectometry, complex reflection coefficient, input impedance, remote sensing, environmental geology

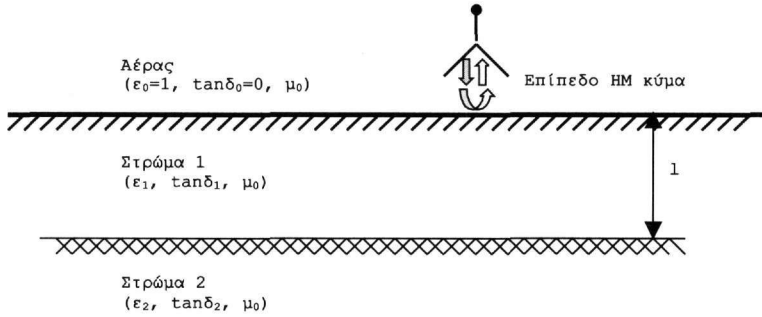
## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέτρηση του συντελεστή ανάκλασης, ως μέθοδος για τον προσδιορισμό των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων υλικών ή γεωλογικών σχηματισμών, έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν από αρκετούς ερευνητές. Στην περίπτωση που το μέσο παρουσιάζει ανομοιογένεια ή είναι στρωματωμένο, απαιτείται η χρήση αριθμητικών μεθόδων αντιστροφής για τον υπολογισμό των διηλεκτρικών παραμέτρων (Risha and Vidberg, 1983, Habashy et al, 1986, Habahy and Mittra, 1987). Αναλυτική επίλυση του προβλήματος υπάρχει μόνο στην περίπτωση όπου τα στρώματα είναι τέλεια διηλεκτρικά (Linlor and Jiracek, 1975) ή όταν παρουσιάζουν ηλεκτρικές απώλειες, αλλά η τιμή τους δε διαφέρει στο πάνω και κάτω στρώμα (Parchomchuk et al., 1989). Με τη μεθοδολογία που θα παρουσιαστεί, καθίσταται δυνατός ο απευθείας προσδιορισμός του πάχους και των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων μίας δομής δύο στρωμάτων, όταν οι εφαιπτομενικές απώλειες είναι διαφορετικές (Mertzanides et al., 2000, Mertzanides et al., 2001).

Για την επίλυση του προβλήματος, χρειάζεται να μετρηθεί η αντίσταση εισόδου, στη διαχωριστική επιφάνεια του πάνω στρώματος και του αέρα, σε ένα εύρος συχνοτήτων, όπου παρουσιάζονται δύο διαδοχικά ακρότατα του πραγματικού της μέρους. Η ανάλυση που θα ακολουθήσει στηρίζεται στην αναλογία της διάδοσης επίπεδων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων στο χώρο, με τη διάδοση TEM (εγκάρσιων) κυμάτων σε γραμμές μεταφοράς (Chirpman, 1968). Με τη χρήση του ισοδύναμου κυκλώματος υπολογίζεται ο συντελεστής ανάκλασης. Προϋπόθεση αποτελεί η ομοιογένεια των επιμέρους στρωμάτων και η διατήρηση των ηλεκτρομαγνητικών ιδιοτήτων σταθερών στο μετρούμενο εύρος συχνοτήτων.

## 2. ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο σχήμα (1) φαίνεται η γεωμετρία του προβλήματος. Στρώμα διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_1$ , εφαιπτομενικών απωλειών  $\tan\delta_1$  και πάχους  $l$ , υπέρκειται στρώματος διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_2$ , εφαιπτομενικών απωλειών  $\tan\delta_2$  και απείρου πάχους. Τόσο το πάνω όσο και το κάτω στρώμα είναι μη μαγνητικά ( $\mu=\mu_0$ ). Η περιοχή πάνω από τα δύο στρώματα είναι ο ημιχώρος που αποτελείται από αέρα ( $\epsilon_0=1$ ,  $\tan\delta_0=0$ ,  $\mu=\mu_0$ ). Στη διαχωριστική επιφάνεια εδάφους - αέρα, θεωρούμε ότι προσπίπτει κάθετα, αρμονικό, επίπεδο ηλεκτρομαγνητικό κύμα, κυκλικής συχνότητας  $\omega$ .



