

Η ΔΙΕΘΝΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

Κοκκίνη Ευμορφία και Αναγνώστου Μιλτιάδης
Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας, ΒΙ.ΠΕ.Θ. Σίνδος 57022, τετρ. 45
e-mail: kokkini@eim.org.gr, miltiadis.anagnostou@eim.org.gr

Στο Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (EIM) υλοποιείται η διεθνής κλίμακα θερμοκρασίας (ITS-90) στο εύρος: -189.3442 έως 961.7800 °C. Η υλοποίηση αυτή βασίζεται στα σταθερά θερμοκρασιακά σημεία του Ar, Hg, H₂O, Ga, In, Sn, Zn, Al, Ag και την διακρίβωση προτύπων θερμομέτρων λευκόχρυσου στα σημεία αυτά. Η διάδοση της κλίμακας θερμοκρασίας στο παραπάνω εύρος γίνεται με την χρήση των θερμομέτρων αυτών. Το θεμελιώδες σημείο της κλίμακας, βάση του οποίου ορίζεται η μονάδα θερμοκρασίας του SI το Kelvin (K), είναι το τριπλό του H₂O.

Διεθνείς συγκρίσεις επιβεβαιώνουν την αξιοπιστία υλοποίησης της κλίμακας θερμοκρασίας στο EIM και αποτελούν βάση για την αμοιβαία αναγνώριση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων μεταξύ των εθνικών ινστιτούτων μετρολογίας.

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διεργαστηριακής ευρωπαϊκής σύγκρισης στο τριπλό σημείο του H₂O EUROMET 549 «Interlaboratories comparison of water triple point cells» στην οποία συμμετείχε το EIM.

Λέξεις-Κλειδιά: θερμοκρασία, ITS-90, τριπλό σημείο του νερού, σταθερά σημεία θερμοκρασίας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάθε κλίμακα θερμοκρασίας είναι ένας πρακτικός τρόπος προσέγγισης με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια, της φυσικής ποσότητας που ονομάζεται θερμοδυναμική θερμοκρασία (σύμβολο T). Η προσέγγιση αυτή γίνεται με την χρήση κατάλληλων θερμομέτρων τα οποία διακριβώνονται σε σταθερά σημεία αναφοράς. Τέτοια σημεία αναφοράς είναι τριπλά σημεία στοιχείων ή μορίων, σημεία πήξεως ή τήξεως μετάλλων κλπ.

Η Διεθνής Κλίμακα Θερμοκρασίας του 1990 (ITS-90) υιοθετήθηκε από την Διεθνή Επιτροπή Μέτρων και Σταθμών στην σύνοδο της το 1989^{[1], [2]} και αντικατέστησε την προηγούμενη ισχύουσα κλίμακα του 1968 (στην αναθεωρημένη της έκδοση του 1975) καθώς και την προσωρινή κλίμακα από 0.5 K έως 30K του 1976. Όπως και στην προηγούμενη κλίμακα, σαν μονάδα μέτρησης της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας ορίζεται το Kelvin (σύμβολο K), που είναι το κλάσμα $1/273.16$ της θερμοδυναμικής θερμοκρασίας του τριπλού σημείου του νερού.

Η κλίμακα ITS-90 εκτείνεται από 0.65K έως την μεγαλύτερη θερμοκρασία που να είναι μετρήσιμη με την χρήση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα (~3000K). Η εκπομπή αυτή περιγράφεται από τον νόμο ακτινοβολίας του Plank.

Δεδομένου ότι το παραπάνω εύρος θερμοκρασίας δεν μπορεί να καλυφθεί από ένα μόνο είδος θερμομέτρου, η ITS-90 ορίζει ένα αριθμό υπό-κλιμάκων μέσα στις οποίες ορίζεται η $T_{(ITS-90)}$ βάση του κατάλληλου θερμομέτρου το οποίο διακριβώνεται σε προκαθορισμένα

σταθερά σημεία αναφοράς. Οι υποκλίμακες αυτές συνήθως επικαλύπτονται για μικρό διάστημα ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή μετάβαση από την μία στην άλλη.

Από θερμοκρασία 0.65K έως 5.0K, η $T_{(ITS-90)}$ ορίζεται με βάση την σχέση τάσεως κορεσμένων ατμών-θερμοκρασίας των ^3He και ^4He όταν αυτά βρίσκονται σε υγρή μορφή.

