Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΩΣΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΙΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΝΑΝΟΡΕΥΣΤΩΝ

Γεωργία Ι. Τερτσινίδου[1], Κωνσταντίνος Δ. Αντωνιάδης[1], Μάρκος Ι. Ασσαέλ[1] και William A. Wakeham[2]
[1]Εργαστήριο Θερμοφυσικών Ιδιοτήτων & Περιβαλλοντικών Διεργασιών, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη 54636
[2]Chemical Engineering Department, Imperial College London, London SW7 2BY, UK
e-mail: assael@auth.gr

Περίληψη

Το άρθρο αναφέρεται στις απαραίτητες συνθήκες για την εξασφάλιση μετρήσεων ακριβείας της θερμικής αγωγιμότητας νανορευστών. Οι συσκευές που λειτουργούν με τη μέθοδο θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση μπορούν να παράγουν άριστες μετρήσεις, όπως αποδεικνύεται όταν εφαρμοστεί μια μέθοδος επίλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την ακριβή γεωμετρία του θερμαινόμενου σύρματος. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι, μια προσεγγιστική αναλυτική λύση μπορεί να υιοθετηθεί με ανάλογη επιτυχία, μεταξύ του χρονικού διαστήματος από 0.1 σε 1 s, με την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται τέσσερα συγκεκριμένα κριτήρια. Στην βάση αυτών των κριτηρίων, έχει σχεδιαστεί, κατασκευαστεί και χρησιμοποιηθεί, μια συσκευή θερμαινόμενου σύρματος για τη μέτρηση της επαύξησης της θερμικής αγωγιμότητας του νερού όταν προστίθενται σε αυτό νανοσωλήνες άνθρακα. Οι νέες αυτές μετρήσεις, μαζί με μια συγκριτική αξιολόγηση άλλων μετρήσεων, καταδεικνύουν τη σημασία της ορθής εφαρμογής της τεχνικής.

Λέξεις-Κλειδιά: νανορευστά, θερμική αγωγιμότητα, μέθοδος Θερμαινόμενου Σύρματος σε μη-Μόνιμη Κατάσταση.

Abstract

The paper considers the conditions that are necessary to secure accurate measurement of the apparent thermal conductivity of nanofluids. It is shown that instruments operating according to the transient hot-wire technique can, indeed, produce excellent measurements when a finite element method (FEM) is employed to describe the instrument for the exact geometry of the hot wire. Furthermore it is shown that an approximate analytic solution can be employed with equal success, over the time range 0.1 to 1 s, provided four specific criteria are satisfied. According to these criteria, a transient hot-wire instrument has been designed, constructed, and employed for the measurement of the enhancement of the thermal conductivity of water when multi-wall carbon nanotubes (MWCNT) are added. These new results, together with a critical evaluation of other measurements, demonstrate the importance of proper implementation of the technique.

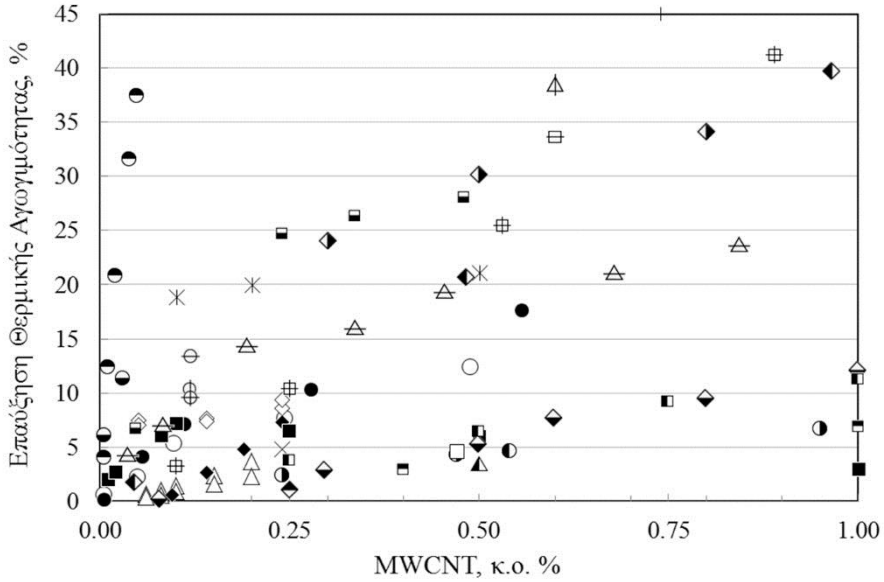
Keywords: finite element method, liquids, low uncertainty, nanofluids, thermal conductivity, transient hot-wire technique.

---

1. Εισαγωγή

Η τεχνική του θερμαινόμενου σύρματος σε μη-μόνιμη κατάσταση (THW - transient hot-wire) είναι σήμερα μία καθιερωμένη, απόλυτη τεχνική με ένα πλήρες θεωρητικό υπόβαθρο (Wakeham et al. 1991), για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας ρευστών και στερεών με πολύ χαμηλή αβεβαιότητα, 1% και 2% αντίστοιχα. Η εξέλιξή της τεχνικής περιγράφεται με λεπτομέρεια στη βιβλιογραφία (Assael et al. 2010, Wu et al. 2014).

