

ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΟΤΗΤΑΣ

Ι. Γκόνος
Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ¹

Α. Κλαδάς
Σχολή ΗΜΜΥ, ΕΜΠ²

Σ. Κουλουρίδης
Τμήμα ΗΜΤΥ, ΠΠ³

Γ. Κυριακού
Τμήμα ΗΜΜΥ, ΔΠΘ⁴

Δ. Λαμπρίδης
Τμήμα ΗΜΜΥ, ΑΠΘ⁵

Π. Μικρόπουλος
Τμήμα ΗΜΜΥ, ΑΠΘ⁶

Ε. Πυργιώτη
Τμήμα ΗΜΤΥ, ΠΠ⁷

Α. Σαφιγιάννη
Τμήμα ΗΜΜΥ, ΔΠΘ⁸

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία διερευνώνται ανθρώπινες δραστηριότητες στο περιβάλλον των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής και υπερυψηλής τάσης, με απώτερο στόχο να προταθούν σχετικές αποστάσεις ασφαλείας ανθρώπινης δραστηριότητας. Αρχικά αναλύεται η παρουσία ανθρώπου στο ομοιογενές ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο. Περιγράφονται η μορφή και οι ιδιότητες των μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων στη συχνότητα των 50 Hz, τα οποία στη συχνότητα αυτή συμπεριφέρονται ως δυο ανεξάρτητα πεδία, που προσδιορίζονται κυρίως από τις εντάσεις των ρευμάτων και από τις τάσεις των γραμμών, αντίστοιχα. Στη συνέχεια αναφέρονται οι σχετικές διεθνείς οδηγίες, στις οποίες προσδιορίζονται οι βασικοί περιορισμοί και τα επίπεδα αναφοράς που αφορούν στην έκθεση ανθρώπων στα πεδία αυτά. Ακολουθεί διερεύνηση της συμμόρφωσης με τα όρια ασφαλούς έκθεσης, η οποία βασίζεται αρχικά σε προσομοιώσεις. Τέλος, παρουσιάζονται αποτελέσματα προσομοιώσεων σε γραμμές του συστήματος μεταφοράς και συγκρίνονται με ήδη δημοσιευμένες μελέτες.

ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD ANALYSIS OF OVERHEAD TRANSMISSION LINES AND CLEARANCES FOR HUMAN ACTIVITY

J. Gonos
School of ECE, NTUA¹

A. Kladas
School of ECE, NTUA²

S. Koulouridis
Dept. of ECE, UP³

G. Kyriacou
Dept. of ECE, DUTH⁴

D. Labridis
Dept. of ECE, AUTH⁵

P. Mikropoulos
Dept. of ECE, AUTH⁶

E. Pyrgioti
Dept. of ECE, UP⁷

A. Safigianni
Dept. of ECE, DUTH⁸

ABSTRACT

This work analyzes human activities near high voltage overhead transmission lines, aiming to propose appropriate clearances in future. In a first step the presence of human body in homogeneous electric and magnetic field is analyzed. The characteristics and properties of magnetic and electric fields varying at the frequency of 50 Hz are then described, which can be determined in this frequency independently, by means of the currents and voltages of the lines, respectively. Moreover, the relative international guidelines are reported deriving the main admissible limits and reference levels for human exposure to such fields. Furthermore, an investigation of compliance with the requirements and admissible limits for human exposure is proposed based initially on convenient simulations. Simulation results of the proposed methodologies for typical transmission line configurations are presented and compared to the ones available in the literature.

¹e-mail: igonos@cs.ntua.gr, ²e-mail: kladasel@central.ntua.gr, ³e-mail: koulouridis@upatras.gr,

⁴e-mail: gkyriac@ee.duth.gr, ⁵e-mail: labridis@auth.gr, ⁶e-mail: pnm@eng.auth.gr,

⁷e-mail: E.Pyrgioti@ece.upatras.gr, ⁸e-mail: asafig@ee.duth.gr

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία (ΗΜΠ) των συνιστωσών ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) αποτελούν περιβαλλοντικούς παράγοντες. Ο καθορισμός των αποδεκτών τιμών της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και της μαγνητικής επαγωγής απαιτείται τόσο κατά τη μελέτη των γραμμών μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΓΜΔΗΕ), όσο και κατά το σχεδιασμό ηλεκτρικών συσκευών οικιακής και επαγγελματικής χρήσης, ώστε να παρέχεται η προστασία των ανθρώπων έναντι των πεδίων αυτών. Τα ΗΜΠ ανεξαρτήτως συχνότητας περιγράφονται από τις εξισώσεις του Maxwell και είναι αλληλένδετα. Στις πολύ χαμηλές όμως συχνότητες, όπως αυτή των 50 Hz (βασική συχνότητα λειτουργίας των ΣΗΕ), δεν υπάρχει πρακτικά ζεύξη μεταξύ των ανωτέρω πεδίων και ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, οπότε εμφανίζονται δύο ανεξάρτητα πεδία: το ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο προκαλείται από σχεδόν σταθερές τάσεις λειτουργίας των αγωγών και το μαγνητικό πεδίο, το οποίο προκαλείται από ιδιαίτερα μεταβαλλόμενες εντάσεις λειτουργίας των αγωγών.

Τόσο το ηλεκτρικό όσο και το μαγνητικό πεδίο ΓΜΔΗΕ σε θέσεις προσιτές για τον άνθρωπο, μπορούν να θεωρηθούν ως ομοιογενή πεδία, οπότε η επίδρασή τους μπορεί να περιγραφεί καλύτερα αλλά και να αναπαραχθούν τεχνητά, οπότε προσφέρονται για διεξαγωγή δοκιμών με δυνατότητα συνέχειας ή ελέγχου των αποτελεσμάτων.

Το ομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο (ΗΠ) παραμορφώνεται με την είσοδο σε αυτό αγώγιμων διατάξεων. Το εσωτερικό ενός ηλεκτρικά αγώγιμου σώματος είναι πρακτικά ελεύθερο από ΗΠ, δηλαδή αποτελεί έναν κλωβό Faraday, οπότε μπορεί να επιτευχθεί με αγώγιμη επένδυση ή θωράκιση ενός χώρου έναντι ΗΠ. Η αγωγιμότητα των συνηθισμένων δομικών υλικών είναι επαρκής, ώστε να επέρχεται μέσα στα σύγχρονα κτίσματα δραστηκή εξασθένηση των ΗΠ, που προέρχονται από εξωτερικές πηγές. Εξασθένηση του ΗΠ επιφέρουν επίσης και οι διάφορες μεταλλικές κατασκευές, τα οχήματα, τα δένδρα, ο ρουχισμός, ακόμα και οι ζώντες οργανισμοί που βρίσκονται στην περιοχή, λόγω της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας. Τα ΗΠ είναι εξαιρετικά δύσκολο να μετρηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια, αφού υφίστανται εξασθένηση και παραμόρφωση ακόμα και από την ίδια τη συσκευή μέτρησης. Είναι προτιμότερος ο υπολογισμός τους με αριθμητικές μεθόδους.

Αντίθετα, τα μαγνητικά πεδία (ΜΠ) διαπερνούν πρακτικά χωρίς παραμόρφωση τα μη μαγνητικά υλικά. Η αποτελεσματική θωράκιση είναι πολύ δυσχερής και συνεπώς τα ΜΠ, που εξασθενίζουν πολύ δύσκολα και δεν παραμορφώνονται από συνήθη αντικείμενα και ζώντες οργανισμούς, είναι δυνατό να μετρηθούν με ικανοποιητική ακρίβεια. Δεδομένης της εξάρτησης των ΜΠ των ΓΜΔΗΕ από τη μεταβαλλόμενη ένταση του ρεύματος που τις διαρρέει, πρέπει να γίνονται μετρήσεις τους και στη συνέχεια οι τιμές των μετρήσεων αυτών να ανάγονται κατάλληλα στις μέγιστες εντάσεις των αγωγών τους.