Μεταξύ των 3K και του τριπλού σημείου του Ne (24.5561K), η $T_{(ITS-90)}$ ορίζεται με βάση ένα θερμομέτρο αερίου το οποίο διακριβώνεται σε τρεις πειραματικά υλοποιήσιμες θερμοκρασίες. Για τα ενδιάμεσα σημεία χρησιμοποιούνται οι υποδεικνυόμενες διαδικασίες παρεμβολής.

Από το τριπλό σημείο του H_2 (13.8033K) μέχρι το σημείο πήξεως του Ag (961.78 °C) η $T_{(ITS-90)}$ ορίζεται με την βοήθεια των θερμομέτρων αντίστασης λευκόχρυσου (Standard Platinum Resistance Thermometers ή συντομότερα SPRT) τα οποία διακριβώνονται σε καθορισμένα σύνολα σταθερών σημείων αναφοράς. Για τα ενδιάμεσα σημεία χρησιμοποιούνται όπως και παραπάνω αυστηρά καθορισμένες διαδικασίες παρεμβολής.

Από το σημείο πήξεως του Ag (961.78 °C) και πάνω η $T_{(ITS-90)}$ ορίζεται με την βοήθεια ενός προτύπου μονοχρωματικού πυρομέτρου που χρησιμοποιεί ένα σταθερό σημείο αναφοράς και τον νόμο ακτινοβολίας μέλανος σώματος του Planck.

Τα σταθερά σημεία αναφοράς που ορίζουν την Διεθνή Κλίμακα Θερμοκρασίας του 1990 φαίνονται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Πρότυπα σημεία της κλίμακας ITS-90

A/A	Θερμοκρασία		Ουσία	Κατάσταση	SPRT resistance ratio:
	$T_{(ITS-90)}/\text{K}$	$T_{(ITS-90)}/^\circ\text{C}$			$R(T)/R(273.16\text{K})$
1	3 ως 5	-270,15 ως -268,15	He	Τ.Ατμ.	
2	13,8033	-259,3467	e- H_2	Τρ.Σ.	0,00119007
3	~ 17	~ -256,15	e- H_2 (ή He)	Τ.Ατμ. (ή Θ.Αερ.)	
4	~ 20,3	~ -252,85	e- H_2 (ή He)	Τ.Ατμ. (ή Θ.Αερ.)	
5	24,5561	-248,5939	Ne	Τρ.Σ.	0,00844974
6	54,3584	-218,7916	O_2	Τρ.Σ.	0,09171804
7	83,8058	-189,3442	Ar	Τρ.Σ.	0,21585975
8	234,3156	-38,8344	Hg	Τρ.Σ.	0,84414211
9	273,16	0,01	H_2O	Τρ.Σ.	1,00000000
10	302,9146	29,7646	Ga	Σ.Τηξ.	1,11813889
11	429,7485	156,5985	In	Σ.Πηξ.	1,60980185
12	505,078	231,928	Sn	Σ.Πηξ.	1,89279768
13	692,677	419,527	Zn	Σ.Πηξ.	2,56891730
14	933,473	660,323	Al	Σ.Πηξ.	3,37600860

15	1234,93	961,78	Ag	Σ.Πηξ.	4,28642053
16	1337,33	1064,18	Au	Σ.Πηξ.	
17	1357,77	1084,62	Cu	Σ.Πηξ.	

Τ.Ατμ.: Τάση κορεσμένων ατμών, Τρ.Σ.: Τριπλό σημείο, Θ.Αερ. : Θερμόμετρο Αερίου, Σ.Πηξ.: Σημείο πήξεως, Σ.Τηξ.: Σημείο τήξεως

Στο Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (EIM) υλοποιείται η διεθνής κλίμακα θερμοκρασίας (ITS-90) στο εύρος: $-189.3442\text{ }^{\circ}\text{C}$ έως $961.7800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Η υλοποίηση αυτή βασίζεται στα σταθερά σημεία αναφοράς του Αργού (Ag), Υδραργύρου (Hg), νερού (H_2O), Γαλλίου (Ga), Ινδίου (In), Κασσιτέρου (Sn), Ψευδαργύρου (Zn), Αργιλίου (Al) και Αργύρου (Ag) και την διακρίβωση προτύπων θερμομέτρων λευκόχρυσου στα σημεία αυτά.