Τα τελευταία χρόνια όμως, η 'απλούστευση' της τεχνικής για εμπορικούς λόγους, αλλά και η εφαρμογή της σε ανομοιογενή συστήματα πολλαπλών φάσεων, έχει οδηγήσει σε μετρήσεις που είναι σημαντικά μεγαλύτερης αβεβαιότητας από αυτή που δηλώνεται ή από αυτή που θα μπορούσε να επιτευχθεί (Tertsinidou et al. 2015, Antoniadis et al. 2016). Ως παράδειγμα, στο Σχήμα 1 παρουσιάζονται μετρήσεις της επαύξησης της θερμικής αγωγιμότητας του νερού όταν προστεθούν πολυστρωματικοί νανοσωλήνες άνθρακα (Multi Wall Carbon Nano Tubes, MWCNT). Παρατηρείται ότι, αν και, 23 από τους 25 ερευνητές χρησιμοποίησαν όργανα που θεωρητικά τουλάχιστον βασίζονται στη μέθοδο του θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση και επιπλέον, κατά βάση έχουν δηλωθεί αβεβαιότητες της τάξεως του ±1-2 %, οι διαφορές μεταξύ αυτών των μετρήσεων είναι μεγάλες.



Σχήμα 1 Απεικόνιση της επαύξησης της θερμικής αγωγιμότητας του νερού όταν σε αυτό προστίθενται MWCNT, ως προς την συγκέντρωση των MWCNT και διαφορετικής εξωτερικής διαμέτρου. (○) 9-11 nm (Estellé et al. 2015), (×) 20-30 nm (Sadri et al. 2014), (✳) na (Madhesh and Kalaiselvam 2014), (△) 10-15 nm (Gu et al. 2013), (◆) na (Indhuja et al. 2013), (◇) 10-30 nm (Ruan and Jacobi 2012), (◓) 20 nm (Walvekar et al. 2012), (⊖) <10 nm, (⊕) 10-20 nm (Nasiri et al. 2012), (◑) 20-30 nm (Phuoc et al. 2011), (◒) na (Aravind et al. 2011), (◐) na (Xie et al. 2011), (+) 50-80 nm (Ponmozhi et al. 2010), (■) 11-38 nm (Cherkasova and Shan 2010), (□) 10-20 nm (Garg et al. 2009), (◭) 8-15 nm (Pantzali et al. 2009), (◆) 15 nm (Chen et al. 2008), (◆) 10-120 nm (Glory et al. 2008), (◆) 10 nm (Jana et al. 2007), (◆) 10-30 nm (Hwang et al. 2007), (⊞) 150 nm (Zhang et al. 2006), (⬓) na (Ding et al. 2006), (◧) 10-30 nm (Hwang et al. 2006), (⊟) 130 nm (Assael et al. 2005), (◬) 100 nm (Assael et al. 2004), (◬) 20-60 nm (Wen and Ding 2004), (⬒) 15 nm (Xie et al. 2003).

Γ.Ι. Τερτσινίδου[1], Κ.Δ. Αντωνιάδης[1], Μ.Ι. Ασσαέλ[1] και W.A. Wakeham[2], [1]Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη 54636, [2]Imperial College, London SW7 2BY, UK

2. Θεωρητικό μέρος

Η μέθοδος θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση βασίζεται στην παρατήρηση της αύξησης της θερμοκρασίας ενός λεπτού κατακόρυφου σύρματος εμβαπτισμένο στο υγρό, του οποίου ζητείται η θερμική αγωγιμότητα. Το σύρμα ενεργεί ως πηγή θέρμανσης, και ως θερμόμετρο καταγραφής της θερμοκρασιακής αύξησης του υγρού.

2.1 Το ιδανικό μοντέλο και η αναλυτική του λύση

Η θεωρία της μεθόδου και η προέλευση των περιορισμών στον σχεδιασμό, ερμηνεύονται ευκολότερα χρησιμοποιώντας ένα ιδανικό πειραματικό μοντέλο. Στο ιδανικό μοντέλο, ένα κατακόρυφο λεπτό σύρμα απείρου μήκους και ακτίνας r_o, μηδενικής ειδικής θερμότητας και άπειρης θερμικής αγωγιμότητας, εμβαπτίζεται σε ένα σταθερό, άπειρο, ισότροπο υλικό σταθερής θερμικής διαχυτότητας α, και θερμικής αγωγιμότητας λ, και το οποίο αρχικά (σε $t = 0$) βρίσκεται σε θερμοδυναμική ισορροπία με το σύρμα σε θερμοκρασία T_o. Επιπλέον, η μεταφορά θερμότητας q ανά μονάδα μήκους σύρματος, όταν εφαρμόζεται μια βηματική τάση, θεωρείται ότι πραγματοποιείται μόνο με αγωγή (η ακτινοβολία θεωρείται αμελητέα). Το θερμοκρασιακό πεδίο γύρω από το σύρμα μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση Fourier ως εξής:

$$\rho\, C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right), \tag{1}$$

όπου C_p and ρ, είναι η ειδική θερμότητα και πυκνότητα του υλικού που περιβάλλει το σύρμα, και r είναι η ακτινική απόσταση από το κέντρο του σύρματος, και ανάλογα

Αρχικές συνθήκες : για $t \le 0$ και για κάθε r, $\Delta T(r, t) = 0$ (2)

Οριακές συνθήκες: a) για $t \ge 0$ και για $r = 0$, $\lim_{r\to 0}\left(r\,\frac{\partial T}{\partial t} \right) = -\frac{q}{2\pi\lambda}$ (3)

b) για $t \ge 0$ και για $r \to \infty$, $\Delta T(r,t) = 0$. (4)

Το πρόβλημα είναι γνωστό και η αναλυτική λύση του για θερμοκρασιακή αύξηση $\Delta T(r, t)$ αναφέρεται στην βιβλιογραφία (Wakeham et al. 1991), για την επιφάνεια του σύρματος $r = r_o$, και για πολύ μικρές τιμές του όρου $(r_o^2 / 4\alpha t)$ (κατά βάση 10^{-6}), ως:

$$\Delta T(r_o, t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{4\alpha t}{r_o^2 e^{\gamma}} \right), \tag{5}$$

όπου γ είναι η σταθερά Euler ίση με 0.5772157. Η Εξίσωση (5) είναι η απλούστερη μορφή της θεμελιώδους εξίσωσης της μεθόδου θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση και δείχνει ότι, η θερμική αγωγιμότητα του υγρού μπορεί να υπολογιστεί από την κλίση της ευθείας ΔT έναντι $\ln t$.

