



ΕΛΛΗΝΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ

**ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΟΥ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟΥ
ΜΕΓΑΛΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ**

Πειραιώς 45, 105 53, Αθήνα, Τηλ., Fax: 210-3216851, e-mail: info@cigre.gr

COMITE NATIONAL HELLENIQUE

45, rue Pireos, 105 53, Athenes, Tel.-Fax: +30210-3216851, e-mail: info@cigre.gr

GREEK NATIONAL COMMITTEE

45, Pireos Str. , 105 53, Athens, Tel.-Fax: +30210-3216851, e-mail: info@cigre.gr

ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΕΝΑΕΡΙΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

I.N. Ζτούπης¹

I.Φ. Γκόνος¹

I.A. Σταθόπουλος¹

Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π.

Ο ακριβής υπολογισμός των ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων που παράγονται από εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντικός σε πολλούς ερευνητικούς τομείς. Παρά το γεγονός πως πολλά εμπορικά πακέτα λογισμικού είναι ικανά για την εκτίμηση των χαμηλόσυχνων πεδίων κάτω από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς, το άρθρο αυτό ασχολείται με την ανάλυση και την εφαρμογή δύο τρισδιάστατων μεθόδων υπολογισμού. Αυτές οι μέθοδοι βασίζονται στον νόμο του Biot-Savart για το μαγνητικό πεδίο και στη μέθοδο των ισοδυνάμων φορτίων για το ηλεκτρικό πεδίο. Αμφότερες οι μέθοδοι επιλύθηκαν αριθμητικά με το λογισμικό του Matlab χρησιμοποιώντας τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά και παραμέτρους των γραμμών μεταφοράς. Η ορθότητα τους επικυρώθηκε κατόπιν άμεσης σύγκρισης με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σύμφωνα με πρότυπες διαδικασίες. Επίσης, τα αποτελέσματα υπολογισμών επαληθεύτηκαν με αποτελέσματα που λήφθησαν από ένα εμπορικά διαθέσιμο πακέτο λογισμικού. Το επίπεδο συμφωνίας που παρατηρήθηκε στη μελέτη αυτή μεταξύ των δύο μεθόδων υπολογισμού, των μετρήσεων και του εμπορικού λογισμικού συζητείται δίνοντας χρήσιμα συμπεράσματα για την δυνατότητα εφαρμογής της κάθε μεθόδου.

MEASUREMENTS AND CALCULATIONS OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS FROM OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINES

I.N. Ztoupis

I.F. Gonos

I. A. Stathopoulos¹

High Voltage Laboratory N.T.U.A.

Precise calculation of electric and magnetic fields produced by overhead power lines is highly important in several research areas. Although many commercial software packages are able to estimate the extremely low frequency fields under the overhead transmission lines, this paper deals with the analysis and application of two three-dimensional calculation methods. These methods are based on the Biot-Savart law for magnetic field and the Charge Simulation Method (CSM) for electric field. Both methods were numerically solved by MATLAB program using the required characteristics and parameters of the transmission lines. Their accuracy was validated using direct comparison with measurements performed in the vicinity of power transmission lines according to standard procedures. The computed results were also verified with results obtained by a commercially available software package. The level of agreement between the two calculation methods, the measurements and the commercially software package observed in this study is discussed giving useful conclusions about the applicability of each method.

¹ Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου, 15780, Τηλ. 2107723582, Fax 2107723504, e-mail: ztoup@central.ntua.gr, igonos@cs.ntua.gr, stathop@power.ece.ntua.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σταθερά αυξανόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως φυσική συνέπεια την εξάπλωση των συστημάτων μεταφοράς και κατ' επέκταση των εναέριων γραμμών μεταφοράς, καθώς παραμένουν, ακόμη και σήμερα, το αποτελεσματικότερο / οικονομικότερο μέσο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στον ελλαδικό χώρο συνίστανται από περίπου 10500km εναέριων γραμμών υψηλής τάσης (150kV) και υπερυψηλής τάσης (400kV), με πολλές εξ αυτών διερχόμενες πλησίον ή / και εντός κατοικημένων περιοχών. Οι εναέριες γραμμές μεταφοράς, λόγω της τάσης στην οποία λειτουργούν και του ρεύματος από το οποίο διαρρέονται, δημιουργούν γύρω τους εξαιρετικά χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία. Τα εν λόγω πεδία, έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και της κοινής γνώμης, όσον αφορά στις ενδεχόμενες δυσμενείς επιπτώσεις τους στον ανθρώπινο οργανισμό.

Τα χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία αλληλεπιδρούν με τον ανθρώπινο οργανισμό επάγοντας ηλεκτρικά πεδία και δημιουργώντας ρεύματα στο εσωτερικό του. Από το 1979, όπου μία μελέτη [1] ανέδειξε για πρώτη φορά το ζήτημα των αρνητικών επιδράσεων από την έκθεση σε πεδία παραγόμενα από ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, έχουν διεξαχθεί παγκοσμίως αμέτρητες επιδημιολογικές, εργαστηριακές και κλινικές έρευνες πάνω σε αυτό το αντικείμενο μελέτης. Το 2002 ο Διεθνής Οργανισμός Ερευνών για τον Καρκίνο (IARC) κατέταξε τα χαμηλόσυχνα μαγνητικά πεδία ως ενδεχομένως καρκινογενή για παιδική λευχαιμία και έκρινε ανεπαρκείς τις ενδείξεις για πρόκληση άλλου τύπου καρκίνου από την έκθεση σε χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία [2]. Παρά το γεγονός ότι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων από το σύνολο των ερευνών που διεξάγονται μέχρι και σήμερα είναι αμφιλεγόμενη, δεν υπάρχει καμία επιστημονική απόδειξη σχετικά με τις αρνητικές συνέπειες για την υγεία του ανθρώπου που μπορεί να προκύψουν από τα χαμηλόσυχνα πεδία στα επίπεδα που εμφανίζονται στους εργασιακούς ή μη περιβάλλοντες χώρους [3].

Παρόλα αυτά, μία σειρά από εθνικούς και διεθνείς οργανισμούς έχουν προτείνει όρια έκθεσης για τα χαμηλόσυχνα πεδία. Το 1998 η Διεθνής Επιτροπή Προστασίας από Μη Ιονίζουσες Ακτινοβολίες (ICNIRP) δημοσίευσε τις κατευθυντήριες γραμμές της [4] όσον αφορά στην έκθεση του κοινού και στην επαγγελματική έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τα όρια αυτών των κατευθυντήριων γραμμών έγιναν ευρέως αποδεκτά και εγκρίθηκαν από την Ευρωπαϊκή Ένωση [5], [6]. Πολλές χώρες μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα τα έθεσαν σε εφαρμογή για την προστασία του κοινού [7], [8]. Πρόσφατα, η μέγιστη επιτρεπόμενη έκθεση σε πεδία χαμηλών συχνοτήτων ορίστηκε στο πρότυπο IEEE C95.6-2002 [9] και τις τελευταίες οδηγίες της ICNIRP [10]. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα επίπεδα αναφοράς για την έκθεση του κοινού και την επαγγελματική έκθεση σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 50 Hz.

Οδηγίες και κανονισμοί	Έκθεση γενικού πληθυσμού			Επαγγελματική έκθεση		
	E (kV/m)	H (A/m)	B (μ T)	E (kV/m)	H (A/m)	B (μ T)
Κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP [4]	5	80	100	10	400	500
Ευρωπαϊκό κοινοβούλιο [5], [6]	5	80	100	10	400	500
Ελληνική νομοθεσία [7], [8]	5	80	100	-	-	-
Πρότυπο IEEE C95.6-2002 [9]	5 ^a	719	904	20	2160	2710
Νέες κατευθυντήριες γραμμές ICNIRP [10]	5	160	200	10	800	1000

Πίνακας 1: Επίπεδα αναφοράς σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνότητας 50 Hz.