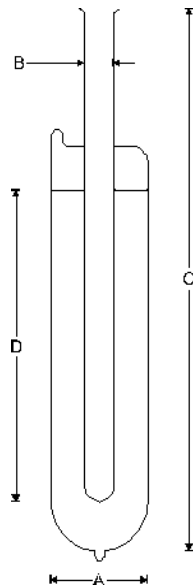
2. ΤΟ ΤΡΙΠΛΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

2.1 Κυψέλες τριπλού σημείου του νερού

Το τριπλό σημείο του νερού, είναι το πιο σημαντικό σημείο της κλίμακας θερμοκρασίας. Μπορεί να υλοποιηθεί στο εργαστήριο με μεγάλη ακρίβεια και για αυτό επιλέχθηκε για τον ορισμό του Kelvin. Η διακρίβωση των προτύπων θερμομέτρων αντίστασης λευκόχρυσου αρχίζει με τον καθορισμό της ηλεκτρικής τους αντίστασης στο σημείο αυτό. Ο λόγος $W(T) = R(T)/R(273.16\text{K})$, όπου $R(T)$ είναι η αντίσταση του θερμομέτρου σε μια τυχαία θερμοκρασία (T) και $R(273.16\text{K})$ η αντίσταση του θερμομέτρου στο τριπλό σημείο του νερού, αποτελεί την ποσότητα που πρέπει να προσδιοριστεί κατά την διακρίβωση του.

Το σημείο υλοποιείται με τη χρήση σφραγισμένων κυψελών που περιέχουν διπλά απεσταγμένο νερό. Οι κυψέλες αυτές είναι κυλινδρικού σχήματος με ένα πηγάδι εισαγωγής του προς διακρίβωση θερμομέτρου, κατά μήκος του άξονα του κυλίνδρου και είναι κατασκευασμένες είτε από βοριοπυριτικό γυαλί είτε από άμορφο χαλαζία (quartz glass).

Στο Εργαστήριο Θερμοκρασίας του E.I.M., για την υλοποίηση του τριπλού σημείου του νερού, υπάρχουν επτά κυψέλες. Πέντε από αυτές είναι κατασκευασμένες από το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας της Μ.Βρετανίας NPL, και δύο είναι κατασκευασμένες από το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας της Ρωσίας D.I.MENDELEYEV INSTITUTE FOR METROLOGY (VNIIM). Οι διαστάσεις και η σχεδίαση τους παρουσιάζεται στο σχήμα 1.



	Διαστάσεις (mm)	
	NPL-Type 32	VNIIM
A (εξ.δ.)	40	60
B (εσ.δ.)	12	12
C	360	380
D	220	270

εξ. δ. =εξωτερική διάμετρος εσ. δ. =εσωτερική διάμετρος

Σχήμα 1. Διαστάσεις και σχεδίαση κυψελών υλοποίησης του τριπλού σημείου του νερού

2.2 Υλοποίηση του τριπλού σημείου του νερού στο εσωτερικό των κυψελών

Τα βήματα που ακολουθούνται σε γενικές γραμμές, προκειμένου να υλοποιηθεί το τριπλό σημείο του νερού, είναι τα παρακάτω:

- 1) Οι κυψέλες του νερού εισάγονται σε λουτρό νερού, το οποίο βρίσκεται ήδη σε θερμοκρασία 273.16K και αφήνονται να έλθουν σε θερμική ισορροπία.
- 2) Στο πηγάδι κάθε κυψέλης εισάγεται αιθανόλη σαν μέσο μεταφοράς θερμότητας και στην συνέχεια εισάγονται μεταλλικές ράβδοι που έχουν προ-ψυχθεί με υγρό άζωτο. Σκοπός της διαδικασίας είναι η δημιουργία μανδύα πάγου που περιβάλλει το πηγάδι εισαγωγής του θερμομέτρου. Με την διαδικασία αυτή, στην κυψέλη συνυπάρχουν και οι τρεις φάσεις του νερού (υγρό, στερεό, αέριο) και επομένως έχει δημιουργηθεί το τριπλό σημείο (273.16K ή 0.01 °C). Οι τρεις φάσεις του νερού διατηρούνται μέσα στις κυψέλες για αρκετές εβδομάδες εφόσον η θερμοκρασία του λουτρού στο οποίο φυλάσσονται είναι περίπου 0.01 °C.
- 3) Για μετρήσεις υψηλής ακρίβειας, η κυψέλη χρησιμοποιείται για διακριβώσεις μετά από 24 ώρες, χρόνος ικανός για την απάλειψη των εσωτερικών τάσεων του μανδύα του πάγου.

