

Πειράματα με τη χρήση νέων τεχνολογιών στο εργαστήριο Φυσικής: *Ελεύθερη πτώση σώματος*

Ιωάννης Α. Σιανούδης

Εργαστήριο Φυσικής, Τμήμα Φυσικής-Χημείας & Τεχνολογίας Υλικών,
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, ΤΕΙ Αθήνας,
Αγ. Σπυρίδωνος, 12210 Αιγάλεω, e-mail: jansian@teiath.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την περιγραφή μιας εργαστηριακής άσκησης, ενός απλού πειράματος φυσικής, με αφορμή το οποίο γίνεται για εκπαιδευτικούς σκοπούς η παρακολούθηση, η καταγραφή και η μελέτη της χαρακτηριστική κίνησης σώματος που διαγράφει πορεία «ελεύθερης πτώσης». Η υλοποίηση του πειράματος βασίζεται σε μια απλή διάταξη και σε μια σύγχρονη μετρητική τεχνολογία (διασυνδέτης, αισθητήρας, υπολογιστής). Η συλλογή, επεξεργασία και παρουσίαση των πειραματικών δεδομένων, καθώς και ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων επιτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων, αυξάνουν την δυνατότητα κατανόησης του φυσικού φαινομένου και αποτελούν ως εκ τούτου μια ιδιαίτερα χρήσιμη εκπαιδευτική διαδικασία.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

ελεύθερη πτώση σώματος, ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση, επαγωγική τάση, Excel, διασύνδεση με PC

Εισαγωγή

Μια συνεχής προσπάθεια για εκσυγχρονισμό των μέσων, εργαλείων και μεθόδων που χρησιμοποιούνται έχει ήδη ένα θετικό αντίκτυπο και στο εργαστήριο Φυσικής, στην αναβάθμιση του ρόλου και της συμβολής του στην εκπαιδευτική διαδικασία. Τα σύγχρονα εργαστήρια έχουν εισαγάγει και υιοθετήσει τις τεχνολογίες της πληροφόρησης, εξελιγμένα εποπτικά μέσα και νέες παιδαγωγικές απόψεις, ώστε να καταστήσουν αυτά πιο ελκυστικά για τους σπουδαστές, αποδοτικά στην κατανόηση και εμπέδωση της επιστημονικής

γνώσης και τεχνολογίας, συνδυάζοντας παραδοσιακά πειράματα με βοηθήματα της σύγχρονης τεχνολογίας, τόσο στην διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος, όσο και στην επεξεργασία των δεδομένων και στη διατύπωση συμπερασμάτων.

Σ' αυτό το πλαίσιο εμπίπτει η παρούσα εργασία, με την οποία προτείνεται μια εργαστηριακή άσκηση, ως ένα παράδειγμα εφαρμογής σύγχρονων τεχνολογιών της πληροφόρησης στη διδασκαλία της Φυσικής. Συγκεκριμένα, το πείραμα όπως έχει σχεδιαστεί επιτρέπει στον σπουδαστή να παρακολουθήσει και να καταγράψει το φαινόμενο της «ελεύθερης πτώσης», προσδιορίζοντας τα χαρακτηριστικά της κίνησης ενός σώματος που πέφτει, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην διερευνητική διάσταση του πειράματος. Ο σπουδαστής προτρέπεται να ασχοληθεί με την αρχή λειτουργίας της διάταξης, την κατανόηση και εξοικείωση με την χρησιμοποιούμενη τεχνολογία των μετρήσεων, την επεξεργασία των δεδομένων και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων και τέλος την ίδια την μελέτη του φαινομένου.

Η παρακολούθηση της κίνησης ενός σώματος που κινείται κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, ενώ αφήνεται ελεύθερο να πέσει και ο προσδιορισμός της επιτάχυνσης του, αποτελεί ένα σύννηθες πείραμα στα εκπαιδευτικά εργαστήρια φυσικής, αρκετά προσφιλές και εντυπωσιακό. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι και έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες τεχνικές^{1,2,3}. Στην άσκηση που παρουσιάζεται εδώ προτείνεται μια ενδιαφέρουσα πειραματική διάταξη, η οποία διευκολύνει σημαντικά τόσο από παιδαγωγική άποψη στην κατανόηση της πειραματικής διαδικασίας, όσο και στο ότι οι ίδιες οι μετρήσεις γίνονται με ακρίβεια και οδηγούν έτσι σε ασφαλή συμπεράσματα.