Ο σχεδιασμός της πειραματικής συσκευής μέτρησης θερμικής αγωγιμότητας ενός υλικού, αναπόφευκτα εισάγει έναν αριθμό αποκλίσεων από το ιδανικό μοντέλο. Στην πράξη, η θεωρητική ανάλυση κάθε απόκλισης και ο αντίστοιχος σχεδιασμός της πειραματικής συσκευής, εξασφαλίζει ότι καμία διόρθωση δεν υπερβαίνει κατά 1% της μετρούμενης

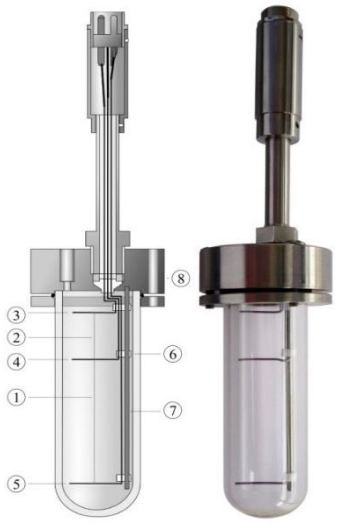
θερμοκρασιακής αύξησης. Έχει επαληθευτεί στην πράξη ότι ένας τέτοιος περιορισμός διασφαλίζει μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας με αβεβαιότητα καλύτερη από ±0.5 %. Οι αποκλίσεις περιγράφονται στη βιβλιογραφία (Wakeham et al. 1991), αναφέρουμε μόνον τη χρήση δύο όμοιων συρμάτων που διαφέρουν μόνον ως προς το μήκος τους, έτσι ώστε μετρώντας τη διαφορά των αντιστάσεων τους, εξαλείφεται η επίδραση των φαινομένων των άκρων τους.

2.2 Η προσέγγιση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

Αντί της προσεγγιστικής αναλυτικής επίλυσης που περιγράφηκε, σήμερα μπορούν εύκολα να λυθούν οι εξισώσεις μεταφοράς θερμότητας Fourier για το σύρμα, την μόνωση και το ρευστό (Antoniadis et al. 2016), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Στην περίπτωσή μας, χρησιμοποιήθηκε το COMSOL Multiphysics Version 3.2. Θα πρέπει να τονιστεί ότι αυτή η προσέγγιση δεν ήταν διαθέσιμη την δεκαετία του 1970, όταν αναπτύχθηκε η μέθοδος του θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση.

3. Πειραματικό μέρος

Για τη μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας υγρών και νανορευστών, κατασκευάστηκε ένας αισθητήρας, ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 2. Δυο όμοια σύρματα, που διαφέρουν μόνο ως προς το μήκος τους, χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί η μεταβολή της αντίστασης ενός πεπερασμένου τμήματος σύρματος απείρου μήκους (Kestin and Wakeham 1978). Τα σύρματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 2, κατασκευάστηκαν από ταντάλιο και έχουν διάμετρο 25 μm και μήκη 50 and 20 mm αντίστοιχα. Τα λεπτά σύρματα (1), (2), είναι κολλημένα πάνω σε σύρματα τανταλίου διαμέτρου 1 mm, (3), (4) και (5), και τα οποία συγκρατούνται από μικρά στηρίγματα Teflon, (6), συνδεδεμένα σε μια ράβδο πάχους 3 mm από ανοξείδωτο ατσάλι, (7). Η ράβδος αυτή στηρίζεται στο κάτω μέρος του ανοξείδωτου που σφραγίζει το γυάλινο δοχείο, (8). Αυτή η διάταξη διασφαλίζει ότι, παρά τις όποιες θερμοκρασιακές μεταβολές το σύρμα παραμένει τεντωμένο καθώς έχει τον ίδιο συντελεστή διαστολής με το χοντρό υποστηρικτικό σύρμα τανταλίου.