Στο εργαστήριο θερμοκρασίας του Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας, η υλοποίηση του τριπλού σημείου του νερού πραγματοποιείται με αβεβαιότητα ± 0.00014 °C με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%, όπως τεκμηριώνεται και από τα αποτελέσματα της

διεργαστηριακής ευρωπαϊκής σύγκρισης EUROMET PROJECT No 549 ^[3], που παρουσιάζονται παρακάτω.

3. Η ΔΙΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΣΥΓΚΡΙΣΗ «EUROMET PROJECT No 549» – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΥΨΕΛΩΝ ΤΡΙΠΛΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

3.1 Περιγραφή

Από το Φεβρουάριο του 2000 έως τον Οκτώβριο του 2003, διοργανώθηκε υπό την αιγίδα της EUROMET (project No 549), μία ευρωπαϊκή σύγκριση με σκοπό την αποτίμηση των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με την πρακτική υλοποίηση του τριπλού σημείου του νερού, (TPW-Triple Point of Water), σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες. Στη σύγκριση αυτή συμμετείχαν τα εθνικά μετρολογικά ινστιτούτα 15 χωρών, με 26 διαφορετικές κυψέλες νερού.

Το εργαστήριο που συντόνιζε όλο το πρόγραμμα, ήταν το εργαστήριο θερμοκρασίας του εθνικού ινστιτούτου της Γαλλίας (BNM – INM, Bureau National de Métrologie – Institut National de Métrologie). Παρείχε την κυψέλη (κατασκευής NPL No 679) και το κατάλληλο λουτρό, για τη διατήρησή της. Το πρόγραμμα ήταν η συνέχεια του EUROMET Project 278 ^[4], στο οποίο συμμετείχαν 12 χώρες, με την ίδια κυψέλη No 679 ως πρότυπο.

Τα συμμετέχοντα εργαστήρια οργανώθηκαν σε πέντε ομάδες. Μετά από τις μετρήσεις της κάθε ομάδας εργαστηρίων, η κυψέλη επέστρεψε στο BNM-INM, όπου ελεγχόταν η σταθερότητά της.

3.2 Διαδικασία Μετρήσεων

Στόχος της διεργαστηριακής ήταν η σύγκριση της υλοποιούμενης θερμοκρασίας στο τριπλό σημείο του νερού με τα διαφορετικά μέσα που διαθέτει το κάθε εργαστήριο (κυψέλη–λουτρό-διαδικασία), με αυτήν που υλοποιείται από τις παρεχόμενες συσκευές του BNM – INM. Το κάθε εργαστήριο χρησιμοποιούσε τις δικές του μεθόδους για την προετοιμασία της δικής του κυψέλης και της υλοποίησης του τριπλού σημείου, ενώ για την προετοιμασία και την υλοποίηση του τριπλού σημείου με την κυψέλη No 679, χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά μία συγκεκριμένη διαδικασία, κοινή σε όλα τα εργαστήρια.

Στο εργαστήριο Θερμοκρασίας του EIM έγιναν μετρήσεις από τις 21/01/03 έως τις 11/02/03. Η κυψέλη του εργαστηρίου που χρησιμοποιήθηκε για σύγκριση ήταν κατασκευής NPL – No 997. Πραγματοποιήθηκαν τρεις πλήρεις κύκλοι μετρήσεων μίας εβδομάδας έκαστος, και ένας τέταρτος για τον καθορισμό του θερμοκρασιακού προφίλ των κυψελών συναρτήσει του βάθους βύθισης. Την πρώτη μέρα κάθε κύκλου μετρήσεων, γινόταν νέος μανδύας πάγου, τόσο στην κυψέλη αναφοράς, όσο και στην κυψέλη του εργαστηρίου. Τις υπόλοιπες μέρες κάθε κύκλου συγκρίνονταν οι θερμοκρασίες των δύο κυψελών.

Για τις μετρήσεις των διαφορών των δύο κυψελών, χρησιμοποιήθηκαν:

- δύο διαφορετικά SPRT, 25Ω, ser.no 909/832, 909/834
- γέφυρα μέτρησης λόγου αντιστάσεων DC & σαρωτής 10 καναλιών

- πρότυπη αντίσταση (για αναφορά της γέφυρας), ονομαστικής τιμής 24.999985Ω, σε λουτρό λαδιού σταθερής θερμοκρασίας 23 °C.

3.3 Αποτελέσματα Μετρήσεων

Η σύγκριση γίνεται μετρώντας τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της παρεχόμενης κυψέλης (T_c) και της κυψέλης του εργαστηρίου (T_l). Στις διαφορές θερμοκρασίας, γίνονται διορθώσεις ως προς την υδροστατική πίεση που ασκείται από τη στήλη του υγρού και ως προς το φαινόμενο της αυτοθέρμανσης του θερμομέτρου σύγκρισης.

