

ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗΣ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΩΝ: ΔΙΑΚΡΙΒΩΣΗ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΛΕΥΚΟΧΡΥΣΟΥ ΑΠΟ -20°C έως 160 °C.

Μ. Αναγνώστου¹, Ε. Κοκκίνη¹, Ε. Γαλανόπουλος², Α. Κουγιουμτζίδης³, Ε. Μαθιουλάκης⁴, Α. Μανάρας⁵, Π. Πυλαρινός⁶, Γ. Τζορμπατζόγλου⁷, Θ. Τσιρόπουλος⁸, Θ. Χειλάς⁹

1.Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας, 2. Τεχνολογίες Εντολής Ελέγχου Επικοινωνιών (C3T), 3. CQS-Υπηρεσίες Διακριβώσεων & Ποιότητας Α.Ε., 4.ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος» Εργαστήριο Ηλιακών & Ενεργειακών Συστημάτων, 5.Algosystems S.A., 6. Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία, Τμήμα Μετρολογίας, 7. Μετρολογία Ελλάς Α.Ε., 8.Intracom, 9. Link Lab ΕΠΕ, Εργαστήριο Διακριβώσεων

Στις αρχές του 2006, διοργανώθηκε από το Ε.Ι.Μ., για πρώτη φορά, διεργαστηριακή σύγκριση μεταξύ ελληνικών εργαστηρίων, που πραγματοποιούν διακριβώσεις θερμοκρασίας. Το αντικείμενο της διεργαστηριακής ήταν η συγκριτική διακριβωση ενός αισθητήρα αντίστασης λευκόχρυσου στο εύρος -20°C έως 160 °C.

Στη διεργαστηριακή σύγκριση συμμετείχαν συνολικά 8 εργαστήρια, με πιλοτικό εργαστήριο, το εργαστήριο θερμοκρασίας του Ε.Ι.Μ., το οποίο διέθεσε και τον αισθητήρα προς διακριβωση.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διεργαστηριακής αυτής σύγκρισης.

Λέξεις-Κλειδιά: θερμοκρασία, διακριβωση, αισθητήρας αντίστασης λευκόχρυσου, διεργαστηριακή σύγκριση.

1. Εισαγωγή

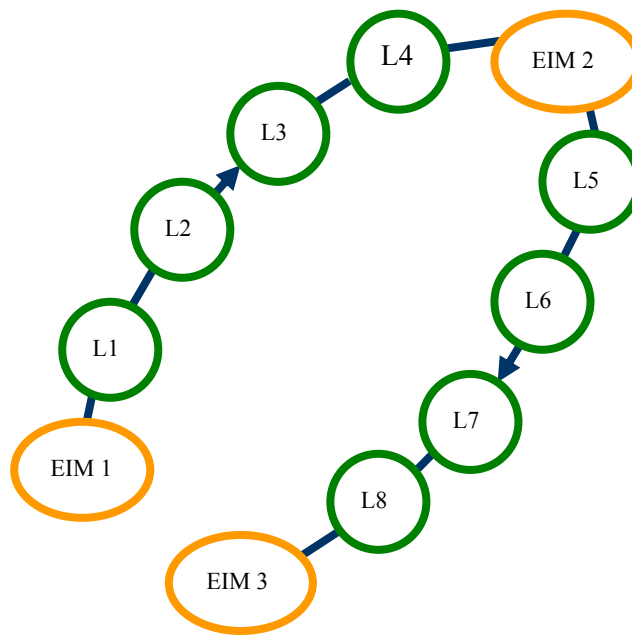
Η διεργαστηριακή σύγκριση διοργανώθηκε από το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (ΕΙΜ) με βασικό κίνητρο την αξιολόγηση της ικανότητας μέτρησης των εργαστηρίων που δραστηριοποιούνται στην χώρα μας και την υποστήριξη με τον τρόπο αυτό του εθνικού συστήματος διαπίστευσης εργαστηρίων.

Πιλοτικό εργαστήριο ήταν το εργαστήριο Θερμοκρασίας του ΕΙΜ το οποίο για τους σκοπούς της σύγκρισης διέθεσε ένα αισθητήρα θερμοκρασίας αντιστάσεως λευκόχρυσου (τύπου Isotech / 935-14-95), με ονομαστική τιμή 100 Ω στους 0 °C. Ο αισθητήρας διαθέτει μεταλλικό περίβλημα με διάμετρο 6mm και μήκος 450mm. Η μέτρηση της ηλεκτρικής του αντίστασης, γίνεται με την μέθοδο των τεσσάρων αγωγών με ρεύμα μέτρησης 1mA. Ο αριθμός σειράς του είναι: 18790-11.

Ο σκοπός της διεργαστηριακής είναι ο προσδιορισμός από κάθε εργαστήριο της ηλεκτρικής αντίστασης του αισθητήρα σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες αναφοράς: -20,-10, 2, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 °C και 0 °C.

Η μετρήσεις ήταν συγκριτικές σε θερμοστατούμενα λουτρά διακριβωσης ή φούρνους εφοδιασμένους με ισοθερμικά μπλοκ (dry block calibrators). Τα εργαστήρια που συμμετείχαν έπρεπε να διαθέτουν ένα (τουλάχιστον) διακριβωμένο θερμόμετρο αναφοράς, καθώς και τον κατάλληλο εξοπλισμό για την μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του αισθητήρα υπό διακριβωση. Ο αισθητήρας μπορούσε να διακριβωθεί σε όλο το προτεινόμενο εύρος ή σε τμήμα αυτού που περιείχε την θερμοκρασία 0 °C.

Το θερμόμετρο μεταφερόταν από το προηγούμενο εργαστήριο στο επόμενο «χέρι με χέρι», ούτως ώστε να μην υποστεί δονήσεις που ενδεχομένως θα άλλαζαν τα μετρολογικά χαρακτηριστικά του και θα έκαναν δύσκολη την σύγκριση των αποτελεσμάτων.



2. Πρόγραμμα σύγκρισης

Οι μετρήσεις άρχισαν στις 14/03/06 με μετρήσεις στο EIM (εργαστήριο EIM1), και συνεχίστηκαν από εργαστήριο σε εργαστήριο, όπως δείχνει το παραπάνω σχήμα. Στο EIM ο αισθητήρας διακριβώθηκε ακόμα δύο φορές, μία στην μέση της διεργασηριακής (εργαστήριο EIM2) και μία στο τέλος της (εργαστήριο EIM3). Με αυτό τον τρόπο ελέγχθηκε η σταθερότητα του καθ' όλη την διάρκεια της διεργασηριακής. Οι μετρήσεις τελείωσαν στις 18/01/07.

3. Συμμετέχοντα Εργαστήρια

Πιλοτικό εργαστήριο: Εργαστήριο θερμοκρασίας, Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (EIM)
Όνομα υπευθύνου: Δρ. Μ. Αναγνώστου, κα Ε. Κοκκίνη

Εργαστήριο L1: CQS, Υπηρεσίες Διακριβώσεων & Ποιότητας Α.Ε.

Όνομα υπευθύνου: Δρ. Α. Κουγιουμτζίδης

Εργαστήριο L2: Τεχνολογίες Εντολής Ελέγχου Επικοινωνιών (C3T)

Όνομα υπευθύνου: κ. Ε. Γαλανόπουλος & κα. Κ. Καραμπέτη

Εργαστήριο L3: ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ» Εργαστήριο Ηλιακών & Ενεργειακών

Συστημάτων, Όνομα υπευθύνου: Δρ. Ε. Μαθιουλάκης

Εργαστήριο L4: Μετρολογία Ελλάς Α.Ε., Όνομα υπεύθυνου: Δρ. Γ. Τζορμπατζόγλου

Εργαστήριο L5: Algosystems S.A., Όνομα υπευθύνου: κ. Α. Μανάρας

Εργαστήριο L6: Link Lab ΕΠΕ, Εργαστήριο Διακριβώσεων

Όνομα υπευθύνου: κ. Θ. Χειλάς

Εργαστήριο L7: Ελληνική Αεροπορική Βιομηχανία, Τμήμα Μετρολογίας,

Όνομα υπευθύνου: κ. Π. Πυλαρινός

Εργαστήριο L8: INTRACOM, Όνομα υπευθύνου: κ. Θ. Τσιρόπουλος

4. Διαδικασία μέτρησης

Η διαδικασία των μετρήσεων από κάθε εργαστήριο ήταν η ακόλουθη:

- 4.1. Μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης $R(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ του αισθητήρα στο σημείο των $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- 4.2. Θερμική ανόπτηση του αισθητήρα στους $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ για διάρκεια 4 περίπου ωρών.
- 4.3. Διακρίβωση του αισθητήρα στο σημείο των $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, προσδιορισμός του $R_{\alpha}(0\text{ }^{\circ}\text{C})$
- 4.4. Διακρίβωση του αισθητήρα σε θερμοκρασίες t_i : -20, -10, 2, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 $^{\circ}\text{C}$, προσδιορισμός των αντίστοιχων $R(t_i)$.
- 4.5. Τελική διακρίβωση του αισθητήρα στο σημείο των $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, προσδιορισμός του $R_{\tau}(0\text{ }^{\circ}\text{C})$