Θεωρία

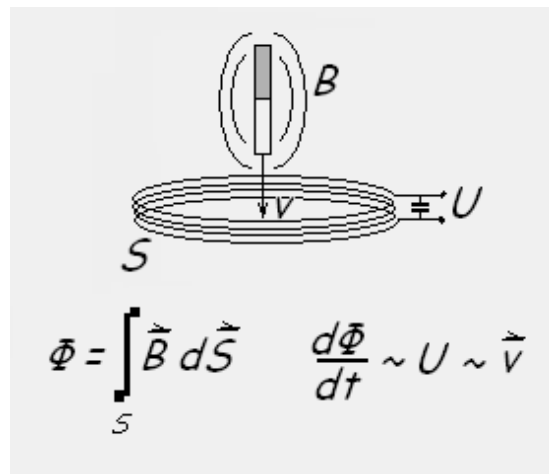
Η χαρακτηριστική κίνηση σώματος που αφήνεται ελεύθερο να πέσει από κάποιο ύψος και κινείται κάτω από την επίδραση της βαρύτητας, ονομάζεται, αν θεωρήσει κανείς αμελητέα κυρίως την συμμετοχή σ' αυτήν της δύναμης της τριβής, *ελεύθερη πτώση*. Το σώμα διαγράφει μια ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση, η οποία περιγράφεται με τις γνωστές σχέσεις που συνδέουν την απομάκρυνση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση με τον χρόνο:

$$s = s_0 + v \cdot t + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$
$$v = v_0 + g \cdot t \quad g = \text{σταθερά} \quad (1,2)$$

Με δεδομένο, ότι η επιτάχυνση g της βαρύτητας είναι μια σταθερά (δεδομένη για τον συγκεκριμένο τόπο, πχ το εργαστήριο μας), η θέση s και η στιγμιαία ταχύτητα v του σώματος που πέφτει εξαρτώνται από τον χρόνο.

Στο συγκεκριμένο πείραμα το σώμα που πέφτει ελεύθερα από συγκεκριμένη θέση και του οποίου παρατηρείται η κίνηση είναι ένας *μαγνήτης*, με επίμηκες σχήμα. Κατά μήκος της πορείας της κίνησής του έχουν διαταχθεί *κυκλικά* και *επίπεδα* πηνία, στα οποία δημιουργείται *εξ επαγωγής* μια σημαντική και μετρήσιμη επαγωγική τάση.

Η επαγωγική τάση U_I που αναπτύσσεται σε κάθε πηνίο είναι ανάλογη της μεταβολής της μαγνητικής ροής Φ , του αριθμού των περιελίξεων του N και του εμβαδού της επιφάνειάς του S . Η πρώτη έχει να κάνει τόσο με την ένταση του μαγνητικού πεδίου B που αναπτύσσεται γύρω του, δηλαδή την μαγνήτιση του μαγνήτη που αφήνει κανείς ελεύθερο να πέσει, όσο επίσης (η μέγιστη τιμή U_{max}) με την ταχύτητα του, ενώ οι υπόλοιποι συντελεστές χαρακτηρίζουν το ίδιο το κάθε πηνίο. (βλέπε το video)

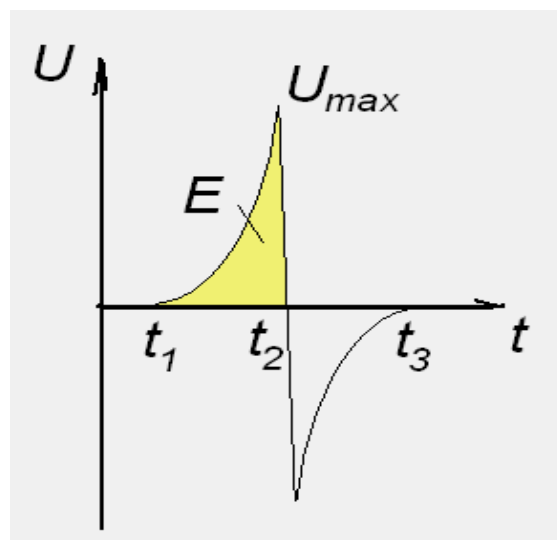


$$U_I = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad (3)$$

ενώ

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

Ως μαγνητική ροή Φ ορίζεται το γινόμενο της μαγνητικής επαγωγής B (ή έντασης του μαγνητικού πεδίου) επί το εμβαδόν της επιφάνειας S , ήτοι διαφορετικά ορίζεται επίσης ως το σύνολο του αριθμού των δυναμικών, μαγνητικών γραμμών που διέρχονται μέσα από το



περίγραμμα του πηνίου.

$$\int_{t_1}^{t_2} U_I \cdot dt = -N \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\Phi}{dt} \cdot dt = -N \cdot (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (5)$$

Η μεταβολή της μαγνητικής ροής λαμβάνει χώρα *αρχικά* κατά την είσοδο του μαγνήτη στο επίπεδο του πηνίου, ανάμεσα στα χρονικά σημεία t_1 και t_2 , όπως φαίνεται από την χρονική εξέλιξη του σήματος, στο διπλανό σχήμα, οπότε και αναπτύσσεται η επαγωγική τάση U .