Η ελλιπής επιστημονική γνώση για τους κινδύνους που συνεπάγεται, τόσο η πρόσκαιρη, όσο και η μακροχρόνια έκθεση σε ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων έχει καταστήσει αναγκαία την μέτρηση τους σε αρκετές, «επιβαρυνμένες» από πεδία, περιοχές, όπως αυτές πλησίον των γραμμών μεταφοράς, προκειμένου να διαπιστωθεί κατά πόσον πληρούνται οι απαιτήσεις για την ασφαλή έκθεση του γενικού πληθυσμού ή των επαγγελματικά απασχολούμενων. Ως εκ τούτου, απλές και ομοιόμορφες διαδικασίες μέτρησης έχουν συσταθεί από τα πρότυπα IEC 61786:1998 [11], IEC 62110:2009 [12] και IEEE 644-1994 [13]. Όμως, η εύκολη και γρήγορη εκτίμηση των επιπέδων της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής από τις υφιστάμενες γραμμές μεταφοράς καθώς και η δυνατότητα πρόβλεψης τους κατά την φάση του σχεδιασμού των νέων γραμμών, με στόχο την ελαχιστοποίηση των πεδίων, μέσω υπολογιστικών μεθόδων ή προγραμμάτων υπολογισμού, έχει οδηγήσει στη μερική αντικατάσταση των μετρήσεων [14]–[16] από τους υπολογισμούς – προσομοιώσεις [17]–[21].

^a Εντός της ζώνης διέλευσης των γραμμών μεταφοράς και κάτω από κανονικές συνθήκες φόρτισης, η μέγιστη επιτρεπόμενη έκθεση για τον γενικό πληθυσμό είναι 10 kV/m.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΧΑΜΗΛΟΣΥΧΝΩΝ ΠΕΔΙΩΝ

Αρκετές υπολογιστικοί μέθοδοι όπως η μέθοδος των ροπών (MOM), η μέθοδος των οριακών στοιχείων (BEM), η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM), η μέθοδος των ισοδύναμων φορτίων (CSM) και άλλες δισδιάστατες και τρισδιάστατες τεχνικές έχουν αναπτυχθεί με σκοπό τον ακριβή υπολογισμό των εν λόγω πεδίων. Επίσης, υπάρχουν διαθέσιμα πολυάριθμα εμπορικά προγράμματα λογισμικού χρήσιμα για τους μηχανικούς ως εργαλεία για την σχεδίαση των γραμμών μεταφοράς και τον προσδιορισμό των επιπέδων των πεδίων προκειμένου να προβλεφθούν οι περιπτώσεις της αναμενόμενης και χειρότερης έκθεσης των πεδίων και να επιλεγθούν η ζώνη διέλευσης και η διαμόρφωση των γραμμών μεταφοράς.

Στο παρόν άρθρο παρουσιάζονται το λογισμικό που αναπτύχθηκε, καθώς και οι δύο μεθοδολογίες στις οποίες βασίστηκε, για τον ακριβή υπολογισμό της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής των γραμμών μεταφοράς. Η πρώτη βασίζεται στη μέθοδο των ισοδύναμων φορτίων και η δεύτερη σε αναλυτικές σχέσεις, με εφαρμογή τον νόμο του Biot-Savart [22]–[24]. Για τον τρισδιάστατο υπολογισμό των πεδίων σε εργαλείο της MATLAB λαμβάνονται υπόψη όλα τα απαραίτητα δεδομένα των γραμμών μεταφοράς. Παρότι η καμπύλη των αγωγών φάσης περιγράφεται ακριβέστερα από την εξίσωση της αλυσοειδούς [22], το λογισμικό χρησιμοποιεί παραβολικές εξισώσεις για να υπολογίσει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου και την μαγνητική επαγωγή στις τρεις διαστάσεις. Στη συνέχεια, περιγράφονται συνοπτικά οι υπολογιστικές μέθοδοι για τις τριφασικές γραμμές μεταφοράς.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΕΠΑΓΩΓΗΣ

Το μαγνητικό πεδίο ενός διαρρέομενου αγωγού από ηλεκτρικό ρεύμα (Σχήμα 1) σε αυθαίρετο σημείο στο χώρο P μπορεί να υπολογιστεί από τον νόμο του Biot-Savart:

$$\vec{B} = \mu_0 \int_l \frac{i \vec{dl} \times \vec{r}_o}{4\pi r_o^3} \quad (1)$$

όπου

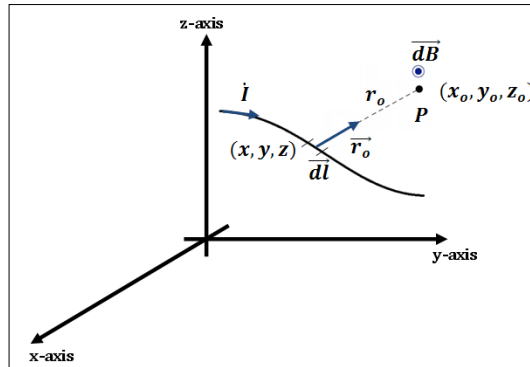
μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ($4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A),

I το ρεύμα που διαρρέει τον αγωγό,

\vec{dl} το διαφορικό στοιχείο στη κατεύθυνση του ρεύματος και

\vec{r}_o το διάνυσμα απόστασης από την πηγή (x, y, z) στο τυχαίο σημείο P (x_o, y_o, z_o) .

Σε αυτή την εργασία, τα μεγέθη ημιτονοειδούς κατάστασης στη θεμελιώδη συχνότητα (συχνότητα ισχύος) αναπαριστώνται εδώ ως φασιθέτες με σύμβολο “ \cdot ”, ενώ “ \rightarrow ” και “ \wedge ” υποδεικνύουν διανύσματα και μοναδιαία διανύσματα, αντίστοιχα.



Σχήμα 1: Μαγνητικό πεδίο στο σημείο P από ηλεκτρικά διαρρέομενο αγωγό

Στις καρτεσιανές συντεταγμένες, τα διανυσματικά μεγέθη \vec{r}_o και \vec{dl} είναι:

$$\vec{r}_o = (x_o - x)\hat{i}_x + (y_o - y)\hat{i}_y + (z_o - z)\hat{i}_z \quad (2)$$

$$\vec{dl} = dx\hat{i}_x + dy\hat{i}_y + dz\hat{i}_z \quad (3)$$

όπου $\hat{i}_x, \hat{i}_y, \hat{i}_z$ είναι τα μοναδιαία διανύσματα στην κατεύθυνση των αξόνων x, y, z, αντίστοιχα.

Εφόσον το βύθισμα του αγωγού μιας εναέριας γραμμής μεταφοράς προσεγγίζεται με την εξίσωση της παραβολής, όταν οι πυλώνες του έχουν διαφορετική διάταξη και άνισα ύψη, όπως εικονίζονται στο Σχήμα 2, μπορεί να αναλυθεί σε δύο επίπεδα και να περιγραφεί με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$z = h_{min} + \frac{x^2}{2C} \quad (4)$$

$$y = \frac{y_{t2} - y_{t1}}{x_{t2} - x_{t1}} x + \frac{x_{t2}y_{t1} - x_{t1}y_{t2}}{x_{t2} - x_{t1}} \quad (5)$$

όπου $(x_{t_1}, y_{t_1}, z_{t_1})$ και $(x_{t_2}, y_{t_2}, z_{t_2})$ είναι τα σημεία ανάρτησης, h_{min} είναι το ύψος του κοντύτερου σημείου του αγωγού πάνω από την γη και C είναι η λύση του συστήματος εξισώσεων (4) και (5).

Η παράμετρος C καθορίζει το σχήμα της παραβολής και μπορεί να γραφεί ως:

$$C = \frac{l}{4S} = \frac{\sqrt{L^2 - (y_{t_1} - y_{t_2})^2}}{4S} \quad (6)$$

όπου $S = z_{t_1} - h_{min}$ είναι το βύθισμα του αγωγού και L είναι η απόσταση μεταξύ των σημείων ανάρτησης.