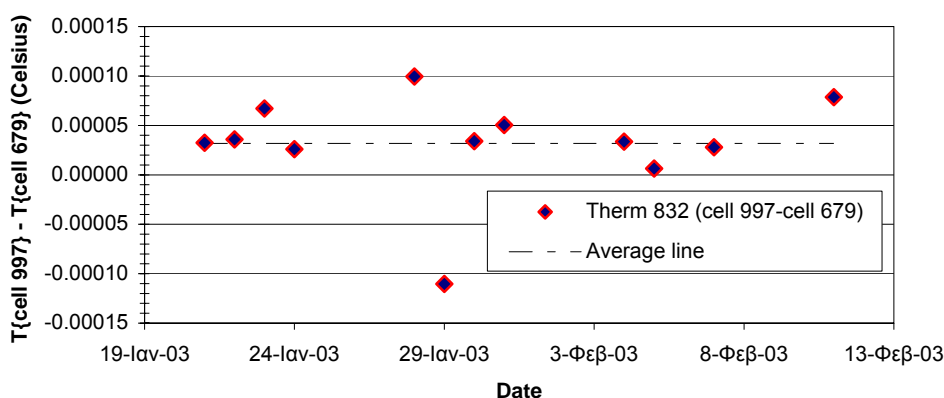
Λόγω της υδροστατικής πίεσης που ασκείται από τη στήλη του ίδιου του νερού στις κυψέλες, η πίεση στο βάθος μέτρησης l είναι μεγαλύτερη από πίεση στην επιφάνεια του νερού, όπου υλοποιείται η πραγματική θερμοκρασία του τριπλού σημείου ^[2]. Αυτή η βαθμίδα πίεσης, δημιουργεί μια αντίστοιχη βαθμίδα θερμοκρασίας $dT/dl = -0.73 \times 10^{-3}$ K/m στην κυψέλη, η οποία πρέπει να διορθώνεται.

Η αυτοθέρμανση των θερμομέτρων, εξαιτίας του ρεύματος μέτρησης, προσδιορίζεται με διαδοχικές μετρήσεις σε 1mA, $\sqrt{2}$ mA και 1mA και διορθώνεται ανάγοντας κάθε μέτρηση σε ρεύμα 0 mA

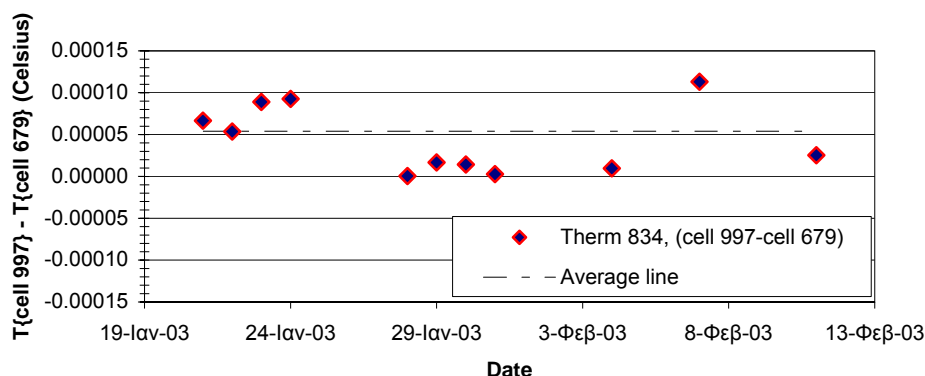
Η διαφορά στις μετρούμενες αντιστάσεις μετατρέπεται σε διαφορά θερμοκρασίας μέσω του συντελεστή ευαισθησίας dT/dR των χρησιμοποιούμενων SPRT.

$$T_l - T_c = T_{(local)} - T_{(circulating)} = [R_{(local)} - R_{(circulating)}] \cdot dT/dR$$

Τα αποτελέσματα μετρήσεων του εργαστηρίου παρουσιάζονται στα σχήματα 2 και 3, που ακολουθούν.



Σχήμα 2. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ παρεχόμενης κυψέλης & κυψέλης εργαστηρίου, όπως προσδιορίζεται από το θερμομέτρο 832.



Σχήμα 3. Διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ παρεχόμενης κυψέλης & κυψέλης εργαστηρίου, όπως προσδιορίζεται από το θερμόμετρο 834.