Ακολουθως, ανάμεσα στα χρονικά σημεία t_2 και t_3 , κατά την έξοδο του μαγνήτη, αναπτύσσεται μια συμμετρική, πλην όμως αντίθετης πόλωσης, επαγωγική τάση, συνέπεια της ίδιας της πολικότητας του μαγνήτη. Προφανώς κατά την ίδια την χρονική στιγμή t_2 που η επαγωγική τάση έχει τιμή μηδέν, ο μαγνήτης βρίσκεται στο κέντρο, μέσα στο επίπεδο του πηνίου.

Το πρώτο σκέλος της σχέσης (5) παριστάνεται δια του εμβαδού E της επιφάνειας κάτω από την καμπύλη (γραμμοσκιασμένη περιοχή στο σχήμα), του οποίου η τιμή εξαρτάται μόνο από την μεταβολή της μαγνητικής ροής $\Delta\Phi$ και όχι από τον ρυθμό της μεταβολής της $d\Phi/dt$.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} U_I \cdot dt = -N \cdot \Phi \quad (6)$$

Η ταχύτητα πτώσης v του μαγνήτη είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολής της μαγνητικής ροής $d\Phi/dt$, ο οποίος επίσης είναι ανάλογος της μέγιστης τιμής $U_{I,max}$ της επαγωγικής τάσης που αναπτύσσεται στο πηνίο (Buell, 1998).

$$v \approx \frac{d\Phi}{dt} \approx U_{I,max} \quad (7)$$

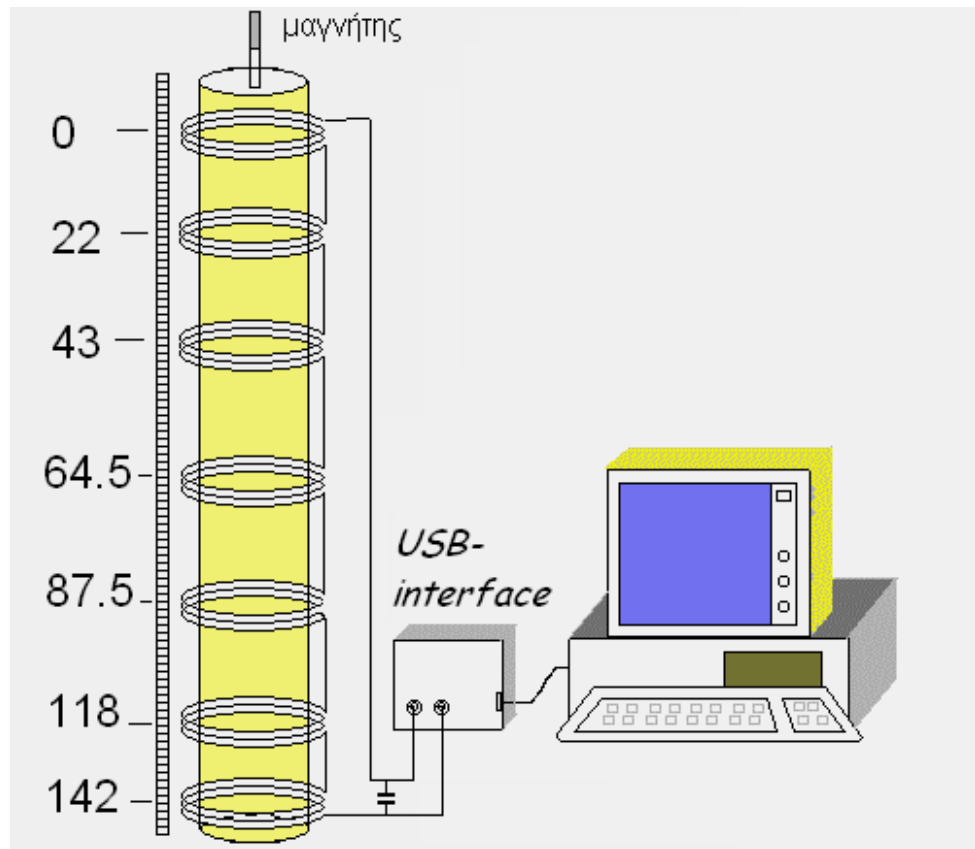
Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται στο πείραμα φαίνεται σχηματικά στην εικόνα 1. Αποτελείται από ένα σύστημα επτά (7) πηνίων, ίδιων στα χαρακτηριστικά τους, τα οποία έχουν συνδεθεί μεταξύ τους σε σειρά. Τα πηνία έχουν διαταχθεί διαδοχικά, κατά μήκος κατακόρυφου διαφανούς σωλήνα από Plexiglas, μήκους 1,5 m και σε διαφορετικό το καθένα ύψος. Τα άκρα τους είναι