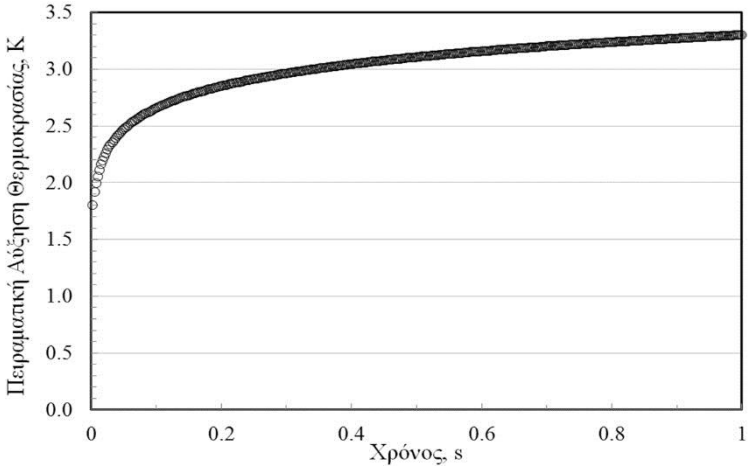


Σχήμα 2 Σχηματική απεικόνιση του αισθητήρα με δυο σύρματα τανταλίου

Τα δυο σύρματα τοποθετούνται σε κυλινδρικό γυάλινο δοχείο για μετρήσεις σε ατμοσφαιρική πίεση. Το ταντάλιο επιλέχτηκε για την κατασκευή του σύρματος, καθώς με ηλεκτρόλυση δημιουργείται στην επιφάνειά του το Ta_2O_5, που είναι ηλεκτρικά μονωτικό υλικό. Μια γέφυρα τύπου Wheatstone που ελέγχεται μέσω υπολογιστή, χρησιμοποιείται για να θερμάνει τα σύρματα και να καταγράψει τις χρονικές μεταβολές της τάσης κάθε αντίστασης (Assael et al. 2002). Τα σύρματα θερμαίνονται από το ηλεκτρικό ρεύμα που τα διαπερνά και το οποίο προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας τους περίπου 3-4 K, η οποία μετράται μεταξύ 2 ms και 1 s. Η μετρούμενη μεταβολή της τάσης ως προς το χρόνο, μετατρέπεται σε μεταβολή της αντίστασης και αυτή σε θερμοκρασιακή μεταβολή.

4. Αξιολόγηση της μεθόδου Θερμαινόμενου Σύρματος σε μη-Μόνιμη Κατάσταση

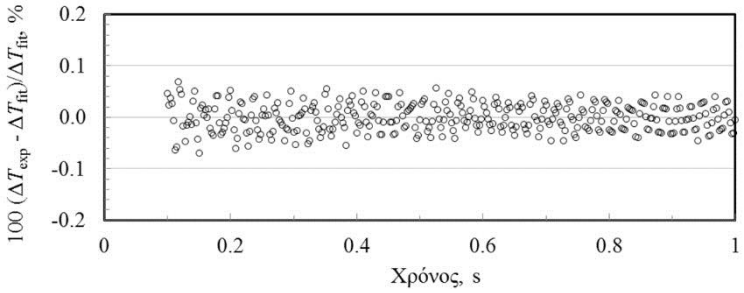
Σε κάθε μέτρηση θερμικής αγωγιμότητας (με την μέθοδο θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση), η παρατηρούμενη θερμοκρασιακή αύξηση πρέπει να συμφωνεί με την θεωρητική της τιμή και να βρίσκεται εντός του αποδεκτού σφάλματος. Για να την επικύρωση της δικής μας τεχνικής, μετρήσαμε την αύξηση της θερμοκρασίας διπλά απεσταγμένου-απιονισμένου νερού στους 297.5 K και 1 ατμόσφαιρα (Σχήμα 3).



Σχήμα 3 Πειραματική αύξηση θερμοκρασίας συναρτήσει του χρόνου (νερό στους 297.5 K)

4.1 Η αναλυτική λύση

Εξετάζουμε την συμπεριφορά του πειράματός μας σε σχέση με την προσεγγιστική αναλυτική λύση της αύξησης της θερμοκρασίας.

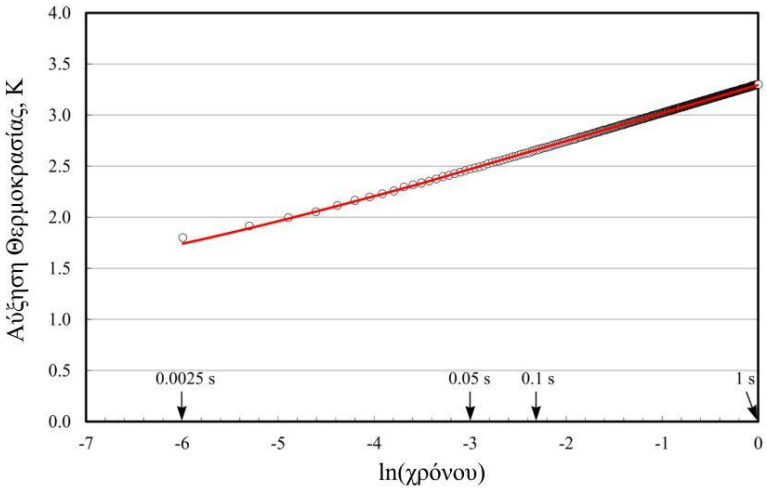


Σχήμα 4 Ποσοστιαίες αποκλίσεις της πειραματικής αύξησης της θερμοκρασίας από την τιμή που λαμβάνεται από την γραμμική προσαρμογή του αναλυτικού μοντέλου, ως προς το χρόνο (νερό στους 297.5 K)

Στο Σχήμα 4 δείχνονται οι χρονικές αποκλίσεις της πειραματικής θερμοκρασιακής αύξησης από το αναλυτικό μοντέλο. Η συμφωνία είναι ±0.05 % (σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%), και η θερμική αγωγιμότητα του νερού που μετρήθηκε είναι 605.6 $mW \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ στους 297.5 K. Η αβεβαιότητα της τιμής που μετρήθηκε με αυτήν την τεχνική είναι 0.5 % (σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95%) - πλήρης ανάλυση δίνεται στη βιβλιογραφία (Charitidou et al. 1987). Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή αναφοράς της θερμικής αγωγιμότητας του νερού στους 297.5 K που προτείνεται από την International Union of Pure and Applied Chemistry και την International Association for Transport Properties είναι 605.5 ±0.2% $mW \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Huber et al. 2012), δηλαδή 0.02 % από την παρούσα μέτρηση.

