

Παίζοντας με τις φουσαλίδες: εμβάθυνση σε ένα “απλό” πείραμα μελέτης της ευθύγραμμης ομαλής κίνησης

Αναστάσιος Νέζης

Όλοι όσοι διδάσκουμε Φυσική είτε στη Β΄ Γυμνασίου είτε στην Α΄ Λυκείου, είμαστε λίγο – πολύ εξοικειωμένοι με το πείραμα της φουσαλίδας (Αντωνίου κ.α., 2006, σ. 34): ένας λεπτός σωλήνας από τα όργανα Χημείας ή ένα καλαμάκι, με μήκος περίπου 30 cm κλείνεται και από τις δύο πλευρές με λίγη πλαστελίνη (ή ακόμη καλύτερα με λίγη σιλικόνη), αφού έχουμε βάλει μέσα χρωματιστό νερό, τόσο ώστε να μείνει ένας μικρός κενός χώρος που θα λειτουργήσει ως “φουσαλίδα”. Σημειώνουμε πάνω στον σωλήνα σημάδια (π.χ. ανά 4 cm) με μαρκαδόρο και στη συνέχεια τον τοποθετούμε κεκλιμένα, όπως στη φωτογραφία 1.



Φωτογραφία 1. Η ευθύγραμμη κίνηση μίας φουσαλίδας (Αντωνίου κ.α., 2006, σ. 34)

Μετρώντας τις χρονικές στιγμές διέλευσης της φουσαλίδας από κάθε σημάδι και κάνοντας στη συνέχεια ένα διάγραμμα θέσης – χρόνου υποδεικνύουμε σε πρώτη φάση (για το γυμνάσιο) την ομαλότητα της κίνησης μέσω της ευθείας γραμμής που σχηματίζουν τα πειραματικά δεδομένα στο διάγραμμα. Στη συνέχεια (στο λύκειο) υπολογίζουμε την κλίση αυτής της ευθείας και άρα την ταχύτητα κίνησης της φουσαλίδας.

Η παρατήρηση

Αφορμή για το άρθρο αυτό στάθηκε μια παρατήρηση που προκλήθηκε από την ερώτηση ενός μαθητή στη διάρκεια του μαθήματος. Κάνοντας μετωπικά το παραπάνω πείραμα μέσα σε μια τάξη της Α' λυκείου και έχοντας τις ομάδες των μαθητών να τοποθετούν τους σωλήνες τους σε μια στήλη βιβλίων, διαφορετικού πλήθους βιβλίων για κάθε ομάδα, παρατηρήσαμε αυτό που όλοι περιμέναμε: την αύξηση της ταχύτητας της φυσαλίδας «ανάλογα» με το ύψος της στήλης, δηλαδή «ανάλογα» με την κλίση του σωλήνα.

Κάποιος μαθητής ρωτάει τότε: «Δηλαδή, αν τοποθετήσουμε τον σωλήνα κατακόρυφα θα πάει πιο γρήγορα;» (εννοώντας τη φυσαλίδα). Η απάντησή μου αυθόρμητα ήταν «ναι» και ταυτόχρονα πήρα ένα σωλήνα από ένα πάγκο για να το δείξω. Και ιδού η έκπληξη! Η φυσαλίδα στην κατακόρυφη θέση πήγαινε υπερβολικά αργά, τόσο, όσο σχεδόν και στην πολύ μικρή κλίση που μια ομάδα μαθητών είχε δημιουργήσει με ένα μόνο βιβλίο...

Τα ερωτήματα

Τι συνέβαινε; Μήπως ήταν τυχαίο; Όχι! Αρκετές επαναλήψεις του φαινομένου επιβεβαίωσαν την παρατήρηση. Μήπως η υπόθεση ότι η φυσαλίδα θα κινείται με όλο και μεγαλύτερη ταχύτητα (αυξανόμενης της κλίσης) ισχύει μέχρι και λίγο πριν τις 90° και καταρρέει στις 90° ; Ή μήπως η ταχύτητα αυξάνεται στην αρχή, φτάνει σε μια μέγιστη τιμή και μετά μειώνεται σταδιακά μέχρι τις 90° ; Ποια θα ήταν τότε η γωνία μέγιστης ταχύτητας; Μήπως οι 45° , όπως συμβαίνει για παράδειγμα και με το βεληνεκές μιας πλάγιας βολής; Γιατί η φυσαλίδα εμφανίζει τέτοια συμπεριφορά;