2. Ο ΑΝΘΡΩΠΟΣ ΣΤΟ ΟΜΟΙΟΓΕΝΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟ ΠΕΔΙΟ [1]

Το Σχήμα 1 δείχνει την παραμόρφωση ομοιογενούς ΗΠ έντασης 20 kV/m λόγω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του ανθρωπίνου σώματος σε όρθια στάση επί αγώγιμου επιπέδου. Στην κεφαλή του ανθρώπου εμφανίζεται η μέγιστη ένταση $E_{max}=14 E_0$, όπου E_0 είναι η ένταση του αδιατάρακτου ομοιογενούς πεδίου. Παραμόρφωση εμφανίζεται επίσης στις ισοδυναμικές γραμμές, έτσι ώστε η διαφορά δυναμικού μεταξύ της κεφαλής και των ποδιών του ανθρώπου να είναι τελικά μικρότερη από 0.1 V.

Το Σχήμα 2 δείχνει αντίστοιχα τον άνθρωπο σε ομοιογενές ΜΠ. Ο άνθρωπος προσομοιώνεται όρθιος επί αγώγιμου επιπέδου ως το ήμισυ εκ περιστροφής ελλειψοειδούς με μεγάλο ημιάξονα h και μικρό ημιάξονα b . Η συνολική επαγόμενη ένταση στον ανθρωπινό οργανισμό είναι:

$$I \cong \omega \sigma \frac{hb^2}{6} B_0 \quad (1)$$

όπου:

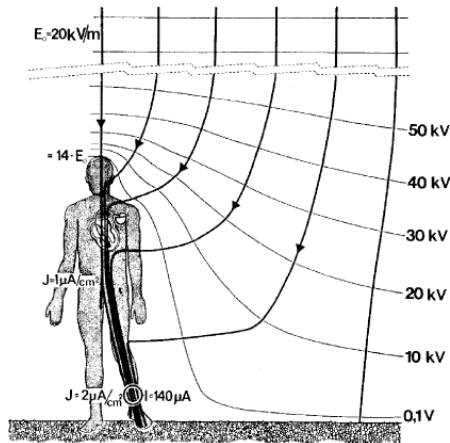
ω η κυκλική συχνότητα, $\omega=2\pi f$, $f=50$ Hz,

σ η μέση ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του οργανισμού, ($\sigma=0,2 \Omega^{-1}/m$, [9, 13]),

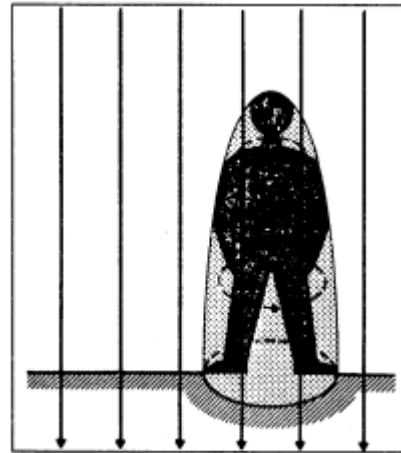
B_0 η μαγνητική επαγωγή του ομοιογενούς πεδίου.

Η αντίστοιχη μέση πυκνότητα ρεύματος J είναι:

$$J \cong \omega \sigma \frac{b}{4} B_0 \quad (2)$$



Σχήμα 1: Άνθρωπος σε ομοιογενές ηλεκτρικό πεδίο.



Σχήμα 2: Άνθρωπος σε ομοιογενές μαγνητικό πεδίο.

3. ΠΕΔΙΑΚΕΣ ΕΝΤΑΣΕΙΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα συμμετρικό χρονικά μεταβαλλόμενο τριφασικό σύστημα τάσεων δημιουργεί σε ένα σημείο Σ του χώρου ΗΠ, επειδή οι διανυσματικές αποστάσεις μεταξύ του σημείου Σ και των αγωγών των φάσεων Α, Β, C, είναι άνισες, όπως φαίνονται στο Σχήμα 3, [2].

Αντίστοιχα ένα συμμετρικό χρονικά μεταβαλλόμενο σύστημα ρευμάτων δημιουργεί για τον ίδιο λόγο ΜΠ.

Επειδή τα συστήματα των τάσεων και ρευμάτων των ΓΜΔΗΕ μπορούν να θεωρηθούν κατά την μόνιμη κατάσταση λειτουργίας ως συμμετρικά, τα προαναφερθέντα ισχύουν με ικανοποιητική ακρίβεια για τις ΓΜΔΗΕ.

Το συνιστάμενο ΜΠ ενός ή περισσοτέρων τριφασικών χρονικά μεταβαλλόμενων συστημάτων ρευμάτων 50 Hz, είναι γενικά ελλειπτικά πολωμένο [3], δηλαδή το άκρο του στρεφόμενου διανύσματος του διαγράφει την περιφέρεια μιας έλλειψης με αρχή το κέντρο της έλλειψης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2α. Το μέγεθος και η κατεύθυνση του μεγάλου ημιάξονα της έλλειψης, που δίδεται από το M στο Σχήμα 4.2α, αντιστοιχίζεται στην τιμή και την κατεύθυνση του μέγιστου ΜΠ. Αντίστοιχα, το μέγεθος και η κατεύθυνση του μικρού ημιάξονα της έλλειψης, που δίδεται από το m στο Σχήμα 4, αντιστοιχίζεται στην τιμή και την κατεύθυνση του ελάχιστου ΜΠ.

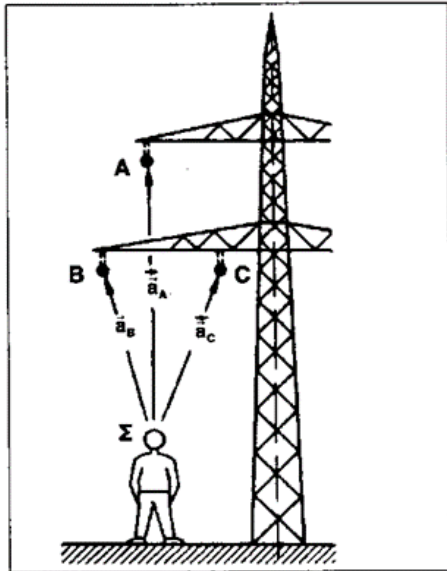
Το συνιστάμενο ΜΠ δίδεται από τη σχέση:

$$B_R = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (3)$$

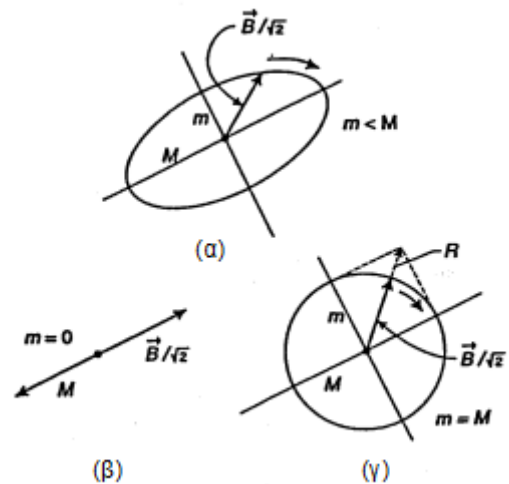
όπου B_x , B_y και B_z είναι οι ενεργές τιμές των τριών ορθογωνίων συνιστωσών του στο χώρο και είναι ίσο με την ενεργό τιμή του μεγέθους του [4]. Το μέγιστο ΜΠ είναι μικρότερο ή το πολύ ίσο με το συνιστάμενο πεδίο B_R και η διαφορά μεταξύ των δύο ποσοτήτων εξαρτάται από το βαθμό της πόλωσης. Δυο ειδικές μορφές πόλωσης υποδηλώνουν τις δυο ακραίες περιπτώσεις, που επιδρούν και στα αποτελέσματα των μετρήσεων:

- i. Όταν ο μικρός ημιάξονας της έλλειψης είναι ίσος με το 0, το ΜΠ ταλαντώνεται κατά μήκος μιας σταθερής διεύθυνσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.β. και λέγεται γραμμικά πολωμένο. Στην περίπτωση αυτή, η μέγιστη και η συνιστάμενη τιμή είναι ίσες.
- ii. Όταν οι δύο ημιάξονες της έλλειψης είναι ίσοι μεταξύ τους, το ΜΠ διαγράφει την περιφέρεια ενός κύκλου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.γ. και λέγεται κυκλικά πολωμένο. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά μεταξύ της μέγιστης τιμής της δεσπόζουσας συνιστώσας και της συνιστάμενης τιμής μεγιστοποιείται, με το συνιστάμενο ΜΠ να είναι κατά 41% μεγαλύτερο από τη δεσπόζουσα συνιστώσα του ΜΠ.