Η μέση διαφορά θερμοκρασίας από τα δύο θερμόμετρα του **E.I.M.** είναι:

$T_{(local)} - T_{(circulating)} = T_{(997)} - T_{(679)} = +0.04 \text{ mK}^{[3]}$, με συνολική διευρυμένη αβεβαιότητα, σε 95% επίπεδο εμπιστοσύνης $2u = \pm 0.12 \text{ mK}^{[3]}$.

Στον πίνακα 2 που ακολουθεί παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα όλων των εργαστηρίων και κυψελών, που συμμετείχαν στη διεργαστηριακή ^[3].

Υπολογίζεται ο μέσος όρος των είκοσι έξι τιμών $(T_1 - T_c)$. Ο μέσος όρος αυτός, είναι ίσος με τη διαφορά $(T_m - T_c)$ (σχέση 1), όπου T_m ο μέσος όρος των θερμοκρασιών από τις είκοσι έξι διαφορετικές κυψέλες που συμμετείχαν στη διεργαστηριακή.

$$\frac{(T_{11} - T_c) + (T_{12} - T_c) + \dots + (T_{26} - T_c)}{26} = \frac{T_{11} + T_{12} + \dots + T_{26}}{26} - T_c = T_m - T_c \quad (1)$$

Η διαφορά $(T_m - T_c)$ υπολογίζεται ίση με 0.067 mK με τυπική αβεβαιότητα $u(T_m - T_c) = \pm 0.015 \text{ mK}$.

Για κάθε κυψέλη, υπολογίζεται η τιμή $(T_1 - T_m)$ χρησιμοποιώντας τη σχέση 2.

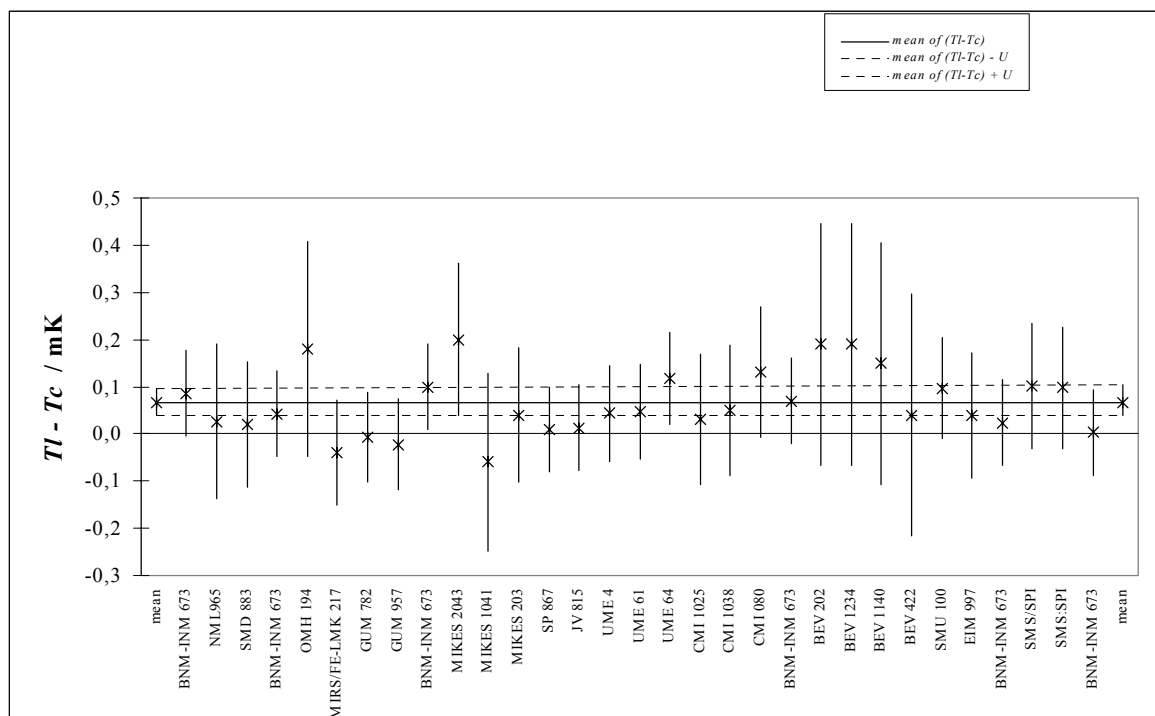
$$(T_1 - T_m) = (T_1 - T_c) - (T_m - T_c) \quad (2)$$