5. Επεξεργασία των μετρήσεων και αναφορά αποτελεσμάτων

Κάθε εργαστήριο έδωσε τα παρακάτω λεπτομερή στοιχεία από τις μετρήσεις του:

- $R_{\alpha}(0\text{ }^{\circ}\text{C})$
- $R(t_i)$ για κάθε θερμοκρασία t_i στην οποία έκανε μετρήσεις και
- $R_{\tau}(0\text{ }^{\circ}\text{C})$

Με μαθηματική προσαρμογή του λόγου $R(t_i) / R_{\mu}(0\text{ }^{\circ}\text{C})$ με την δευτεροβάθμια εξίσωση:

$$R(t) / R_{\mu}(0\text{ }^{\circ}\text{C}) = 1 + A.t + B.t^2 \text{ (Εξίσωση του Callendar)} \quad (1)$$

$$\text{Όπου } R_{\mu}(0\text{ }^{\circ}\text{C}) = [R_{\alpha}(0\text{ }^{\circ}\text{C}) + R_{\tau}(0\text{ }^{\circ}\text{C})] / 2$$

Προσδιορίστηκαν οι συντελεστές A και B του θερμομέτρου από το κάθε εργαστήριο. Από τις τιμές αυτές και την εξίσωση (1) τα εργαστήρια προσδιόρισαν το $R_{\text{calc}}(t_i)$

$$R_{\text{calc}}(t_i) = R_{\mu}(0\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot [1 + A.t_i + B.t_i^2] \quad (2)$$

Τέλος, επειδή οι πραγματικές θερμοκρασίες μέτρησης t_i , ήταν λίγο διαφορετικές από εργαστήριο σε εργαστήριο και για να γίνουν συγκρίσιμα τα αποτελέσματα, κάθε εργαστήριο υπολόγισε την αντίσταση του αισθητήρα $R_{\text{calc}}(t)$, χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2) για τις ονομαστικές τιμές θερμοκρασίας της συγκρίσεως (t): -20, -10, 2, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160 $^{\circ}\text{C}$.

6. Υπολογισμός της αβεβαιότητας των μετρήσεων κάθε εργαστηρίου

Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας που ανέφερε το κάθε εργαστήριο έγινε σύμφωνα με το πρότυπο «*Guide to the expression of uncertainty in measurement*»^[1] και περιέχει τους παρακάτω όρους:

6.1 Θερμοκρασία αναφοράς:

Κάθε θερμοκρασία αναφοράς t_i , εκφράζεται από την μαθηματική εξίσωση (3). Η αβεβαιότητα της θερμοκρασίας αναφοράς $u(t_i)$, υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των αβεβαιοτήτων που αντιστοιχούν στον κάθε όρο της εξίσωσης (3), υψωμένων στο τετράγωνο.

$$t_i = t_s + \delta t_{s-std-mean} + \delta t_{s-cal} + \delta t_{s-drift} + \delta_{s-immersion} + \delta t_{s-meter-cal} + \delta t_{s-meter-drift} + \delta t_{s-meter-resolution} + \delta t_{bath-homogeneity} + \delta t_{bath-stability} \quad (3)$$

t_s : μέση τιμή θερμοκρασίας του αισθητήρα αναφοράς

$\delta t_{s-std-mean}$: τυπική απόκλιση της μέσης τιμής των μετρήσεων του αισθητήρα αναφοράς

δt_{s-cal} : διόρθωση εξαιτίας της διακρίβωσης του αισθητήρα αναφοράς

$\delta t_{s-drift}$: διόρθωση εξαιτίας της ολίσθησης του αισθητήρα αναφοράς

$\delta t_{s-immersion}$: διόρθωση εξαιτίας της μη επαρκούς βύθισης του αισθητήρα αναφοράς αλλά και της επίδρασης της ροής θερμότητας κατά μήκους του στελέχους του αισθητήρα στην θερμοκρασία αναφοράς (η αβεβαιότητα της διόρθωσης αυτής εκτιμάται με ανύψωση του αισθητήρα κατά 20mm από την θέση που βρίσκεται στο λουτρό και ταυτόχρονη καταγραφή της αλλαγής Δt της θερμοκρασίας αναφοράς: $u(\delta t_{s-immersion}) = \Delta t / \sqrt{3}$)

$\delta t_{s-meter-cal}$: διόρθωση εξαιτίας της διακρίβωσης της μετρητικής διάταξης του αισθητήρα αναφοράς

$\delta t_{s-meter-drift}$: διόρθωση εξαιτίας της ολίσθησης της μετρητικής διάταξης του αισθητήρα αναφοράς

$\delta t_{s-meter-resolution}$: διόρθωση εξαιτίας της διακριτικής ικανότητας της μετρητικής διάταξης του αισθητήρα αναφοράς

$\delta t_{bath-homogeneity}$: διόρθωση εξαιτίας της ομοιογένειας της θερμοκρασίας στον χώρο του λουτρού (για απόσταση τουλάχιστον όση η απόσταση αισθητήρα αναφοράς – αισθητήρα υπό διακρίβωση)

$\delta t_{bath-stability}$: διόρθωση εξαιτίας της χρονικής σταθερότητας της θερμοκρασίας του λουτρού (για 20min τουλάχιστον)

6.2 Αντίσταση αισθητήρα υπό διακρίβωση:

Η ηλεκτρική αντίσταση $R(t_i)$ του αισθητήρα σε κάθε θερμοκρασία αναφοράς t_i , εκφράζεται για κάθε εργαστήριο από την μαθηματική εξίσωση (4). Η αβεβαιότητα της ηλεκτρικής αντίστασης $u(R(t_i))$, υπολογίζεται ως η τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των αβεβαιοτήτων που αντιστοιχούν στον κάθε όρο της εξίσωσης (4), υψωμένων στο τετράγωνο.

$$R(t_i) = R + \delta R_{std-mean} + \delta R_{immersion} + \delta R_{ohm-meter-cal} + \delta R_{ohm-meter-drift} + \delta R_{ohm-meter-resolution} + \delta R_{repeatability} \quad (4)$$

R : μέση τιμή αντίστασης του αισθητήρα υπό διακρίβωση στην κάθε θερμοκρασία t_i

$\delta R_{std-mean}$: τυπική απόκλιση μέσης τιμής των μετρήσεων του R

$\delta R_{immersion}$: διόρθωση εξαιτίας της μη επαρκούς βύθισης του αισθητήρα αλλά και της επίδρασης της ροής θερμότητας κατά μήκους του στελέχους του αισθητήρα στην τιμή της ηλεκτρικής του αντίστασης (η τυπική αβεβαιότητα της διόρθωσης αυτής, εκτιμάται με ανύψωση του αισθητήρα κατά 20mm από την θέση που βρίσκεται στο λουτρό και ταυτόχρονη καταγραφή της αλλαγής ΔR της τιμής της ηλεκτρικής του αντίστασης: $u[\delta R_{immersion}] = \Delta R / \sqrt{3}$)

$\delta R_{ohm-meter-cal}$: διόρθωση εξαιτίας της διακρίβωσης του ωμομέτρου

$\delta R_{ohm-meter-drift}$: διόρθωση εξαιτίας της ολίσθησης του ωμομέτρου

$\delta R_{ohm-meter-resolution}$: διόρθωση εξαιτίας της διακριτικής ικανότητας του ωμομέτρου

$\delta R_{repeatability}$: διόρθωση εξαιτίας της βραχυπρόθεσμης επαναληψιμότητας του αισθητήρα, εκτιμάται από την ολίσθηση του σημείου του πάγου του αισθητήρα πριν και μετά την διακρίβωση

6.3 Αβεβαιότητα της μαθηματικής προσαρμογής:

Η αβεβαιότητα της μαθηματικής προσαρμογής u_{fit} , εκτιμάται από την εξίσωση (5):

$$u_{fit} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [R(t_i) - R_{calc}(t_i)]^2}{N - 2}} \quad (5)$$

Όπου: $R(t_i)$, η ηλεκτρική αντίσταση του αισθητήρα που μέτρησε το εργαστήριο σε κάθε θερμοκρασία t_i , $R_{calc}(t_i)$ οι τιμές της ηλεκτρικής αντίστασης του αισθητήρα που υπολόγισε το κάθε εργαστήριο από την εξίσωση (2) με την χρήση των συντελεστών A και B για τις θερμοκρασίες μέτρησης t_i , και N ο αριθμός των διαφορετικών θερμοκρασιών t_i στις οποίες μέτρησε το εργαστήριο.