συνδεδεμένα με ένα διασυνδότη (interface), ο οποίος μεταφέρει απευθείας στον υπολογιστή τις τιμές μέτρησης της αναπτυσσόμενης σ' αυτά επαγωγικής τάσης. Πρόγραμμα που τρέχει στον υπολογιστή αναλαμβάνει την εισαγωγή, αποθήκευση και την σε πραγματικό χρόνο παρουσίαση των δεδομένων σε μορφή πίνακα τιμών ή σε μορφή γραφικής παράστασης.

Παράλληλα στις εισόδους του διασυνδότη συνδέει κανείς επίσης έναν πυκνωτή πχ $C = 10 \mu\text{F}$, για την μείωση της στάθμης του θορύβου που έχει το σήμα εισόδου.

Τα χαρακτηριστικά κάθε πηνίου είναι: χάλκινο σύρμα, διατομής 0.7 mm, 100 περιελίξεων και εσωτερικής διαμέτρου βρόχου 10 cm. Τα πηνία που χρησιμοποιήθηκαν αποτελούν απλές ιδιοκατασκευές. Τυλίχθηκαν με το χέρι και παρουσιάζουν μεταξύ τους, ως προς τα χαρακτηριστικά τους, μικρές αναπόφευκτες, πλην όμως αμελητέες για το πείραμα αποκλίσεις.



Εικόνα 1. : Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης

Το σώμα που αφήνει κανείς με το χέρι να πέσει είναι ένας μικρός, επιμήκης μαγνήτης ($l = 5 \text{ cm}$). Οι θέσεις των πηνίων, οι μεταξύ τους αποστάσεις, επιλέχθηκαν τυχαία.

Στην διάταξη αυτή χρησιμοποιήθηκε διασυνδέτης και λογισμικό από το εμπόριο. Πρόκειται για τον διασυνδέτη Pasport USB-Link (PS-2100) σε σύνδεση με τον αισθητήρα τάσης/έντασης (PS-2115) της εταιρείας Pasco, καθώς επίσης το λογισμικό DataStudio 1.9 της ίδιας εταιρείας.

Εύκολα βεβαία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην καταγραφεί του σήματος ένας ψηφιακός παλμογράφος ή ένας οποιοδήποτε διασυνδέτης, datalogger, που υπάρχει ήδη στο εργαστήριο Φυσικής ή εύκολα μπορεί ακόμη και να κατασκευαστεί.