**Σχήμα 1. Κάθετη πρόσπτωση επίπεδου ΗΜ κύματος επάνω σε δομή δύο οριζόντιων στρωμάτων.**  
**Fig. 1. Two - layered medium, normally irradiated by a time - harmonic plane wave.**

Ο συντελεστής ανάκλασης ορίζεται ως εξής (Wait, 1985):

$$R = \frac{Z_{in} - n_0}{Z_{in} + n_0} \quad (1)$$

Η αντίσταση εισόδου στην κορυφή του πάνω στρώματος, δίνεται από τη σχέση (Wait, 1985):

$$Z_{in} = Z_1 \frac{Z_2 + Z_1 \tanh(\gamma_1 l)}{Z_1 + Z_2 \tanh(\gamma_1 l)} \quad (2)$$

όπου:

$$\gamma_1 = j \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_1} \sqrt{1 - j \tan \delta_1} : \text{ Σταθερά διάδοσης στο πάνω στρώμα}$$

l: Πάχος του πάνω στρώματος σε m

ω: Κυκλική συχνότητα

$$n_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} : \text{ Χαρακτηριστική αντίσταση του κενού}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} : \text{ Ταχύτητα διάδοσης των ΗΜ κυμάτων στο κενό}$$

$$j = \sqrt{-1}$$

Οι χαρακτηριστικές αντιστάσεις  $Z_i$  ( $i=1,2$ ) των δύο στρωμάτων και η σταθερά διάδοσης στο πρώτο στρώμα  $\gamma_1$ , μπορούν να γραφούν και ως:

$$Z_i = n_0 \sqrt{\frac{\cos \delta_i}{\epsilon_i}} e^{j \frac{\delta_i}{2}} = Z_i^0 e^{j \frac{\delta_i}{2}} \quad (3)$$

$$\gamma_1 = j \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\cos \delta_1}} e^{-j \frac{\delta_1}{2}} \quad (4)$$

Με τη χρήση των σχέσεων (3) και (4), προκύπτει ότι η αντίσταση εισόδου στην επιφάνεια του πάνω στρώματος μπορεί να γραφεί και ως:

$$Z_{in} = Z_1^0 e^{j \frac{\delta_1}{2}} \tanh(\gamma_1 l + \beta_{2,1}) \quad (5)$$

όπου ο παράγοντας  $\beta_{2,1}$  δίνεται από τη σχέση:

$$\tanh \beta_{2,1} = \frac{Z_2^0}{Z_1^0} e^{j \left( \frac{\delta_2 - \delta_1}{2} \right)} \quad (6)$$

Η μεθοδολογία βασίζεται στις σχέσεις (4) - (6).

Ισχύει ότι (Abramowitz and Stegun, 1970):

$$\text{Im} [\tanh (\gamma_1 l + \beta_{2,1})] = 0 \quad (7)$$

όταν είναι,

$$\text{Im} (\gamma_1 l + \beta_{2,1}) = \frac{\kappa\pi}{2} \quad \text{ή} \quad \text{Im} (\gamma_1 l) = \frac{\kappa\pi}{2} - \text{Im} (\beta_{2,1}) \quad (8)$$

Όπως αποδεικνύεται, η (7) επαληθεύεται όταν το πραγματικό μέρος της αντίστασης εισόδου  $Z_{in}$ , παρουσιάζει ακρότατες τιμές  $\left( \frac{d}{d\omega} [\text{Re}(Z_{in})] = 0 \right)$ .

Αν εφαρμόσουμε την (8) σε δύο διαδοχικές συχνότητες  $\omega_1$  και  $\omega_2$ , καταλήγουμε ότι:

$$l \sqrt{\epsilon_1} = \frac{c}{2(\omega_2 - \omega_1)} \frac{\sqrt{\cos \frac{\delta_1}{2}}}{\cos \frac{\delta_1}{2}} \quad (9)$$

Σε αυτές τις συχνότητες ( $\omega_1, \omega_2$ ), μετράμε την αντίσταση εισόδου  $Z_{in}$ :

$$Z_{in}(\omega_1) = A_1 + jB_1 = Z_1^0 e^{j\frac{\delta_1}{2}} \tanh [\beta_{2,1} + \gamma_1(\omega_1)l] \quad (10\alpha)$$

$$Z_{in}(\omega_2) = A_2 + jB_2 = Z_1^0 e^{j\frac{\delta_1}{2}} \tanh [\beta_{2,1} + \gamma_1(\omega_2)l] \quad (10\beta)$$