4.2 Η λύση μέσω της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων

Το Σχήμα 5 απεικονίζει αφενός την πειραματική θερμοκρασιακή αύξηση της ανωτέρω μέτρησης, χωρίς να εφαρμοστεί καμία διόρθωση, αφετέρου τη θερμοκρασιακή αύξηση που προκύπτει από την επίλυση των 3 εξισώσεων Fourier (για το σύρμα, την μόνωση και το ρευστό) σε όλο το εύρος της μέτρησης (από 0.0025 σε 0.1 s).



Σχήμα 5 Θερμοκρασιακή αύξηση συναρτήσει του χρόνου (νερό στους 297.5 K): (ο) πειραματικά μη διορθωμένα σημεία, (—) FEM.

Παρατηρείται ότι:

- Η συμφωνία μεταξύ των πειραματικών τιμών και αυτών που υπολογίστηκαν με την επίλυση FEM, είναι τέλεια σε όλο το εύρος του χρόνου από 0.0025 s σε 1 s.
- Η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας που υπολογίστηκε με την μέθοδο FEM, είναι 604.0 $mW \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ στους 297.5 K, με απόλυτη ακρίβεια 0.5%.
- Η ανωτέρω τιμή είναι στο 0.2 % τόσο από την τιμή αναφοράς που προτείνεται από τις IAPWS-IATP, ήτοι 605.5 $mW \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Huber et al. 2012) όσο και από την πειραματική μας τιμή 605.6 $mW \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

5. Συζήτηση

Το πλήρες σύστημα εξισώσεων μεταφοράς θερμότητας που διέπουν το πείραμα του θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση, μπορεί να λυθεί με ακρίβεια από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, έτσι ώστε η αύξηση της θερμοκρασίας να υπολογίζεται στην χειρότερη περίπτωση με απόκλιση 0.1%, και η θερμική αγωγιμότητα να λαμβάνεται με απόλυτη αβεβαιότητα της τάξεως του 0.5%. Η προσεγγιστική αναλυτική λύση μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς να εισάγει επιπρόσθετο σφάλμα μεταξύ του χρονικού διαστήματος από 0.1 σε 1 s, με αντίστοιχη απόλυτη αβεβαιότητα περίπου 0.5%. Ωστόσο, για να ισχύει αυτό πρέπει να έχουν εφαρμογή οι παρακάτω τέσσερις συνθήκες**:**

1) Και στις δυο περιπτώσεις είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίζεται ότι εκμηδενίζεται η επίδραση λόγω των άκρων των συρμάτων
2) Για να εφαρμοστεί η αναλυτική λύση και να υπολογιστεί η θερμική αγωγιμότητα από την κλίση της γραμμής που συσχετίζει την ιδανική θερμοκρασιακή αύξηση με το λογάριθμο του χρόνου, πρέπει το σύρμα (συμπεριλαμβανομένης της μόνωσης) να είναι

λεπτό, διαμέτρου μικρότερης των 30 μm, ώστε να ισχύουν οι διορθώσεις του ιδανικού μοντέλου και να μην εισάγεται σημαντικό σφάλμα

3) Πρέπει να εφαρμόζονται τιμές θερμοκρασιακής αύξησης μικρότερες από 4 K, ώστε να μειωθεί η επίδραση της συναγωγής στον πειραματικό χρόνο του 1 s και τέλος,
4) Να χρησιμοποιούνται μονωμένα σύρματα για τις μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας ηλεκτρικά αγώγιμων ρευστών.

Έχοντας υπόψη τις ανωτέρω αναγκαίες συνθήκες μετρήσεων ακριβείας της μεθόδου θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση, μπορούμε να επανεξετάσουμε τις μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 1.

Πίνακας 1 Πολυστρωματικοί νανοσωλήνες άνθρακα σε νερό

1ος Συγγραφέας	Έτος Δημ.	Εξωτερική διάμετρος (nm)	Μήκος (μm)	Χρησιμοποιηθείσα Τεχνική[a]	Διάμετρος σύρματος (μm)	Αβεβαι-ότητα (%)
Estellé	2015	9-11	1.5	TNP	-	5
Sadri	2014	20-30	10-30	TNP	-	5
Madhesh	2014	na	na	Flash	-	na
Gu	2013	10-15	0.6-20	THW-2Pt ins	50	2
Indhuja	2013	na	5-15	TNP	-	5
Ruan	2012	10–30	10-30 nm	TNP	-	5
Walvekar	2012	20	35	TNP	-	5
Nasiri	2012	<10, 10-20	10	TNP	-	5
Aravind	2011	na	1-3	TSTHW	-	na
Phuoc	2011	20-30	10-30	TNP	-	5
Xie	2011	na	na	TSHW-1Pt ins.	50 (cal)	1
Ponmozhi	2010	50-80	10-20	TNP	-	5
Cherkasova	2010	11-38	0.5-2	TNP	-	5
Garg	2009	10-20	0.5-40	TNP	-	5
Pantzali	2009	8-15	10-50	THW-2Ta anod.	25	<2
Chen	2008	15	30	TSHW-1Cu ins	50	<1
Glory	2008	10-120	1.7	SSCC	-	
Jana	2007	10	5-10	THPr	-	na
Hwang	2007	10-30	10-50	THW-1Pt ins.	76	na
Zhang	2006	150	10	TSHW-1Pt ins.	20	1
Ding	2006	na	na	TNP	-	5
Hwang	2006	10-30	10-50	THW-1Pt ins.	76	na
Assael	2005	130	40	THW-2Ta anod.	25	<2
Assael	2004	100	50	THW-2Ta anod.	25	<2
Wen	2004	20-60	20-30	TNP	-	3
Xie	2003	15	30	THW-1Pt ins	76.2	<0.5

[a] anod: anodized; ins: insulated; Flash: laser flash heater; SSCC: steady-state coaxial cylinders; Son: Sonication; THPr: Transient hot probe; THW: transient hot wire; TNP: transient needle probe; TSHW: transient short hot wire; TSTHW: transient short and thick hot wire; 1Cu: 1 copper wire; 1Pt: 1 platinum wire, 2Ta: 2 tantalum wires.