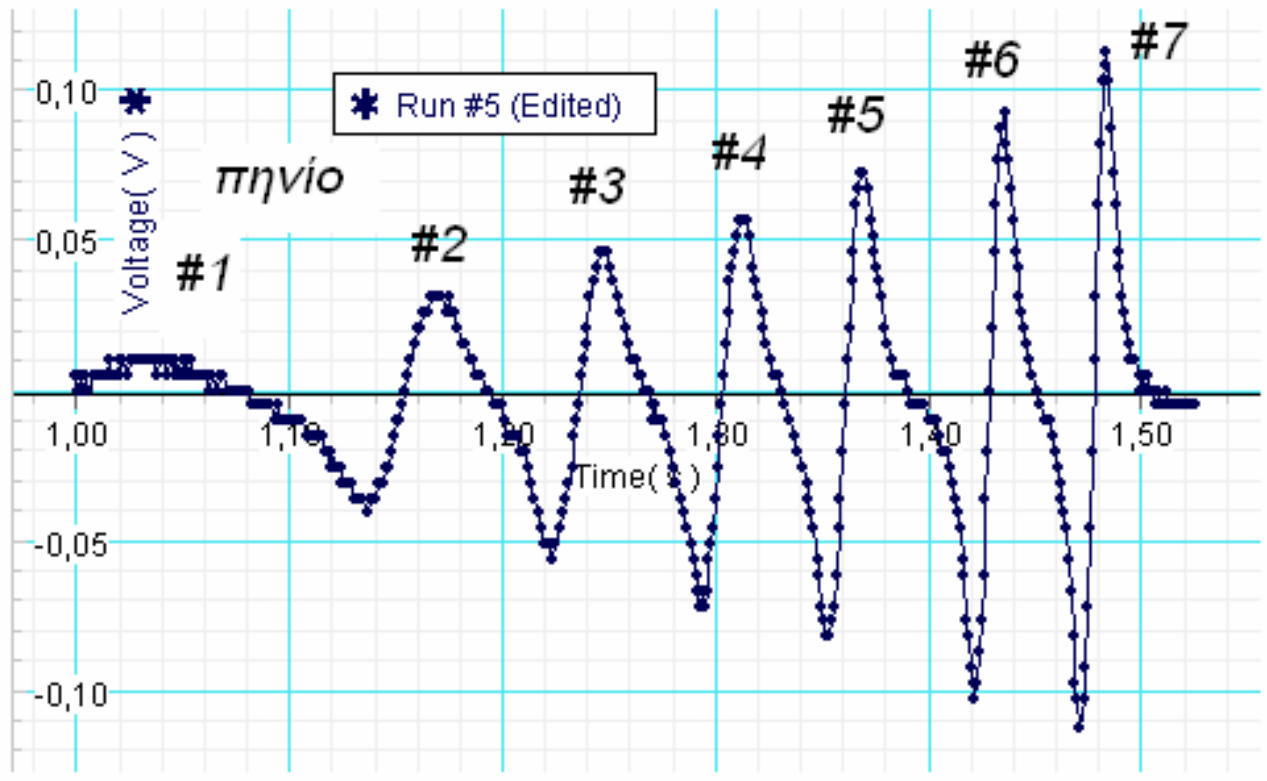
Στην διάταξη προβλέπεται σε επόμενη ανάπτυξη και βελτίωση της να προστεθεί, σε επόμενη φάση, η δυνατότητα άντλησης του αέρα, για την εξασφάλιση συνθηκών πραγματικής «ελεύθερης πτώσης». Επίσης προβλέπεται η δυνατότητα πτώσης όχι μόνο μαγνητών αλλά και οποιοδήποτε μεταλλικού σώματος, εφ' όσον στα ίδια τα πηνία, με την δίοδο ηλεκτρ. Ρεύματος, έχει προηγουμένα δημιουργηθεί μαγνητικό πεδίο, το οποίο αντίστοιχα διαταράσσεται.

Πειραματική διαδικασία

Μετρήσεις

Μέσα από το πρόγραμμα συλλογής δεδομένων μέτρησης επιλέγεται ο ρυθμός δειγματοληψίας να είναι αρκούντως επαρκής, ώστε να καταγραφούν πιστά οι επιμέρους κορυφές στο σήμα, ιδίως προς το τέλος του, όταν το σώμα έχει ήδη αποκτήσει σχετικά μεγάλη ταχύτητα. Η μέτρηση που φαίνεται στην εικόνα 2 έχει παρθεί με ταχύτητα δειγματοληψίας 1000 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο.

Στο συγκεκριμένο πείραμα και με την σχεδίαση της διάταξης απαλλάσσεται κανείς από τα προβλήματα α) του ταυτοχρονισμού και β) της μέτρησης της αρχικής θέσης εκκίνησης του πίπτοντος σώματος, τα οποία αντιμετωπίζει κανείς συνήθως στα αντίστοιχα εκπαιδευτικά πειράματα «ελεύθερης πτώσης» σώματος². Τα επτά πειραματικά δεδομένα, ως ζεύγη τιμών «απόστασης και χρόνου», είναι αρκετά, ώστε να αποδώσουν στην γραφική παράσταση την μαθηματική σχέση που τα συνδέει: η καμπύλη που πιστά προσαρμόζεται (best fit), όπως φαίνεται στην εικόνα (3), είναι ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού, αντίστοιχο της σχέσης (1).



Εικόνα 2. : Η γραφική παράσταση του σήματος (επαγωγική τάση του συστήματος των επτά πηνίων στον χρόνο), όπως λήφθηκε μέσα από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την συλλογή των δεδομένων.