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά κυψελών, αποτελέσματα & αβεβαιότητες

Εργαστήριο	Κυψέλη			$(T_1 - T_c) /$ mK	$U(T_1 - T_c)_{\text{Lab}} /$ k=2 mK	$U(T_1 - T_c) /$ U_{Stab} added k=2 mK	$(T_1 - T_m) /$ mK	$U(T_1 - T_m) /$ U_{Stab} added k=2 mK
	Type	N°	Delivery date					
BNM-INM	NPL	673	1993	0.054	0.070	0.090	-0.013	0.095
NML	NPL	965	1997	0.026	0.154	0.164	-0.041	0.167
SMD	NPL	883	1996	0.020	0.120	0.133	-0.047	0.136
OMH	OMH	194	old	0.180	0.220	0.227	0.113	0.229
MIRS/FE-LMK	NMi	94 T 217	1994	-0.040	0.095	0.111	-0.107	0.114

GUM	NPL	782	1995	-0.007	0.075	0.095	-0.074	0.099
	NPL	957	1998	-0.023	0.078	0.097	-0.090	0.102
MIKES	Jarrett	A11204	1998	0.200	0.150	0.160	0.133	0.163
	NPL	3	2000	-0.060	0.180	0.189	-0.127	0.191
	Forschung	1041 203	1990	0.040	0.130	0.142	-0.027	0.145
SP	NPL	867	1996	0.009	0.070	0.090	-0.058	0.095
JV	NPL	815	1995	0.013	0.070	0.090	-0.054	0.095
UME	UME	4	1995	0.044	0.084	0.102	-0.023	0.106
	UME	61	2000	0.048	0.082	0.100	-0.019	0.104
	UME	64	2000	0.118	0.080	0.098	0.051	0.102
CMI	NPL	1025	1999	0.030	0.126	0.138	-0.037	0.141
	NPL	1038	1999	0.050	0.126	0.138	-0.017	0.141
	ISOTECH	E11-080	1999	0.130	0.126	0.138	0.063	0.141
BEV	BEV	202	Old	0.190	0.250	0.256	0.123	0.258
	Hart	1234	2001	0.190	0.250	0.256	0.123	0.258
	Hart	1140	2001	0.150	0.250	0.256	0.083	0.258
	BEV	422	old	0.040	0.250	0.256	-0.027	0.258
SMU	ISOTECH	C12-100	2002	0.097	0.090	0.107	0.030	0.110
EIM	NPL	997	1999	0.040	0.120	0.133	-0.027	0.136
SMS/SPI	Hart	1195	2000	0.101	0.120	0.133	0.034	0.136
	Hart	1196	2000	0.098	0.115	0.128	0.031	0.132

Στο σχήμα 4, παρουσιάζονται οι διαφορές $T_I - T_c$, με τις αντίστοιχες διευρυμένες αβεβαιότητες σε 95% επίπεδο εμπιστοσύνης, για όλες τις κυψέλες που πήραν μέρος στη διεργαστηριακή. Η ευθεία γραμμή αντιστοιχεί στη διαφορά $(T_m - T_c) = +0.067\text{mK}$. Οι διακεκομμένες γραμμές αποτελούν τα όρια της διευρυμένης αβεβαιότητας της τιμής αυτής $U(T_m - T_c) = 2u(T_m - T_c)$



Σχήμα 4. $(T_I - T_c)$ όλων των κυψελών με τις αντίστοιχες διευρυμένες αβεβαιότητες

3.4 Αβεβαιότητα Μετρήσεων

Η αβεβαιότητα της διαφοράς ($T_1 - T_m$) δίνεται από τη σχέση :

$$u_{(T_1 - T_m)}^2 = u_{(T_1 - T_c)Lab}^2 + u_{stab}^2 + u_{(T_m - T_c)}^2$$

όπου :

$u_{(T_1 - T_c)Lab}$: η διευρυμένη αβεβαιότητα που δηλώνεται από το κάθε εργαστήριο.