και επειδή ο παράγοντας  $\tanh [\beta_{2,1} + \gamma_1(\omega_i)l]$  έχει μόνο πραγματικό μέρος, προκύπτει ότι:

$$\tan \frac{\delta_1}{2} = \frac{B_i}{A_i} \quad i=1, 2 \quad (11)$$

Επιπλέον, στις συχνότητες αυτές ο παράγοντας  $\tanh (\beta_{2,1} + \gamma_1 l)$ , δίνεται:

$$\tanh (\beta_{2,1} + \gamma_1(\omega_i)l) = \frac{A_i}{Z_1^0 \cos \frac{\delta_1}{2}}, \quad i=1, 2 \quad (12)$$

Με την εφαρμογή της (12) για τις συχνότητες  $\omega_1$  και  $\omega_2$ , οδηγούμαστε σε μία δευτεροβάθμια εξίσωση από την οποία υπολογίζεται η ποσότητα  $Y = Z_1^0 \cos \frac{\delta_1}{2}$ , την οποία αν αντικαταστήσουμε στην (3), βρίσκουμε τη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_1$ :

$$\epsilon_1 = \left( \frac{\eta_0}{Y} \right)^2 \cos \delta_1 \cos^2 \frac{\delta_1}{2}, \quad (13)$$

ενώ από τις (9) και (13) υπολογίζεται το πάχος  $l$  του πάνω στρώματος.

Από την επίλυση της (10α), ως προς  $\tanh (\beta_{2,1})$ , έχουμε ότι:

$$\tanh (\beta_{2,1}) = \Gamma + j\Delta \quad (14)$$

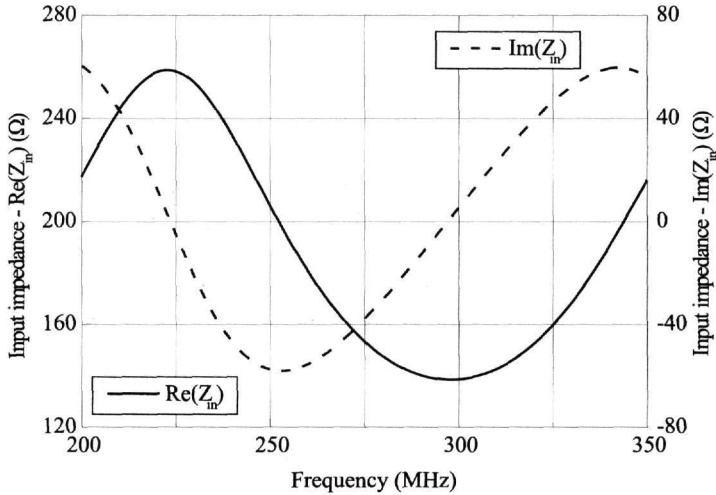
Οι ηλεκτρομαγνητικές παράμετροι του δεύτερου και κατώτερου στρώματος προκύπτουν από την εξίσωση των σχέσεων (6) και (14):

$$\tan \left( \frac{\delta_2 - \delta_1}{2} \right) = \frac{\Delta}{\Gamma} \quad (15)$$

$$\epsilon_2 = \frac{\epsilon_1}{\Gamma^2 + \Delta^2} \cdot \frac{\cos \delta_2}{\cos \delta_1} \quad (16)$$