6.4 Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα

Η συνδυασμένη τυπική (1σ) αβεβαιότητα των μετρήσεων για κάθε ζεύγος τιμών $t_i, R(t_i)$ δίδεται από την εξίσωση:

$$u_{total,i} = \sqrt{\left(u(t_i) \cdot \frac{dR}{dt}\right)^2 + u^2(R(t_i))} \quad (6)$$

όπου: dR/dt είναι η ευαισθησία του θερμομέτρου σε Ω/K και t_i είναι η αντίστοιχη πραγματική θερμοκρασία αναφοράς στην οποία έγινε η μέτρηση αυτή.

Σε ένα σύνολο αξιόπιστων μετρήσεων, και με την προϋπόθεση ότι το θερμομέτρο της σύγκρισης είναι επαναλήψιμο όργανο με συμπεριφορά που περιγράφεται από την εξίσωση του Callendar, το u_{fit} πρέπει να είναι συγκρίσιμο με το $u_{total,i}$.

Η συνδυασμένη τυπική (1σ) αβεβαιότητα της τιμής της ηλεκτρικής αντίστασης του αισθητήρα $R_{calc}(t)$, που υπολογίζεται από την εξίσωση (2) με χρήση των A, B και $R_{\mu}(0 \text{ } ^\circ\text{C})$, για κάθε ονομαστική θερμοκρασία αναφοράς t, υπολογίστηκε από την εξίσωση:

$$u(R_{calc}(t)) = \sqrt{\left(u(t_i) \cdot \frac{dR}{dt}\right)^2 + u^2(R(t_i)) + u_{fit}^2} \quad (7)$$

Ειδικά για το σημείο του πάγου η τιμή της αντίστασης προκύπτει από μετρήσεις στο σημείο του πάγου στην αρχή των μετρήσεων του εργαστηρίου και στο τέλος τους, και άρα δεν υπάρχει ο όρος u_{fit} (ή $u_{fit}=0$ όπως φαίνεται στον πίνακα 1).

7. Αποτελέσματα μετρήσεων

Στον πίνακα 1. που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εργαστηρίων. Η σήμανση τους έχει αλλάξει από L1, L2, L3,... σε E1, E2, E3,... Αυτό έγινε για να διασφαλιστεί η εμπιστευτικότητα των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα εργαστηρίων

$t = -20^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	92.17761	0.00147	0.00053	0.00164	0.00156	0.00227	0.00237	0.00059	0.00153	0.19
E3	92.17463	0.02296	0.00152	0.00164	0.02301	0.02307	0.02308	-0.00238	0.02301	-0.05
E4	92.17635	0.01378	0.00400	0.00272	0.01435	0.01460	0.01462	-0.00066	0.01451	-0.02
EIM2	92.17550	0.00195	0.00050	0.00270	0.00201	0.00336	0.00344	-0.00151	0.00292	-0.26
E6	92.36882	0.01122	0.02306	0.36166	0.02565	0.36257	0.36257	0.19181	0.36256	0.26
E8	92.16005	0.01748	0.00607	0.05323	0.01850	0.05636	0.05636	-0.01696	0.05633	-0.15
EIM3	92.17885	0.00195	0.00046	0.00761	0.00200	0.00787	0.00790	0.00184	0.00769	0.12

$t = -10^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	96.10808	0.00148	0.00067	0.00164	0.00163	0.00231	0.00241	0.00045	0.00155	0.15
E2	96.09260	0.01739	0.01710	0.01746	0.02439	0.02999	0.03000	-0.01503	0.02994	-0.25
E3	96.10635	0.02287	0.00118	0.00164	0.02290	0.02296	0.02297	-0.00128	0.02289	-0.03
E4	96.10745	0.00981	0.00400	0.00272	0.01060	0.01094	0.01096	-0.00018	0.01080	-0.01
EIM2	96.10664	0.00182	0.00049	0.00270	0.00188	0.00329	0.00336	-0.00099	0.00280	-0.18
E6	96.18147	0.01119	0.00604	0.36166	0.01271	0.36188	0.36188	0.07384	0.36188	0.10
E8	96.08885	0.01746	0.00607	0.05323	0.01849	0.05635	0.05636	-0.01878	0.05633	-0.17
EIM3	96.10967	0.00180	0.00048	0.00761	0.00186	0.00783	0.00787	0.00205	0.00764	0.13

$t = +20^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	100.80924	0.00146	0.00053	0.00164	0.00156	0.00226	0.00237	0.00031	0.00165	0.09
E1	100.80790	0.00164	0.00510	0.00261	0.00536	0.00596	0.00600	-0.00111	0.00575	-0.10
E2	100.78890	0.02057	0.01780	0.01746	0.02720	0.03232	0.03233	-0.02011	0.03228	-0.31
E3	100.80888	0.02260	0.00121	0.00164	0.02263	0.02269	0.02270	-0.00013	0.02264	0.00
EIM2	100.80847	0.00163	0.00064	0.00270	0.00175	0.00321	0.00329	-0.00054	0.00282	-0.10
E4	100.80931	0.00978	0.00400	0.00272	0.01056	0.01091	0.01093	0.00030	0.01080	0.01
E6	100.76688	0.01115	0.00175	0.36166	0.01128	0.36184	0.36184	-0.04212	0.36183	-0.06
E8	100.78850	0.01734	0.00608	0.05323	0.01838	0.05632	0.05632	-0.02051	0.05630	-0.18
EIM3	100.81117	0.00161	0.00066	0.00761	0.00174	0.00781	0.00784	0.00216	0.00765	0.14

$t = +20^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	107.82947	0.00166	0.00071	0.00164	0.00180	0.00244	0.00253	0.00007	0.00181	0.02
E1	107.82800	0.00167	0.00550	0.00261	0.00575	0.00631	0.00635	-0.00140	0.00610	-0.11
E2	107.80550	0.02625	0.02070	0.01746	0.03343	0.03772	0.03772	-0.02390	0.03768	-0.32
E3	107.83091	0.02248	0.00125	0.00164	0.02252	0.02258	0.02259	0.00151	0.02252	0.03
EIM2	107.82947	0.00162	0.00064	0.00270	0.00175	0.00321	0.00329	0.00007	0.00277	0.01
E4	107.83048	0.00972	0.00400	0.00272	0.01051	0.01086	0.01088	0.00108	0.01074	0.05
E5	107.82107	0.00352	0.00218	0.03162	0.00414	0.03189	0.03190	-0.00833	0.03185	-0.13
E6	107.66590	0.01109	0.00169	0.36166	0.01121	0.36183	0.36183	-0.16350	0.36183	-0.23
E8	107.80744	0.01726	0.00609	0.05323	0.01830	0.05629	0.05630	-0.02196	0.05627	-0.20
EIM3	107.83174	0.00162	0.00059	0.00761	0.00172	0.00780	0.00783	0.00234	0.00763	0.15

$t = +40^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	115.58537	0.00163	0.00070	0.00164	0.00177	0.00242	0.00251	-0.00022	0.00178	-0.06
E1	115.58680	0.00166	0.00570	0.00261	0.00594	0.00649	0.00652	0.00121	0.00628	0.10
E2	115.55770	0.02335	0.02100	0.01746	0.03141	0.03593	0.03594	-0.02789	0.03589	-0.39
E3	115.58847	0.02271	0.00115	0.00164	0.02274	0.02280	0.02281	0.00289	0.02274	0.06
E4	115.58729	0.00967	0.00400	0.00272	0.01046	0.01081	0.01083	0.00171	0.01069	0.08
EIM2	115.58588	0.00161	0.00080	0.00270	0.00180	0.00324	0.00331	0.00029	0.00280	0.05
E5	115.53956	0.00351	0.00241	0.03162	0.00426	0.03190	0.03191	-0.04603	0.03186	-0.72
E6	115.36090	0.01102	0.00171	0.36166	0.01115	0.36183	0.36183	-0.22469	0.36183	-0.31
E7	115.53614	0.00407	0.00078	0.00594	0.00414	0.00724	0.00728	-0.04944	0.00706	-3.50
E8	115.56332	0.01717	0.00609	0.05323	0.01822	0.05627	0.05627	-0.02227	0.05624	-0.20
EIM3	115.58778	0.00158	0.00053	0.00761	0.00166	0.00779	0.00782	0.00219	0.00762	0.14