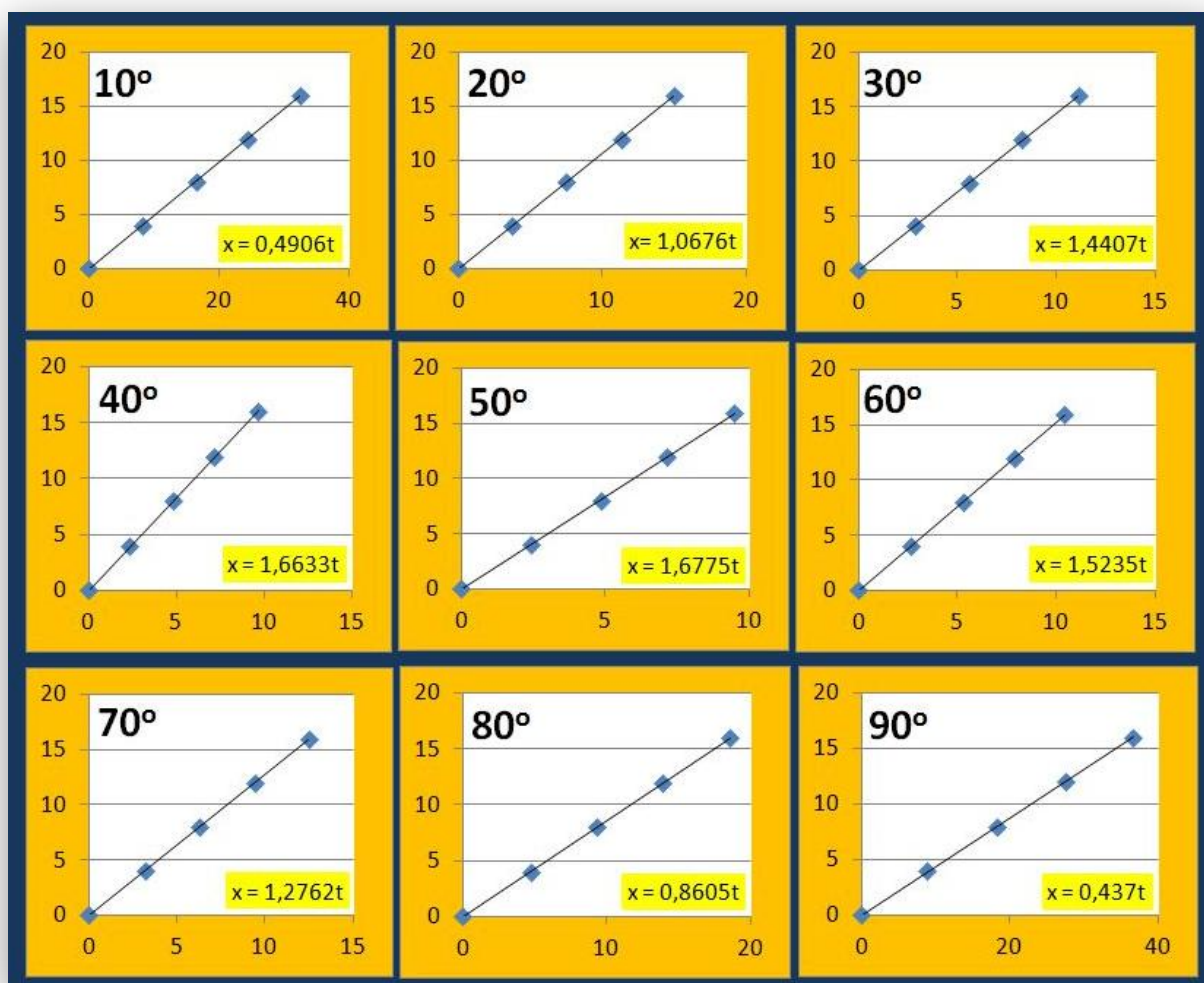
Η διερεύνηση

Για να απαντηθούν όλα αυτά τα ερωτήματα αποφασίστηκε να γίνει μεθοδική διερεύνηση της μεταβολής της ταχύτητας με την κλίση του σωλήνα. Αρχικά κατασκευάστηκε με απλά υλικά (χαρτόνι από μια κούτα και θερμοκόλλα) μία πειραματική διάταξη σταθεροποίησης των σωλήνων σε γωνίες από 10° έως 90° , με βήμα 10° (Φωτογραφία 2).