Τα εμβαδά των επιφανειών που περικλείονται κάτω από την κάθε κορυφή είναι ίσα μεταξύ τους, αφού η τιμή τους εξαρτάται μόνο από την μεταβολή της μαγνητικής ροής (σχέση 6), γεγονός που μπορεί επίσης εύκολα με την χρήση ενός λογισμικού γραφικών παραστάσεων, όπως πχ το Origin, να επιβεβαιωθεί. Έτσι στον βαθμό που μικρύνει η χρονική διάρκεια του σήματος της κορυφής, μεταβάλλεται το ύψος της εν λόγω κορυφής με αποτέλεσμα:

Το πλάτος της κάθε κορυφής (η μέγιστη τιμή U_{max}), θετικό ή αρνητικό, εφ' όσον το σήμα είναι συμμετρικό, αποτελεί μέτρο της στιγμιαίας ταχύτητας του σώματος για την συγκεκριμένη θέση. Έτσι αναλύοντας το πλούσιο σε πληροφορίες ελκυστικό και καλαίσθητο σήμα της μέτρησης και κάνοντας μια απαραίτητη βαθμονόμηση, μπορεί να εξάγει κανείς επιπλέον τις επίσης χρήσιμες σχέσεις $v =$

$f(t)$ και $v=f(s)$, οι οποίες περιγράφουν με εντυπωσιακή πληρότητα την χαρακτηριστική κίνηση της ελεύθερη πτώσης σώματος.

Επεξεργασία μετρήσεων

ι) προσδιορισμός της επιτάχυνσης της βαρύτητας

Στον πίνακα I παρατίθενται οι πειραματικές τιμές αντίστοιχες της απόστασης και του χρόνου, όπως εξάχθηκαν από το πρωτογενές σήμα της μέτρησης (εικόνα 2).

Πίνακας τιμών I		
Αριθμός πηνίου	ύψος h σε [m]	χρόνος t σε [s]
1	0	0
2	0,22	0,174
3	0,43	0,256
4	0,645	0,323
5	0,875	0,381
6	1,18	0,449
7	1,42	0,4975

Οι πειραματικές τιμές του χρόνου συλλέγονται εύκολα, διαβάζοντας την θέση του κέρσορα στην γραφική παράσταση (εικόνα 2), όταν η επαγωγική τάση στο σήμα, αντίστοιχη κάθε πηνίου, γίνει μηδέν, κατά την μετάβασή του από τις θετικές στις αρνητικές τιμές του (χρονικό σημείο t_2). Η θέση κάθε πηνίου, ήτοι η απόσταση του από την αρχή του σωλήνα προσδιορίζεται με ακρίβεια χιλιοστού, στο μέσον του πηνίου, με τη βοήθεια μετροταινίας.

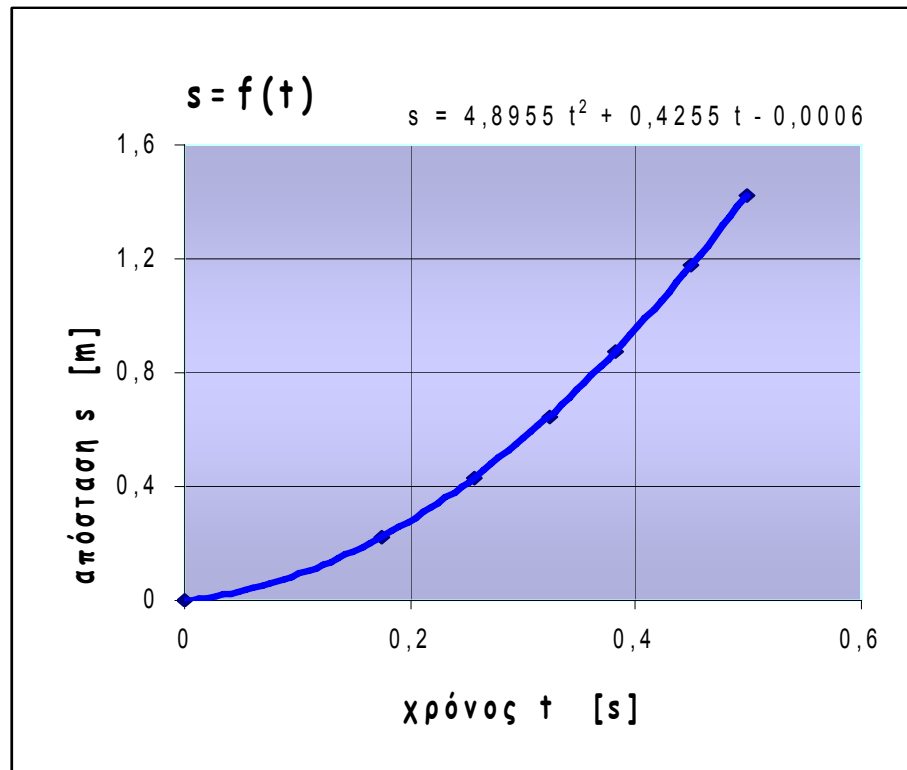
Με τη βοήθεια του Excel⁵ παραστάθηκε γραφικά η σχέση του ύψους (απόσταση) με τον χρόνο και προέκυψε η γραφική παράσταση στην εικόνα (3).