Όπως το ΜΠ, έτσι και το ΗΠ των τριφασικών γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ελλειπτικά πολωμένο πεδίο.



Σχήμα 3: Δημιουργία ΗΜΠ συμμετρικών συστημάτων τάσεων και ρευμάτων.



Σχήμα 4: Βαθμοί πόλωσης ΜΠ: (α) πεδίο ελλειπτικά πολωμένο, $m < M$, (β) πεδίο γραμμικά πολωμένο, $m=0$ και (γ) πεδίο κυκλικά πολωμένο, $m=M$.

4. ΟΔΗΓΙΕΣ ΚΑΙ ΟΡΙΑΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΕΚΘΕΣΗΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ

4.1 Γενικά

Στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα οι μη-ιοντίζουσες ακτινοβολίες (non-ionizing radiation, NIR) είναι οι ακτινοβολίες με μήκος κύματος μεγαλύτερο των 100 nm. Τα ΗΜΠ, τα οποία στη συχνότητα των 50 Hz έχουν μήκος κύματος 6000 km, ανήκουν συνεπώς στην κατηγορία NIR. Φυσικές πηγές NIR είναι ο ήλιος, η θερμική ακτινοβολία της Γης και των διαφόρων αντικειμένων, το γήινο ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο και οι ατμοσφαιρικές εκκενώσεις. Τεχνητές πηγές NIR είναι οι ΓΜΔΗΕ, οι συσκευές και τα καλώδια που διαρρέονται από ισχυρά ηλεκτρικά ρεύματα, οι ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές διατάξεις που ακτινοβολούν παρασιτικά, οι κεραίες των διαφόρων πομπών, τα ηλεκτρικά τόξα, οι συσκευές ηλεκτροσυγκόλλησης και οξυγονοκόλλησης, τα αντικείμενα που βρίσκονται σε υψηλές θερμοκρασίες, τα φωτιστικά σώματα και λυχνίες και οι ακτίνες Laser.

Για την εκτίμηση των NIR, η IRPA (International Radiation Protection Association) ίδρυσε το 1977 την INIRC (International Non-Ionizing Radiation Committee). Η πρώτη προσωρινή (interim) οδηγία της IRPA/INIRC του 1990 [5] έλαβε υπόψη όλες τις μέχρι τότε επιδημιολογικές μελέτες και τα συμπεράσματά τους και αποτέλεσε το πρώτο διεθνώς αποδεκτό πλαίσιο για την μετέπειτα επεξεργασία διεθνών ή εθνικών κανονισμών.

Το 1992 ιδρύθηκε από την IRPA η ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) με αντικείμενο την διερεύνηση των κινδύνων που σχετίζονται με τις διάφορες μορφές NIR, την ανάπτυξη διεθνών οδηγιών για τα όρια έκθεσης σε NIR και την αντιμετώπιση όλων των θεμάτων προστασίας από NIR. Ένας εθνικός πρόδρομος κανονισμός που ακολούθησε αμέσως ήταν ο Γερμανικός Κανονισμός (Vornorm) του 1992 [6]. Ο κανονισμός αυτός χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια για την εκπόνηση του πρώτου Ευρωπαϊκού Κανονισμού της CENELEC, που δημοσιεύτηκε πάλι ως Πειραματικό Ευρωπαϊκό Πρότυπο ENV το 1995 [7]. Ο κανονισμός αυτός υιοθετήθηκε και δημοσιεύτηκε στα Ελληνικά από τον ΕΛΟΤ, ως ΕΛΟΤ ENV 50166-1 [8].

Η ICNIRP εξέδωσε νέα οδηγία [9] το 1998, αντικαθιστώντας την προηγούμενη της IRPA/INIRC του 1990. Η οδηγία αυτή, όπου λήφθηκαν υπόψη οι μελέτες που έγιναν μεταξύ 1990 και 1997 και τέθηκαν νέα όρια, για πεδία στην περιοχή συχνοτήτων από 0 έως 300 GHz, αποτέλεσε τη βάση για τη Σύσταση του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου 1999/519/EC [10] τον Ιούλιο του 1999, η οποία αποτελούσε μέχρι το 2004 την τρέχουσα σύσταση για τα όρια έκθεσης στα ΗΜΠ χαμηλής συχνότητας για το γενικό κοινό και τους εργαζόμενους.

Τον Απρίλιο του 2004 εκδόθηκε η πρώτη οδηγία 2004/40/EC [11] του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, προτείνοντας αυξημένες τιμές σε σχέση με τα επίπεδα αναφοράς της [10] για την επαγγελματική έκθεση σε ΗΜ πεδία. Η οδηγία 2004/40/EC προέβλεπε επίσης ότι τα κράτη μέλη θα πρέπει να

έχουν θέσει σε ισχύ τις νομοθετικές, κανονιστικές και διοικητικές διατάξεις που είναι αναγκαίες, για να συμμορφωθούν με την οδηγία το αργότερο έως τις 30 Απριλίου 2008. Όμως το 2008 εκδόθηκε η οδηγία 2008/46/EC [12], η οποία μετέθεσε κατά μια τετραετία την προηγούμενη ημερομηνία, δεδομένου ότι γνωστοποιήθηκαν στο Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Συμβούλιο και την Επιτροπή νέες επιστημονικές μελέτες σχετικά με τις επιπτώσεις στην υγεία από την έκθεση σε ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες. Τα αποτελέσματα αυτών των μελετών έπρεπε να εξεταστούν αφενός από την ICNIRP, στο πλαίσιο της εν εξελίξει αναθεώρησης των συστάσεων της και, αφετέρου, από την Παγκόσμια Οργάνωση Υγείας, στο πλαίσιο της διενεργούμενης αναθεώρησης των «κριτηρίων υγιεινής του περιβάλλοντος».

Η ICNIRP εξέδωσε νέα οδηγία [13] το 2010, αντικαθιστώντας την προηγούμενη της IRPA/INIRC του 1998. Η οδηγία αυτή, όπου λήφθηκαν υπόψη οι μελέτες που έγιναν μεταξύ 1998 και 2009 και τέθηκαν νέα όρια, για πεδία στην περιοχή συχνοτήτων από 1 Hz έως 100 kHz, αποτέλεσε τη βάση για τη νέα οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου [14] του Ιουνίου του 2013, που αποτελεί και την τρέχουσα σύσταση για τα όρια έκθεσης στα ΗΜΠ χαμηλής συχνότητας των εργαζομένων, ενώ τα όρια για το γενικό κοινό παραμένουν τα ίδια έως την έκδοση νέας οδηγίας.

4.2 Διαχρονική εξέλιξη των οριακών τιμών έκθεσης στη συχνότητα των 50 Hz

Η ασφαλής έκθεση ανθρώπων σε ΗΜΠ καθορίστηκε από την ICNIRP [9, 13] με τη θέσπιση μέγιστων επιτρεπτών τιμών που καλούνται βασικοί περιορισμοί. Σύμφωνα με την οδηγία της ICNIRP του 1988 [9], που χρησιμοποιήθηκε και στον Βρετανικό κανονισμό του 2007 [15] και για συχνότητες από μερικά Hz έως 1 kHz, ορίστηκε ως βασικός περιορισμός η μέγιστη επιτρεπτή πυκνότητα ρεύματος που επάγεται στο κεντρικό νευρικό σύστημα $J_{BR}=2 \text{ mA/m}^2$ για τον γενικό πληθυσμό και 10 mA/m^2 για τους εργαζόμενους στο ΣΗΕ. Από το όριο αυτό εξήχθησαν οι βασικοί περιορισμοί για το ΗΠ, E_{BR} και το ΜΠ, B_{BR} στο εσωτερικό του ανθρωπίνου σώματος. Οι τιμές του εσωτερικού ΗΠ καθορίστηκαν από τη σχέση $J_{BR} = \sigma E_{BR}$ θεωρώντας ως μέση τιμή αγωγιμότητας ανθρωπίνου σώματος (ισοδύναμο ομογενές σώμα) $\sigma=0.2 \text{ } \Omega^{-1}/\text{m}$. Το αντίστοιχο εσωτερικό ΜΠ ορίστηκε από τον νόμο του Faraday θεωρώντας ένα βρόχο ακτίνας R ως $J_{BR} = nRf\sigma B_{BR}$. Εναλλακτικά το εσωτερικό ΜΠ προσδιορίζεται από το μοντέλο του Σχήματος 2 ή πιο ρεαλιστικά μοντέλα. Λαμβάνοντας υπόψη τα ανωτέρω, η οδηγία [9] καταλήγει στους βασικούς περιορισμούς για το εσωτερικό ΗΠ ως $E_{BR}=0.01 \text{ V/m}$ για το γενικό πληθυσμό και 0.05 V/m για τους εργαζόμενους. Αντίστοιχα ορίζει για το εσωτερικό ΜΠ, $B_{BR}=100 \text{ } \mu\text{T}$ για τον γενικό πληθυσμό και $500 \text{ } \mu\text{T}$ για τους εργαζόμενους