Στη συνέχεια έγιναν μετρήσεις ταχυτήτων γεμίζοντας τους σωλήνες με νερό στο οποίο διαλύθηκε ελάχιστη ποσότητα στιγμιαίου καφέ για να χρωματιστεί. Για κάθε κλίση πραγματοποιήθηκαν τρία σετ μετρήσεων του χρόνου που απαιτήθηκε για να φτάσει διαδοχικά η φυσαλίδα στις θέσεις $x=4, 8, 12$ και 16 cm και υπολογίστηκε, για κάθε θέση, ο μέσος όρος του χρόνου. Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζονται για τις εννέα διαφορετικές πειραματικές διατάξεις (διαφορετικές γωνίες κλίσεις) οι αναπαραστάσεις των πειραματικών δεδομένων θέσης – χρόνου καθώς και οι αντίστοιχες ευθείες ελαχίστων τετραγώνων¹.



Φωτογραφία 2. α. Η πειραματική διάταξη σταθεροποίησης των σωλήνων στη φάση του σχεδιασμού (αριστερά) και β. ολοκληρωμένη (δεξιά). (Φωτογραφίες του συγγραφέα).



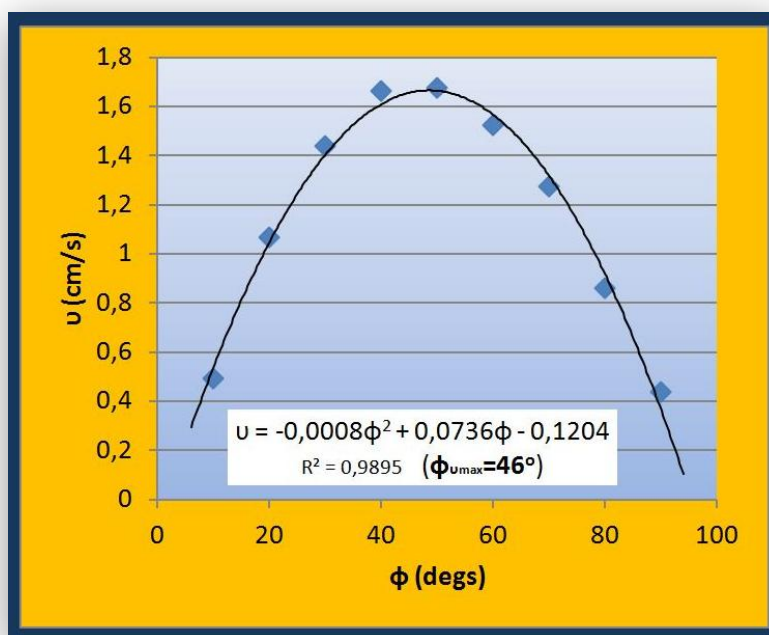
Διάγραμμα 1. Μετρήσεις θέσης - χρόνου για εννιά διαφορετικές γωνίες κλίσης και οι ευθείες ελαχίστων τετραγώνων που τις περιγράφουν.

Από την κλίση κάθε ευθείας ελαχίστων τετραγώνων προκύπτει άμεσα η ταχύτητα της φουσαλίδας σε cm/s. Έτσι, για παράδειγμα, η ταχύτητα της φουσαλίδας για γωνία κλίσης 80° είναι 0,8605 cm/s. Οι ταχύτητες που υπολογίστηκαν με αυτόν τον τρόπο για τις διάφορες γωνίες δίνονται στον Πίνακα 1.

ϕ (deg)	u (cm/s)
10	0,4906
20	1,0676
30	1,4407
40	1,6633
50	1,6775
60	1,5235
70	1,2762
80	0,8605
90	0,437

Πίνακας 1. Οι τιμές της ταχύτητας της φουσαλίδας που μετρήθηκαν για γωνίες κλίσης από 10° - 90° .

Στο Διάγραμμα 2 δίνεται η γραφική αναπαράσταση των δεδομένων του Πίνακα 1 καθώς και η καμπύλη δευτέρου βαθμού (παραβολή) που φαίνεται να ικανοποιούν τα δεδομένα αυτά. Όπως είναι φανερό, η ταχύτητα αυξάνεται, αποκτά μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μειώνεται καθώς η γωνία κλίσης μεταβάλλεται σταδιακά από 10° έως 90° .



