ΔΙΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΧΑΜΗΛΟΣΥΧΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ: Ο ΤΡΙΤΟΣ ΚΥΚΛΟΣ ΤΟΥ ΣΧΗΜΑΤΟΣ

Ε. Π. Νικολοπούλου[1], Ε. Καραμπέτσος[2], Ι. Φ. Γκόνος[1] και Ι. Α. Σταθόπουλος[1]
[1]Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π., Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
[2]Γραφείο Μη Ιοντιζουσών Ακτινοβολιών Ε.Ε.Α.Ε., Πατριάρχου Γρηγορίου και Νεαπόλεως, Αγία Παρασκευή, Τ.Θ 60092, Τ.Κ. 15310
E-mail: hveleni@mail.ntua.gr

Περίληψη

Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας και το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. προχώρησαν τον Ιανουάριο του 2016 στη διεξαγωγή του τρίτου κύκλου ενός σχήματος διεργαστηριακών μετρήσεων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων χαμηλών συχνοτήτων, με στόχο την αξιολόγηση των φορέων που δραστηριοποιούνται στο συγκεκριμένο πεδίο μετρήσεων. Σε πρώτο στάδιο, έγινε καταγραφή του ηλεκτρικού πεδίου, κοντά σε ομοίωμα γραμμής ηλεκτρικής ενέργειας μέσης τάσης και σε δεύτερο στάδιο του παραγόμενου μαγνητικού πεδίου από ένα καλώδιο μέσης τάσης. Στο τρίτο στάδιο, τα συμμετέχοντα εργαστήρια έπρεπε να μετρήσουν το μαγνητικό πεδίο και τη συχνότητα στο κέντρο ενός τετραγωνικού πηνίου, που διαρρεόταν από ρεύμα άγνωστης, για αυτούς, τιμής και συχνότητας. Οι μετρήσεις αξιολογήθηκαν με χρήση των z-scores και των βαθμών E_n ως δεικτών επίδοσης. Επιπλέον, διερευνήθηκαν πιθανοί παράγοντες σφάλματος που υποβαθμίζουν την επίδοση των συμμετεχόντων, έγινε σύγκριση με τις επιδόσεις στους προηγούμενους κύκλους μετρήσεων και προέκυψαν συμπεράσματα για τη γενικότερη λειτουργία και αποτελεσματικότητα του εν λόγω διεργαστηριακού σχήματος.

Λέξεις-Κλειδιά: διεργαστηριακές μετρήσεις, ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία εξαιρετικά χαμηλών συχνοτήτων, z-scores, βαθμοί E_n, παράγοντες μη ικανοποιητικής επίδοσης.

Abstract

The Non Ionizing Radiation Office of the Greek Atomic Energy Commission and the High Voltage Laboratory of the National Technical University of Athens organized in January 2016 the third round of an interlaboratory comparison programme for extremely low frequency electric and magnetic fields measurements in order to evaluate the competence of the laboratories acting in this field. The participants recorded at the first stage of the scheme the electric field strength in the vicinity of a scale transmission line and at the second stage the magnetic flux density produced by a middle voltage cable. The magnetic flux density and the frequency at the centre of a standard square coil were measured at the third stage. The measurement results were analysed statistically with the robust algorithm A according to the standard ISO 13528, in order to estimate the reference average values and standard deviations, and consequently calculate the z-scores and - where possible the E_n numbers - for the performance evaluation of the laboratories. Factors that contribute to the unsatisfactory performance of the participants are investigated and a comparison to the performance of the participants in previous rounds is also presented along with conclusions on the overall efficiency of the interlaboratory programme.

Keywords: interlaboratory comparisons, extremely low frequency electric and magnetic fields, z-scores, E_n numbers, factors of non-satisfying performance.

---

1. Εισαγωγή

Η έκθεση σε χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία συχνά εγείρει αντιδράσεις από το κοινό για τις πιθανές επιπτώσεις στην υγεία ειδικά στην περίπτωση γειτνίασης με γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, λόγω των πεδίων που αναπτύσσονται στο περιβάλλον τους. Τα ανώτερα επίπεδα έκθεσης του γενικού πληθυσμού σε πεδία παραγόμενα από τη βιομηχανική συχνότητα των 50 Hz όπως έχουν τεθεί από την ICNIRP (ICNIRP, 2010) είναι 5 kV/m για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E) και 200 μT για τη μαγνητική επαγωγή (B), ενώ σύμφωνα με την κείμενη ελληνική νομοθεσία είναι 5 kV/m για την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου (E) και 100 μT για τη μαγνητική επαγωγή (B). Για τον έλεγχο της συμμόρφωσης με τα παραπάνω όρια θα πρέπει να διενεργούνται, σε διάφορα σημεία, μετρήσεις των τιμών του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου. Οι σχετικές διαδικασίες μέτρησης ορίζονται από τα Πρότυπα ΕΛΟΤ IEC 61786-1:2014, IEC 61786-2:2014, IEC 62110:2009 και IEEE 644-1994.

Η διαρκώς αυξανόμενη ζήτηση για συγκρίσιμα αποτελέσματα, σε συνδυασμό με την ανάγκη για επικύρωση της αξιοπιστίας εργαστηριακών αποτελεσμάτων έχει συμβάλει στη διάδοση των σχημάτων δοκιμών ικανότητας, ως βασικής μεθόδου για τον έλεγχο της τεχνικής επάρκειας ενός εργαστηρίου. Η Ελληνική Επιτροπή Ατομικής Ενέργειας (Ε.Ε.Α.Ε.) και το Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π. με αφορμή την ανυπαρξία διαθέσιμων αντίστοιχων προγραμμάτων δοκιμών ικανότητας, τόσο από ελληνικούς, όσο και από διεθνείς φορείς, αλλά και την απαίτηση του ΕΣΥΔ, όπως τα διαπιστευμένα εργαστήρια συμμετέχουν σε πρόγραμμα δοκιμών ικανότητας ανά τετραετία, έχουν θέσει σε εφαρμογή ένα πρόγραμμα διεργαστηριακών συγκριτικών μετρήσεων χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των δύο πρώτων κύκλων μετρήσεων, οι οποίες διεξήχθησαν το 2009 (Χριστοδούλου κ.ά. 2010, Nicolopoulou et al. 2012) και το 2013 (Ζτούπης κ.ά. 2013, Ztoupis et al. 2015), ανέδειξε την αναγκαιότητα συνεχούς ελέγχου της τεχνικής επάρκειας των εργαστηρίων που δραστηριοποιούνται στο συγκεκριμένο τομέα, μέσω συμμετοχής σε σχήματα δοκιμών ικανότητας (ΣΔΙ), με στόχο τη διαρκή βελτίωση της επίδοσής τους.