Η νεότερη οδηγία της ICNIRP του 2010 [13] αποτίμησε ένα μεγαλύτερο σύνολο ερευνητικών εργασιών και αναδιαμόρφωσε τους βασικούς περιορισμούς τόσο για το εσωτερικό ΗΠ, όσο και για το εσωτερικό ΜΠ. Η αποτίμηση αυτή έλαβε υπόψη τις επιδράσεις στα νευρικά και άλλα ηλεκτρικά ευαίσθητα κύτταρα. Η νέα όμως οδηγία κατέληξε σε διπλασιασμό των προηγούμενων βασικών περιορισμών ως εξής: $E_{BR}=0.02 \text{ V/m}$ για το γενικό πληθυσμό και 0.10 V/m για τους εργαζόμενους, ενώ αντίστοιχα $B_{BR}=200 \text{ } \mu\text{T}$ για το γενικό πληθυσμό και $1000 \text{ } \mu\text{T}$ για τους εργαζόμενους.

Όπως προαναφέρθηκε, ο άνθρωπος και γενικά οι βιολογικοί οργανισμοί είναι "διάφανοι" στο ΜΠ αφού δομούνται από μη-μαγνητικά υλικά. Συνεπώς το εσωτερικό ΜΠ είναι ταυτόσημο με αυτό που θα μετρηθεί ή θα υπολογισθεί απουσία ανθρώπων. Αντίθετα, η παρουσία ανθρώπου παραμορφώνει δραστικά το ΗΠ λόγω της σχετικά υψηλής του αγωγιμότητας $\sigma=0.2 \text{ } \Omega^{-1}/\text{m}$ και της πολύ μεγάλης διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon_r=105$ για την συχνότητα των 50 Hz, [9, 15]. Είναι επιπλέον προφανές ότι το εσωτερικό ΗΠ δεν μπορεί να μετρηθεί. Τίθεται λοιπόν το ερώτημα "ποιο είναι το μετρούμενο ή υπολογιζόμενο αδιατάρακτο (απουσία ανθρώπου) ομοιογενές ΗΠ που θα δημιουργούσε εσωτερικό πεδίο ίσο με τον αντίστοιχο βασικό περιορισμό"; Οι αντίστοιχες τιμές αδιατάρακτου πεδίου ονομάστηκαν "επίπεδα αναφοράς" και ορίζονται στην επόμενη παράγραφο. Η συσχέτιση του εσωτερικού ΗΠ με το αντίστοιχο ομοιογενές αδιατάρακτο πεδίο έγινε αρχικά μέσω μοντέλων γειωμένου ημι-ελλειψοειδούς (όπως στο Σχήμα 2) με $\epsilon_r=105$ και $\sigma=0.2 \text{ } \Omega^{-1}/\text{m}$. Αργότερα όμως χρησιμοποιήθηκαν ανομογενή ρεαλιστικά μοντέλα ανθρώπων [9, 15].

Σύμφωνα με την ICNIRP [9, 13] τα μετρούμενα ΗΜΠ πρέπει να είναι μικρότερα από τα επίπεδα αναφοράς. Επίσης τονίζεται ότι, εάν αυτό παραβιάζεται τότε πρέπει να ελέγχεται επισταμένως η συμμόρφωση με τους βασικούς περιορισμούς. Στην περίπτωση που παρατηρείται παραβίαση των ορίων αυτών, τότε πρέπει να λαμβάνονται μέτρα μείωσης των εντάσεων των πεδίων, όπως για παράδειγμα η αύξηση των αποστάσεων των αγωγών υπερυψηλής τάσης από γειτνιάζοντα αντικείμενα ή κατασκευές.

Συνοψίζοντας, τα επίπεδα αναφοράς της οδηγίας της ICNIRP [9] του 1998 για έκθεση σε ΗΠ ήταν 5 kV/m για το γενικό κοινό και 10 kV/m για τους εργαζόμενους. Τα αντίστοιχα επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε ΜΠ ήταν

100 μT και 500 μT . Τα νέα επίπεδα αναφοράς της οδηγίας της ICNIRP του 2010 [13] για έκθεση σε ΗΠ, παρέμειναν 5 kV/m για το γενικό κοινό και 10 kV/m για τους εργαζόμενους. Τα αντίστοιχα επίπεδα αναφοράς για έκθεση σε ΜΠ διπλασιάστηκαν και τέθηκαν ίσα με 200 μT για το γενικό κοινό και 1000 μT για τους εργαζόμενους.

Η πρώτη Σύσταση του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου [10], που ίσχυσε μέχρι το 2013, δεν έκανε διάκριση μεταξύ έκθεσης εργαζομένων και κοινού και υιοθετούσε τα επίπεδα αναφοράς της ICNIRP του 1998, που αφορούσαν στο γενικό κοινό και για τις δύο κατηγορίες, δηλαδή 5 kV/m για έκθεση σε ΗΠ και 100 μT για έκθεση σε ΜΠ.

Στη νέα οδηγία του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου [14] του 2013, **η οποία αφορά μόνο τους εργαζόμενους**, εισήχθησαν οι ορισμοί των οριακών τιμών έκθεσης (exposure limit values, ELV) και των επιπέδων δράσης (action levels, AL) ως εξής:

- Οριακές τιμές έκθεσης (ELV) είναι οι τιμές που καθορίζονται βάσει βιοφυσικών και βιολογικών εκτιμήσεων, ιδιαίτερα στη βάση επιστημονικώς παγιωμένων βραχυπρόθεσμων και εντόνων άμεσων επιπτώσεων, ήτοι των θερμικών επιπτώσεων και της ηλεκτρικής διέγερσης των ιστών·
- ELV με επιπτώσεις στην υγεία είναι εκείνες οι ELV άνω των οποίων ενδέχεται να υπάρξουν δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία των εργαζομένων, όπως η θέρμανση ή η διέγερση του νευρικού και μυϊκού ιστού·
- ELV με αισθητηριακές επιπτώσεις είναι εκείνες οι ELV άνω των οποίων οι εργαζόμενοι ενδέχεται να παρουσιάσουν παροδικές διαταραχές στις αισθητηριακές αντιλήψεις και μικρές μεταβολές των εγκεφαλικών λειτουργιών·
- Επίπεδα δράσης (AL) είναι τα λειτουργικά όρια που καθορίζονται με σκοπό την απλοποίηση της διαδικασίας κατάδειξης της συμμόρφωσης με τις σχετικές ELV ή, όπου απαιτείται, προκειμένου να ληφθούν τα σχετικά μέτρα προστασίας ή πρόληψης κατά την παρούσα οδηγία.

Στην οδηγία [14] υιοθετήθηκαν τα επίπεδα αναφοράς της οδηγίας της ICNIRP του 2010, οπότε αυξήθηκαν τα αντίστοιχα ευρωπαϊκά όρια για τους εργαζόμενους. Επομένως, οι τρέχουσες ευρωπαϊκές οριακές τιμές έκθεσης σε ΗΠ και ΜΠ συχνότητας 50 Hz είναι:

- ΗΠ: 5 kV/m για το γενικό κοινό και 10 kV/m για τους εργαζόμενους
- ΜΠ: 200 μT για το γενικό κοινό και 1000 μT για τους εργαζόμενους.