### 3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΦΑΛΜΑΤΑ

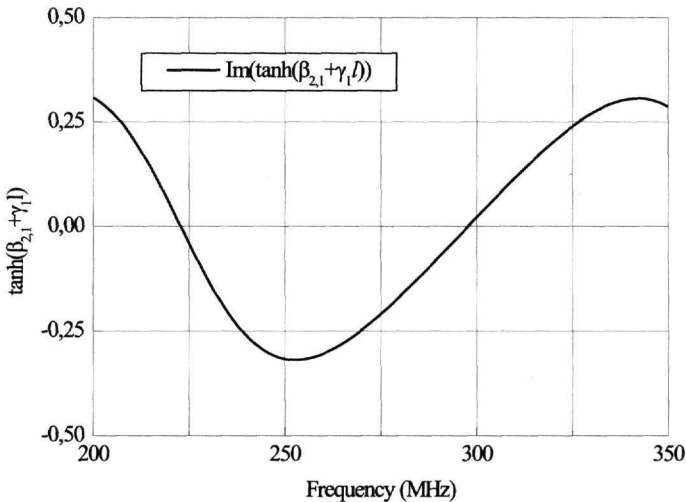
Για τη δοκιμή της ακρίβειας της μεθόδου, προσομοιώθηκε η αντίσταση εισόδου μίας δομής δύο στρωμάτων με  $l=0.5m$ ,  $\epsilon_1=4$ ,  $\epsilon_2=8$ ,  $\tan\delta_1=0.02$  και  $\tan\delta_2=0.08$  και ελιχειρήθηκε ο προσδιορισμός των παραμέτρων με τη μεθοδολογία που προαναφέρθηκε. Στο σχήμα (2), φαίνεται η μεταβολή του πραγματικού και φανταστικού μέρους της αντίστασης εισόδου (input impedance) για συχνότητες από 200 - 350 MHz. Σε αυτό το εύρος, παρατηρούνται δύο διαδοχικά ακρότατα της τιμής του πραγματικού μέρους της αντίστασης εισόδου  $Z_{in}$ .



Σχήμα 2. Μεταβολή του πραγματικού και φανταστικού μέρους της αντίστασης εισόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για δομή δύο στρωμάτων με  $l=0.5m$ ,  $\epsilon_1=4$ ,  $\epsilon_2=8$ ,  $\tan\delta_1=0.02$  και  $\tan\delta_2=0.08$ .

Fig. 2. Simulated frequency response of the input impedance (real and imaginary part) for a two-layered half-space ( $l=0.5m$ ,  $\epsilon_1=4$ ,  $\epsilon_2=8$ ,  $\tan\delta_1=0.02$  και  $\tan\delta_2=0.08$ ).

Στο σχήμα (3), φαίνεται η μεταβολή του φανταστικού μέρους του παράγοντα  $\tanh(\gamma_1 l + \beta_{2,1})$ . Όπως προκύπτει, ακρότατες τιμές του πραγματικού μέρους της  $Z_{in}$ , συμβαίνουν στις συχνότητες όπου το φανταστικό μέρος της  $\tanh(\gamma_1 l + \beta_{2,1})$  γίνεται ίσο με μηδέν.



Σχήμα 3. Μεταβολή του φανταστικού μέρους του παράγοντα σε συνάρτηση με τη συχνότητα για δομή δύο στρωμάτων με  $l=0.5m$ ,  $\epsilon_1=4$ ,  $\epsilon_2=8$ ,  $\tan\delta_1=0.02$  και  $\tan\delta_2=0.08$ .

Fig. 3. Simulated frequency response of the factor  $\text{Im}[\tanh(\beta_{2,1} + \gamma_1 l)]$ , for the two-layered half-space given in Fig. 2.

Ακρότατες τιμές της  $\text{Re}(Z_{in})$  υπάρχουν στις συχνότητες  $f_1=222.83$  MHz και  $f_2=297.77$  MHz. Στην  $f_1$ , η αντίσταση εισόδου είναι  $Z_{in}=258.95+j2.59$  ενώ στην  $f_2$  είναι  $\text{Re}(Z_{in})=138.55$  Ω. Από την (11) προκύπτει ότι η εφαπτομένη απωλειών του πάνω στρώματος είναι  $\tan\delta_1 \cong 0.02025$  και από την (9) ότι το ηλεκτρικό του πάχος είναι  $l\sqrt{\epsilon_1} \cong 0.9999$  m. Η διηλεκτρική σταθερά του πάνω στρώματος υπολογίζεται από την (13)  $\epsilon_1 \cong 4.0005$ , και με τη βοήθεια της (9) το πάχος του πάνω στρώματος,  $l \cong 0.4999$  m. Όσο αφορά το κάτω στρώμα, από τις σχέσεις (15) και (16), η εφαπτομένη απωλειών και η διηλεκτρική σταθερά υπολογίζονται,  $\tan\delta_2=0.08110$  και  $\epsilon_2=8.0903$  αντίστοιχα.