Η δοκιμή ικανότητας συνίσταται στην από κοινού οργάνωση, εκτέλεση και αξιολόγηση ομοειδών μετρήσεων από δύο ή περισσότερα εργαστήρια (ISO/IEC 17043, 2010), με βασική αρχή λειτουργίας την αξιολόγηση των συμμετεχόντων εργαστηρίων, μέσω ενός αριθμητικού δείκτη της ικανότητάς τους (δείκτης επίδοσης). Σκοπός της συμμετοχής σε ΣΔΙ, η οποία είναι υποχρεωτική για τα διαπιστευμένα εργαστήρια σύμφωνα με τις απαιτήσεις του Προτύπου ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025:2005, δεν πρέπει να είναι απλά μία μεμονωμένη επιτυχής επίδοση που θα πιστοποιεί την επάρκεια ενός εκάστου εργαστηρίου μόνο για ένα περιορισμένο χρονικό διάστημα, αλλά η συνεχής επιβεβαίωση της αξιοπιστίας του και η παρακολούθηση της χρονικής εξέλιξης της επίδοσης του.

Το ΣΔΙ που εφαρμόζεται στον τομέα των μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων περιλαμβάνει μια διαδικασία όπου όλοι οι συμμετέχοντες μετρούν την ίδια πηγή εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, συνήθως σε κανονικές συνθήκες εργασίας (Nicolopoulou et al. 2012). Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο τρίτος κύκλος του σχήματος, ο οποίος πραγματοποιήθηκε τον Ιανουάριο 2016, εντός του Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π., αξιοποιώντας τα συμπεράσματα και την εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τους προηγούμενους δύο κύκλους. Το παρόν ΣΔΙ έχει σχεδιασθεί

σύμφωνα με τις διεθνείς κατευθυντήριες γραμμές ILAC G13:08/2007 και ISO/IEC 17043:2010, την πολιτική ILAC-P9:11/2010 και τη σχετική πολιτική του ΕΣΥΔ για τη συμμετοχή των εργαστηρίων σε προγράμματα δοκιμών ικανότητας (ΕΣΥΔ ΠΔΙ/02/00/02-09-2011).

2. Πειραματική διαδικασία

Το σχήμα δοκιμών ικανότητας που διεξήχθη στις 29 Ιανουαρίου 2016 στο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Υ.Τ. / Ε.Μ.Π.), είχε ως σκοπό την αξιολόγηση των συμμετεχόντων εργαστηρίων στη μέτρηση χαμηλόσυχνων ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων. Στο πλαίσιο των διεργαστηριακών πειραμάτων που διεξήχθησαν, τα εργαστήρια κλήθηκαν να μετρήσουν το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο που προέκυπταν από συγκεκριμένες διατάξεις. Η διαδικασία μέτρησης, όπως και η συνδεσμολογία των διατάξεων παραγωγής του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, παρέμειναν ίδιες με αυτές του δεύτερου κύκλου που διεξήχθη το 2013, όπως περιγράφεται αναλυτικά στη βιβλιογραφία (Ζτούπης κ.ά. 2013, Ztoupis et al. 2015).

Συγκεκριμένα, για το σκοπό των μετρήσεων της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, ένα προσομοίωμα γραμμής μεταφοράς στο Ε.Υ.Τ. Ε.Μ.Π. τέθηκε σε τάση 33 kV, μέσω ενός μετασχηματιστή δοκιμών με λόγο 110V/55kV. Το κάθε εργαστήριο έλαβε μετρήσεις σε ύψος 1,5 m από το έδαφος σε τρεις προκαθορισμένες θέσεις, οι αποστάσεις των οποίων από τη γραμμή μεταφοράς φαίνονται στον Πίνακα 1. Για την αξιολόγηση των εργαστηρίων σε μετρήσεις μαγνητικής επαγωγής, τροφοδοτήθηκε με τη βοήθεια ενός μετασχηματιστή ρεύματος ένα καλώδιο με ρεύμα 515 A. Η κάθε ομάδα κατέγραψε την τιμή του μαγνητικού πεδίου σε τρία διαφορετικά σημεία σε ύψος 80 cm από το έδαφος. Οι αποστάσεις των θέσεων μέτρησης από το ρευματοφόρο αγωγό φαίνονται επίσης στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Αποστάσεις θέσεων μέτρησης ηλεκτρικού πεδίου από γραμμή μεταφοράς και μαγνητικού πεδίου από ρευματοφόρο αγωγό

Θέση	**Απόσταση θέσης – γραμμής μεταφοράς (cm) (Ηλεκτρικό πεδίο)**	**Απόσταση θέσης – ρευματοφόρου αγωγού (cm) (Μαγνητικό πεδίο)**
1	114	50
2	224	224
3	444	444

Στο τρίτο στάδιο του σχήματος οι συμμετέχοντες κλήθηκαν να καταγράψουν τη μαγνητική επαγωγή και τη συχνότητα ενός προσεγγιστικά ομοιόμορφου μαγνητικού πεδίου στο κέντρο ενός πρότυπου τετραγωνικού πηνίου διαστάσεων 1m x 1m. Το πηνίο τροφοδοτήθηκε μέσω μιας ειδικής μονάδας-διεπαφής από μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης απαλλαγμένη από αρμονικές συνιστώσες και με χρήση κατάλληλου λογισμικού ρυθμίστηκε η τιμή του ρεύματος που διέρρεε το πηνίο, καθώς και η συχνότητα του παραγόμενου πεδίου.