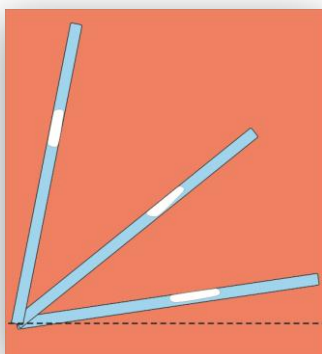
Διάγραμμα 2. Αναπαράσταση της ταχύτητας της φουσαλίδας για γωνίες κλίσης από 10° - 90° και χάραξη καμπύλης παλινδρόμησης.

Για να βρεθεί η γωνία στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη ταχύτητα μηδενίστηκε η πρώτη παράγωγος της συνάρτησης δευτέρου βαθμού που προέκυψε από την καμπύλη παλινδρόμησης. Η τιμή της γωνίας που προέκυψε είναι $\varphi=46^\circ$.

Μεταβάλλοντας το είδος του υγρού

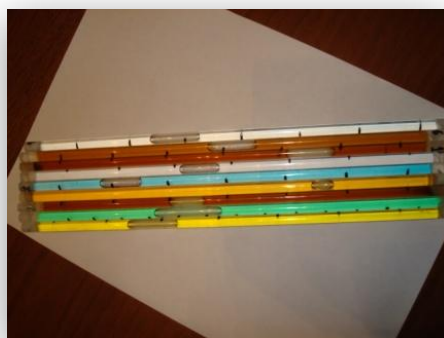
Μπορεί να θεωρηθεί αυτό το αποτέλεσμα ως γενικό συμπέρασμα; Άραγε η ταχύτητα μεγιστοποιείται όταν η γωνία είναι περίπου 45° σε κάθε περίπτωση, για διαφορετικού μεγέθους φυσαλίδες ή για διαφορετικά υγρά;

Για να ελεγχτεί καταρχήν αν υπάρχει εξάρτηση της ταχύτητας από το μέγεθος της φυσαλίδας παρατηρήθηκε προσεκτικά το σχήμα της φυσαλίδας καθώς αυξανόταν η κλίση (πράγμα όχι και τόσο εύκολο, άρα όχι και τόσο ακριβές). Η εικόνα που παρατηρήθηκε αποτυπώνεται γραφικά στο Σχήμα 1, για μικρή, μεσαία και μεγάλη κλίση. Όπως φαίνεται, σε μικρές κλίσεις η φυσαλίδα ήταν μακρόστενη και άφηνε αρκετό υγρό να ρέει από κάτω της. Σε μεσαίες κλίσεις έπαιρνε ένα «σφηνοειδές» σχήμα στο οποίο παρατηρήθηκε, με τη βοήθεια των μικροσωματιδίων του στιγμιαίου καφέ, γρήγορη ροή του υγρού στο κάτω μέρος της. Στις μεγάλες κλίσεις τέλος, η φυσαλίδα είχε το μικρότερο μήκος της, καθώς καταλάμβανε σε διατομή όλη τη διαθέσιμη διατομή του σωλήνα και η ροή του υγρού γινόταν από τα πλάγια με μεγάλη δυσκολία.