Στο ίδιο πρόγραμμα, αφού παρασταθούν τα πειραματικά σημεία γραφικά, χρησιμοποιείται η επιλογή «προσθήκη γραμμή τάσης» με την επιλογή «προβολή εξίσωσης στο γράφημα» για την εμφάνιση της μαθηματικής της εξίσωσης, ώστε να βρεθεί υπολογιστικά η καλύτερα προσαρμοζόμενη καμπύλη (best fit). Στην προκειμένη περίπτωση επελέγη ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού με πολύ καλά

αποτελέσματα, το οποίο θυμίζει και περιγράφει ικανοποιητικά την σχέση (1). Από τις παραμέτρους της προκύπτει, ότι η επιτάχυνση της βαρύτητας έχει την τιμή:

$$\frac{1}{2} g = 4,896 \text{ m/s}^2 \Rightarrow g = 9,78 \text{ m/s}^2$$

Εικόνα 3.: Γραφική παράσταση των τιμών του πίνακα I με την καλύτερα προσαρμοσμένη καμπύλη και την έκφραση της μαθηματικής σχέσης που την περιγράφει



ii) προσδιορισμός της ταχύτητας

Η τιμή της στιγμιαίας ταχύτητας σε κάθε θέση της τροχιάς του κινητού βρίσκεται από το πλάτος της κάθε κορυφής, θετικής ή αρνητικής (εικόνα 2), εφ' όσον γίνει πιο πριν μια απλή βαθμονόμηση, ως εξής: Αναζητείται η σχέση αναλογίας που συνδέει το πλάτος του σήματος (μέγιστη τιμή U_{max}) με την ταχύτητα. Γι' αυτό αρκούν το πολύ τρία ζεύγη τιμών μέγιστης τιμής τάσης (πλάτους σήματος) και γνωστής ταχύτητας v .

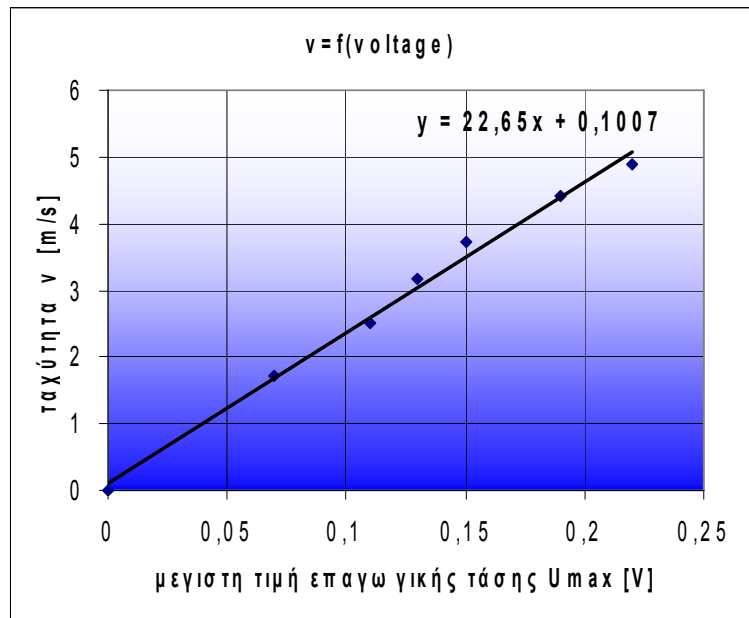
Αν αφεθεί ο μαγνήτης να πέσει από συγκεκριμένο σημείο, έστω $s_0 = 0$ και πραγματοποιηθεί η μέτρηση, τότε η ταχύτητα στις θέσεις τριών επιλεγμένων πηνίων, πχ 3° , 5° και 7° , μπορεί να υπολογιστή από την σχέση (1), γνωρίζοντας από το πείραμα τον χρόνο που μεσολάβησε. Κάνοντας στην συνέχεια την γραφική

παράσταση $U_{max} = f(v)$ θα προκύψει μια ευθεία, της οποίας η τιμή της κλίσης που εύκολα υπολογίζεται, μας δίνει τον συντελεστή αναλογίας ή μετατροπής κάθε τιμής πλάτους σήματος U_{max} σε αντίστοιχες τιμές ταχύτητας.