Ο Πίνακας 1 απεικονίζει λεπτομερώς τις τεχνικές όπως αυτές χρησιμοποιήθηκαν από τους ερευνητές για την μέτρηση της θερμικής αγωγιμότητας νερού με MWCNT. Εξετάζοντας τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν, διαπιστώνονται τα εξής:

- Μετρήσεις θερμικής αγωγιμότητας που ελήφθησαν από εμπορικά διαθέσιμες συσκευές, οι οποίες δεν διαθέτουν πλήρες θεωρητικό μοντέλο για την ακριβή

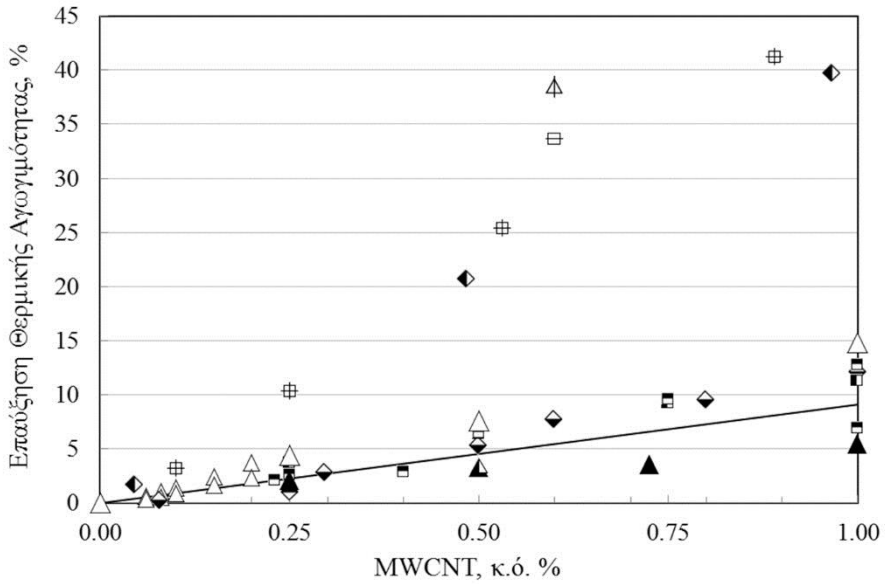
γεωμετρία τους (Wen and Ding 2004, Ding et al. 2006, Garg et al. 2009, Cherkasova and Shan 2010, Ponmozhi et al. 2010, Phuoc et al. 2011, Nasiri et al. 2012, Ruan and Jacobi 2012, Walvekar et al. 2012, Indhuja et al. 2013, Sadri et al. 2014, Estellé et al. 2015), (Jana et al. 2007), (Madhesh and Kalaiselvam 2014) απορρίπτονται.

- Αγνοούνται επίσης, μετρήσεις οι οποίες ελήφθησαν από όργανα θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση, τα οποία όμως διαθέτουν ένα μικρού μήκους και μεγάλης διαμέτρου σύρμα (Aravind et al. 2011).

Οι υπόλοιπες μετρήσεις έγιναν με την βοήθεια μονωμένων συρμάτων, αλλά μόνο ο Assael et al. (Assael et al. 2004, Assael et al. 2005) και η Pantzali et al. (Pantzali et al. 2009) (οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από την ομάδα του Assael), χρησιμοποίησαν δυο σύρματα για την αποφυγή της επίδρασης των άκρων των συρμάτων.

Η εναπομένουσα εικόνα (Σχήμα 6) είναι απλοποιημένη από την αρχική (Σχήμα 1) και παρατηρείται ότι διαμορφώνονται δυο ομάδες μετρήσεων:

- Η μια ομάδα μετρήσεων αποτελείται από νανοσωματίδια εξωτερικής διαμέτρου μεταξύ 5-80 nm και της οποίας η επαύξηση θερμικής αγωγιμότητας δείχνει να ακολουθεί το μοντέλο Hamilton-Crosser (Hamilton and Crosser 1962). Οι νέες μετρήσεις μας (νερό με MWCNT και 1 % κ.β. μη-ιονικό παράγοντα διασποράς) παρουσιάζουν την παραπάνω συμπεριφορά και βρίσκονται σε συμφωνία με παλαιότερες μετρήσεις της Pantzali et al. (Pantzali et al. 2009).
- Η άλλη ομάδα μετρήσεων, με νανοσωματίδια διαμέτρου μεταξύ 100 και 150 nm, παρουσιάζουν μια εντελώς άλλη συμπεριφορά, η οποία ενδεχομένως να υποδεικνύει την ύπαρξη επιπρόσθετου μηχανισμού μεταφοράς θερμότητας.



Σχήμα 6 Απεικόνιση της επαύξησης της θερμικής αγωγιμότητας του νερού όταν σε αυτό προστίθενται MWCNT, ως προς την συγκέντρωση των MWCNT και διαφορετικής εξωτερικής διαμέτρου. (△) 10-15 nm (Gu et al. 2013), (◭) 8-15 nm (Pantzali et al. 2009), (◆) 15 nm (Chen et al. 2008), (◧) 10-120 nm (Glory et al. 2008), (◆) 10-30 nm (Hwang et al. 2007), (⊞) 150 nm (Zhang et al. 2006), (◧) 10-30 nm (Hwang et al. 2006), (⊟) 130 nm (Assael et al. 2005), (△) 100 nm (Assael et al. 2004), (▬) 15 nm (Xie et al. 2003), (——) (Hamilton and Crosser 1962), (▲) 5-15 nm (△) 50-80 nm, Present work.