$t = +60^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	123.29458	0.00144	0.00055	0.00164	0.00154	0.00225	0.00236	-0.00062	0.00165	-0.19
E1	123.30230	0.00184	0.00560	0.00261	0.00590	0.00645	0.00648	0.00710	0.00626	0.57
E2	123.26360	0.02133	0.01950	0.01746	0.02890	0.03376	0.03377	-0.03160	0.03373	-0.47
E3	123.29898	0.02338	0.00117	0.00164	0.02341	0.02347	0.02348	0.00378	0.02342	0.08
E4	123.29727	0.00961	0.00600	0.00272	0.01133	0.01165	0.01167	0.00207	0.01155	0.09
EIM2	123.29523	0.00144	0.00054	0.00270	0.00153	0.00310	0.00318	0.00004	0.00270	0.01
E5	123.22669	0.00349	0.00250	0.03162	0.00429	0.03191	0.03192	-0.06851	0.03187	-1.07
E6	123.08687	0.01095	0.00610	0.36166	0.01254	0.36188	0.36188	-0.20833	0.36187	-0.29
E7	123.24331	0.00404	0.00082	0.00594	0.00413	0.00723	0.00727	-0.05189	0.00707	-3.67
E8	123.27398	0.01711	0.00610	0.05323	0.01817	0.05625	0.05625	-0.02122	0.05623	-0.19
EIM3	123.29689	0.00143	0.00052	0.00761	0.00153	0.00777	0.00779	0.00169	0.00761	0.11

$t = +80^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	130.95711	0.00144	0.00053	0.00164	0.00154	0.00225	0.00235	-0.00021	0.00158	-0.07
E1	130.97430	0.00195	0.00570	0.00261	0.00602	0.00656	0.00660	0.01698	0.00637	1.33
E2	130.92310	0.01948	0.01710	0.01746	0.02592	0.03125	0.03126	-0.03422	0.03121	-0.55
E3	130.96244	0.02456	0.00125	0.00164	0.02459	0.02464	0.02465	0.00511	0.02459	0.10
E4	130.96041	0.00955	0.00600	0.00272	0.01128	0.01160	0.01162	0.00309	0.01149	0.13
EIM2	130.95754	0.00143	0.00053	0.00270	0.00153	0.00310	0.00317	0.00022	0.00265	0.04
E5	130.88246	0.00383	0.00228	0.03162	0.00446	0.03193	0.03194	-0.07486	0.03189	-1.17
E6	130.84380	0.01089	0.02307	0.36166	0.02551	0.36256	0.36256	-0.11352	0.36255	-0.16
E7	130.91797	0.00401	0.00082	0.00594	0.00410	0.00722	0.00725	-0.03936	0.00704	-2.80
E8	130.93943	0.01703	0.00611	0.05323	0.01809	0.05622	0.05623	-0.01789	0.05620	-0.16
EIM3	130.95905	0.00143	0.00052	0.00761	0.00152	0.00777	0.00779	0.00173	0.00759	0.11

$t = +100^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	138.57295	0.00171	0.00053	0.00164	0.00179	0.00243	0.00252	0.00021	0.00172	0.06
E2	138.53630	0.01935	0.01710	0.01746	0.02582	0.03117	0.03118	-0.03644	0.03112	-0.59
E3	138.57884	0.02664	0.00121	0.00164	0.02666	0.02671	0.02672	0.00610	0.02666	0.11
E4	138.57672	0.00949	0.00600	0.00272	0.01123	0.01155	0.01157	0.00398	0.01143	0.17
EIM2	138.57280	0.00171	0.00054	0.00270	0.00179	0.00324	0.00331	0.00006	0.00275	0.01
E5	138.50687	0.00423	0.00242	0.03162	0.00487	0.03199	0.03200	-0.06587	0.03195	-1.03
E6	138.63171	0.01082	0.02307	0.36166	0.02548	0.36256	0.36256	0.05897	0.36255	0.08
E8	138.55966	0.01697	0.00612	0.05323	0.01804	0.05621	0.05621	-0.01308	0.05618	-0.12
EIM3	138.57429	0.00171	0.00052	0.00761	0.00178	0.00783	0.00785	0.00155	0.00763	0.10

$t = +120^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	146.14211	0.00146	0.00052	0.00164	0.00155	0.00226	0.00244	0.00033	0.00170	0.10
E2	146.1031	0.01924	0.01710	0.01746	0.02574	0.03110	0.03112	-0.03868	0.03107	-0.62
E3	146.14819	0.02960	0.00189	0.00164	0.02966	0.02971	0.02972	0.00641	0.02967	0.11
E4	146.14619	0.00943	0.00600	0.00272	0.01118	0.01151	0.01154	0.00442	0.01141	0.19
EIM2	146.14101	0.00145	0.00052	0.00270	0.00154	0.00311	0.00324	-0.00076	0.00273	-0.14
E6	146.45058	0.01079	0.05203	0.36166	0.05314	0.36554	0.36554	0.30881	0.36554	0.42
E8	146.13468	0.01692	0.00613	0.05323	0.01800	0.05620	0.05620	-0.00709	0.05618	-0.06
EIM3	146.14259	0.00145	0.00052	0.00761	0.00154	0.00778	0.00782	0.00081	0.00762	0.05

$t = +140^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	153.66458	0.00140	0.00061	0.00164	0.00153	0.00224	0.00243	0.00079	0.00169	0.23
E2	153.62360	0.01911	0.01710	0.01746	0.02564	0.03102	0.03104	-0.04019	0.03099	-0.65
E3	153.67048	0.03314	0.00181	0.00164	0.03319	0.03323	0.03324	0.00669	0.03320	0.10
E4	153.66883	0.00937	0.00600	0.00272	0.01113	0.01146	0.01149	0.00504	0.01136	0.22
EIM2	153.66217	0.00140	0.00065	0.00270	0.00155	0.00311	0.00324	-0.00162	0.00273	-0.30
E6	154.30043	0.01072	0.05203	0.36166	0.05312	0.36554	0.36554	0.63664	0.36554	0.87
E8	153.66449	0.02000	0.00614	0.05323	0.02092	0.05720	0.05721	0.00070	0.05718	0.01
EIM3	153.66395	0.00140	0.00062	0.00761	0.00153	0.00777	0.00782	0.00016	0.00762	0.01

$t = +160^{\circ}\text{C}$	$R_{calc}(t)$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u(R(t_i))$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{calc}(t))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	161.14036	0.00140	0.00062	0.00164	0.00153	0.00224	0.00252	0.00142	0.00182	0.39
E2	161.0978	0.01899	0.01710	0.01746	0.02556	0.03095	0.03097	-0.04114	0.03092	-0.67
E4	161.14463	0.00932	0.00600	0.00272	0.01108	0.01141	0.01147	0.00569	0.01133	0.25
EIM2	161.13628	0.00139	0.00062	0.00270	0.00152	0.00310	0.00330	-0.00266	0.00281	-0.47
E6	162.18124	0.01066	0.09202	0.36166	0.09263	0.37334	0.37334	1.04230	0.37333	1.40
E8	161.14908	0.01976	0.00615	0.05323	0.02069	0.05712	0.05713	0.01014	0.05710	0.09
EIM3	161.13837	0.00139	0.00062	0.00761	0.00152	0.00777	0.00785	-0.00057	0.00765	-0.04

$t = 0^{\circ}\text{C}$	$R_{\mu}(0^{\circ}\text{C})$ (Ω)	$u(t_i)$ (Ω)	$u[R_{\mu}(0^{\circ}\text{C})]$ (Ω)	u_{fit} (Ω)	$u_{total,i}$ (Ω)	$u(R_{\mu}(0^{\circ}\text{C}))$ (Ω)	$.u_j(t)$ (Ω)	$D_j(t)$ (Ω)	$.u(D_j(t))$ (Ω)	$E_j(t)$
EIM1	100.02688	0.00004	0.00053	0.00000	0.00053	0.00053	0.00088	0.01014	0.00082	-0.21
E1	100.02571	0.00164	0.00510	0.00000	0.00536	0.00536	0.00540	-0.00057	0.00539	-0.14
E2	100.01070	0.00783	0.01780	0.00000	0.01944	0.01944	0.01946	-0.01653	0.01945	-0.42
E3	100.02630	0.00495	0.00115	0.00000	0.00508	0.00508	0.00513	-0.00093	0.00512	-0.09
E4	100.02683	0.00078	0.00400	0.00000	0.00408	0.00408	0.00413	-0.00040	0.00412	-0.05
EIM2	100.02601	0.00004	0.00052	0.00000	0.00052	0.00052	0.00087	-0.00122	0.00081	-0.75
E5	100.07122	0.00783	0.00218	0.00000	0.00812	0.00812	0.00815	0.04399	0.00815	2.70
E6	100.00188	0.00783	0.00175	0.00000	0.00802	0.00802	0.00805	-0.02536	0.00804	-1.58
E7	100.03000	0.00235	0.00078	0.00000	0.00247	0.00247	0.00257	0.00277	0.00255	0.54
E8	100.00635	0.00783	0.00608	0.00000	0.00991	0.00991	0.00993	-0.02088	0.00993	-1.05
EIM3	100.02876	0.00004	0.00052	0.00000	0.00052	0.00052	0.00087	0.00153	0.00081	0.94

Σημειώστε ότι 0.4 Ω για το PRT της διεργαστηριακής αντιστοιχούν σε περίπου ένα βαθμό Κελσίου.