Οι παράγοντες που συνεισφέρουν στη αβεβαιότητα αυτή είναι:

- η επαναληψιμότητα (repeatability) των μετρήσεων για μικρό χρονικό διάστημα και για τον ίδιο μανδύα πάγου.
- η τυπική απόκλιση του συνόλου των μετρήσεων. Αποτελεί εκτίμηση της αναπαραγωγιμότητας (reproducibility) των μετρήσεων, που επηρεάζονται από παράγοντες όπως διαφορετικοί μανδύες σε μέγεθος ή σε ηλικία, διαφορετικοί τρόποι προετοιμασίας του μανδύα πάγου, σταθερότητα των χρησιμοποιούμενων SPRT, ροή θερμότητας από το περιβάλλον κ.ά.
- η αβεβαιότητα των ηλεκτρικών μετρήσεων, η οποία οφείλεται στη χρησιμοποιούμενη γέφυρα μέτρησης λόγω αντιστάσεων (χρονική σταθερότητα μεταξύ δύο μετρήσεων) και στη χρησιμοποιούμενη πρότυπη αντίστασης αναφοράς (σταθερότητα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία).
- η αβεβαιότητα εξαιτίας της διόρθωσης ως προς την υδροστατική πίεση

Εξαιτίας του γεγονότος ότι, μετράμε διαφορές θερμοκρασίας και οι σχετιζόμενες αβεβαιότητες αναφέρονται σε διαφορές, υπάρχουν κάποιοι παράγοντες αβεβαιότητας όπως οι χημικές προσμίξεις του νερού της κυψέλης, η διακρίβωση και η ολίσθηση της χρησιμοποιούμενης γέφυρας και της πρότυπης αντίστασης, η διόρθωση στις τιμές αντίστασης ενός SPRT λόγω της αυτοθέρμανσης, κλπ, μπορούν να θεωρηθούν αμελητέοι, είτε γιατί είναι πολύ μικροί, είτε γιατί είναι ισχυρά συσχετισμένοι. (π.χ. η ίδια γέφυρα και το ίδιο SPRT χρησιμοποιούνται και για τις δύο κυψέλες).

u_{stab} : η αβεβαιότητα εξαιτίας της σταθερότητας της κυψέλης Νο679 κατά τη διάρκεια της διεργασηριακής σύγκρισης. Ο έλεγχος σταθερότητας της γινόταν μέσω σύγκρισης με την κυψέλη Νο673. Η Νο673 συμμετέχει στην ομάδα κυψελών που ορίζει το τριπλό σημείο του νερού στο BNM – INM.

$$u_{stab} = \frac{(T_{673} - T_{679})_{\max} - (T_{673} - T_{679})_{\min}}{2\sqrt{3}} \quad u_{stab} = 0.029 \text{ mK}$$

$u_{(T_m - T_c)}$: αποτελεί την τυπική απόκλιση του μέσου όρου της διαφοράς ($T_m - T_c$)

Πίνακας 3. Έλεγχος σταθερότητας κυψέλης Νο679 κατά τη διάρκεια της σύγκρισης

Ημερομηνίες	$T_{673} - T_{679}$
Φεβρουάριος 2000	0.086 mK
Ιούλιος 2000	0.043 mK
Ιανουάριος 2001	0.100 mK
Μάιος 2002	0.070 mK
Απρίλιος 2003	0.024 mK
Σεπτέμβριος 2003	0.003 mK

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διεργαστηριακή σύγκριση EUROMET No 549, βασίστηκε στη σύγκριση 26 κυψελών 15 ευρωπαϊκών χωρών, με μία κυψέλη του BNM-INM. Υπολογίζεται η μέση τιμή των διαφορών των 26 κυψελών από την παραπάνω κυψέλη (= +0.067 mK). Δώδεκα αποτελέσματα είναι μεταξύ ± 0.05 mK από τη μέση τιμή. Είκοσι αποτελέσματα βρίσκονται μεταξύ ± 0.1 mK από τη τιμή αυτή.

Η διαφορά της θερμοκρασίας του τριπλού σημείου του νερού που υλοποιεί το EIM χρησιμοποιώντας την κυψέλη Νο 997 από την μέση αντίστοιχη τιμή των υπολοίπων ευρωπαϊκών εθνικών εργαστηρίων που έλαβαν μέρος στην σύγκριση αυτή, είναι -0.027 mK, με διευρυμένη αβεβαιότητα ± 0.136 mK, με επίπεδο εμπιστοσύνης 95%.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), H.Preston-Thomas, Metrologia 27, pages 3-10, 1990
2. Supplementary Information for the International Temperature Scale of 1990, Bureau International des Poids et Mesures, 1990
3. EUROMET Project No 549, Comparison of realization of the triple-point of water, Final Report, E. Renaot and G. Bonnier, 2004. Download from: http://www.euromet.org/projects/search/reports/549_THERM_final_report.pdf
4. Interlaboratory comparison of realizations of the triple point of water, E. Renaot, M. Elgourdou and G. Bonnier, Metrologia, 37, pages 693-699, 2000