6. Συμπεράσματα

Αποδείχθηκε ότι συσκευές θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση μπορούν να παράγουν άριστες μετρήσεις με την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Method-FEM) που περιγράφει πλήρως τη γεωμετρία της συσκευής του θερμαινόμενου σύρματος. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι, μια προσεγγιστική αναλυτική λύση μπορεί να υιοθετηθεί με ανάλογη επιτυχία, μεταξύ του χρονικού διαστήματος 0.04 έως 1 δευτερόλεπτο, με απόλυτη αβεβαιότητα 0.5 %, με την προϋπόθεση ότι ικανοποιούνται συγκεκριμένες συνθήκες.

Στη βάση αυτών των συνθηκών, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μία συσκευή θερμαινόμενου σύρματος σε μη μόνιμη κατάσταση, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση της επαύξησης της θερμικής αγωγιμότητας του νερού όταν προστίθενται πολυ-στρωματικοί νανοσωλήνες άνθρακα. Τα αποτελέσματα αυτών των νέων μετρήσεων επιβεβαιώνουν προηγούμενες διαπιστώσεις σύμφωνα με τις οποίες υπάρχουν σημαντικά σφάλματα στο μεγαλύτερο μέρος της βιβλιογραφίας όσον αφορά τη μέθοδο μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας των νανορευστών.

Βιβλιογραφία

Antoniadis K.D., Tertsinidou G.J., Assael M.J, and Wakeham W.A, "*Necessary Conditions for Accurate, Transient Hot-wire Measurements of the Apparent Thermal Conductivity of Nanofluids are Seldom Satisfied*", Int. J. Thermophys. (in press)

Aravind S.S.J., Baskar P., Baby T.T., Sabareesh R.K., Das S., and Ramaprabhu S., "*Investigation of Structural Stability, Dispersion, Viscosity, and Conductive Heat Transfer Properties of Functionalized Carbon Nanotube Based Nanofluids*", J. Phys. Chem., 115, 16737, 2011

Assael M.J., Antoniadis K.D., and Wakeham W.A., "*Historical Evolution of the Transient Hot-Wire Technique*", Int. J. Thermophys., 31, 1051, 2010

Assael M.J., Chen C.-F., Metaxa I.N., and Wakeham W.A., "*Thermal Conductivity of Suspensions of Carbon Nanotubes in Water*", Int. J. Thermophys., 25, 971, 2004

Assael M.J., Dix M., Gialou K., Vozar L., and Wakeham W.A., "*Application of the Transient Hot-Wire Technique to the Measurement of the Thermal Conductivity of Solids*", Int. J. Thermophys., 23, 615, 2002

Assael M.J., Metaxa I.N., Arvanitidis J., Christofilos D., and Lioutas C., "*Thermal Conductivity Enhancement in Aqueous Suspensions of Carbon Multi-Walled and Double-Walled Nanotubes in the Presence of Two Different Dispersants*", Int. J. Thermophys., 26, 647, 2005

Charitidou E., Dix M., Assael M.J, Nieto de Castro C.A., and Wakeham W.A., "*A Computer-Controlled Instrument for the Measurement of the Thermal Conductivity of Liquids*", Int. J. Thermophys., 8, 511, 1987

Chen L., Xie H., Li Y., and Yu W., "*Nanofluids Containing Carbon Nanotubes Treated by Mechanochemical Reaction*", Thermochim. Acta, 477, 21, 2008

Cherkasova A.S., and Shan J.W., "*Particle Aspect-Ratio and Agglomeration-State Effects on the Effective Thermal Conductivity of Aqueous Suspensions of Multiwalled Carbon Nanotubes*", J. Heat Transfer, 132, 082402, 2010

Ding Y., Alias H., Wen D., and Williams R.A., "*Heat Transfer of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (CNT Nanofluids)*", Int. J. Heat Mass Transfer, 49, 240, 2006

Estellé P., Halelfadl S., and Maré T., "*Thermal Conductivity of CNT Water Based Nanofluids: Experimental Trends and Models Overview*", J. Therm. Engineering, 1, 381, 2015

Garg P., Alvarado J.L., Marsh C., Carlson T.A., Kessler D.A., and Annamalai K., "*Experimental Study on the Effect of Ultrasonication on Viscosity and Heat Transfer Performance of Multi-wall Carbon Nanotube-based Aqueous Nanofluids*", Int. J. Heat Mass Transfer, 52, 5090, 2009

Glory J., Bonetti M., Helezen M., Mayne-L'Hermite M., and Reynaud C., "*Thermal and Electrical Conductivities of Water-Based Nanofluids Prepared with Long Multiwalled Carbon Nanotubes*", J. Appl. Phys., 103, 094309, 2008

Γ.Ι. Τερτσινίδου[1], Κ.Δ. Αντωνιάδης[1], Μ.Ι. Ασσαέλ[1] και W.A. Wakeham[2], [1]Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη 54636, [2]Imperial College, London SW7 2BY, UK

Gu B., Hou B., Lu Z., Wanga Z., and Chen S., "*Thermal Conductivity of Nanofluids Containing High Aspect Ratio Fillers*", Int. J. Heat Mass Transfer, 64, 108, 2013