Δεδομένου πως η μοντελοποιημένη καμπύλη λύνεται στα επίπεδα x-y και x-z, το διαφορικό στοιχείο (3) μπορεί να προσδιοριστεί ως εξής:

$$d\vec{l} = d\vec{x} \left(\hat{i}_x + \frac{dy}{dx} \hat{i}_y + \frac{dz}{dx} \hat{i}_z \right) = d\vec{x} \left(\hat{i}_x + \frac{y_{t_2} - y_{t_1}}{x_{t_2} - x_{t_1}} \hat{i}_y + \frac{x}{C} \hat{i}_z \right) \quad (7)$$

Αντικαθιστώντας την (2) και την (7) στην (1), και υπολογίζοντας το εξωτερικό γινόμενο, το διάνυσμα της πυκνότητας μαγνητικής ροής γίνεται:

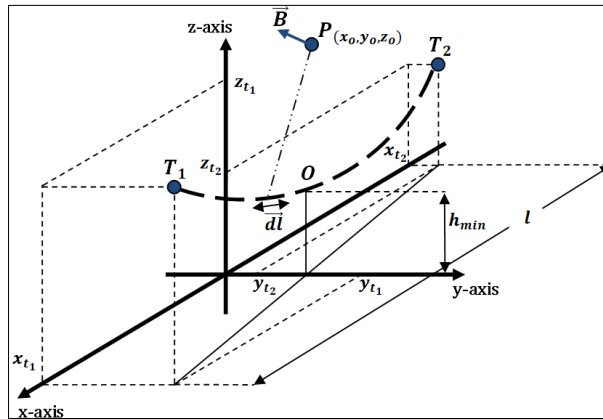
$$\vec{B} = \vec{B}_x + \vec{B}_y + \vec{B}_z = \int_{x_{t_2}}^{x_{t_1}} (b_x \hat{i}_x + b_y \hat{i}_y + b_z \hat{i}_z) dx \quad (8)$$

όπου:

$$b_x = \frac{\mu_0 I \left[\frac{y_{t_2} - y_{t_1}}{x_{t_2} - x_{t_1}} (z_0 - z) - \frac{x}{C} (y_0 - y) \right]}{4\pi r_0^3} \quad (9)$$

$$b_y = \frac{\mu_0 I \left[\frac{x}{C} (x_0 - x) - (z_0 - z) \right]}{4\pi r_0^3} \quad (10)$$

$$b_z = \frac{\mu_0 I \left[(y_0 - y) - \frac{y_{t_2} - y_{t_1}}{x_{t_2} - x_{t_1}} (x_0 - x) \right]}{4\pi r_0^3} \quad (11)$$



Σχήμα 2: Μαγνητικό πεδίο από ηλεκτρικά διαρρέομενο αγωγό με βέλος στις τρεις διαστάσεις

Η συνολική rms τιμή του μαγνητικού πεδίου στο ίδιο σημείο προσδιορίζεται από την σύνθεση των συνιστωσών:

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (12)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την (8), το διάνυσμα της πυκνότητας μαγνητικής ροής για τις γραμμές μεταφοράς μπορεί να παρουσιαστεί στην παρακάτω σχέση:

$$\vec{B} = \sum_{k=1}^N \int_{x_{t_2}}^{x_{t_1}} (b_{x_k} \hat{i}_x + b_{y_k} \hat{i}_y + b_{z_k} \hat{i}_z) dx \quad (13)$$

όπου ο δείκτης k δηλώνει τον k -οστό αγωγό από τους N αγωγούς της εναέριας γραμμής μεταφοράς. Παρόμοια, η συνολική rms τιμή B μπορεί να υπολογιστεί για τριφασικά συστήματα με την (12).

Στην παραπάνω ανάλυση έχουν υιοθετηθεί οι παρακάτω παραδοχές [22]-[24] για την τρισδιάστατη μέθοδο: (α) δεν υπάρχουν αρμονικές στα ρεύματα-φορτία της γραμμής, (β) η επιρροή των ρευμάτων-ειδώλων έχει παραβλεφθεί, (γ) το μαγνητικό πεδίο έχει αξιολογηθεί ελλείψει των σιδηρομαγνητικών υλικών και (δ) η επίδραση των γειτονικών ανοιγμάτων της γραμμής δεν έχει ληφθεί υπόψη παρά μόνο όταν τα σημεία υπολογισμού είναι μακριά από το μέσο του ανοιγματος και κοντά στους πυλώνες.

ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Το ηλεκτρικό πεδίο ενός φορτισμένου αγωγού τοποθετημένου πάνω σε μια πλήρως αγώγιμη επίπεδη γη σε αυθαίρετο σημείο στο χώρο P (Σχήμα 3) μπορεί να υπολογιστεί από:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{C_1(r)} \frac{q(r)\vec{r}_1}{r_1^3} dl_1 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{C_2(r)} \frac{q(r)\vec{r}_2}{r_2^3} dl_2 \quad (14)$$

όπου

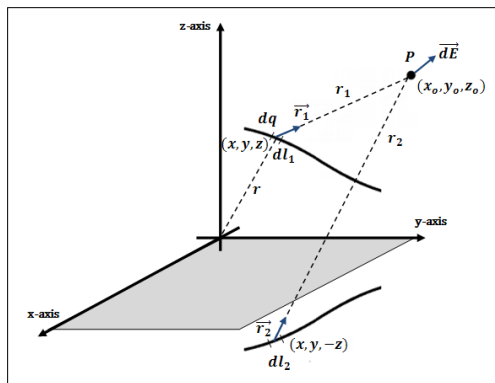
ϵ_0	η διηλεκτρική σταθερά του κενού ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m),
$q(r)$	η γραμμική πυκνότητα φορτίου,
dl_1	το διαφορικό στοιχείο στον πραγματικό αγωγό $C_1(r)$,
dl_2	το διαφορικό στοιχείο στον εικονικό αγωγό $C_2(r)$,
\vec{r}_1	το διάνυσμα απόστασης από τον πραγματικό αγωγό (x,y,z) στο τυχαίο σημείο P (x_o,y_o,z_o) ,
\vec{r}_2	το διάνυσμα απόστασης από τον εικονικό αγωγό $(x,y,-z)$ στο τυχαίο σημείο P (x_o,y_o,z_o) .

Τα διανυσματικά μεγέθη \vec{r}_1 και \vec{r}_2 δίνονται από:

$$\vec{r}_1 = (x_o - x)\hat{i}_x + (y_o - y)\hat{i}_y + (z_o - z)\hat{i}_z \quad (15)$$

$$\vec{r}_2 = (x_o - x)\hat{i}_x + (y_o - y)\hat{i}_y + (z_o + z)\hat{i}_z \quad (16)$$

όπου $\hat{i}_x, \hat{i}_y, \hat{i}_z$ είναι τα μοναδιαία διανύσματα στην κατεύθυνση των αξόνων x, y, z, αντίστοιχα.



Σχήμα 3: Ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο P από ηλεκτρικά φορτισμένο αγωγό

Δεδομένου της προηγούμενης ανάλυσης για τον υπολογισμό του μαγνητικού πεδίου, οι ποσότητες dl_1 και dl_2 ενός αγωγού γραμμής μεταφοράς και του ειδώλου του (Σχήμα 4) μπορούν να περιγραφούν με την παρακάτω εξίσωση:

$$dl_1 = dl_2 = dl = \sqrt{1 + \left(\frac{y_{t_2} - y_{t_1}}{x_{t_2} - x_{t_1}}\right)^2 + \left(\frac{z}{C}\right)^2} dx \quad (17)$$

Σε περίπτωση που η γραμμή μεταφοράς αποτελείται από περισσότερους από έναν αγωγούς, τα φορτία σε κάθε έναν αγωγό υπολογίζονται μέσω των συντελεστών δυναμικού [24]. Για μία n- φασική γραμμή μεταφοράς τα γραμμικά φορτία μπορούν να υπολογιστούν από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \begin{bmatrix} I_{1,1} - I_{2,1} & \cdots & I_{1,n} - I_{2,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{1,n} - I_{2,n} & \cdots & I_{n,n} - I_{2,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} \quad (18)$$

με τις εξισώσεις $I_{1,i,j}$ και $I_{2,i,j}$ να δίνονται παρακάτω

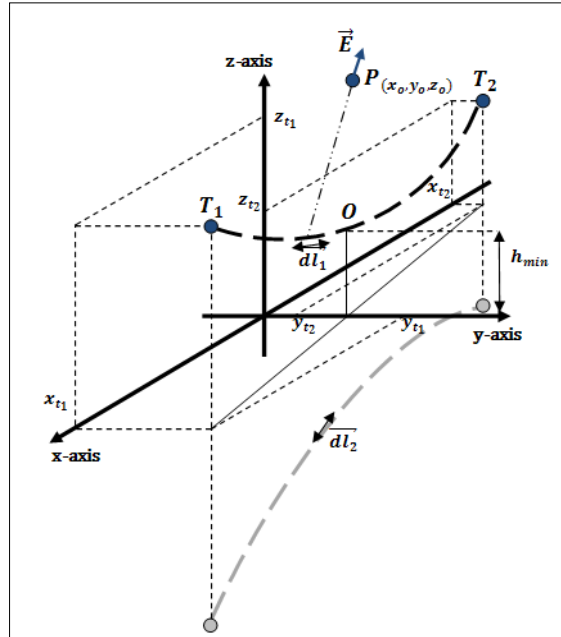
$$I_{1,i,j} = \int_{x_{t_2}}^{x_{t_1}} \frac{dl_j}{\sqrt{(\hat{x}_i - x_j)^2 + (\hat{y}_i - y_j)^2 + (\hat{z}_i - z_j)^2}} \quad (19)$$

$$I_{2,i,j} = \int_{x_{t_2}}^{x_{t_1}} \frac{dl_j}{\sqrt{(\hat{x}_i - x_j)^2 + (\hat{y}_i - y_j)^2 + (\hat{z}_i + z_j)^2}} \quad (20)$$