8. Επεξεργασία Αποτελεσμάτων

Προκειμένου να υπάρξει μια τιμή αναφοράς για την ηλεκτρική αντίσταση του αισθητήρα της διεργαστηριακής σε κάθε θερμοκρασία μέτρησης, επιλέξαμε το σταθμισμένο μέσο όρο (weighted mean) των μετρήσεων των εργαστηρίων ^[2].

$$R_{calc}(t)_{wmean} = \frac{\sum_j \left[\frac{1}{u_j(t)} \right]^2 R_{calc,j}(t)}{\sum_j \left[\frac{1}{u_j(t)} \right]^2} \quad (8)$$

Η αβεβαιότητα της τιμής αναφοράς δίνεται από:

$$u^2[R_{calc}(t)_{wmean}] = \left(\sum_j \left[\frac{1}{u_j(t)} \right]^2 \right)^{-1} \quad (9)$$

όπου ο δείκτης j συμβολίζει τα εργαστήρια μέτρησης και

$$u_j(t) = \sqrt{u^2(R_{calc,j}(t)) + u_{stability}^2} \quad (10)$$

Ο όρος: $u(R_{calc,j}(t))$ συμβολίζει την αβεβαιότητα $u(R_{calc}(t))$ του εργαστηρίου (j) (στήλη επτά του πίνακα 1)

Ο όρος: $u_{stability}$ αντιστοιχεί στην σταθερότητα του αισθητήρα κατά την διάρκεια της σύγκρισης και εκτιμάται από το EIM από την διαφορά αρχικής και τελικής διακρίβωσης του αισθητήρα στα σταθερά σημεία της κλίμακας θερμοκρασίας: Hg, H₂O, Ga, In δηλαδή σε θερμοκρασίες: -38.8344, 0.0100, 29.7646 και 156.5985 °C. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν πριν αρχίσει η σύγκριση και αφού αυτή τελείωσε. Η σταθερότητα θεωρούμε ότι είναι όρος τύπου B, με τετραγωνική κατανομή, και πλήρες εύρος ίσο με 0.006 °C (0.0024Ω) από -20 °C έως και 100 °C, 0.008 °C (0.0032Ω) για 120 °C και 140 °C και 0.010 °C (0.004Ω) για τους 160 °C. Άρα ανάγεται σε όρο τυπικής αβεβαιότητας πολλαπλασιάζοντας με $1/(2*\sqrt{3})$. Το $u_j(t)$ για κάθε εργαστήριο φαίνεται στον πίνακα 1.

Οι τιμές $R_{calc,j}(t)$ κάποιων εργαστηρίων διαφέρουν από τον σταθμισμένο μέσο όρο $R_{calc}(t)_{wmean}$, περισσότερο από $k.u_j(t)$ ($k=2$, επίπεδο εμπιστοσύνης 95%). Σε μία πιο ακριβή προσέγγιση του όρου, τα εργαστήρια αυτά εξαιρέθηκαν από τον υπολογισμό του $R_{calc}(t)_{wmean}$ (εκτός αυτών που οριακά δεν πληρούσαν το κριτήριο). Στον πίνακα 2 φαίνονται τα τελικά $R_{calc}(t)_{wmean}$ (Ω) και $u[R_{calc}(t)_{wmean}]$ (Ω) για κάθε θερμοκρασία t της διεργαστηριακής.

Πίνακας 2. Σταθμισμένος μέσος όρος και αβεβαιότητα του

t (°C)	$R_{calc}(t)_{wmean}$ (Ω)	$u[R_{calc}(t)_{wmean}]$ (Ω)
0	100.02723	0.00030
-20	92.17701	0.00181
-10	96.10763	0.00185
2	100.80901	0.00170
20	107.82940	0.00177
40	115.58559	0.00177
60	123.29520	0.00168
80	130.95732	0.00174
100	138.57274	0.00185
120	146.14178	0.00175
140	153.66379	0.00174
160	161.13894	0.00174

Για τον έλεγχο του βαθμού της ισοδυναμίας των αποτελεσμάτων (degree of equivalence) υπολογίζεται στη συνέχεια η διαφορά:

$$D_j(t) = R_{calc,j}(t) - R_{calc}(t)_{wmean} \quad (11)$$

Της οποίας η αβεβαιότητα $u(D_i(t))$ αφού λάβουμε υπόψη και την συσχέτιση μεταξύ $R_{calc,j}(t)$ και $R_{calc}(t)_{wmean}$ δίνεται από^[3]:

$$u(D_j(t)) = \sqrt{u_j^2(t) - u^2(R_{calc}(t)_{wmean})} \quad (12)$$

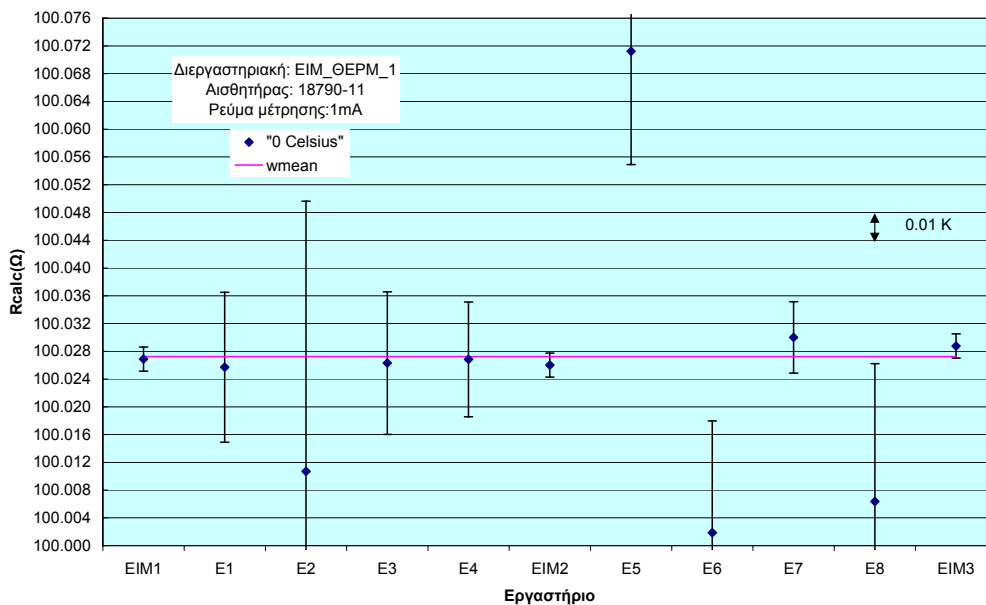
Τα αποτελέσματα των εργαστηρίων $R_{calc,j}(t)$ (πίνακας 1, δεύτερη στήλη), θεωρούνται συμβατά [4], [5] με τον σταθμισμένο μέσο όρο $R_{calc}(t)_{wmean}$ (πίνακας 3) με βεβαιότητα ~95% όταν:

$$|E_j(t)| \equiv \left| \frac{D_j(t)}{ku(D_j(t))} \right| < 1, \text{ για } k=2 \quad (13)$$

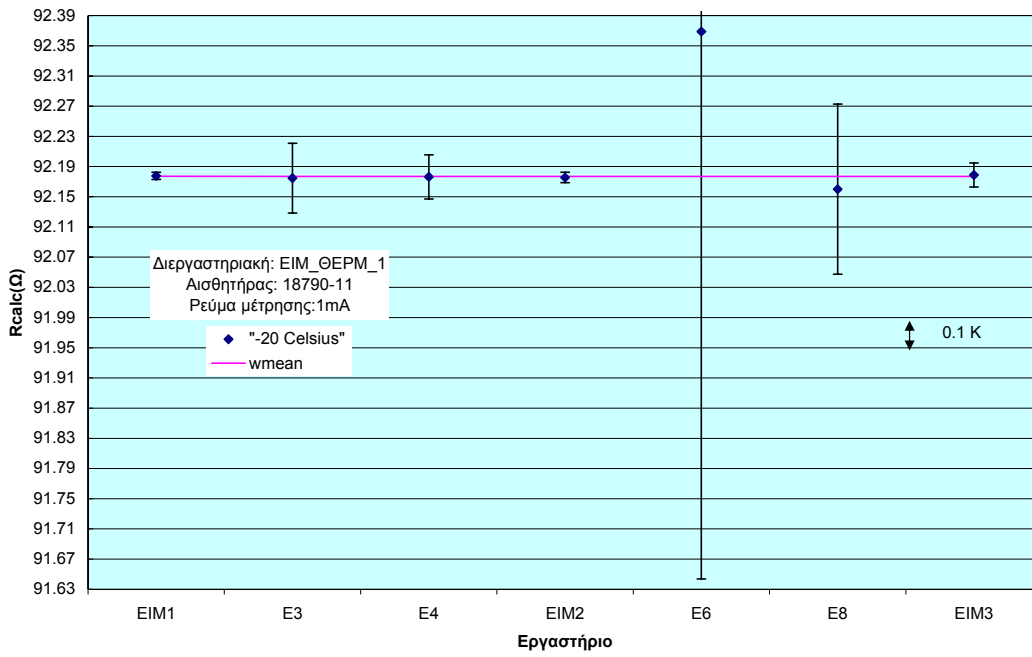
Οι ποσότητες $D_j(t)$, $u(D_j(t))$, και $E_j(t)$ φαίνονται επίσης στον πίνακα 1.