3. Διαδικασία Υπολογισμού των Στατιστικών Επίδοσης (z-scores)

Το πρώτο στάδιο της στατιστικής επεξεργασίας των αποτελεσμάτων είναι ο καθορισμός της εκτιμήτριας τιμής $\hat{m}$ και της τυπικής απόκλισης $\hat{\sigma}$, που αποτελούν ουσιαστικά τις καλύτερες διαθέσιμες εκτιμήσεις για την πραγματική τιμή του

μετρούμενου μεγέθους και τη διασπορά των μετρήσεων των εργαστηρίων, αντίστοιχα. Σε κάθε επιμέρους επίπεδο δοκιμής οι εκτιμήτριες προσδιορίζονται - συναρτήσει των μετρήσεων των εργαστηρίων - με χρήση του επαναληπτικού αλγορίθμου A που περιγράφεται στο πρότυπο ISO 13528:2005 (Annex C Algorithm A) και ο οποίος παράγει ανθεκτικές τιμές (robust values) της μέσης τιμής ($x*$) και της τυπικής απόκλισης ($s*$) των δεδομένων στα οποία εφαρμόζεται. Σε κάθε επίπεδο δοκιμής υπολογίζεται για κάθε εργαστήριο ο δείκτης επίδοσης z-score (ISO 13528,2005, ISO/IEC 17043,2010):

$$z = \frac{x - \hat{m}}{\hat{\sigma}} = \frac{x - x^*}{s^*} \tag{1}$$

Η ερμηνεία των z-scores στηρίζεται στους εξής κανόνες:

- Όταν $|z| \leq 2$, η επίδοση του εργαστηρίου κρίνεται ικανοποιητική.
- Όταν $2 < |z| < 3$, η ορθότητα της μέτρησης κρίνεται αμφισβητήσιμη και ο δείκτης επίδοσης αποτελεί «προειδοποιητικό σήμα» (warning signal).
- Όταν $|z| \geq 3$, η επίδοση του εργαστηρίου κρίνεται μη ικανοποιητική και ο δείκτης επίδοσης αποτελεί «σήμα δράσης» (action signal).

Αναφορικά με τη μέτρηση της συχνότητας, οι περισσότεροι συμμετέχοντες κατέγραψαν την ίδια τιμή με αποτέλεσμα στην αρχική επανάληψη του robust αλγορίθμου η τυπική απόκλιση να είναι μηδέν. Προκειμένου να καταστεί δυνατός ο υπολογισμός των z-scores και λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή της συχνότητας ήταν γνωστή και ίση με $f = 321\ \text{Hz} \pm 0{,}3\%$ (από το πιστοποιητικό διακρίβωσης της AC πηγής για k=2, 95,45% διάστημα εμπιστοσύνης), οι αποδεκτές τιμές μέτρησης τέθηκαν από τον οργανωτή στο εύρος τιμών από 320Hz μέχρι 322Hz. Έτσι ως ανθεκτική τυπική απόκλιση ορίστηκε:

$$s_f{}^* = \frac{322-320}{\sqrt{2}} = 1{,}414 \tag{2}$$

4. Αποτελέσματα

4.1. z-scores

Εφόσον στο περιβάλλον διεξαγωγής των μετρήσεων δεν υπάρχουν άλλες φασματικές συνιστώσες πέραν της βασικής συχνότητας του εκάστοτε σταδίου μέτρησης (της βιομηχανικής συχνότητας των 50 Hz για τα πρώτα δύο στάδια και των 321 Hz στο τρίτο στάδιο), οι μετρήσεις οι οποίες λαμβάνονται σε όλο το εύρος ζώνης των οργάνων ταυτίζονται πρακτικά με τις αντίστοιχες μετρήσεις μόνο στην κυρίαρχη αρμονική συνιστώσα. Έτσι οι συμμετέχοντες πραγματοποίησαν τις μετρήσεις επιλέγοντας έναν μόνο από τους δύο τρόπους μέτρησης (ευρυζωνικό ή συχνοεπιλεκτικό).

Κάθε εργαστήριο κλήθηκε να παραδώσει τις μετρούμενες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου που παράγεται από τη γραμμή μεταφοράς σε κάθε θέση (E_1, E_2 και E_3) και τις αντίστοιχες διευρυμένες αβεβαιότητες (UE_1, UE_2 και UE_3), (συντελεστής κάλυψης k=2, επίπεδο εμπιστοσύνης 95,45%). Αυτές οι τιμές για το πρώτο στάδιο μέτρησης παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