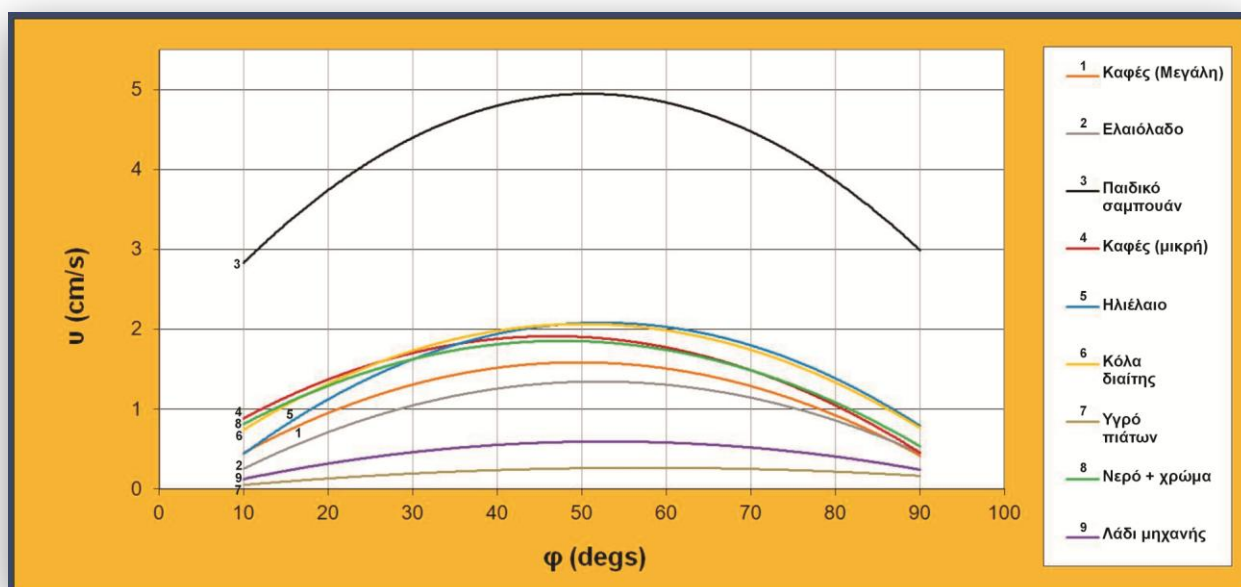


Σχήμα 1. Γραφική αναπαράσταση του σχήματος και του μεγέθους της φυσαλίδας όπως έγιναν αντιληπτά για διάφορες κλίσεις του σωλήνα.

Για να μελετηθεί η επίδραση του είδους του υγρού στην ταχύτητα της φυσαλίδας φτιάχτηκαν εννέα επιπλέον σωλήνες με διαφορετικά υγρά (Φωτογραφία 3). Ακολουθώντας την πειραματική πορεία που περιγράφηκε παραπάνω και ύστερα από πάρα πολλά πειράματα² και πάρα πολλές μετρήσεις (ο αριθμός τους πλησίασε τις 1000) προέκυψε το Διάγραμμα 3. Σε αυτό αναπαριστάται η ταχύτητα της φυσαλίδας σε συνάρτηση με τη γωνία κλίσης του σωλήνα για τα εννέα διαφορετικά υγρά.



Φωτογραφία 3. Εννέα σωλήνες γεμισμένοι με διαφορετικά υγρά και διαφορετικού μεγέθους φουσαλίδες.
(Φωτογραφία του συγγραφέα).



Διάγραμμα 3. Η καταγραφείσα εξάρτηση της ταχύτητας της φουσαλίδας από τη γωνία κλίσης του σωλήνα για εννέα διαφορετικά υγρά.

Όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 3 η συμπεριφορά όλων των φουσαλίδων είναι παρόμοια, με ελαφρές διαφοροποιήσεις ως προς την εξάρτηση της ταχύτητας από τη γωνία και μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις ως προς το μέτρο της ταχύτητας. Η ταχύτητα αυξάνεται μέχρι μια ορισμένη γωνία και στη συνέχεια μειώνεται πάλι. Φαίνεται ότι υπάρχει μία τάση η μέγιστη ταχύτητα να λαμβάνει χώρα για γωνίες ελαφρώς μεγαλύτερες από 45° και αρκετά κοντά στις 50° . Αντίστοιχα, τα μέτρα της ταχύτητας διαφοροποιείται αισθητά για διαφορετικά υγρά, παρουσιάζοντας τη μεγαλύτερη τιμή για το παιδικό σαμπουάν και τη μικρότερη για το υγρό πιάτων.

Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Η διερεύνηση του φαινομένου που μελετήθηκε ήταν αυστηρά πειραματική αφήνοντας ανοικτά και αναπάντητα πολλά ερωτήματα. Ενδεικτικά:

1. Γιατί αυξομειώνεται η ταχύτητα; Πώς σχετίζεται με το σχήμα της φυσαλίδας και την παραμόρφωσή της, καθώς αυξάνεται η γωνία;
2. Τελικά από τι εξαρτάται η γωνία μέγιστης ταχύτητας και πόση είναι αυτή; Είναι σταθερή για όλα τα υγρά ή εξαρτάται με κάποιον τρόπο από τις ιδιότητές τους;
3. Για το ίδιο υγρό πώς εξαρτάται η σχέση της ταχύτητας της φυσαλίδας με τη γωνία κλίσης από το μέγεθος – μήκος της φυσαλίδας;
4. Για το ίδιο μέγεθος φυσαλίδας πώς εξαρτάται η σχέση της ταχύτητας της φυσαλίδας με τη γωνία κλίσης από τη μεταβολή στην πυκνότητα ή/και το ιξώδες του υγρού;