9. Διαγράμματα μετρήσεων

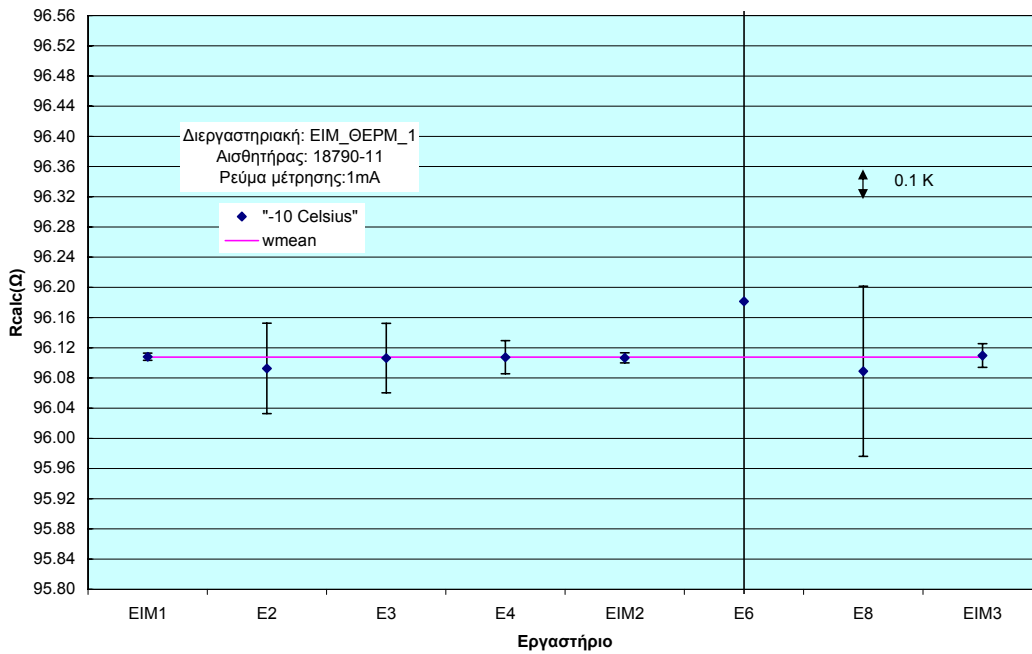
Ακολουθούν τα διαγράμματα των μετρήσεων των εργαστηρίων για κάθε θερμοκρασία της σύγκρισης. Η αβεβαιότητα που συνοδεύει τις μετρήσεις κάθε εργαστηρίου στα διαγράμματα είναι η $k \cdot u_j(t)$ ($k=2$). Όπου το $u_j(t)$ περιγράφεται από την εξίσωση (10) και δίδεται στην στήλη οκτώ του πίνακα 1 για κάθε εργαστήριο.



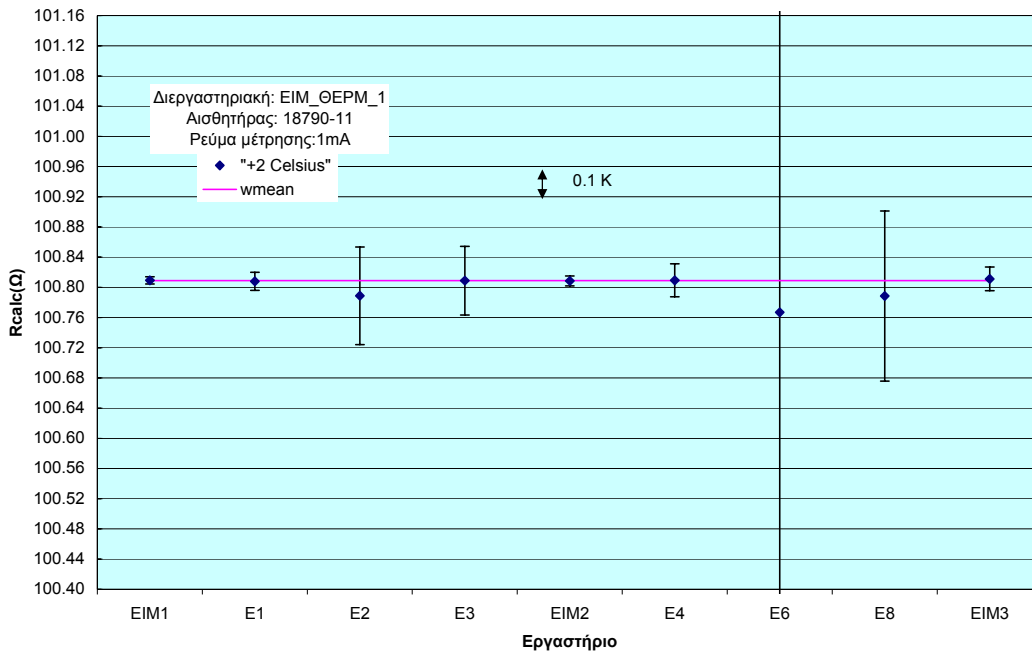
Διάγραμμα 1. Οι μετρήσεις στο σημείο των 0 °C



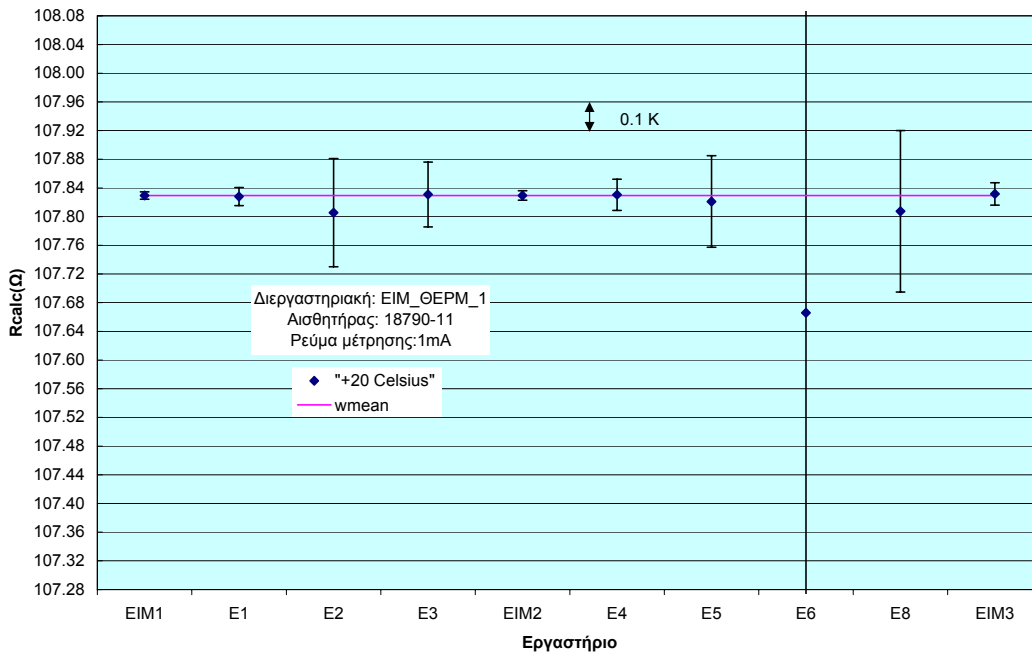
Διάγραμμα 2. Οι μετρήσεις στο σημείο των -20 °C



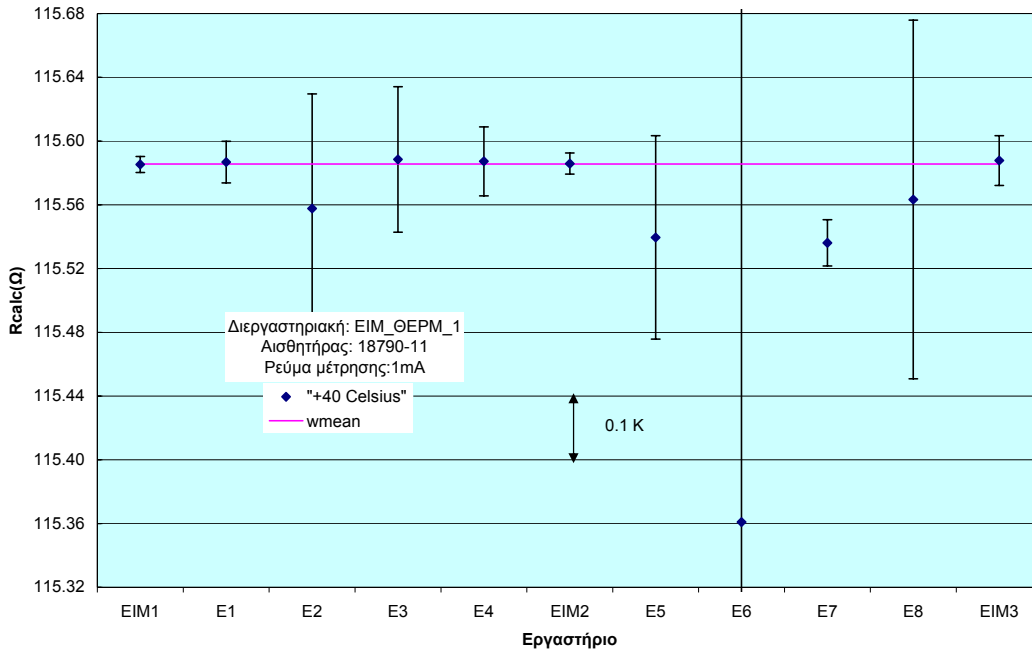
Διάγραμμα 3. Οι μετρήσεις στο σημείο των -10 °C