όπου $(\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)$ είναι οι συντεταγμένες των επιφανειακών σημείων, τα οποία είναι τοποθετημένα στην επιφάνεια κάθε αγωγού της γραμμής μεταφοράς, (x_j, y_j, z_j) είναι οι συντεταγμένες των γραμμικών φορτίων τοποθετημένων στο κέντρο των αγωγών και V_i είναι το δυναμικό στην επιφάνεια των αγωγών με $i, j = 1, 2$ και 3. Στο παράδειγμα του μονού αγωγού (Σχήμα 4), οι συντεταγμένες των επιφανειακών σημείων είναι ίσες με $(0, \frac{x_{t_2}y_{t_1} - x_{t_1}y_{t_2}}{x_{t_2} - x_{t_1}}, h_{min} - r_i)$ όπου r_i είναι

η ακτίνα του αγωγού (i). Χρησιμοποιώντας την (17) το διαφορικό στοιχείο μπορεί να προσδιοριστεί ως:

$$dl_j = \sqrt{1 + \left(\frac{y_{t_2} - y_{t_1}}{x_{t_2} - x_{t_1}}\right)^2 + \left(\frac{z_j}{C}\right)^2} dx_j \quad (21)$$



Σχήμα 4: Ηλεκτρικό πεδίο από ηλεκτρικά φορτισμένο αγωγό με βέλος στις τρεις διαστάσεις

Έχοντας υπολογίσει τα φορτία της γραμμής μεταφοράς και χρησιμοποιώντας την υπέρθεση, το ηλεκτρικό πεδίο μίας n-φασικής εναέριης γραμμής μεταφοράς σε οποιοδήποτε σημείο (x_o, y_o, z_o) πάνω ή κοντά στην επιφάνεια της γης δίνεται από:

$$\vec{E}(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_o} [q_1 \quad \dots \quad q_n] \begin{bmatrix} I3_1 - I4_1 \\ \vdots \\ I3_n - I4_n \end{bmatrix} \quad (22)$$

με τις εξισώσεις $I3_i$ και $I4_i$ να φαίνονται παρακάτω:

$$I3_i = \int_{x_{t_2}}^{x_{t_1}} \frac{[(x_o - x_j)\hat{i}_x + (y_o - y_j)\hat{i}_y + (z_o - z_j)\hat{i}_z]}{\sqrt{(x_o - x_j)^2 + (y_o - y_j)^2 + (z_o - z_j)^2}} dl \quad (23)$$

$$I4_i = \int_{x_{t_2}}^{x_{t_1}} \frac{[(x_o - x_j)\hat{i}_x + (y_o - y_j)\hat{i}_y + (z_o + z_j)\hat{i}_z]}{\sqrt{(x_o - x_j)^2 + (y_o - y_j)^2 + (z_o + z_j)^2}} dl \quad (24)$$

Στην παραπάνω ανάλυση έχουν δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι αγωγοί γης αλλά και η επίδραση των γειτονικών ανοιγμάτων της γραμμής παρά μόνο όταν τα σημεία υπολογισμού είναι μακριά από το μέσο του ανοίγματος και κοντά στους πυλώνες [24]. Τέλος, οι δύο αγωγοί ανά φάση που χρησιμοποιούνται στις γραμμές μεταφοράς των 400 kV προσεγγίζονται ως ένας ισοδύναμος αγωγός με ισοδύναμη ακτίνα που προκύπτει από την βιβλιογραφία της μεθόδου των ισοδυνάμων φορτίων.

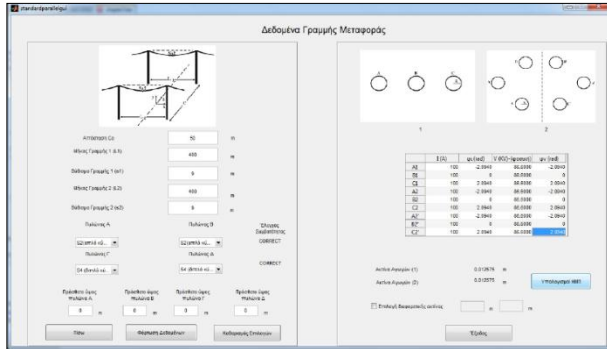
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Στην ενότητα αυτή γίνεται η περιγραφή του λογισμικού που αναπτύχθηκε για τον υπολογισμό ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων χαμηλής συχνότητας κάτω από γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [25], [26]. Το λογισμικό υλοποιήθηκε στο λογισμικό της Matlab και η δημιουργία γραφικού περιβάλλοντος στηρίχτηκε στο χρήσιμο εργαλείο της το GUI (GUIDE-Graphical User Interface Design Environment). Στη συνέχεια, γίνεται μια πρώτη γνωριμία με το πρόγραμμα και επεξηγούνται κάποιες από τις δυνατότητές του καθώς επίσης και η λειτουργία του.

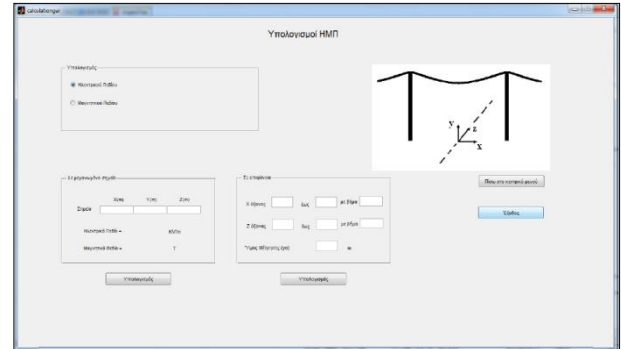
Το λογισμικό έχει την δυνατότητα του υπολογισμού ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου, τόσο με θεώρηση βυθίσματος, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, όσο και με θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών. Ο χρήστης μπορεί να εισάγει τυποποιημένες γραμμές μεταφοράς του ελληνικού δικτύου ή να σχεδιάσει νέες διατάξεις αγωγών. Επομένως, το λογισμικό είναι δυνατόν να εφαρμοστεί όχι μόνο σε γραμμές μεταφοράς των 150 kV και 400 kV του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, αλλά σε οποιαδήποτε γραμμή μεταφοράς, εφ' όσον είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά τους. Σύμφωνα με το Σχήμα 5 οι εξής παράμετροι χρειάζεται να καταχωρηθούν από τον χρήστη όπως η τάση και το φορτίο

της γραμμής μεταφοράς, η γεωμετρική διάταξη των αγωγών της, η διάταξη των φάσεων στις γραμμές πολλαπλού κυκλώματος, το μήκος του θεωρουμένου τμήματος της γραμμής, καθώς και το ύψος, η ακτίνα και το βέλος των αγωγών των γραμμών μεταφοράς. Άρα, υπάρχει η δυνατότητα στις προς σχεδίαση γραμμές οι αγωγοί στους δύο πυλώνες να βρίσκονται σε διαφορετικά ύψη και σε διαφορετικές αποστάσεις ως προς τον κεντρικό άξονα της.

Ακόμη, έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τις τιμές μεμονωμένων σημείων του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου ή αποτελέσματα σε δισδιάστατα και τρισδιάστατα γραφήματα αφού πρώτα δώσουμε τα όρια υπολογισμού καθώς επίσης και το ύψος μέτρησης (Σχήμα 6).