Hamilton R.L., and Crosser O.K., "*Thermal Conducivity of Heterogeneous two-Component Systems*", I&EC Fundam., 1, 187, 1962

Huber M.L., Perkins R.A., Friend D.G., Sengers J.V., Assael M.J., Metaxa I.N., Miyagawa K., Hellmann R., and Vogel E., "*New International Formulation for the Thermal Conductivity of H_2O*", J. Phys. Chem. Ref. Data, 41, 033102, 2012

Hwang Y., Lee I.K., Lee C.H., Jung Y.M., Cheong S.I., Lee C., Ku B.C., and Jang S.P, "*Stability and Thermal Conductivity Characteristics of Nanofluids*", Thermochim. Acta, 455, 70, 2007

Hwang Y.J., Ahn Y.C., Shin H.S., Kim G.T., Park H.S., and Lee J.K., "*Investigation on Characteristics of Thermal Conductivity Enhancement of Nanofluids*", Curr. Appl. Phys., 6, 1068, 2006

Indhuja A., Suganthi K.S, Manikandan S., and Rajan K.S., "*Viscosity and Thermal Conductivity of Dispersions of Gum Arabic Capped MWCNT in Water: Influence of MWCNT Concentration and Temperature*", J. Taiwan Inst. Chem. Engin., 44, 474, 2013

Jana S., Salehi-Khojin A., and Zhong W.-H., "*Enhancement of Fluid Thermal Conductivity by the Addition of Single and Hybrid Nano-additives*", Thermochim. Acta, 462, 45, 2007

Kestin J., and Wakeham W.A., "*A Contribution to the Theory of the Transient Hot-wire Technique for Thermal Conductivity Measurements*", Physica, 92A, 102, 1978

Madhesh D., and Kalaiselvam S., "*Preparation and Characterization of MWCNT -Water Nanofluids for Heat Transfer Applications*", Int. J. Adv. Mech. Engin., 4, 193, 2014

Nasiri A., Shariaty-Niasar M., Rashidi A.M., and Khodafarin R., "*Effect of CNT Structures on Thermal Conductivity and Stability of Nanofluid*", Int. J. Heat Mass Transfer, 55, 1529, 2012

Pantzali M.N., Mouza A.A., and Paras S.V., "*Investigating the Efficacy of Nanofluids as Coolants in Plate Heat Exchangers (PHE)*", Chem. Eng. Sci., 64, 3290, 2009

Phuoc T.X., Massoudi M., and Chen R.H., "*Viscosity and Thermal Conductivity of Nano-fluids Containing Multiwalled Carbon Nanotubes Stabilized by Chitosan*", Int. J. Therm. Sci., 50, 12, 2011

Ponmozhi J., Gonçalves F.A.M.M., Ferreira A.G.M., Fonseca I.M.A., Kanagaraj S., Martins N., and Oliveira M.S.A., "*Thermodynamic and Transport Properties of CNT-Water Based Nanofluids*", J. Nano Res., 11, 101, 2010

Ruan B., and Jacobi A.M., "*Heat Transfer Characteristics of Multiwall Carbon Nanotube Suspensions (MWCNT) in Intertube Falling-film Flow*", Int. J. Heat Mass Transfer, 55, 3186, 2012

Sadri R., Ahmadi G., Togun H., Dahari M., Kazi S.N., Sadeghinezhad E., and Zubir N., "*An Experimental Study on Thermal Conductivity and Viscosity of Nanofluids Containing Carbon Nanotubes*", Nanoscale Research Letters, 9, 151, 2014

Tertsinidou G., Assael M.J., and Wakeham W.A., "*The Apparent Thermal Conductivity of Liquids Containing Solid Particles of Nanometer Dimensions: A Critique*", Int. J. Thermophys., 36, 1367, 2015

Wakeham W.A., Nagashima A., and Sengers J.V., *Experimental Thermodynamics. Vol. III, Measurement of the Transport Properties of Fluids*, Blackwell Scientific Publications, 1991, London

Walvekar R., Faris I.A., and Khalid M., "*Thermal Conductivity of Carbon Nanotube Nanofluid—Experimental and Theoretical Study*", Heat Transfer - Asian Research, 41, 145, 2012

Wen D., and Ding Y., "*Effective Thermal Conductivity of Aqueous Suspensions of Carbon Nanotubes (Carbon Nanotube Nanofluids)*", J. Thermophys. Heat Transf., 18, 481, 2004

Wu J.T., Assael M.J., and Antoniadis K.D., *Chapter 5.1. History of the Transient Hot Wire, in Experimental Thermodynamics Volume IX: Advances in Transport Properties of Fluids*, RSC Press., 2014, London

Xie H., Lee H., Youn W., and Choib M., "*Nanofluids Containing Multiwalled Carbon Nanotubes and their Enhanced Thermal Conductivities*", J. Appl. Phys., 94, 4967, 2003

Xie H., Yu W., Li Y., and Chen C., "*Discussion on the Thermal Conductivity Enhancement of Nanofluids*", Nanoscale Res. Lett., 6, 124, 2011

Zhang X., Gu H., and Fujii M., "*Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids Containing Spherical and Cylindrical Nanoparticles*", J. Appl. Phys. 100, 044325, 2006

Γ.Ι. Τερτσινίδου[1], Κ.Δ. Αντωνιάδης[1], Μ.Ι. Ασσαέλ[1] και W.A. Wakeham[2], [1]Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, Θεσσαλονίκη 54636, [2]Imperial College, London SW7 2BY, UK

Η ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΣΩΣΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΜΙΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ: ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΝΑΝΟΡΕΥΣΤΩΝ