Λόγω του ότι με την παραπάνω τεχνική, οι παράμετροι υπολογίζονται απευθείας και δε γίνεται χρήση αριθμητικών επαναληπτικών μεθόδων αντιστροφής, τα προκύπτοντα σφάλματα είναι μικρά. Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται αποκλειστικά από την ακρίβεια στη μέτρηση της αντίστασης εισόδου, ιδιαίτερα δε του φανταστικού μέρους αυτής  $\text{Im}(Z_{in})$  και από την ακρίβεια προσδιορισμού της συχνότητας στην οποία παρουσιάζει ακρότατη τιμή η ποσότητα  $\text{Re}(Z_{in})$ . Περισσότερο ευαίσθητη στη μέτρηση του  $\text{Im}(Z_{in})$ , είναι η εφαπτομένη απωλειών του πάνω στρώματος  $\tan\delta_1$ , η οποία υπολογίζεται με σφάλμα της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτό του  $\text{Im}(Z_{in})$ .

Για το προηγούμενο παράδειγμα, το σφάλμα υπολογισμού ήταν περίπου 1.26% για το  $\tan\delta_1$ , 0.01% για το  $l\sqrt{\epsilon_1}$ , 0.01% για το  $\epsilon_1$ , 0.01% για το  $l$ , 1.38% για το  $\tan\delta_2$  και 0.10% για το  $\epsilon_2$ .

Δοκιμάστηκαν πολλές περιπτώσεις δομών με διαφορετικές ΗΜ παραμέτρους. Οι τιμές των A ( $\text{Re}(Z_{in})$ ), B ( $\text{Im}(Z_{in})$ ) και των συχνοτήτων συντονισμού μεταβλήθηκαν, έτσι ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία της μεθόδου. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, φάνηκε ότι μία μεταβολή ζ% στα A και B, προκαλεί μέχρι και ζ% σφάλμα στο  $\tan\delta_1$ . Η ακρίβεια στον προσδιορισμό των  $\epsilon_{1,l}$ , εξαρτάται από την ακρίβεια των A, B και

των συχνοτήτων συντονισμού. Το σφάλμα των  $\epsilon_{1,l}$  είναι σε κάθε περίπτωση μικρότερο από  $(\frac{4}{5}\zeta+u)\%$ , όπου

u% είναι το επί τοις εκατό σφάλμα στον προσδιορισμό της συχνότητας συντονισμού. Λόγω του ότι στα περισσότερα όργανα μέτρησης, το u είναι πολύ μικρό, προκύπτει τελικά ότι το σφάλμα στα  $\epsilon_{1,l}$ , δεν ξεπερνά το

$\frac{4}{5}\zeta\%$ . Η ακρίβεια στον προσδιορισμό των  $\epsilon_2$ ,  $\tan\delta_2$ , επηρεάζεται από τις διαφορές  $(\delta_2-\delta_1)$ ,  $(\epsilon_2-\epsilon_1)$  καθώς και

από την τιμή του l. Δεν παρατηρήθηκε γραμμικότητα μεταξύ των σφαλμάτων και των παραπάνω μεγεθών. Για τιμές των  $\epsilon_2$ ,  $\tan\delta_2$  που δε διέφεραν πάνω από μία τάξη μεγέθους με αυτές των  $\epsilon_1$ ,  $\tan\delta_1$ , τα σφάλματα για το κάτω στρώμα έφταναν μέχρι και 3ζ%. Όσο η διαφορά στις ΗΜ παραμέτρους μεταξύ των δύο στρωμάτων αυξάνει, τόσο μεγαλώνουν και τα σφάλματα.

Λόγω της εξάρτησης των ΗΜ παραμέτρων από τη συχνότητα, σφάλματα μπορεί να προκύψουν όταν το εύρος των συχνοτήτων στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις είναι πολύ μεγάλο (von Hippel, 1954).