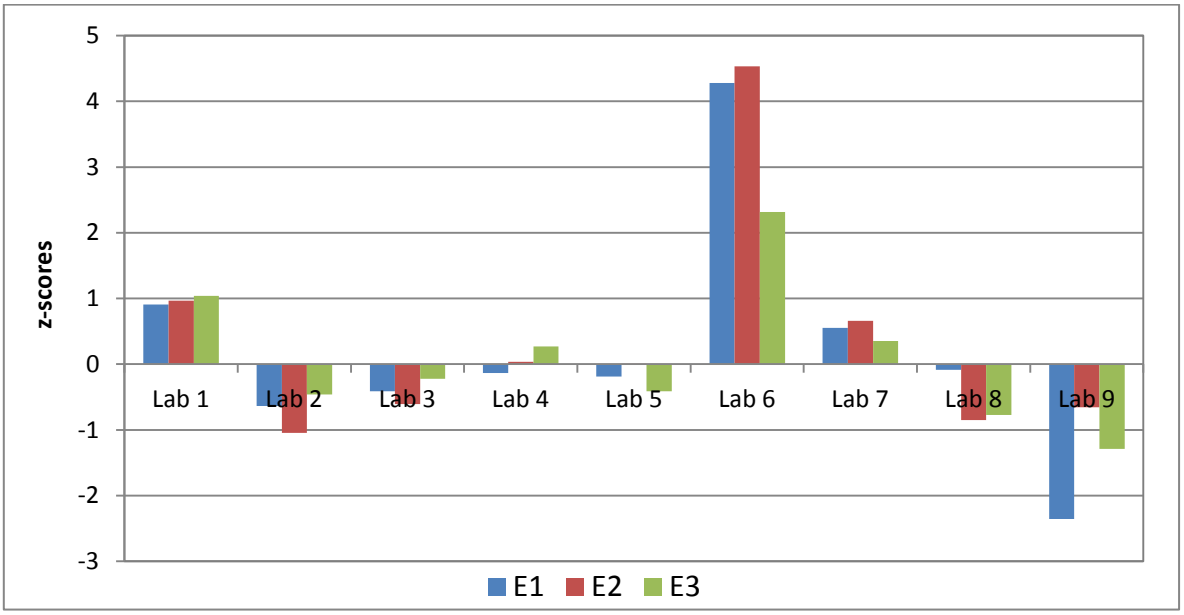
Πίνακας 2: Μετρήσεις της Έντασης του Ηλεκτρικού Πεδίου (Ε)

Εργαστήριο	Θέση 1		Θέση 2		Θέση 3	
	E_1 [kV/m]	UE_1 [%]	E_2 [V/m]	UE_2 [%]	E_3 [V/m]	UE_3 [%]
1	3,575	1	840,2	1	162,8	1
2	3,406	5	800,0	5	154,4	5
3	3,410	6,3	808,8	6,3	155,8	6,3
4	3,445	4,5	821,6	4,5	158,5	4,5
5	3,438	11,33	820,9	6,86	154,7	8,27
6	3,996	3	911,4	3	170,0	3
7	3,530	2,994	834,0	2,998	159,0	3,145
8	3,451	8	803,9	8	152,7	8
9	3,167	4,5	807,8	4,5	149,8	4,5
Παράμετροι						
μ	3,491		827,6		157,5	
σ	0,220		34,2		6,0	

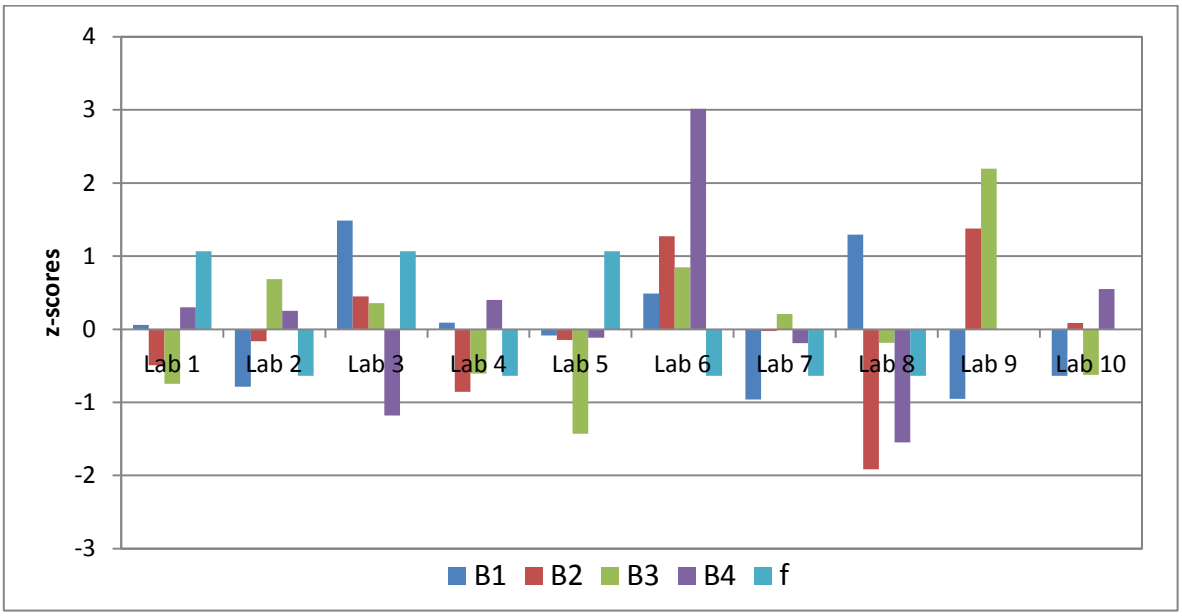
Οι μετρούμενες τιμές της μαγνητικής επαγωγής από κάθε εργαστήριο για το δεύτερο και το τρίτο στάδιο μέτρησης (B_1, B_2, B_3, B_4 και f_4) μαζί με τις διευρυμένες αβεβαιότητές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Σε κάθε σενάριο μέτρησης παρουσιάζονται επίσης η μέση τιμή των αποτελεσμάτων (μ) και η τυπική τους απόκλιση (σ) (Πίνακες 2 και 3). Σε κάθε στάδιο του σχήματος (μέτρηση Ε ή Β) τα z-scores των εργαστηρίων υπολογίζονται για όλες τις θέσεις μέτρησης. Στα Διαγράμματα 1 και 2 που ακολουθούν παρατίθενται τα z-scores όλων των συμμετεχόντων για τις μετρήσεις του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα.