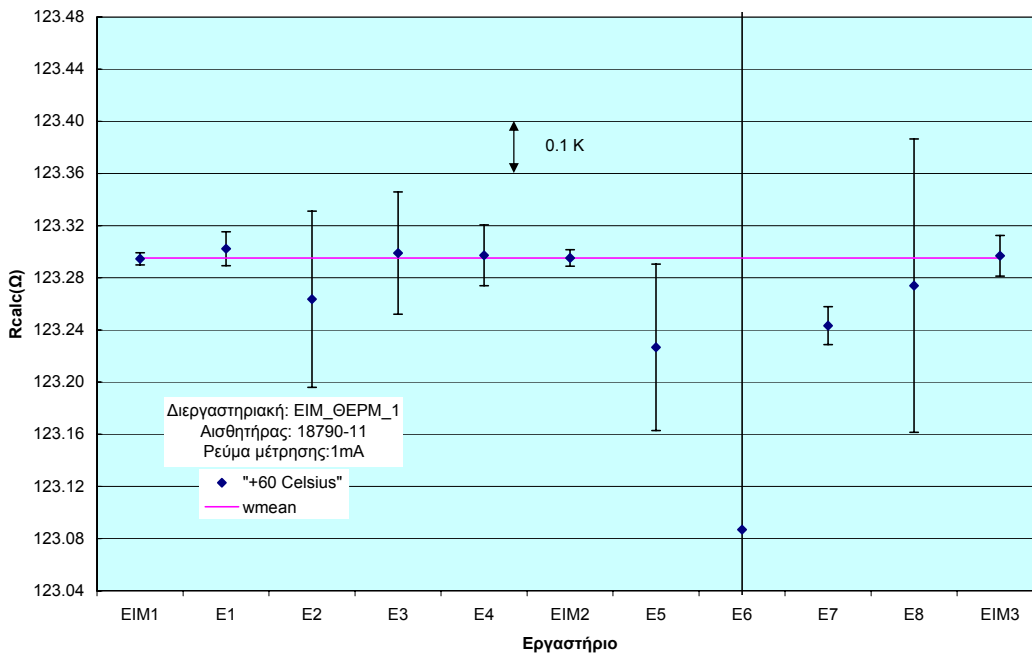
Διάγραμμα 4. Οι μετρήσεις στο σημείο των +2 °C



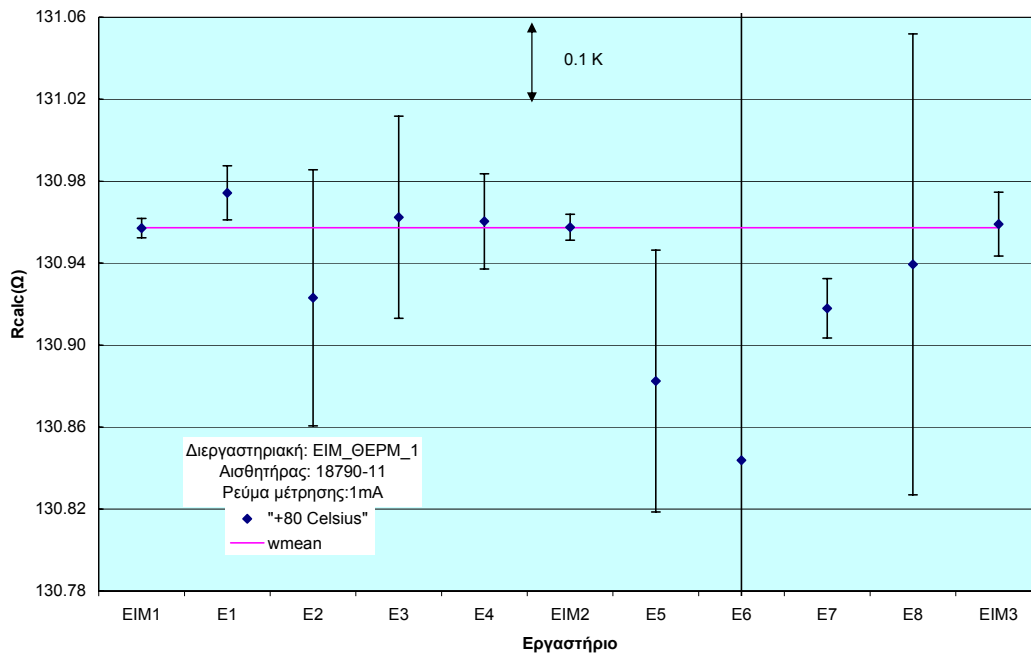
Διάγραμμα 5. Οι μετρήσεις στο σημείο των +20 °C



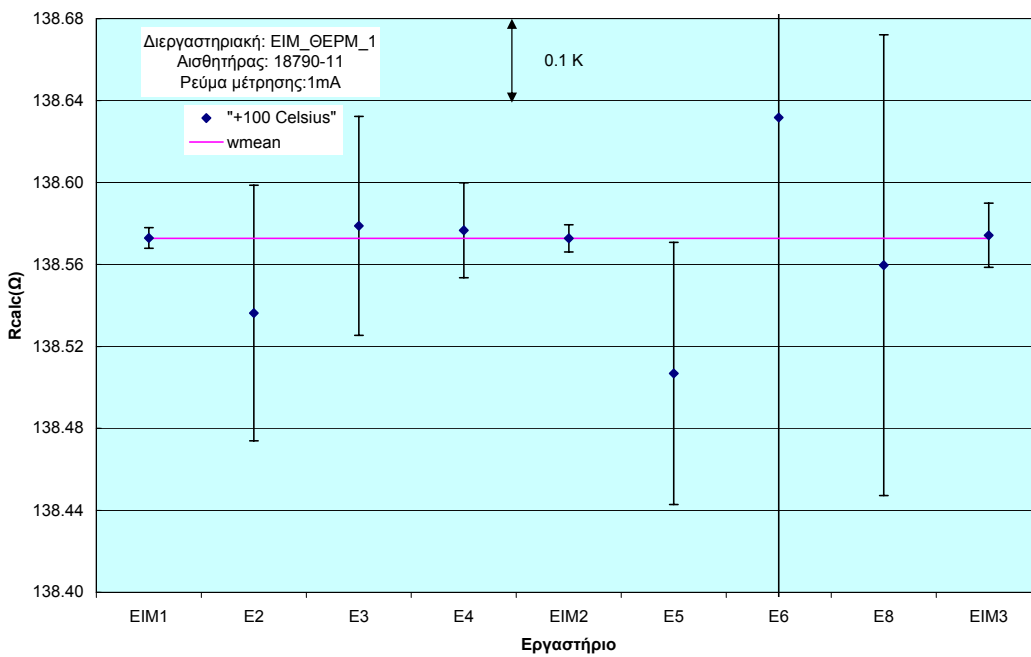
Διάγραμμα 6. Οι μετρήσεις στο σημείο των +40 °C