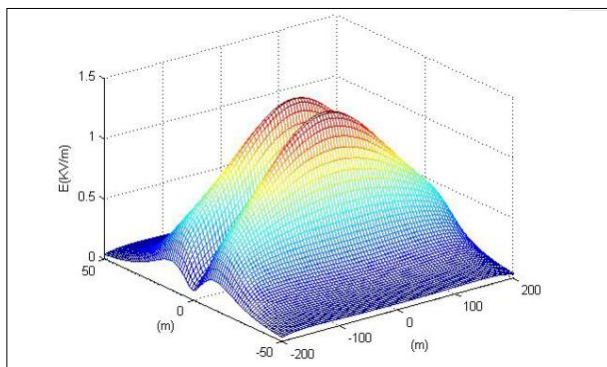


Σχήμα 5: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων

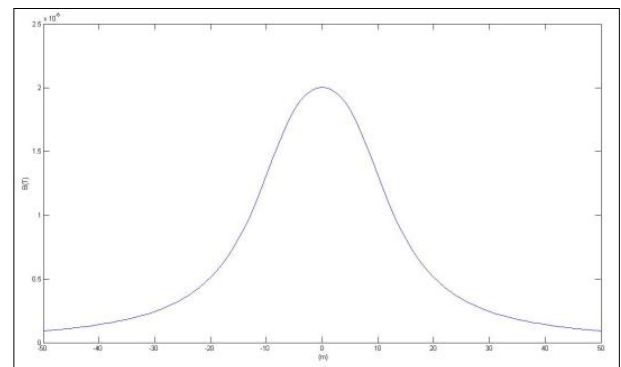


Σχήμα 6: Παράθυρο επιλογής σημείων υπολογισμού

Στα Σχήματα 7 και 8 που ακολουθούν εμφανίζονται τα αποτελέσματα των χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων όπως εξάγονται σε δισδιάστατα και τρισδιάστατα γραφήματα.

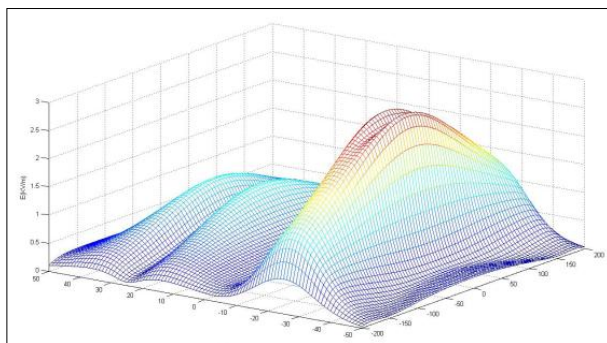


Σχήμα 7: Υπολογισμός ηλεκτρικού πεδίου σε τρισδιάστατο γράφημα

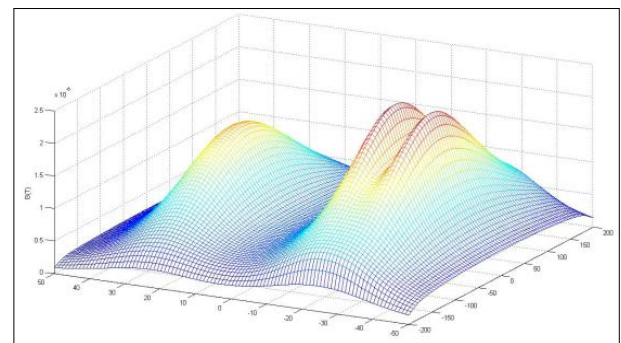


Σχήμα 8: Υπολογισμός μαγνητικού πεδίου σε δισδιάστατο γράφημα

Τέλος, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει υπολογισμό χαμηλόσυχνων πεδίων παράλληλα οδευουσών γραμμών. Η εισαγωγή δεδομένων και παραμέτρων καθώς και η επεξεργασία τους γίνεται όπως παρουσιάστηκαν παραπάνω με την διαφορά πως προστίθεται ο καθορισμός της απόστασης μεταξύ των παράλληλα οδευουσών γραμμών. Στα Σχήματα 9 και 10 παραθέτονται ενδεικτικά αποτελέσματα του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου παράλληλα οδευουσών γραμμών.



Σχήμα 9: Ηλεκτρικό πεδίο παράλληλα οδευουσών γραμμών με θεώρηση βυθίσματος



Σχήμα 10: Μαγνητικό πεδίο παράλληλα οδευουσών γραμμών με θεώρηση βυθίσματος

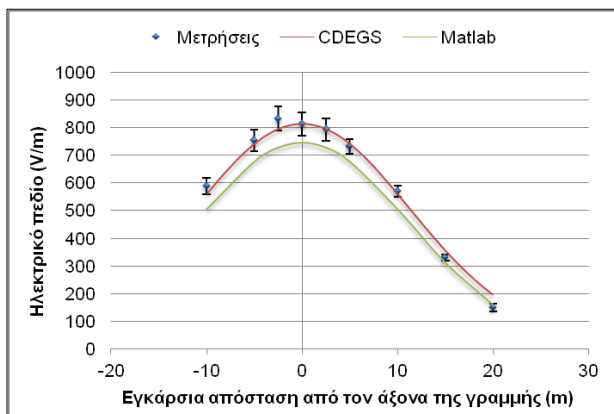
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ

Στα πλαίσια της ενότητας αυτής συγκρίνονται τα αποτελέσματα του λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Matlab με πραγματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν πλησίον γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, δίνονται τέσσερις εφαρμογές με συγκρίσεις μετρήσεων και προσομοιώσεων τόσο για το ηλεκτρικό όσο και για το μαγνητικό πεδίο. Οι μετρήσεις των χαμηλόσυχων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων πραγματοποιήθηκαν σε περιοχές στην Αττική ακολουθώντας την διαδικασία μέτρησης των διεθνών προτύπων, όπως τα IEC 61786:2003 [11], IEC62110:2009 [12] και IEEE Std 644:1994[13]. Βάσει των προτύπων αυτών υπολογίστηκε σε ύψος 1 m πάνω από το έδαφος το συνιστάμενο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο (rms) στην συχνότητα των 50 Hz με την χρήση διακριβωμένου οργάνου. Επίσης, με τα αποτελέσματα των μετρήσεων δίνονται οι αβεβαιότητες τους όπως εκτιμήθηκαν βάσει της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην [27].

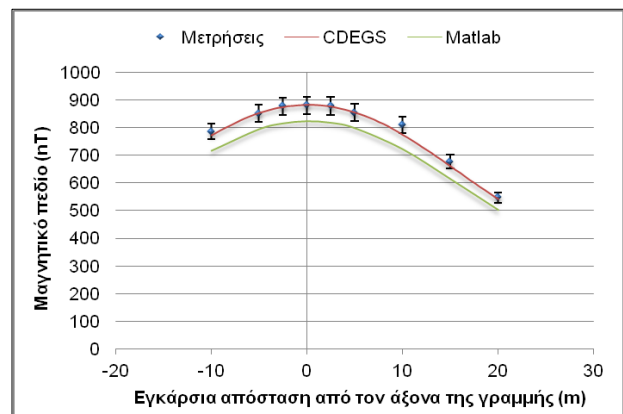
Παράλληλα, ελέγχθηκε η ορθότητα του λογισμικού μέσα από συγκρίσεις που έγιναν με εμπορικό λογισμικό (CDEGS), μετά τη μοντελοποίηση των γραμμών. Η σύγκριση αυτή είναι μια σύγκριση όχι μόνο δύο λογισμικών αλλά και δύο διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού πεδίων αφού το CDEGS χρησιμοποιεί ως μέθοδο υπολογισμού την μέθοδο των ροπών (MOM). Στην συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα πραγματικών μετρήσεων και συγκριτικών υπολογισμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής στο περιβάλλον γραμμών του ελληνικού συστήματος, είτε μόνων είτε ως παραλλήλων οδευουσών γραμμών. Επίσης, εξετάζονται οι αποκλίσεις των αποτελεσμάτων και σχολιάζονται οι παράγοντες που τις προκαλούν καταλήγοντας σε χρήσιμα συμπεράσματα για την περαιτέρω βελτίωση του λογισμικού.

Ξεκινώντας από την 1^η περίπτωση, στα Σχήματα 10 και 11 δείχνονται οι μετρηθείσες και οι υπολογισθείσες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής μιας γραμμής διπλού κυκλώματος των 150 kV με συμμετρική διάταξη των αγωγών των φάσεων. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε προάστιο της Αττικής (Αχαρναί) και συγκεκριμένα στο άνοιγμα της γραμμής AX7NA – AX8NA. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις υπό εξέταση γραμμές του άρθρου όπως το ρεύμα κάθε φάσης, ο τύπος των πύργων, οι αποστάσεις μεταξύ των αγωγών ή από το έδαφος, κτλ παραθέτονται στην [25].