Πίνακας 3: Μετρήσεις της Μαγνητικής Επαγωγής (Β) και της συχνότητας (f)

	Θέση 1		Θέση 2		Θέση 3		Θέση 4			
Εργαστήριο	B_1 [μT]	UB_1 [%]	B_2 [μT]	UB_2 [%]	B_3 [nT]	UB_3 [%]	B_4 [μT]	UB_4 [%]	f_4 [Hz]	Uf_4 [%]
1	58,695	0,60	14,662	0,60	911,6	0,60	2,300	0,60	322	0,311
2	56,198	5	14,818	5	1031,0	5	2,302	5	321	0,4
3	63,113	5,17	15,029	5,17	1001,9	5,17	2,240	5,17	322	1
4	58,800	6,0	14,520	6,0	923,0	6,0	2,304	7,0	321	3,5
5	58,260	8,18	14,796	6,38	856,0	6,68	2,280	5,94	322	2,16
6	60,033	3	15,350	3	1042,0	3,0000	2,410	3	321	0,312
7	55,539	3,636	14,844	2,721	989,6	4,082	2,280	3,07	321	0,623
8	62,517	5,5	14,108	5,5	957,4	5,5	2,225	5,5	321	0,312
9	55,576	3	15,390	3	1152,2	3	-	-	-	-
10	56,549	5	14,887	5	921,6	5	2,310	5	-	-
Παράμετροι										
μ	58,528		14,840		978,6		2,295		321,4	
σ	2,715		0,376		84,3		0,052		0,518	



Διάγραμμα 1: z-scores για τις μετρήσεις της Έντασης του Ηλεκτρικού πεδίου (E)



Διάγραμμα 2: z-scores για τις μετρήσεις της Μαγνητικής Επαγωγής (B) και της συχνότητας (f)

Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι συμμετέχοντες με τη βοήθεια ψηφιακού βολτομέτρου και αμπεροτσιμπίδας, κατέγραφαν, επίσης, την τιμή της τάσης και του ρεύματος κατά τη διάρκεια των μετρήσεων του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου, αντίστοιχα και, συνεπώς, οι τιμές που παρέδωσαν αναφέρονται στις εκάστοτε μετρούμενες τιμές τάσης και ρεύματος. Προκειμένου η σύγκριση να πραγματοποιηθεί σε κοινή βάση για όλους τους συμμετέχοντες και να εξαλειφθεί πλήρως ο παράγοντας της αστάθειας του μετρούμενου πεδίου, έγινε αναγωγή των μετρήσεων σε τάση πρωτεύοντος 66 V και ρεύμα 515 A, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εξαρτήσεις του ηλεκτρικού πεδίου από την τάση και του μαγνητικού πεδίου από το ρεύμα, αντιστοίχως, είναι γραμμικές. Οι τιμές των

παραπάνω Πινάκων 2 και 3, που χρησιμοποιούνται και για τον υπολογισμό των z-scores, είναι οι μετρήσεις κατόπιν αναγωγής.

4.2. Βαθμοί E_n

Προκειμένου να συνεκτιμηθεί στην αξιολόγηση των συμμετεχόντων η επίδραση των αβεβαιοτήτων που παρέδωσαν από κοινού με τις μετρήσεις, απαιτείται η χρήση δεικτών επίδοσης που ενσωματώνουν τις αβεβαιότητες - είτε τυπικές είτε διευρυμένες - της εκάστοτε μέτρησης και της εκτιμήτριας τιμής. Η επιλογή και η ερμηνεία των εν λόγω δεικτών θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, σύμφωνα με το ISO 13528, ώστε να μην εισάγεται μια συστηματική συσχέτιση μεταξύ μετρήσεων και εκτιμητριών που αλλοιώνει την προκύπτουσα βαθμολογία των εργαστηρίων. Ως εκ τούτου, οι περισσότεροι από αυτούς τους δείκτες προτείνονται μόνο σε ΣΔΙ, όπου η εκτιμήτρια τιμή προκύπτει ως τιμή αναφοράς και όχι ως εκτίμηση από τις μετρήσεις των συμμετεχόντων.

Έτσι, στον παρόντα κύκλο του ΣΔΙ μόνο για το τρίτο στάδιο μέτρησης, στο κέντρο του τετραγωνικού πηνίου έγινε εφαρμογή των βαθμών E_n. Οι τιμές αναφοράς προκύπτουν από τις ρυθμίσεις που τέθηκαν στην πηγή εναλλασσόμενης τάσης για την εκπεμπόμενη συχνότητα f και για την τιμή του ρεύματος I που διαρρέει το πηνίο και επακόλουθα του μαγνητικού πεδίου B_4 στο κέντρο του τετραγωνικού βρόχου.

Σύμφωνα, με το πιστοποιητικό διακρίβωσης της πηγής εναλλασσόμενης τάσης η μαγνητική επαγωγή (B) στο κέντρο του πηνίου δίνεται από την εξίσωση:

$$B = \mu_0 \cdot \text{coil factor} \cdot I \tag{3}$$

όπου: I είναι το συνολικό ρεύμα που διαρρέει το πηνίο

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$

$\text{coil factor} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi l} \cdot \text{reduction factor}$, μια σταθερά που ενσωματώνει τη γεωμετρία του πηνίου ($l = 1m$ είναι η πλευρά του τετραγωνικού πηνίου), καθώς και τις απώλειες του πηνίου που εκφράζονται από τον αντίστοιχο συντελεστή απωλειών (γνωστό υπό τον αγγλικό όρο reduction factor)

Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων το πηνίο τροφοδοτήθηκε με μια σταθερή τιμή ρεύματος $I = 2A \pm 0{,}2\%$ (95% διάστημα εμπιστοσύνης). Με συντελεστή coil factor=0.84 (λαμβάνεται από το πιστοποιητικό διακρίβωσης της πηγής εναλλασσόμενης τάσης) η προκύπτουσα μαγνητική επαγωγή στο κέντρο του πηνίου είναι $B = 2.230\mu T \pm 0{,}2\%$. Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι καταγεγραμμένες τιμές, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3, είναι παραπλήσιες με την παραπάνω θεωρητικά αναμενόμενη τιμή, με τις όποιες μικρές αποκλίσεις να αποδίδονται σε μικρές μετατοπίσεις του οργάνου μέτρησης από το κέντρο του πηνίου και στην αβεβαιότητα του παραγόμενου από την εναλλασσόμενη πηγή ρεύματος. Ο δείκτης E_n σύμφωνα με το πρότυπο ISO 13528 ορίζεται ως:

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \tag{4}$$

όπου: U_{lab} η διευρυμένη αβεβαιότητα τους μέτρησης x του εργαστηρίου

U_{ref} η διευρυμένη αβεβαιότητα της εκτιμήτριας X που προσδιορίζεται ως τιμή αναφοράς (π.χ. σε ένα εργαστήριο αναφοράς).