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι η μελέτη των ΗΜΠ κάτω από γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης του Ελληνικού δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και η σύγκριση τους με τα ανωτέρω επίπεδα αναφοράς.

Όσον αφορά το ΜΠ, τόσο ο άνθρωπος, όσο και το έδαφος καθώς και οι συνήθεις κατασκευές αποτελούνται από μη-μαγνητικά υλικά, συνεπώς οι υπολογισμοί ή/και προσομοιώσεις μπορούν να γίνουν απουσία τους. Υπάρχει μόνο το ζήτημα του κατά πόσο υπάρχει περίπτωση να υφίστανται κάτω από τις γραμμές τεχνητές κατασκευές που εμπεριέχουν μαγνητικά υλικά. Στις περιπτώσεις αυτές θα απαιτηθεί ειδικός υπολογισμός που να προσομοιώνει την παρουσία τους.

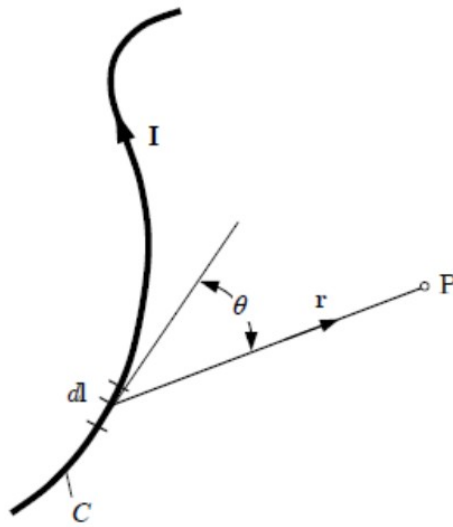
Αντίθετα, όσον αφορά το ΗΠ, οποιοδήποτε αγωγίμο ή διηλεκτρικό αντικείμενο ή τεχνητή κατασκευή βρεθεί κάτω από γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης θα επηρεάζει δραστικά τις τιμές του. Συνεπώς η προσέλευση ανθρώπων στο χώρο αυτό θα τους εκθέτει σε διαφορετικό αδιατάρακτο ΗΠ. Το ερώτημα λοιπόν που τίθεται είναι, "ποιες είναι αυτές οι πρακτικές κατασκευές (κτίσματα, δένδρα, υπερυψωμένοι αυτοκινητόδρομοι, κ.λ.π.) που μπορεί να προκαλέσουν μεγαλύτερες τιμές ΗΠ"; Θεωρούμε ότι η προσέλευση ανθρώπων θα προκαλέσει την ίδια έκθεση με την περίπτωση του ομοιογενούς αδιατάρακτου ΗΠ. Η θεώρηση όμως αυτή πρέπει να ελεγχθεί και να τεθούν οι συντρέχουσες προϋποθέσεις. Αν και όπου αυτή ισχύει, τότε πρέπει να προσδιοριστούν οι χειρότερες δυνατές καταστάσεις - τοπολογίες (μεγιστοποίηση πεδίου) και σε αυτές να προσδιοριστεί το ΗΠ που συγκρίνεται με τα αντίστοιχα επίπεδα αναφοράς. Σε όποιες συνθήκες δεν ισχύει η υπόθεση αυτή, πρέπει να προσομοιώνεται ο άνθρωπος για να προσδιορισθεί το δημιουργούμενο εσωτερικό ΗΠ, το οποίο συγκρίνεται με τους βασικούς περιορισμούς.

5.1. Ανάλυση μαγνητικού πεδίου

Ο υπολογισμός του ΜΠ των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας την αρχή της επαλληλίας, αθροίζοντας τις συνεισφορές της μαγνητικής επαγωγής dB για κάθε

στοιχειώδες τμήμα $d\vec{l}$ (Σχήμα 5) ενός ρευματοφόρου αγωγού διαρρεόμενου από ρεύμα εντάσεως I , που δημιουργεί σε τυχαίο σημείο P που απέχει απόσταση r από το $d\vec{l}$, οι οποίες εκφράζονται με βάση τον νόμο των Biot-Savart από τη σχέση :

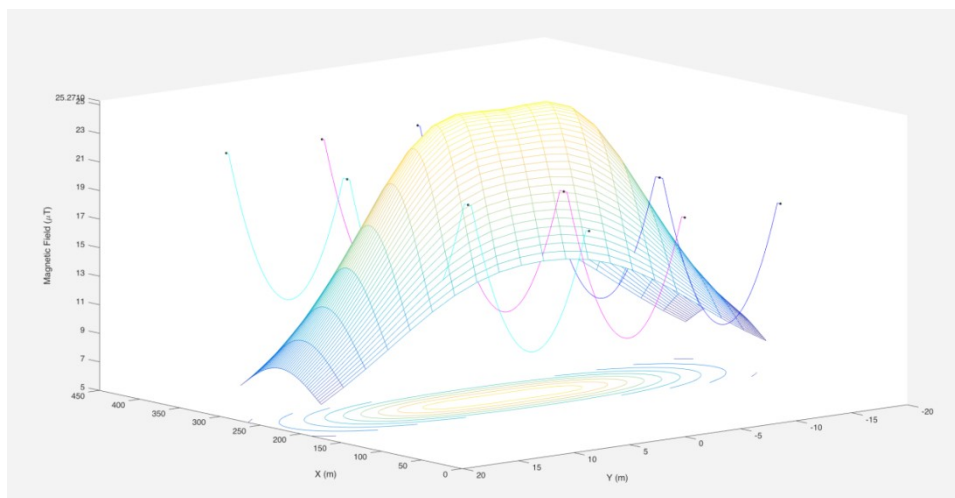
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi} \int_C \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (4)$$



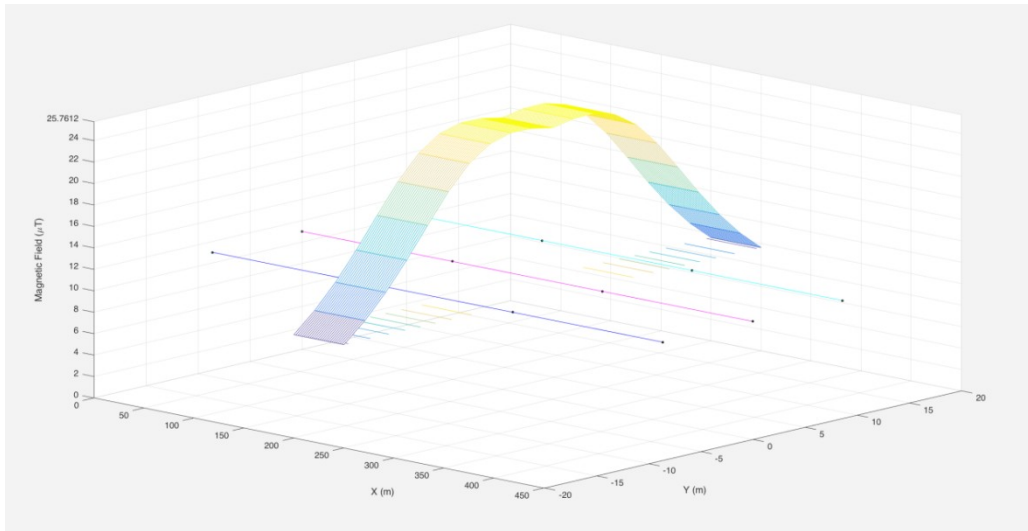
Σχήμα 5: Υπολογισμός μαγνητικής επαγωγής στο σημείο P από στοιχειώδες τμήμα $d\vec{l}$ ρευματοφόρου αγωγού.

Σημειώνεται ότι το έδαφος έχει πρακτικά ίση μαγνητική διαπερατότητα με αυτή του αέρα και περιορισμένη αγωγιμότητα, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει πρακτικά την κατανομή του ΜΠ της γραμμής μεταφοράς. Επιπλέον παρότι η πραγματική γεωμετρία των αγωγών περιλαμβάνει βυθίσεις μεταξύ των σημείων ανάρτησης στους μονωτήρες των πυλώνων, δεν διαφέρουν ουσιαστικά οι μέγιστες παρατηρούμενες τιμές του ΜΠ στις περιοχές μέγιστης βύθισης εάν θεωρηθούν οι αγωγοί ευθύγραμμοι. Για παράδειγμα στο Σχήμα 6 φαίνεται η κατανομή ΜΠ σε ύψος $h=1.5$ m από το έδαφος για γραμμή 400 kV απλού κυκλώματος (S6) και ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος $h_{min}=11$ m για ρεύμα $I_{rms}=1000$ A με θεώρηση του βέλους βύθισης των αγωγών, όπου παρατηρείται μέγιστη επαγωγή $B_{max}=25.27$ μ T. Με την ίδια ανάλυση θεωρώντας τους αγωγούς απολύτως ευθύγραμμους προκύπτει η κατανομή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7, όπου παρατηρείται μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής $B_{max}=25.78$ μ T.