Από τα παρακάτω σχήματα παρατηρούμε ότι η σύγκλιση των μετρούμενων και υπολογισμένων τιμών για το ηλεκτρικό πεδίο είναι αρκετά καλή (μικρότερη από 7 % για τα περισσότερα σημεία), καθώς στο περιβάλλον του συγκεκριμένου άξονα μέτρησης δεν υπήρχαν μεγάλα αντικείμενα. Επιπρόσθετα, μια μικρή απόκλιση παρατηρείται στο μαγνητικό πεδίο μέχρι και 5% εκτός από κάποια μεμονωμένα σημεία στα οποία φτάνει το 9%. Οι διαφορές οφείλονται κυρίως στην ύπαρξη των γειτονικών πηγών ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου οι οποίες αγνοούνται από το πρόγραμμα. Αυτό υπολογίζει το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο μεταξύ των δύο πυλώνων θεωρώντας τον υπόλοιπο χώρο κενό, ενώ στην πραγματικότητα τα πεδία σε κάποιο άνοιγμα γραμμής επηρεάζονται από την επόμενη και προηγούμενη συστοιχία πυλώνων ιδιαίτερα όταν ο άξονας μέτρησης μας βρίσκεται σχετικά κοντά στους πυλώνες. Επίσης, παρόμοιες αποκλίσεις εμφανίζονται μεταξύ των υπολογισμών μέσω Matlab και CDEGS αφού οι μετρήσεις ταυτίζονται με το εμπορικό λογισμικό στο οποίο έχει ληφθεί υπόψη η ύπαρξη των γειτονικών ανοιγμάτων.



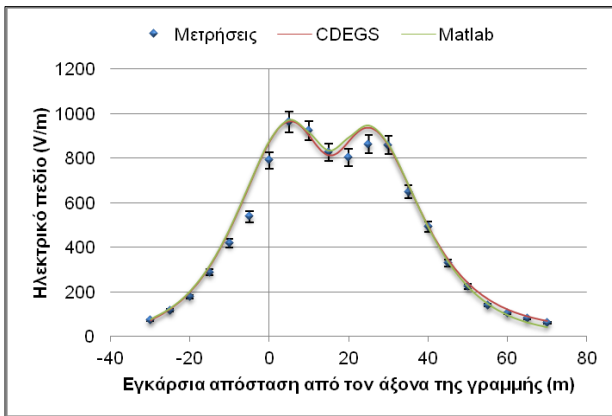
Σχήμα 10: Μετρήσεις και υπολογισμοί ηλεκτρικού πεδίου σε εγκάρσιο άξονα μέτρησης (Περίπτωση 1^η)



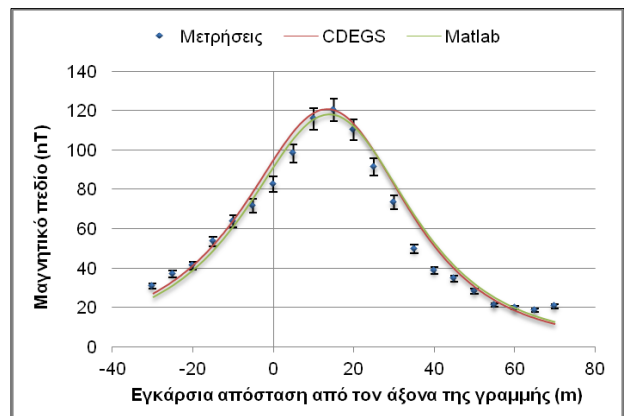
Σχήμα 11: Μετρήσεις και υπολογισμοί μαγνητικού πεδίου σε εγκάρσιο άξονα μέτρησης (Περίπτωση 1^η)

Στην 2^η περίπτωση, στα Σχήματα 12 και 13 παρουσιάζονται οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που πραγματοποιήθηκαν σε χώρο (στον Δήμο Άνω Λιοσίων) που βρίσκεται κάτω από δύο παράλληλες γραμμές μεταφοράς υπερυψηλής τάσης 400kV με κωδικούς APK (ενεργή γραμμή) και AA (ανεργή γραμμή). Παρατηρώντας τα παρακάτω σχήματα, συμπεραίνουμε ότι το λογισμικό της Matlab δίνει σχετικά καλά αποτελέσματα όσον αφορά στη σύγκλιση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές τόσο για το ηλεκτρικό όσο και για το μαγνητικό πεδίο καθώς η διαφορά τους είναι μικρότερη από 12%. Υπάρχουν, όμως, κάποια σημεία που δεν επιτυγχάνεται ικανοποιητική ακρίβεια καθώς η διαφορά τους αγγίζει το 20% αλλά για μικρές τιμές των πεδίων με αποτέλεσμα η απόκλιση να κρίνεται δευτερεύουσας σημασίας. Τα αίτια για αυτές τις μεταβολές είναι η αβεβαιότητα για το ύψος ανάρτησης των γραμμών (σε διαφορετικό υψόμετρο οι πυλώνες), οι πολύ μικρές τιμές των πεδίων, οι

διακυμάνσεις των φορτίων και η κατωφέρεια του εδάφους, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις. Παράλληλα, παρατηρούμε πως οι υπολογισμοί από τα δύο λογισμικά δεν διαφέρουν σημαντικά και σε πολλά σημεία οι καμπύλες τους ταυτίζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

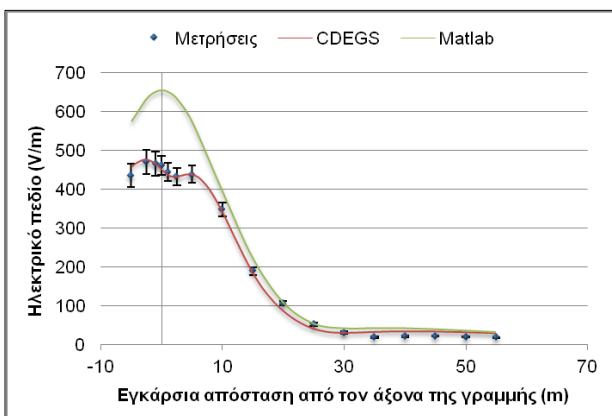


Σχήμα 12: Μετρήσεις και υπολογισμοί ηλεκτρικού πεδίου σε εγκάρσιο άξονα μέτρησης (Περίπτωση 2^η)

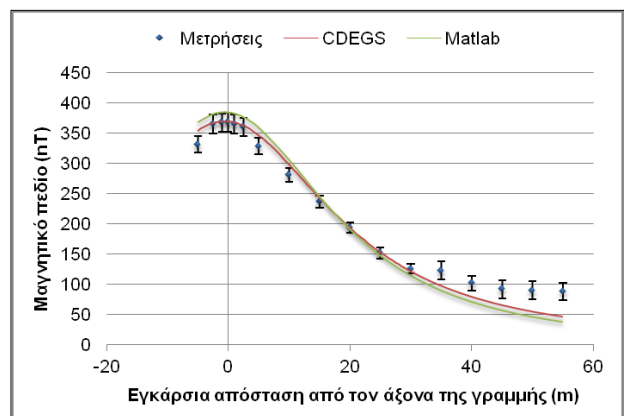


Σχήμα 13: Μετρήσεις και υπολογισμοί μαγνητικού πεδίου σε εγκάρσιο άξονα μέτρησης (Περίπτωση 2^η)

Στην 3^η περίπτωση, οι μετρήσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου διεξήχθησαν εγκάρσια του τμήματος της γραμμής μεταφοράς των 150kV XA24/10 - XA24/11 που βρίσκεται σε κατοικήσιμη περιοχή (στον Δήμο Αχαρνών). Παρατηρώντας το Σχήμα 14 βλέπουμε πως τα σφάλματα για το ηλεκτρικό πεδίο είναι αρκετά αυξημένα και αυτό οφείλεται στην ύπαρξη παρακείμενων εμποδίων στον χώρο των μετρήσεων όπως ενός γειτονικού κτιρίου, κάποιων οχημάτων, των στύλων φωτισμού και των αγωγών χαμηλής τάσης. Αντίθετα, οι υπολογισμένες τιμές για το μαγνητικό πεδίο είναι αρκετά κοντά στις θεωρητικές τιμές (Σχήμα 15) με σφάλμα μικρότερο του 10%, τα οποία αυξάνονται περισσότερο όταν απομακρυνόμαστε από τις γραμμές μεταφοράς κυρίως λόγω των μικρών τιμών του μαγνητικού πεδίου αλλά και από την ύπαρξη άλλων γραμμών διανομής σε απόσταση από το εξεταζόμενο τμήμα της γραμμής μεταφοράς. Ακόμη, για το ηλεκτρικό πεδίο τα αποτελέσματα του CDEGS είναι αρκούτως ικανοποιητικά γιατί δίνεται η ευχέρεια στον χρήστη να μοντελοποιήσει αντικείμενα σε αντίθεση με αυτό της Matlab. Αντίθετα για το μαγνητικό πεδίο δεν διαφέρουν σημαντικά οι καμπύλες των δύο λογισμικών αν και σε κάποια σημεία προσεγγίζονται λίγο περισσότερο οι μετρήσεις με το CDEGS.