#### 4. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Το εύρος εφαρμογών της μεθόδου είναι εξαιρετικά πλατύ και περιλαμβάνει πολλά προβλήματα ωκεανογραφίας, υδρολογίας, τεχνικής και περιβαλλοντικής γεωλογίας. Πιο συγκεκριμένα, προσφέρει ένα χρήσιμο εργαλείο για την απευθείας ερμηνεία δεδομένων τηλεοπτικής, που αφορούν περιπτώσεις εντοπισμού και χαρτογράφησης της ρύπανσης των ωκεανών από συγκέντρωση πλαγκτού και πετρελαιοκηλίδων, παρακολούθηση της χρήσης λιπασμάτων σε καλλιέργειες, καθορισμό της υγρασίας των εδαφών κ.λπ. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα όπως είναι ο εντοπισμός επιφανειακών ασυνεχειών, η συγκέντρωση οργανικών και ανόργανων ρύπων στους υδροφόρους ορίζοντες, ο καθορισμός του πάχους αλλοίωσης των τοιχωμάτων και γενικότερα του ελέγχου των κατασκευών, ο έλεγχος της ποιότητας της ασφάλτου των δρόμων, στην αρχαιολογική έρευνα, καθώς και για στρατιωτικούς σκοπούς. Επίσης, είναι γνωστό ότι υπάρχουν ερμηκικές εκτάσεις στην υποτροπική ζώνη, όπου κάτω από το επιφανειακό ξηρό στρώμα της άμμου και σε μικρό βάθος, συγκεντρώνονται ποσά υγρασίας στους πόρους της άμμου, ικανά να μετατρέψουν το άγονο έδαφος σε καλλιεργήσιμο.

Ιδιαίτερα δε, όσο αφορά την υγρασία των εδαφών, έχει μελετηθεί η επίδραση του ποσοστού υγρασίας στις τιμές των ηλεκτρομαγνητικών παραμέτρων των εδαφών (Hoekstra and Delaney, 1974, Topp et al., 1980, Halikainen et al., 1985, Dobson and Ulaby, 1986). Θεωρώντας το μοντέλο των δύο στρωμάτων για άργιλο όπου η υγρασία βρίσκεται στο κάτω στρώμα ( $\epsilon_2=44$ ,  $\tan\delta_2=0.66$ ), ενώ το πάνω στρώμα δεν περιέχει καθόλου νερό ( $\epsilon_1=3$ ,  $\tan\delta_1=0.12$  και  $l=0.2$  m) και ακολουθώντας τη διαδικασία που περιγράφηκε, υπολογίστηκε:  $\tan\delta_1 \cong 0.119932$ ,  $\epsilon_1 \cong 2.999922$ ,  $l \cong 0.200003$  m,  $\epsilon_2 \cong 43.958$  και  $\tan\delta_2 \cong 0.659347$ . Από τη συσχέτιση των τιμών των  $\epsilon$ ,  $\tan\delta$ , με τα ποσοστά του νερού στους πόρους της άργιλου, μπορεί να υπολογιστεί η υγρασία των δύο στρωμάτων (Wensink, 1993).

Μία ενδιαφέρουσα περίπτωση που συναντάται συχνά στα βόρεια γεωγραφικά πλάτη, είναι και αυτή όπου στρώμα φρέσκου χιονιού υπερκαλύπτει παλαιότερο παγωμένο χιόνι. Η διαφορά στην πυκνότητα και την υφή του χιονιού διαφορετικών επεισοδίων, αντανακλάται στις διαφορετικές τιμές των  $\epsilon$  και  $\tan\delta$ . Έτσι, προσομοιώνοντας το φρέσκο χιόνι με στρώμα πάχους  $l=1.5\text{m}$  και ΗΜ παραμέτρων  $\epsilon_1=1.2$ ,  $\tan\delta_1=0.00029$  και το παγωμένο χιόνι με στρώμα απείρου πάχους και παραμέτρων  $\epsilon_2=1.5$ ,  $\tan\delta_2=0.0009$ , μπορεί εύκολα να γίνει ο διαχωρισμός και η ακριβής ταυτοποίηση των στρωμάτων:  $l \cong 1.5000\text{m}$  και ΗΜ παραμέτρων  $\epsilon_1 \cong 1.2000$ ,  $\tan\delta_1 \cong 0.000290$  και  $\epsilon_2 \cong 1.5000$ ,  $\tan\delta_2 \cong 0.000899$ .

Τέλος, αναφέρεται η περίπτωση ρύπανσης της θάλασσας ( $\epsilon_2=69.0$ ,  $\tan\delta_2=4.0$ ) από αργό πετρέλαιο ( $\epsilon_1=2.19$ ,  $\tan\delta_1=0.0055$ ,  $l=0.2\text{m}$ ). Με εφαρμογή της μεθοδολογίας για αυτές τις τιμές, έχουμε:  $\epsilon_1 \cong 2.19001$ ,  $\tan\delta_1 \cong 0.005501$ ,  $l=0.19999\text{m}$  και  $\epsilon_2 \cong 68.9936$ ,  $\tan\delta_2 \cong 4.00057$ .