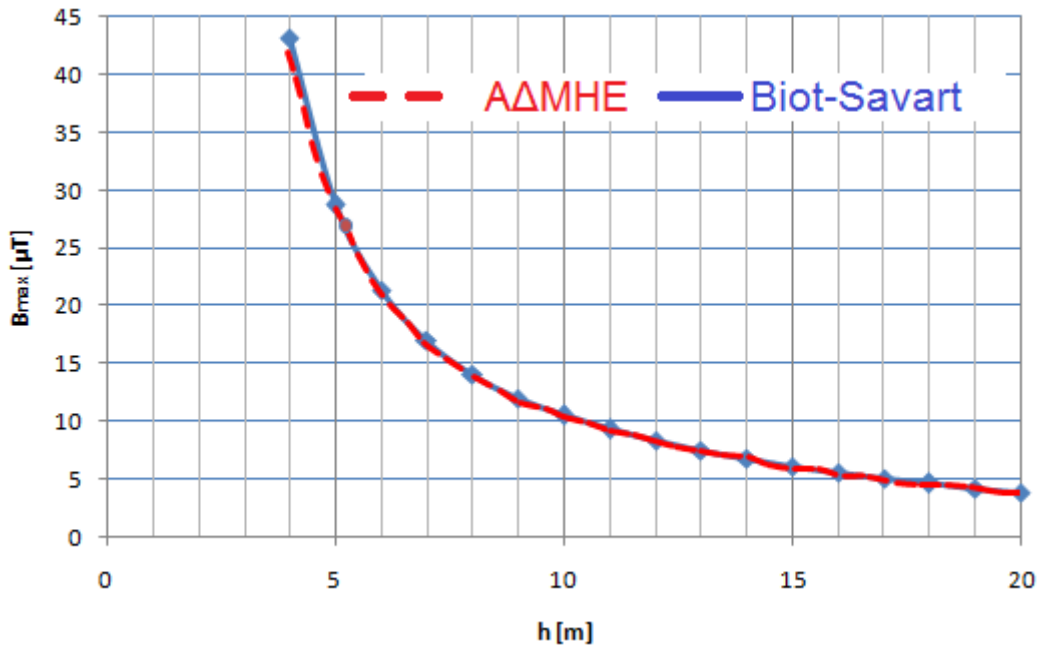
Επομένως για την ανάλυση της κατανομής του ΜΠ των γραμμών μεταφοράς που εμφανίζεται στις περιοχές μέγιστης βύθισης των αγωγών προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια η θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών, η οποία διευκολύνει σημαντικά τους αντίστοιχους υπολογισμούς.



Σχήμα 6: Υπολογισμός ΜΠ σε ύψος $h=1.5$ m από το έδαφος για γραμμή 400 kV απλού κυκλώματος (S6) και ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος $h_{min}=11$ m για ρεύμα $I_{rms}=1000$ A με θεώρηση του βέλους βύθισης των αγωγών ($B_{max}=25.27$ μ T).



Σχήμα 7: Υπολογισμός ΜΠ σε ύψος $h=1.5$ m από το έδαφος για γραμμή 400 kV απλού κυκλώματος (S6) και ελάχιστη απόσταση αγωγών από το έδαφος $h_{min}=11$ m για ρεύμα $I_{rms}=1000$ A χωρίς τη θεώρηση του βέλους βύθισης των αγωγών ($B_{max}=25.78$ μ T).



Σχήμα 8: Σύγκριση υπολογισμών ΜΠ σε συνάρτηση με το ύψος h των αγωγών από το έδαφος για γραμμή 150 kV διπλού κυκλώματος (S4) και ρεύμα $I_{rms}=780$ A χωρίς τη θεώρηση του βέλους βύθισης των αγωγών.

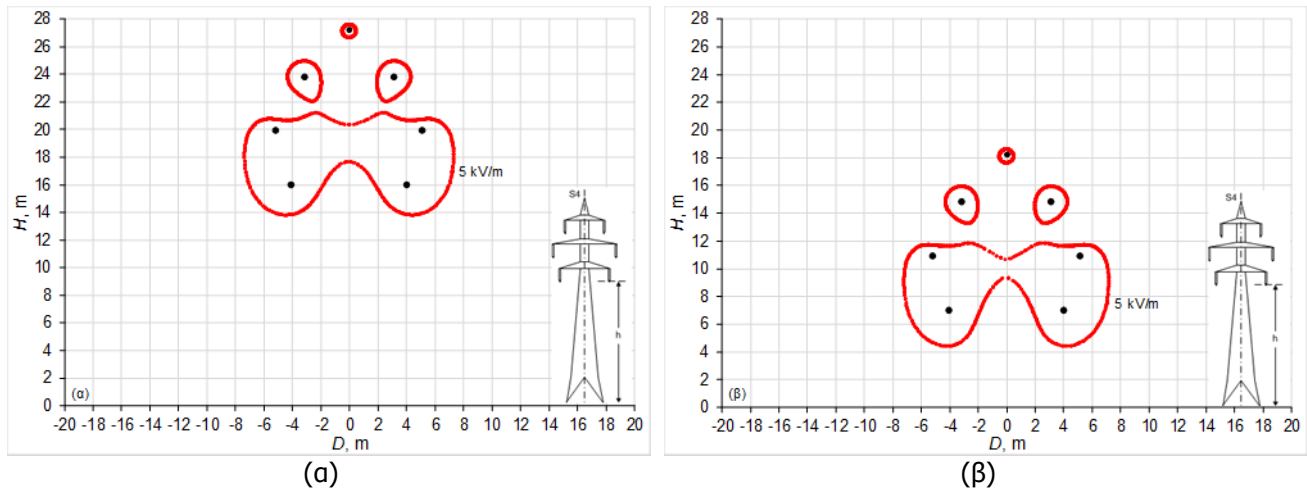
Στο Σχήμα 8 συγκρίνονται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε για ευθύγραμμους αγωγούς απείρου μήκους με εκείνα της εργασίας [18] στην περίπτωση γραμμής μεταφοράς 150 kV διπλού κυκλώματος (S4) για ρεύμα $I_{rms}=780$ A και παρατηρείται πολύ καλή συμφωνία.