Η επίδοση ενός εργαστηρίου με βάση το δείκτη E_n κρίνεται ικανοποιητική, όταν ο δείκτης είναι απολύτως μικρότερος της μονάδας ($|E_n|\leq 1$). Επιπλέον, όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι ο δείκτης, τόσο πιο ικανοποιητική είναι η επίδοση. Συγκεντρωτικά οι εκτιμήτριες τιμές αναφοράς με τις διευρυμένες αβεβαιότητές τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4 και οι αντίστοιχοι βαθμοί E_n των συμμετεχόντων παρατίθενται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 4: Τιμές αναφοράς για τον υπολογισμό των E_n στο τρίτο στάδιο του ΣΔΙ

Μέγεθος	**Τιμή αναφοράς**	**Διευρυμένη αβεβαιότητα (k=2)**
Συχνότητα f	321 Hz	1 Hz (0,3%)
Μαγνητική επαγωγή B	2,230 μT	0,00446 μT (0,2%)

Πίνακας 5: Δείκτες E_n για τις μετρήσεις της Μαγνητικής Επαγωγής (B) και της συχνότητας f (θέση 4)

Εργαστήριο	**E_n (Θέση 4)**	
	B_4	**f_4**
1	4,827	0,707
2	0,625	0,000
3	0,086	0,297
4	0,459	0,000
5	0,391	0,142
6	2,485	0,000
7	0,713	0,000
8	-0,041	0,000
10	0,692	-

5. Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν η περιγραφή της οργάνωσης και της εκτέλεσης του τρίτου κύκλου ενός σχήματος διεργαστηριακών μετρήσεων ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου χαμηλών συχνοτήτων και η συνολική αποτίμηση της λειτουργίας του. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τις πιθανές πηγές σφάλματος εντός των εργαστηρίων που οδηγούν σε μη ικανοποιητικές επιδόσεις

5.1 Παράγοντες μη ικανοποιητικής επίδοσης

Στον παρόντα κύκλο του σχήματος, όπως και στους προηγούμενους, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στη διατήρηση της σταθερότητας των προς μέτρηση πεδίων. Αυτό κατέστη δυνατό για καθεμία από τις τρεις φάσεις μέτρησης, με τη χρήση ενός σταθεροποιητή τάσης σε συνδυασμό με ένα ψηφιακό βολτόμετρο για τη διαρκή παρακολούθηση της τάσης, μιας αμπεροτσιμπίδας για τη συνεχή καταγραφή της έντασης του ρεύματος και κατάλληλου λογισμικού για την αυτόματη προσαρμογή του ρεύματος του πηνίου, αντίστοιχα. Επιπλέον, η πλήρης συγκρισιμότητα των τιμών που κατέγραψαν οι συμμετέχοντες στα δύο πρώτα στάδια εξασφαλίζεται με την εν συνεχεία αναγωγή των μετρήσεων σε μια κοινή τιμή τάσης (66 V στο πρωτεύον του Μ/Σ) και ρεύματος (515 A), προκειμένου να εξαλειφθούν οι αποκλίσεις λόγω της πιθανής μεταβολής του εκπεμπόμενου πεδίου.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα των Διαγραμμάτων 1 και 2 προκύπτουν οι εξής βασικές παρατηρήσεις ως προς πιθανές αιτίες σφάλματος που σχετίζονται με μη ικανοποιητικές επιδόσεις:

- Σε γενικές γραμμές στον παρόντα κύκλο είναι λιγότερα τόσο τα «προειδοποιητικά σήματα» όσο και τα «σήματα δράσης», γεγονός που συνδέεται αφενός με την εμπειρία που έχει αποκτηθεί από προηγούμενους κύκλους του σχήματος, η οποία μπορεί να συμβάλει στην αποφυγή λαθών και αφετέρου με τη μείωση στον αριθμό των συμμετεχόντων.
- Σε αντίθεση με τους προηγούμενους κύκλους, όπου ήταν εμφανής η βελτιωμένη επίδοση των συμμετεχόντων στη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε σύγκριση με το ηλεκτρικό πεδίο, στον παρόντα κύκλο οι μη ικανοποιητικές επιδόσεις είναι περίπου ισομοιρασμένες, ενώ υπήρξε επίδοση $|z| \geq 3$ κατά τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου.
- Όλα τα εργαστήρια είχαν ικανοποιητική επίδοση στη μέτρηση της συχνότητας στη θέση B_4. Ωστόσο υπήρξε μια μη ικανοποιητική επίδοση στην καταγραφή του πεδίου στη θέση B_4 για το Εργ. 6, παρά τη σταθερότητα του πεδίου στη συγκεκριμένη διάταξη. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα δύο «σήματα δράσης» και το ένα «προειδοποιητικό σήμα» του Εργ. 6 κατά τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου, στην έλλειψη διακρίβωσης, η οποία μεταξύ άλλων μπορεί να αποδοθεί στην έλλειψη διαπίστευσης του εργαστηρίου, ή στις μη κατάλληλες ρυθμίσεις του χρησιμοποιούμενου οργάνου.
- Όσον αφορά στο Εργ. 9, το «προειδοποιητικό σήμα» που έχει λάβει κατά τη μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου οφείλεται στο συστηματικό λάθος (bias) που εισάγει ο συγκεκριμένος μετρητικός εξοπλισμός, καθώς για τη χρήση του είναι απαραίτητη η κοντινή παρουσία του χειριστή, η οποία έχει ως αποτέλεσμα την αλλοίωση του ηλεκτρικού πεδίου. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι, στον προηγούμενο κύκλο το συγκεκριμένο όργανο είχε αξιολογηθεί αρνητικά σε όλες τις θέσεις μέτρησης του ηλεκτρικού πεδίου και μάλιστα με αυξανόμενο z στις πιο απομακρυσμένες θέσεις μέτρησης - συμπεριφορά που είναι αναμενόμενη, διότι, όπου είναι ασθενέστερο το πεδίο, το σφάλμα που εισάγεται από την παρουσία του χειριστή είναι ποσοστιαία μεγαλύτερο. Σε αυτόν τον κύκλο εμφανίζεται βελτιωμένη η επίδοση του συγκεκριμένου οργάνου στην καταγραφή του ηλεκτρικού πεδίου, με μόνο ένα «προειδοποιητικό σήμα», ωστόσο αυτό εμφανίζεται στην πλησιέστερη θέση μέτρησης E_1. Ενδεχομένως αυτό να είναι ενδεικτικό προβλήματος σε συγκεκριμένη κλίμακα μέτρησης και να συνδέεται επιπλέον με ελλιπή διακρίβωση του οργάνου. Τον προβληματισμό για την καταλληλότητα του συγκεκριμένου εξοπλισμού συμπληρώνει η εμφάνιση ενός «προειδοποιητικού σήματος» κατά τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου, κάτι το οποίο δεν είχε προκύψει στον προηγούμενο κύκλο. Επίσης, επιβεβαιώνεται η χρησιμότητα της διαπίστευσης των εργαστηρίων, δεδομένου ότι το εργαστήριο αυτό δεν διαθέτει διαπίστευση.
- Από την αξιολόγηση των E_n προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα: όπως και στα z-scores, κατά τη μέτρηση της συχνότητας f όλα τα εργαστήρια είχαν ικανοποιητική επίδοση και μάλιστα οι περισσότεροι έλαβαν E_n=0, διότι εντόπισαν ακριβώς την τιμή αναφοράς των 321 Hz. Από τους υπόλοιπους που κατέγραψαν 322 Hz, το Εργ. 1 έλαβε το μεγαλύτερο βαθμό E_n, καθώς έδωσε τη μικρότερη τιμή αβεβαιότητας (0,311%), συγκρίσιμη με την αβεβαιότητα αναφοράς της πηγής εναλλασσόμενης τάσης (0,3%). Συνεπώς, σε μετρήσεις που απαιτούν μεγάλη ακρίβεια, απόκλιση από την τιμή αναφοράς σε συνδυασμό με πολύ μικρή αβεβαιότητα μέτρησης, όπως είναι αναμενόμενο, φέρνει το δείκτη E_n πλησιέστερα στη μονάδα. Στη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου B_4 επιβεβαιώνεται με το δείκτη E_n η μη ικανοποιητική επίδοση του

Εργ.6 όπως και με τα z-scores, η οποία είναι αποτέλεσμα της αποκλίνουσας μέτρησης και όχι εσφαλμένης αβεβαιότητας. Αντιθέτως, στην περίπτωση του Εργ.1, η μέτρηση του οποίου έχει βαθμολογηθεί θετικά με $|z|<2$, η μη ικανοποιητική τιμή $|E_n|>1$ οφείλεται στην πολύ μικρή αβεβαιότητα της μέτρησης. Γίνεται επομένως φανερό ότι με τη συνδυασμένη ερμηνεία των z-scores με τα E_n είναι εφικτό να εξακριβωθεί κατά πόσο είναι μειωμένη η ακρίβεια της ίδιας της μέτρησης ή της αβεβαιότητας που τη συνοδεύει.

5.2 Σύγκριση μεταξύ κύκλων του ΣΔΙ

Οι 8 από τις 10 ομάδες του παρόντος κύκλου είχαν λάβει μέρος και στον προηγούμενο κύκλο το 2013 (μόνο το Εργ.2 και το Εργ.10 δεν πήραν μέρος στον προηγούμενο κύκλο). Οι αλλαγές στη διαδικασία του παρόντος κύκλου συνίστανται σε πολύ μικρές μεταβολές σε ορισμένες θέσεις μέτρησης και επίπεδα παραγόμενου πεδίου, όπως είναι αυτονόητο, ώστε να μην είναι εκ των προτέρων γνωστά στους συμμετέχοντες τα μετρούμενα μεγέθη, διατηρώντας ωστόσο τις ίδιες τάξεις μεγέθους και κλίμακες μέτρησης. Εφόσον, ουσιαστικά, η δομή του σχήματος διατηρήθηκε ακριβώς ίδια με τον προηγούμενο κύκλο, μπορεί να γίνει μια άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις ομάδες που ήταν παρούσες και στους δύο κύκλους, προκειμένου να διερευνηθεί η εξέλιξη της επίδοσής τους. Η πλήρης απόδοση του όρου «ομάδα μέτρησης» είναι ο συνδυασμός χειριστή και οργάνου. Επειδή δεν είναι πάντα εφικτή η συμμετοχή ενός εργαστηριακού φορέα στο ΣΔΙ όχι μόνο με το ίδιο όργανο, αλλά και με τον ίδιο χειριστή, στη σύγκριση που παρουσιάζεται ακολούθως θεωρήθηκε ως μόνο προαπαιτούμενο να μην έχει αλλάξει ο μετρητικός εξοπλισμός. Στην περίπτωση αυτή, τα συμπεράσματα που προκύπτουν σχετίζονται αποκλειστικά με τα όργανα μέτρησης.