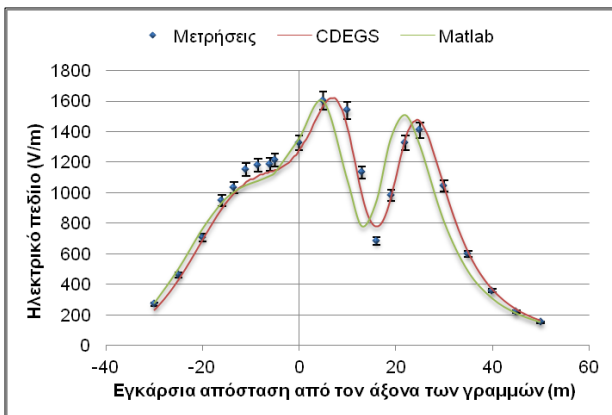
Σχήμα 14: Μετρήσεις και υπολογισμοί ηλεκτρικού πεδίου σε εγκάρσιο άξονα μέτρησης (Περίπτωση 3^η)



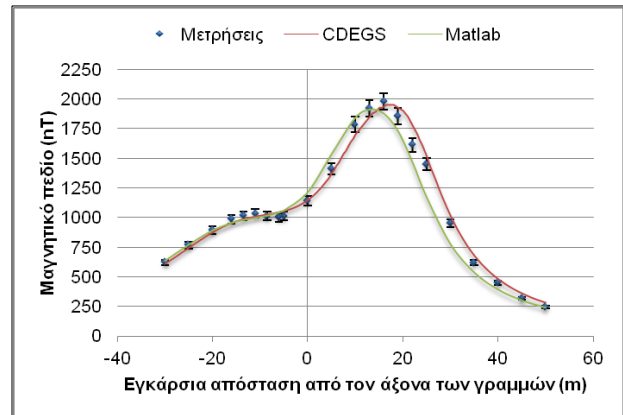
Σχήμα 15: Μετρήσεις και υπολογισμοί μαγνητικού πεδίου σε εγκάρσιο άξονα μέτρησης (Περίπτωση 3^η)

Στην τελευταία περίπτωση, στα Σχήματα 16 και 17 δείχνονται οι μετρηθείσες και οι υπολογισθείσες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής δύο παράλληλα οδευουσών γραμμών υπερυψηλής τάσης 150kV με κωδικούς XA και PA. Η μια γραμμή μεταφοράς είναι διπλού κυκλώματος με συμμετρική διάταξη των αγωγών των φάσεων και η άλλη μονού κυκλώματος με οριζόντια διάταξη των αγωγών των φάσεων. Από τις καμπύλες μπορεί να γίνει η παρατήρηση ότι οι υπολογισμοί που έγιναν με το λογισμικό της Matlab, δίνουν καλά αποτελέσματα όσον αφορά στη σύγκλιση με τις αντίστοιχες μετρηθείσες τιμές. Συγκεκριμένα, από το Σχήμα 16, παρατηρείται ικανοποιητική σύγκλιση (σχετικά σφάλματα <10%) μεταξύ των υπολογισμών και των πραγματικών τιμών έντασης του ηλεκτρικού πεδίου εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων, οι οποίες μπορούν να οφείλονται στην αβεβαιότητα της μεταξύ των δύο ανοιγμάτων απόσταση αλλά και στο γεγονός πως τα δύο τμήματα των γραμμών να μην είναι ακριβώς παράλληλα. Το ίδιο συμπεραίνουμε και από το Σχήμα 17 για τη μαγνητική επαγωγή στην οποία όμως τα σφάλματα είναι σαφώς μικρότερα (< 7% για τα περισσότερα σημεία) και οφείλονται στους ίδιους παράγοντες απόκλισης με αυτούς του ηλεκτρικού πεδίου αλλά επίσης και στην διακύμανση του φορτίου κατά τη διάρκεια των μετρήσεων. Μεταξύ των δύο

λογισμικών παρατηρείται στα δύο σχήματα μια διαφορά της τάξης του 5% με 10% που οφείλεται στη διαφορά του τρόπου υπολογισμού των δύο λογισμικών και στην μαθηματική προσέγγιση του βυθίσματος.



Σχήμα 16: Μετρήσεις και υπολογισμοί ηλεκτρικού πεδίου σε εγκάρσιο άξονα μέτρησης (Περίπτωση 4^η)



Σχήμα 17: Μετρήσεις και υπολογισμοί μαγνητικού πεδίου σε εγκάρσιο άξονα μέτρησης (Περίπτωση 4^η)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, μέσω της σύγκρισης του λογισμικού που αναπτύχθηκε στο Matlab με το εμπορικό λογισμικό CDEGS και με τις πραγματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν είναι εμφανές ότι η χρήση του μπορεί να εφαρμοστεί για τον υπολογισμό χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων πλησίον των γραμμών μεταφοράς δίνοντας πολύ καλά αποτελέσματα. Η εφαρμογή του λογισμικού αυτού στα συγκεκριμένα προβλήματα υπολογισμού των πεδίων έδωσε αποτελέσματα που συγκλίνουν ικανοποιητικά με αυτά των μετρήσεων και κυρίως με αυτά του εμπορικού λογισμικού CDEGS. Στις περισσότερες περιπτώσεις επιτεύχθηκε επαρκής ακρίβεια τόσο στο ηλεκτρικό όσο και στο μαγνητικό πεδίο για τις διαφορετικές διατάξεις γραμμών μεταφοράς όπως μονού κυκλώματος, διπλού κυκλώματος, παράλληλα οδουοσών γραμμών, ανοίγματα γραμμών με πυλώνες διαφορετικού τύπου και σε διαφορετικά ύψη, κλπ.

Τα μεγαλύτερα σφάλματα εμφανίστηκαν στον υπολογισμό του ηλεκτρικού πεδίου σε όποιες περιπτώσεις είχαμε κοντά στο χώρο των μετρήσεων εμπόδια και κυρίως μεταλλικά αντικείμενα. Όπως είναι γνωστό η ύπαρξη των εμποδίων αυτών επηρεάζει πολύ τις τιμές του ηλεκτρικού πεδίου με αποτέλεσμα να έχουμε αυξημένα σφάλματα συγκριτικά με το λογισμικό στο CDEGS. Τα αποτελέσματα ήταν σαφώς καλύτερα όταν είχαμε απουσία αυτών των εμποδίων όπου οι τιμές του ηλεκτρικού πεδίου σύγκλιναν πολύ περισσότερο με τις μετρήσεις.

Από την άλλη τα αποτελέσματα για το μαγνητικό πεδίο ήταν στην πλειοψηφία τους πολύ κοντά τόσο στις μετρήσεις όσο και στις προσομοιώσεις που έγιναν στο CDEGS. Σε ελάχιστες περιπτώσεις είχαμε κάποια μεγαλύτερη απόκλιση των τιμών και αυτό οφειλόταν κυρίως στην ύπαρξη γραμμών διανομής στο χώρο των μετρήσεων οι οποίες αγνοούνταν από το πρόγραμμα υπολογισμού. Επίσης, σημαντικό ρόλο η διακύμανση του φορτίου με αποτέλεσμα να διαφέρουν κάποια μεμονωμένα σημεία με τις πραγματικές μετρήσεις. Συγκεκριμένα, στις προσομοιώσεις τέθηκε μία σταθερή μέση τιμή για το φορτίο της γραμμής ενώ αντίθετα στις μετρήσεις το φορτίο κυμαίνονταν αισθητά αν λάβει κανείς υπόψη τη διάρκεια των μετρήσεων κάτω από μία γραμμή μεταφοράς (μισή ώρα έως μία ώρα). Για το λόγο αυτό είναι πιθανόν οι αποκλίσεις των προσομοιώσεων με τις μετρήσεις μόνο από την διακύμανση του φορτίου να φτάνουν και το 5%.