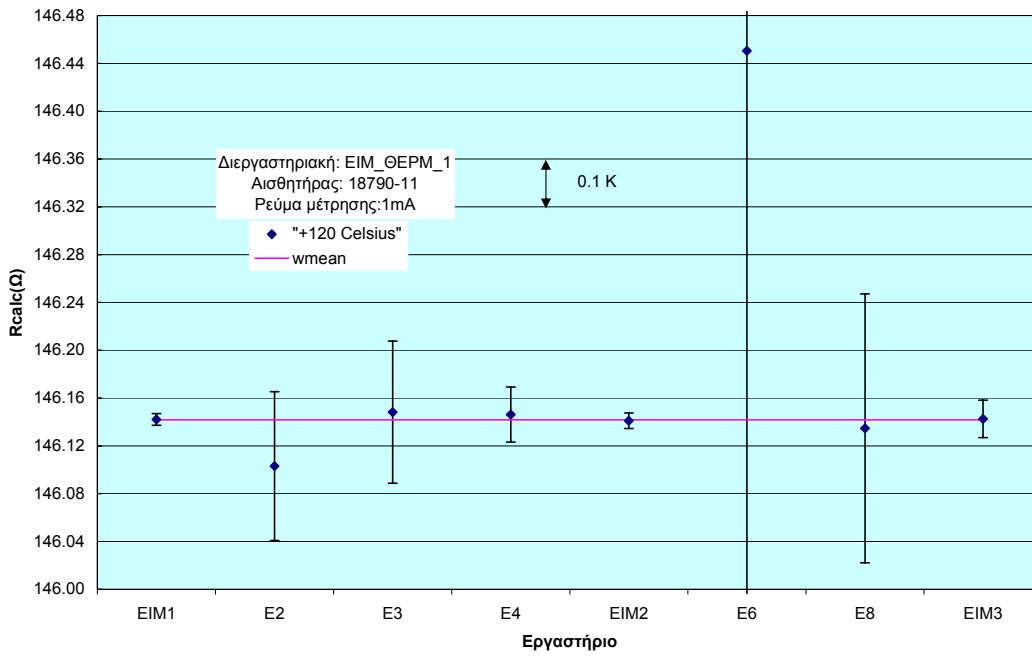
Διάγραμμα 7. Οι μετρήσεις στο σημείο των +60 °C



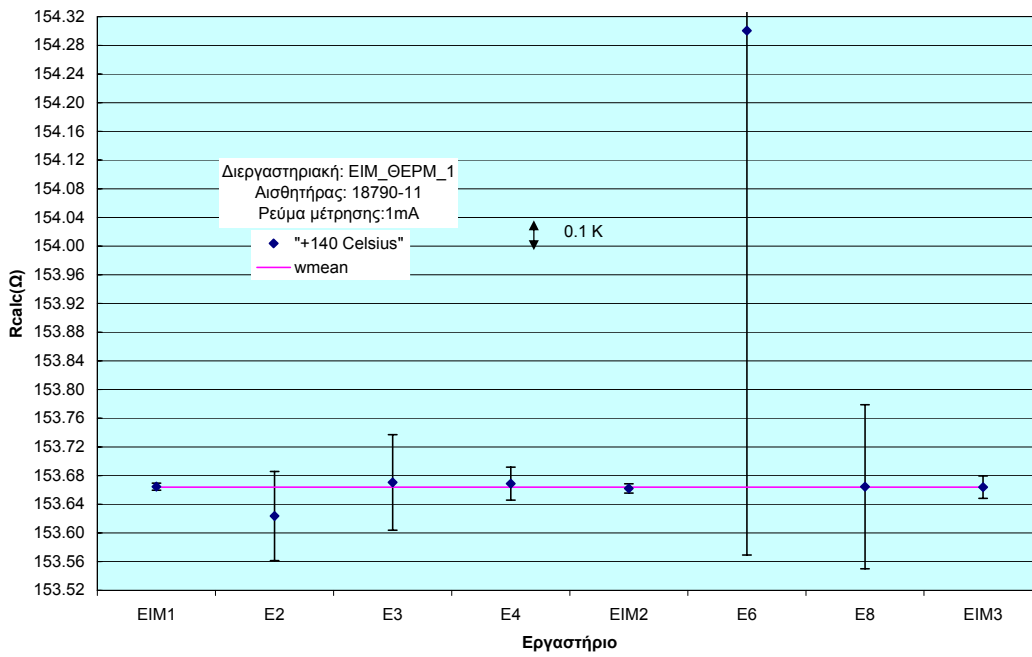
Διάγραμμα 8. Οι μετρήσεις στο σημείο των +80 °C



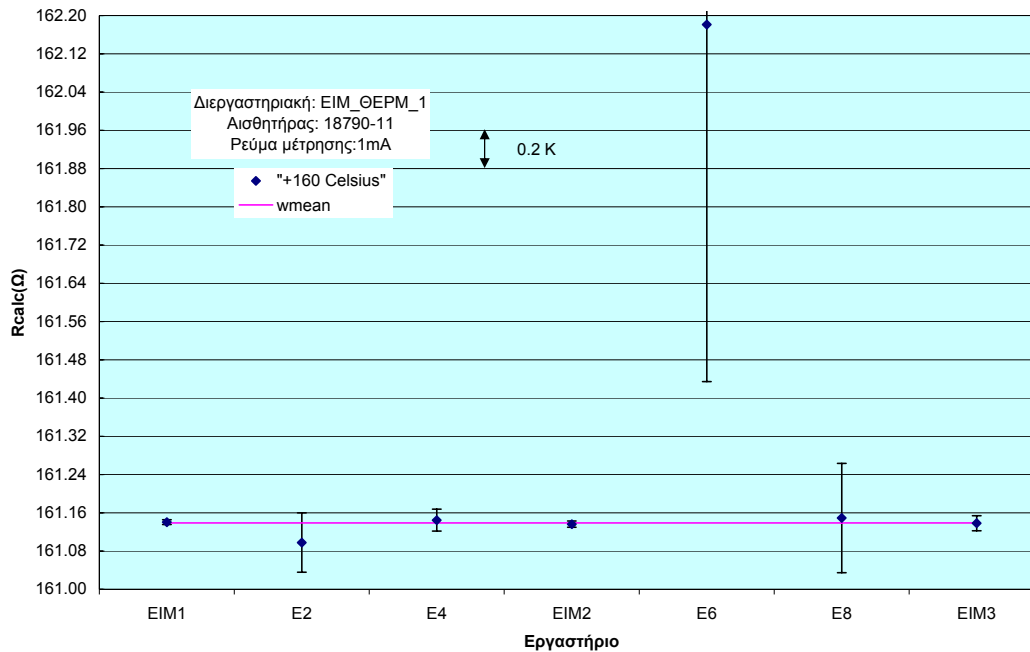
Διάγραμμα 9. Οι μετρήσεις στο σημείο των +100 °C



Διάγραμμα 10. Οι μετρήσεις στο σημείο των +120 °C



Διάγραμμα 11. Οι μετρήσεις στο σημείο των +140 °C



Διάγραμμα 12. Οι μετρήσεις στο σημείο των +160 °C

10. Σύνοψη - Συμπεράσματα

Από τις 14/03/06 έως 18/01/07 πραγματοποιήθηκε η πρώτη διεργαστηριακή μεταξύ εργαστηρίων που δραστηριοποιούνται σε μετρήσεις θερμοκρασίας στον Ελληνικό χώρο με πιλοτικό εργαστήριο το εργαστήριο Θερμοκρασίας του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας.

Στην διεργαστηριακή έλαβαν μέρος οκτώ εργαστήρια διακριβώσεων εκτός του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας. Τα περισσότερα εργαστήρια είχαν αποτελέσματα που ήταν συμβατά με τις τιμές αναφοράς της σύγκρισης. Υπήρξαν όμως και αρκετά εργαστήρια, ιδιαίτερα στο σημείο των 0 °C, των οποίων οι μετρήσεις δεν ήταν συμβατές με την τιμή αναφοράς της σύγκρισης, δεδομένης της αβεβαιότητας μετρήσεων που δηλώσανε ($|E_f(t)| > I$). Αυτό οφείλεται είτε σε μεγάλη απόκλιση των μετρήσεων τους από την τιμή αναφοράς, είτε σε υποεκτίμηση της αβεβαιότητας τους. Από την άλλη μεριά, η συμβατότητα με την τιμή αναφοράς της διεργαστηριακής, για κάποια εργαστήρια, οφείλεται στην μεγάλη αβεβαιότητα μετρήσεων την οποία έχουν. Η μεγάλη αυτή αβεβαιότητα, εάν οφείλεται σε μεγάλο u_{fi} , δηλώνει μη ικανοποιητική προσαρμογή των μετρήσεων στην μαθηματική καμπύλη του θερμομέτρου. Αυτό συνήθως οφείλεται σε μετρήσεις με μεγάλες αποκλίσεις, οι οποίες δεν είναι συμβατές με τους όρους αβεβαιότητας $u(t_i)$ και $u[R(t_i)]$ που δηλώνει το εργαστήριο.

11. Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] ISO, *Guide to the expression of uncertainty in measurement*. (International Organization for Standardization, 1995).
- [2] G. Ratel, *Evaluation of the uncertainty of the degree of equivalence*, *Metrologia* **42**, 140 (2005).
- [3] N. F. Zhang, *The uncertainty associated with the weighted mean of measurement data*, *Metrologia* **43**, 195 (2006)
- [4] K. Beissner, *On a measure of consistency in comparison measurements*, *Metrologia* **39**, 59 (2002).
- [5] C. M. Wang and H. K. Iyer, *Detection of influential observations in the determination of the weighted-mean KCRV*, *Metrologia* **42**, 262 (2005).