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μία νέα αναλυτική τεχνική για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών μίας δομής δύο διηλεκτρικών στρωμάτων, παρουσιάστηκε. Η μέθοδος στηρίζεται στη μέτρηση της αντίστασης εισόδου στην επιφάνεια εδάφους - αέρα, σε δύο συχνότητες στις οποίες παρατηρούνται δύο διαδοχικές ακρότατες τιμές του πραγματικού μέρους της Ζin. Με τον τρόπο αυτό, μπορούν να προσδιοριστούν απευθείας οι ηλεκτρομαγνητικές παράμετροι και το πάχος των στρωμάτων. Η ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια στη μέτρηση του φανταστικού μέρους της αντίστασης εισόδου και φυσικά από το πόσο καλά το θεωρητικό μοντέλο προσεγγίζει την πραγματική δομή στη φύση.

Εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να βοηθήσει στην ερμηνεία δεδομένων τηλεπισκόπησης και σε πολλά προβλήματα ωκεανογραφίας, εδαφολογίας, τεχνικής και περιβαλλοντικής γεωλογίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ABRAMOWITZ, M. AND STEGUN, I. A., 1970, "Handbook of Mathematical Functions", New York: Dover Publications
- CHIPMAN, R. A., 1968, "Theory and Problems of Transmission Lines", New York: Schaum's Outline Series
- DOBSON, M. C., AND ULABY, F. T., 1986, "Active microwave soil moisture research", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. GE-24, pp.23-26
- HABASHY, T. M. AND MITTRA, R., 1987, "On some inverse methods in electromagnetics", J. Electromagn. Waves and Appl., vol. 1, pp.25-28
- HABASHY, T. M., CHEW, W. C., CHOW, E. Y., 1986, "Simultaneous reconstruction of permittivity and conductivity profiles in a radially inhomogeneous slab", Radio Sci., vol. 21, pp.635-645
- HALIKAINEN, M. T., ULABY, F. T., DOBSON, M. C., AL-RAYES, M. A., WU, L. K., 1985, "Microwave dielectric behavior of wet soil - Part I: Empirical models and experimental observations", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. GE-23, pp.25-34
- HOEKSTRA, P. AND DELANEY, A., 1974, "Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies", J. Geophys. Res., vol. 79, pp.1699-1708
- LINLOR, W. I. AND JIRACEK, G. R., 1975, "Electromagnetic reflection from multilayered snow models", J. Glaciology, vol. 14, pp.501-515
- MERTZANIDES, I. C., TSOKAS, G. N., SAHALOS, J. N., 2000, "AN ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE CHARACTERISTICS OF TWO-LAYERED MEDIA", Proceedings of the Second Symposium of Trans-Black Sea Union of Applied Electromagnetism (BSUAE), June 27-29, Xanthi - Greece
- MERTZANIDES, I. C., GOUDOS, S. K., SAHALOS, J. N., 2001, "Direct Solution and Monte Carlo simulation of the inverse problem in two-layered half-space", Archiv fur Elektrotechnik, (accepted for publication on June 2001)
- PARCHOMCHUK, P., WALLENDER, W. W., KING, R. J., 1989, "Direct Solution for Dielectric Properties of a Lossy Two-Layered Material", IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 27, pp. 310-315
- RISHA, D. O. AND VIDBERG, H. J., 1983, "Iterative solution of the electromagnetic inversion problem for vertically varying earth", Geophysics, vol. 19, pp.137-156
- TOPP, G. C., DAVIS, J. L., ANNAN, A. P., 1980, "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines", Water Resources Research, vol. 16, pp.574-582
- VON HIPPEL, A. R., 1954, "Dielectric materials and applications", Boston: Artech House
- WAIT, J. R., 1985, "Electromagnetic Wave Theory", New York: Harper & Row
- WENSINK, W. A., 1993, "Dielectric properties of wet soils in the frequency range 1 - 3000 MHz", Geophysical Prospecting, vol. 41, pp.671-696