Λόγω του μικρού πλήθους των επιπέδων δοκιμής στα οποία αξιολογήθηκαν οι συμμετέχοντες (8 μετρήσεις), για τη σύγκριση μεταξύ κύκλων δεν κρίνεται σκόπιμη η χρήση ενός συνδυαστικού δείκτη επίδοσης, αλλά η απλή σύγκριση του πλήθους των μετρήσεων στις οποίες βαθμολογήθηκαν με $|z| > 2$. Τα Εργ. 2, 3, 4, 5, 7 και 8 (με κωδική ονομασία στον προηγούμενο κύκλο Εργ. 4, 3, 8, 10, 2 και 14 αντίστοιχα) διατήρησαν την ικανοποιητική τους επίδοση, καθώς τόσο στον παρόντα όσο και στον προηγούμενο κύκλο δεν παρουσίασαν καμία μέτρηση με $|z| > 2$. Αντιστοίχως, η επίδοση του Εργ. 9, η οποία οφείλεται σε ακαταλληλότητα του οργάνου μέτρησης, παρέμεινε στον τρίτο κύκλο μη ικανοποιητική με δύο $|z| > 2$, όπως και στο δεύτερο κύκλο του ΣΔΙ (τρία $|z| > 2$ με κωδικό Εργ.12). Αναδεικνύεται, έτσι, η αποτελεσματικότητα και η συνέπεια των διεργαστηριακών μετρήσεων στον εντοπισμό εσφαλμένων μεθόδων μέτρησης, που είναι εκ των προτέρων αναμενόμενο ότι θα οδηγήσουν σε μετρήσεις μειωμένης ακρίβειας. Τέλος, τυπική περίπτωση όπου η συμμετοχή σε ΣΔΙ δείχνει να έχει συμβάλει στη βελτίωση της επίδοσης του εργαστηρίου αποτελεί το Εργ. 1 (στον προηγούμενο κύκλο Εργ. 7), το οποίο το 2013 είχε λάβει δύο $|z| > 2$, ενώ τώρα κανένα.

Προβληματικές μέθοδοι μέτρησης και ελλιπής διακρίβωση, είτε σε νέα, είτε σε παλαιότερα όργανα, αναδείχθηκαν και σε αυτό τον κύκλο ως παράγοντες που υποβαθμίζουν την ακρίβεια μιας μέτρησης αποδεικνύοντας και πάλι την ικανοποιητική λειτουργία του ΣΔΙ. Το ποσοστό των συμμετεχόντων που εμφάνισαν $|z| > 2$ (3 στις 10 ομάδες μέτρησης) παρέμεινε περίπου το ένα τρίτο του συνόλου, όπως και στον προηγούμενο κύκλο (5 στις 16 ομάδες μέτρησης). Έτσι, ενισχύεται η αναγκαιότητα συνεχούς παρακολούθησης της τεχνικής επάρκειας των εμπλεκομένων εργαστηρίων στον

εν λόγω τομέα μετρήσεων, μέσα από τη διεξαγωγή διεργαστηριακών συγκριτικών μετρήσεων.

6. Βιβλιογραφία

ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025:2005, «Γενικές απαιτήσεις για την ικανότητα των εργαστηρίων δοκιμών και διακριβώσεων».

ΕΛΟΤ IEC 61786-1: 2014, «Μετρήσεις DC μαγνητικών πεδίων, AC μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων από 1 Hz μέχρι 100 kHz σε σχέση με την έκθεση των ανθρώπων - Μέρος 1: Απαιτήσεις για όργανα μετρήσεων»

ΕΣΥΔ ΠΔΙ/02/00/02-09-2011, "*Πολιτική του Ε.ΣΥ.Δ. σχετική με τη συμμετοχή των εργαστηρίων σε προγράμματα δοκιμών ικανότητας και σε διεργαστηριακές συγκριτικές δοκιμές*" (http://www.esyd.gr/pweb/s/20/files/EN/kanonismoi/PDI_27_1_11.pdf)

Ζτούπης Ι.Ν, Νικολοπούλου Ε.Π., Καραμπέτσος Ε., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α.: *«Διεργαστηριακές μετρήσεις σε χαμηλόσυχνα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία»*, Σύνοδος Ε.Ε. CIGRE, Αθήνα, 12-13 Δεκεμβρίου 2013, Ενότητα ΣΤ: Ανάλυση Μετρήσεων: ΣΤ4.

Χριστοδούλου Χ.Α., Κατσιβέλης Π.Σ., Γκόνος Ι.Φ., Σταθόπουλος Ι.Α: "*Συγκριτικές μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικού πεδίου χαμηλών συχνοτήτων*", 3° Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας, Λάρνακα 5-6 Φεβρουαρίου 2010.

ICNIRP Guidelines, International Committee for Non-Ionizing Radiation Protection, "*Guidelines for limiting exposure to time varying electric and magnetic fields (1 Hz-100 kHz)*", Health Physics, 99(6):818-836, 2010

IEC 61786-2: 2014, «Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings. - Part 2: Basic standard for measurements»

IEC 62110:2009, "*Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure - Ed. 1.0*"

IEEE 644-1994 (Revision of IEEE 644-1987), "*IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*"

ILAC G13:08/2007, "*Guidelines for the requirements for the competence of providers of proficiency testing schemes*"

ILAC-P9:11/2010, "*ILAC Policy for Participation in National and International Proficiency Testing Activities*"

ISO 13528: 2005, "*Statistical Methods for Use in Proficiency Testing by Interlaboratory Comparisons*"

ISO/IEC 17043:2010, "*Conformity assessment-General requirements for proficiency testing*"

Nicolopoulou E.P., Gonos I.F., Stathopulos I.A., Karabetsos E., "*Two Interlaboratory comparison Programs on EMF Measurements Performed in Greece*", IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 1, (2), pp. 50-59, 2012.

Ztoupis I.N., Nicolopoulou E.P., Gonos I.F., Stathopulos I.A., Karabetsos E., *"An interlaboratory comparison program on ELF electric and magnetic fields measurements performed in Greece: Second round of the scheme"*, Bioelectromagnetics, 7, p.p. 544-550, 2015.