Αναλυτικές μελέτες για την κίνηση της φυσαλίδας έχουν επιχειρήσει να περιγράψουν το θεωρητικό πλαίσιο του φαινομένου που περιγράφηκε εδώ, υπό το πρίσμα της μηχανικής των ρευστών. Οι μελέτες αυτές έχουν δείξει ότι η κίνηση της φυσαλίδας εξαρτάται από πλήθος παραγόντων (Zukoski, 1966; Bozzano & Dente, 2001; Clanet et al., 2004; Glauser & Wickenhauser, 2009; Hor et al., 2011): τη σχέση διαμέτρου του σωλήνα με το μήκος της φυσαλίδας, τη σχέση του υλικού του σωλήνα με το είδος του υγρού, το ιξώδες, την επιφανειακή τάση, το σχήμα της διατομής του σωλήνα και φυσικά την κλίση του σωλήνα.

Είναι μάλλον εντυπωσιακό πόση βαθιά και δύσκολη Φυσική μπορεί να βρίσκεται πίσω από τόσο “απλά” και εύκολα πειράματα. Αρκεί μία ερώτηση ή μία παρατήρηση ενός μαθητή για να αναδείξει τον διανοητικό πλούτο που μπορεί να κρύβει η ενασχόληση με καθημερινά πράγματα. Μήπως πρέπει να ακούμε πιο προσεκτικά τους μαθητές μας; Ίσως μας βοηθήσει να γίνουμε καλύτεροι πέρα από τη διδασκαλία μας και στην επιστήμη μας.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ πολύ τον ανώνυμο κριτή της εργασίας για την υπόδειξη των άρθρων που έχουν επιχειρήσει την ανάλυση και την θεωρητική περιγραφή των φαινομένων που περιγράφηκαν στην παρούσα εργασία.

Παραπομπές

1. Βιντεοσκοπημένα στιγμιότυπα των μετρήσεων έχουν αναρτηθεί στη διεύθυνση:
<http://youtu.be/Wy9YVFY77CY>
2. Όλες οι μετρήσεις και αναλυτικοί πίνακες και διαγράμματα έχουν αναρτηθεί στη διεύθυνση:
http://issuu.com/tasosne/docs/bubble_s_velocity

Βιβλιογραφία

- Clanet, C., Heraud, P., Searby, G. (2004). *On the motion of bubbles in vertical tubes of arbitrary cross-sections: some complements to the Dumitrescu-Taylor problem*, J. Fluid Mech., vol. 519, pp. 359-376.
- Hor, N., Hua, J., Lawrence, C., Spelt, P. (2011). *Numerical simulation of large bubbles in channels using a front-tracking method*, 8th Inter. Conference on CFD in Oil & Gas, Metallurgical and Process Industries, SINTEF/NTNU, Trondheim Norway, 21-23 June 2011.
- Zukoski, E.E. (1966). *Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes*, J. Fluid Mech. vol. 25, part 4, pp. 821-837.
- Αντωνίου, Καμπούρης Κ., (2006). Φυσική της Β' Γυμνασίου. Διαθέσιμο στη διεύθυνση: <http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGYM-B200/455/2985,11970/>
- Glauser, S., Wickenhauser, M. (2009). *Bubble Movement in Downward-inclined Pipes*, J. of Hydraulic Engineering, Nov. 2009, 135, pp. 1012-1015.
- Bozzano, G., Dente, M. (2001). *Shape and terminal velocity of single bubble motion: a novel approach*, Computer and Chemical Engineering 25, pp. 571-576.



Ο Τάσος Νέζης ζει και εργάζεται ως εκπαιδευτικός της Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης στη Σαλαμίνα. Τα ενδιαφέροντά του κινούνται γύρω από την εισαγωγή του πειράματος μικρής διάρκειας στην καθημερινή σχολική πραγματικότητα. Τα τελευταία χρόνια ασχολείται με προπονήσεις μαθητικών ομάδων για τους διαγωνισμούς EUSO. Διατηρεί το κανάλι www.youtube.com/tasosne