5.2. Ανάλυση ηλεκτρικού πεδίου

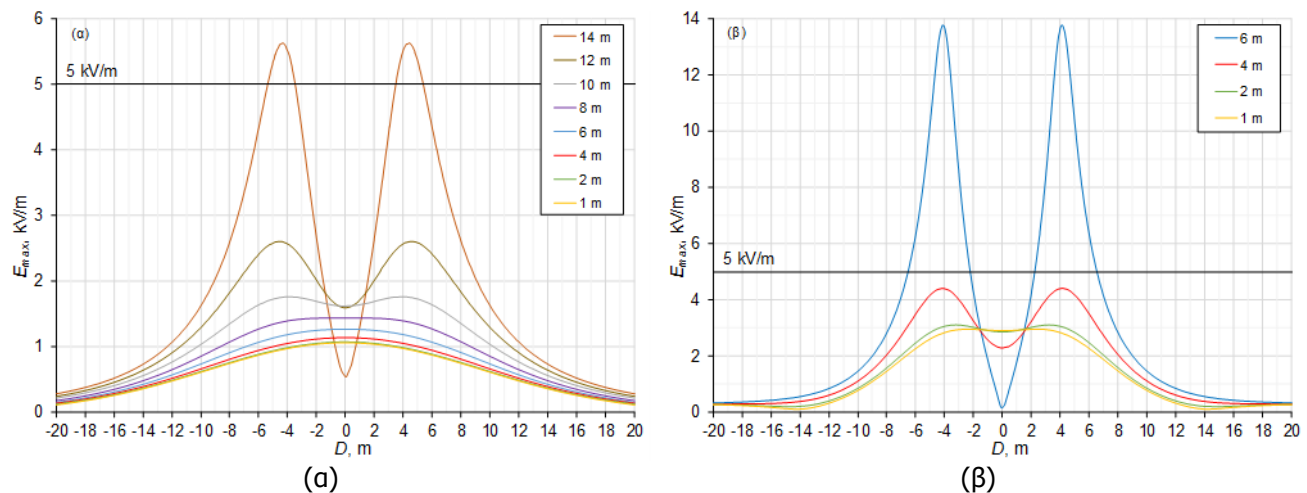
Για την ανάλυση του ΗΠ γύρω από αγωγούς εναέριων γραμμών του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας διεξήχθησαν διδιάστατες και τριδιάστατες προσομοιώσεις ηλεκτροστατικού πεδίου με τη βοήθεια των λογισμικών Comsol Multiphysics [16] και Charge [17], αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι οι προσομοιώσεις γίνονται για λόγους απλότητας σε μηδενική συχνότητα (ηλεκτροστατικό πεδίο) παρόλο που το μελετώμενο σύστημα λειτουργεί στα 50 Hz. Αυτή όμως η προσέγγιση ισχύει με πολύ μεγάλη ακρίβεια επειδή η συχνότητα των 50 Hz είναι πολύ χαμηλή και το αντίστοιχο ηλεκτρικό δυναμικό περιγράφεται και πάλι από την εξίσωση Laplace. Κατά τις προσομοιώσεις ελήφθη υπόψη η γεωμετρία των τυπικών εναέριων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας του Ελληνικού συστήματος και τα αποτελέσματα που ακολουθούν αναφέρονται στη μέγιστη τάση λειτουργίας του συστήματος (170 kV) για συμμετρική διάταξη των αγωγών των φάσεων που

έχει ως αποτέλεσμα τις μέγιστες τιμές ΗΠ κάτω από τους αγωγούς της γραμμής [1]. Ακόμη, τα αποτελέσματα υπολογισμού ΗΠ αναφέρονται σε ευθύγραμμους αγωγούς καθώς η θεώρηση αυτή οδηγεί σε ίσες ή μεγαλύτερες τιμές πεδίου σε σχέση με την περίπτωση που λαμβάνεται υπόψη το βέλος κάμψης των αγωγών της γραμμής.

Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται ο γεωμετρικός τόπος του ορίου αδιατάρακτου ΗΠ 5 kV/m γύρω από τους αγωγούς εναέριας γραμμής 150 kV διπλού κυκλώματος (S4). Το Σχήμα 10 παρουσιάζει την κατανομή του μέγιστου αδιατάρακτου ΗΠ σε διάφορα ύψη από το έδαφος κάτω από την ίδια γραμμή. Διαπιστώνεται εύκολα ότι σε ύψος 2m από το έδαφος το πεδίο λαμβάνει σημαντικά χαμηλότερες τιμές του ορίου των 5 kV/m, γεγονός που ενισχύεται ιδιαίτερα με την αύξηση του ύψους της γραμμής. Ειδικότερα, στο Σχήμα 11 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές της έντασης του ΗΠ σε ύψος 2 m από το έδαφος ως συνάρτηση της απόστασης των αγωγών της κάτω φάσης από το έδαφος. Για ύψος κάτω φάσης μεγαλύτερο των 5 m η μέγιστη τιμή της έντασης του ΗΠ δεν ξεπερνά το όριο των 5 kV/m.



Σχήμα 9: Όρια απόστασης αδιατάρακτου ΗΠ 5 kV/m γύρω από τους αγωγούς εναέριας γραμμής 150 kV διπλού κυκλώματος (S4) με τη συμμετρική διάταξη των αγωγών των φάσεων και ύψος κάτω φάσης (α) $h=16$ m, (β) $h=7$ m, H : ύψος από το έδαφος, D : απόσταση από τον άξονα συμμετρίας της γραμμής.

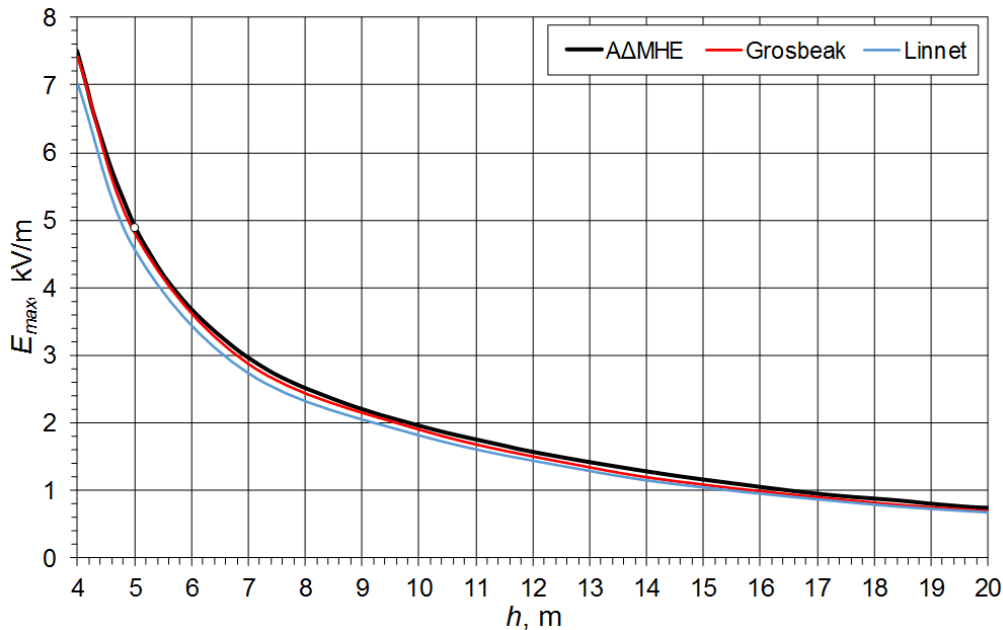


Σχήμα 10: Μέγιστο αδιατάρακτο ΗΠ (E_{max}) σε διάφορα ύψη από το έδαφος κάτω από εναέρια γραμμή 150 kV διπλού κυκλώματος (S4) με τη συμμετρική διάταξη των αγωγών των φάσεων και ύψος κάτω φάσης (α) 16 m, (β) 7 m, D : απόσταση από τον άξονα συμμετρίας της γραμμής.

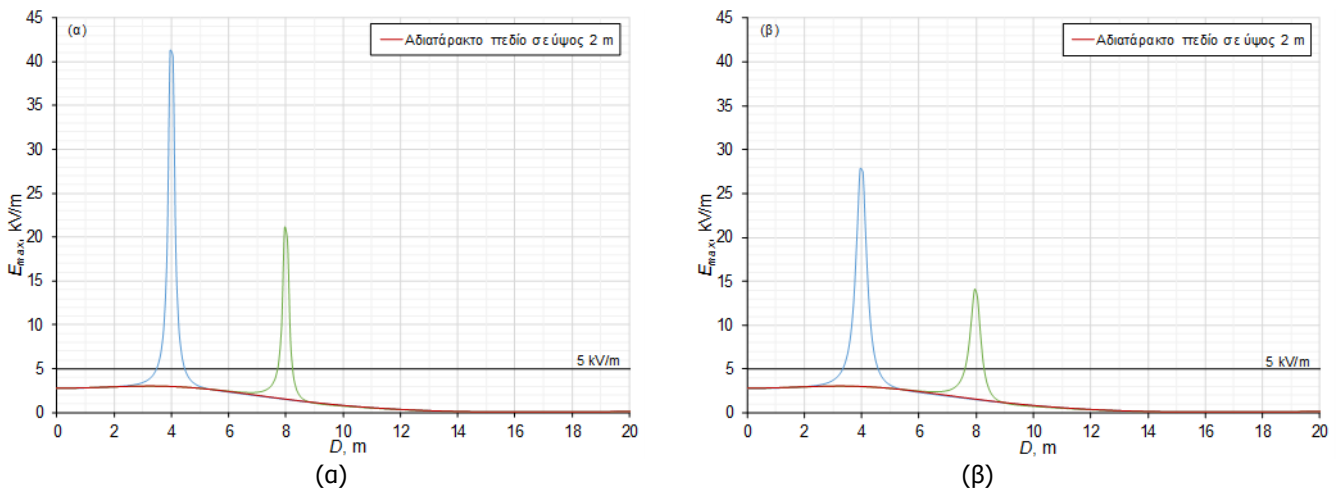
Από το Σχήμα 11 διαπιστώνεται η συμφωνία των αποτελεσμάτων της παρούσης εργασίας με αυτά της [18]. Σημειώνεται ωστόσο, ότι τα αποτελέσματα αυτά αναφέρονται σε 150 kV τάση λειτουργίας της γραμμής και όχι στη μέγιστη τάση λειτουργίας του συστήματος των 170 kV.