Επιπρόσθετα η ανωμαλία του εδάφους σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν η αιτία να παρουσιαστούν μεγαλύτερα σφάλματα και στα δύο πεδία αφού στο λογισμικό γινόταν θεώρηση επίπεδου εδάφους, με αποτέλεσμα σε κάποια σημεία λόγω αυτής της ανωμαλίας του εδάφους να διαφέρει το ύψος μέτρησης. Ακόμη, λόγω ανακρίβειας κάποιων χαρακτηριστικών της γραμμής όπως για παράδειγμα το μήκος ανοίγματος, το βύθισμα καθώς επίσης και η απόσταση του άξονα μέτρησης ήταν αιτίες ύπαρξης των μικρών αποκλίσεων των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές μετρήσεις. Επίσης, στις μετρήσεις οι οποίες γίνονταν σχετικά κοντά στους πυλώνες είχαμε κάποια απόκλιση λόγω της μεγαλύτερης συμβολής των εκατέρωθεν γραμμών μεταφοράς στις επόμενες συστοιχίες πυλώνων οι οποίες στο συγκεκριμένο πρόγραμμα αμελούνταν. Σχετικά με την διαφορά στα αποτελέσματα των δύο λογισμικών, στο CDEGS υπήρχε η δυνατότητα να τοποθετήσουμε αγωγίμα αντικείμενα για την δημιουργία της διαταραχής που αυτά προκαλούν. Χωρίς αυτή τη δυνατότητα οι διαφορές μεταξύ των δύο λογισμικών είναι μικρές και προκύπτουν εξαιτίας της διαφορετικής μαθηματικής προσέγγισης των βυθισμάτων των γραμμών μεταφοράς.

Επομένως, με την εφαρμογή του λογισμικού στο Matlab, οι δύο μεθοδολογίες υπολογισμού επαληθεύονται και τα αποτελέσματα τους κρίνονται άκρως ικανοποιητικά ενώ, παράλληλα, εντοπίζονται τα αίτια στις αποκλίσεις του λογισμικού. Ακόμη, το λογισμικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένα αξιόπιστο, εύκολο και γρήγορο εργαλείο στη σχεδίαση και κατασκευή νέων εναερίων γραμμών μεταφοράς καθώς δίνεται η δυνατότητα παραμετρικής ανάλυσης και διερεύνησης των υπό μελέτη γραμμών μεταφοράς (αντιμετάθεση φάσεων, μείωση της μεταξύ απόστασης των αγωγών, μεταβολή ύψους ανάρτησης ή και βυθίσματος αγωγών), για την εξεύρεση των βέλτιστων διατάξεων και τη δραστηκή

μείωση των τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής. Τέλος, γίνεται προσπάθεια για την βελτίωση του προγράμματος και την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας του λογισμικού. Ανάμεσα στις εύκολα υλοποιήσιμες προτάσεις συγκαταλέγονται ο συνυπολογισμός των αγωγών γης και των εκατέρωθεν τμημάτων των υπό εξέταση γραμμών μεταφοράς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Wertheimer N. and Leeper E., “*Electrical wiring configurations and childhood cancer*”, American Journal of Epidemiology, 109, pp. 273-284, 1979.
- [2] International Agency for Research on Cancer (IARC), “*Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields*”, IARC Monographs Eval. Carcinogenic Risks Humans, 80, Lyon, France, 2002.
- [3] World Health Organization (WHO), “*Extremely low frequency fields. Environmental Health Criteria*”, World Health Organization, 238, Geneva, 2007.
- [4] International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), “*Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*”, Health Phys., 74, 4, pp. 494–522, April 1998.
- [5] European Commission (EC), “*Council Recommendation of 12 July 1999 on the limitation of exposure of the general public to electromagnetic fields (0 Hz to 300 GHz) (1999/519/EC)*”, OJEC, L 199/59, Jul. 1999.
- [6] European Commission (EC), “*Directive 2004/40/EC of the European Parliament and the Council of 29 April 2004 on the minimum health and safety requirements regarding exposure of workers to the risks arising from physical agents (electromagnetic fields)*”, OJEC, L 184/1, May 2004.
- [7] “*Measures for the protection of the general public from the operation of land based antenna stations (Act No.1105/Vol.B/6-9-2000)*”, Common Ministerial Order of the Ministries of Development, Transport and Communications, Health and Environment, Physical Planning and Public Works, Greece, Sep. 2000.
- [8] “*Measures for the protection of the general public from the operation of low frequency electromagnetic fields emitting devices (Act No.512/Vol.B/25-4-2002)*”, Common Ministerial Order of the Ministries of Development, Health and Environment, Physical Planning and Public Works, Greece, Apr. 2000.
- [9] IEEE Std C95.6-2002, “*IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electromagnetic Fields, 0-3 kHz*”, 2002.
- [10] International Commission of Non Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), “*Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 100 kHz)*”, Health Phys., 99, 6, pp. 818-836, Dec. 2010.
- [11] IEC 61786, “*Measurement of low-frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings – Special requirements for instruments and guidance for measurements*”, 1998.
- [12] IEC 62110, “*Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure*”, August 2009
- [13] IEEE Std 644-1994, “*IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*”, 1995.
- [14] Garrido C., Otero A. F., and Cidra’s J., “*Low-frequency magnetic fields from electrical appliances and power lines*”, IEEE Trans. Power Del., 18, pp. 1310-1319, 2003.
- [15] Melo M. O., Fontana E. and Naidu S. R., “*Electric and magnetic fields of compact transmission lines*”, IEEE Trans. Power Del., 14, (1), pp. 200–204, Jan. 1999.
- [16] Hafiz Hamza A. S., “*Evaluation and measurement of magnetic field exposure over human body near EHV transmission lines*”, Electric Power Systems Research, 74, pp. 105-118, 2005.
- [17] Faria J. A. and Almeida M. E., “*Accurate calculation of magnetic-field intensity due to overhead power lines with or without mitigation loops with or without capacitor compensation*”, IEEE Trans. Power Del., 22, (2), pt. 1, pp. 951–959, Apr. 2007.
- [18] Salari J. C., Mpalantinos A. and Silva J. I., “*Comparative analysis of 2- and 3-D methods for computing electric magnetic fields generated by overhead transmission lines*”, IEEE Trans. Power Del., 24, (1), pp. 338–344, Jan. 2009.
- [19] Kaune W. T. and Zaffanella L. E., “*Analysis of magnetic fields produced far from electric power lines*”, IEEE Trans. Power Del., 7, (4), pp. 2082–2091, Oct. 1992.
- [20] Filippopoulos G. and Tsanakas D., “*Analytical calculation of the magnetic field produced by electric power lines*”, IEEE Trans. Power Del., 20, (2), pp. 1474–1482, Apr. 2005.
- [21] Moro F. and Turri R., “*Fast analytical computation of power-line magnetic fields by complex vector method*”, IEEE Trans. Power Del., 23, (2), pp. 1042–1048, Oct. 2008.
- [22] Mamishev A. V., Nevels R. D., and Russell B. D., “*Effects of conductor sag on spatial distribution of power line magnetic field*”, IEEE Trans. Power Del., 11, (3), pp. 1571–1576, Jul. 1996.
- [23] Dein A. Z. E., “*Magnetic-field calculation under EHV transmission lines for more realistic cases*”, IEEE Trans. Power Del., 24, (4), pp. 2214–2222, Oct. 2009.

- [24] Dein A. Z. E., Wahab M. A. A., Hamada M. M., and Emmary T. H., “*The effects of the span configurations and conductor sag on the electric-field distribution under overhead transmission lines*”, IEEE Trans. Power Del., 25, (4), pp. 2891–2902, Oct. 2010.
- [25] Ζτούπης Ιωάννης, “*Μέτρηση και προσομοίωση χαμηλόσυχνων πεδίων από γραμμές μεταφοράς υψηλών τάσεων*”, Μεταπτυχιακή εργασία στο ΔΠΜΣ “Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2012.
- [26] Ztoupis I.N., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “*Calculation of power frequency fields from high voltage overhead lines in residential areas*”, Proceedings of the 18th International Symposium on High-Voltage Engineering (ISH 2013), Seoul, South Korea, August 25-30, 2013, paper PA-01, pp. 62-66.
- [27] Ztoupis I.N., Gonos I.F., Stathopoulos I.A., “*Uncertainty Evaluation in the Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Overhead Power Lines*”, Radiation Protection Dosimetry, doi:10.1093/rpd/nct122.