Στην ανάλυση που προηγήθηκε χρησιμοποιείται το όριο αδιατάρακτου ΗΠ των 5 kV/m, καθώς το τελευταίο προσδιορίστηκε στη βάση της αντίληψης και ενόχλησης ανθρώπων, οι οποίοι πλησιάζοντας προς εναέριας γραμμής υψηλής τάσης υπόκειντο σε ένα διαρκώς αυξανόμενο ΗΠ [19]. Ωστόσο, παρουσία ανθρώπου ή

γειωμένων ή μη αντικειμένων στρεβλώνεται η κατανομή του ΗΠ (Σχήμα 12). Ο βαθμός στρέβλωσης του ΗΠ εξαρτάται από τις γεωμετρικές και ηλεκτρικές παραμέτρους του αντικειμένου, τη σχετική του θέση ως προς την εναέρια γραμμή υψηλής τάσης καθώς και από την παρουσία ή μη άλλων γειτνιαζόντων αντικειμένων.



Σχήμα 11: Καμπύλες για τον καθορισμό της μέγιστης τιμής της έντασης του ΗΠ σε ύψος 2 m από το έδαφος κάτω από γραμμή 150 kV διπλού κυκλώματος (S4) ως συνάρτηση της απόστασης h των αγωγών της κάτω φάσης από το έδαφος για συμμετρική διάταξη των αγωγών των φάσεων.



Σχήμα 12: Στρέβλωση ΗΠ εναέριας γραμμής 150 kV διπλού κυκλώματος (S4) παρουσία γειωμένου αντικειμένου ύψους 2 m και διαμέτρου (α) $d=25$ cm, (β) $d=50$ cm; ύψος κάτω φάσης 7 m, D : απόσταση από τον άξονα συμμετρίας της γραμμής.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία διερευνά τις μεθοδολογίες που επιτρέπουν τη μελέτη και τον καθορισμό των αποστάσεων ασφαλούς έκθεσης των ανθρώπων, στο περιβάλλον των γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υψηλής και υπερυψηλής τάσης, με απώτερο στόχο να προταθούν σχετικές αποστάσεις ασφαλείας ανθρώπινης δραστηριότητας. Για το σκοπό αυτό καταγράφονται τα διεθνή θεσπισμένα όρια μέσω ανασκόπησης σχετικών δημοσιευμένων εργασιών και κανονισμών. Στις χαμηλές συχνότητες ενδιαφέροντος τα δύο πεδία μπορούν να μελετηθούν ανεξάρτητα, με το μαγνητικό και το ηλεκτρικό πεδίο να υπολογίζονται ως συνάρτηση της έντασης του ρεύματος και της τάσης των αγωγών, αντίστοιχα. Η κατανομή του μαγνητικού πεδίου δεν διαταράσσεται από το έδαφος ή την παρουσία ανθρώπων, ενώ η θεώρηση ευθύγραμμων αγωγών απείρου μήκους επιτρέπει τον υπολογισμό των μέγιστων τιμών του με ικανοποιητική ακρίβεια. Αντιθέτως, τόσο το έδαφος όσο και η παρουσία κατασκευών ή/και ανθρώπων δύνανται να επηρεάσουν σημαντικά την κατανομή

του ηλεκτρικού πεδίου και επομένως απαιτείται να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς. Τα πρώτα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν σε τυπικές περιπτώσεις γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας συγκρίνονται και είναι σε συμφωνία με αντίστοιχα δημοσιευμένα.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δ.Κ. Τσανάκα, Ειδικά Κεφάλαια Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων και Δικτύων, Α΄ Μέρος Προστασία Ανθρώπων και Εξοπλισμού, Παράρτημα Β, Τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία χαμηλής συχνότητας ως περιβαλλοντικοί παράγοντες, Πάτρα 2004.
- [2] Δ.Κ. Τσανάκας, Το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο γραμμών και υποσταθμών ηλεκτρικής ενέργειας, Ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία 50 Hz – Πιθανές βιολογικές επιδράσεις, Ημερίδα ΤΕΕ, Αθήνα 26 Μαΐου 1993.
- [3] G. Filippopoulos, D. Tsanakas, G. Kouvarakis, J. Voyatzakis, M. Ammann, K.O. Papailiou, Optimum conductor arrangement of compact lines for electric and magnetic field minimization - Calculations and measurements, Med Power, Athens, November 4-6, 2002.
- [4] IEEE Magnetic Fields Task Force, A Protocol for Spot Measurements of Residential Power Frequency Magnetic Fields, IEEE Trans. on PWRD, 8:1386 1394, 1993.
- [5] International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee, IRPA/INIRC: Interim Guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. Health Physics 58, 113-122, 1990.
- [6] Deutsche Vornorm DIN VDE 0848, Teil 4, A2, November 1992: Sicherheit bei elektromagnetischen Feldern. Grenzwertefürzum Schutz von Personenim Frequenzbereich von 0 Hz bis 30 kHz, 1992.
- [7] CENELEC ENV 50166-1, January 1885: Human Exposure to electromagnetic fields – Low frequency (0 Hz to 10 kHz).
- [8] ΕΛΟΤ ENV 50166-1, January 1885: Έκθεση ανθρώπων σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία – Χαμηλές συχνότητες (0 Hz to 10 kHz).
- [9] ICNIRP, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Physics 74, 494-522, 1998.
- [10] Σύσταση 1999/519/ΕΚ του Συμβουλίου περί του περιορισμού της έκθεσης του κοινού σε ηλεκτρομαγνητικά πεδία (0 Hz – 300 GHz), Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, L199/59- L199/70, 30/07/1999.
- [11] Οδηγία 2004/40/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου περί των ελάχιστων προδιαγραφών υγείας και ασφάλειας όσον αφορά στην έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (ηλεκτρομαγνητικά πεδία), Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, L159/1- L159/26, 29/04/2004.
- [12] Οδηγία 2008/46/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την τροποποίηση της οδηγίας 2004/40/ΕΚ περί των ελάχιστων προδιαγραφών υγείας και ασφάλειας όσον αφορά την έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (ηλεκτρομαγνητικά πεδία, Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, L114/88- L114/89, 23/04/2008.
- [13] Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz), International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Health Physics, 99, 818 -836, 2010.
- [14] Οδηγία 2013/35/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου περί των ελαχίστων απαιτήσεων υγείας και ασφάλειας όσον αφορά την έκθεση των εργαζομένων σε κινδύνους προερχόμενους από φυσικούς παράγοντες (ηλεκτρομαγνητικά πεδία), Επίσημη Εφημερίδα των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, L179/1- L179/21, 26/06/2013.
- [15] Βρετανικός Κανονισμός BS EN 62226-3-1:2007, "Exposure to electric or magnetic fields in the low and intermediate frequency range - Methods for calculating the current density and internal electric field induced in the Human body, Part 3-1: Exposure to electric fields - Analytical and 2D numerical models", British Standards, 31 October 2007.
- [16] <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>
- [17] <http://fieldscale.com/charge/>
- [18] Δ. Τσανάκας, Ε. Μίμος, Νομογραφήματα για τον καθορισμό της απόστασης των αγωγών γραμμών 150 kV και 400 kV από το έδαφος για δεδομένες μέγιστες τιμές των πεδιακών εντάσεων, Πάτρα, Απρίλιος 2010.
- [19] J. Reilly, Applied bioelectricity: from electrical stimulation to electropathology. New York: Springer-Verlag, 1998.