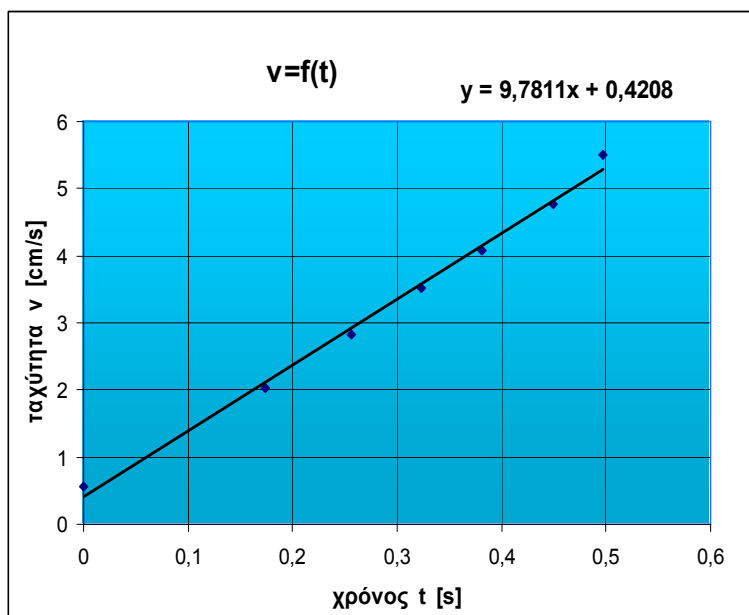
Η διαδικασία αυτή φαίνεται στην εικόνα 4, όπου παριστάνονται γραφικά τιμές ταχύτητα και μέγιστης τάσης που πάρθηκαν πειραματικά. Η κλίση προκύπτει εύκολα και δίνει μια τιμή, ως αποτέλεσμα της βαθμονόμησης, για τον συντελεστή μετατροπής:

$$k = 22,65 \text{ [m/V s]}$$

Εικόνα 4.: Γραφική παράσταση των τιμών ταχύτητας v και των αντίστοιχων μέγιστης τιμής επαγωγικής τάσης U_{max} που χρησιμοποιήθηκαν στην διαδικασία βαθμονόμησης



Εικόνα 5.: Γραφική παράσταση των πειραματικών τιμών στιγμιαίας ταχύτητας και χρόνου, όπως προέκυψαν μετά την βαθμονόμηση.



Αξιοποιώντας τις πειραματικές τιμές από το σήμα μετρήσεων (εικόνα 2), προέκυψαν τιμές για την στιγμιαία ταχύτητα της πορείας του πίπτοντος σώματος στα επτά σημεία των πηνίων μας, στις αντίστοιχες χρονικές στιγμές, αφού προηγούμενα η τιμή του πλάτους στο σήμα που μετρήθηκε στο κάθε πηνίο πολλαπλασιάστηκε με τον συντελεστή k , από την προηγούμενη διαδικασία βαθμονόμηση.

Το αποτέλεσμα παρουσιάζεται στην εικόνα 5, ως γραφική παράσταση της σχέσης $v = f(t)$. Εύκολα και κατά έναν όμοιο τρόπο μπορεί να προκύψει και το γράφημα $v = f(s)$. Η ευθεία που προκύπτει ως καλύτερη προσαρμογή δίνει για την τιμή της κλίσης (κλίση = 9,81 m/s) με αξιοσημείωτη ακρίβεια την ίδια τιμή της επιτάχυνσης της βαρύτητας (βλέπε σχέση 2).

Συμπεράσματα

Η πειραματική διάταξη που παρουσιάζεται, αποτελεί μια χρήσιμη πρόταση για την υλοποίηση εργαστηριακής άσκησης, στον βαθμό που τα αποτελέσματα που εξάγονται είναι εξαιρετικά ως προς την ακρίβεια και πλούσια σε πληροφορίες, η ίδια δε μετρητική διάταξη από μόνη της παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον από εκπαιδευτική άποψη, ενώ μπορεί να κατασκευαστεί για τις ανάγκες ενός εργαστηρίου Φυσικής, εξ ιδίων μέσων, με σχετικά εύκολο και φθηνό τρόπο.

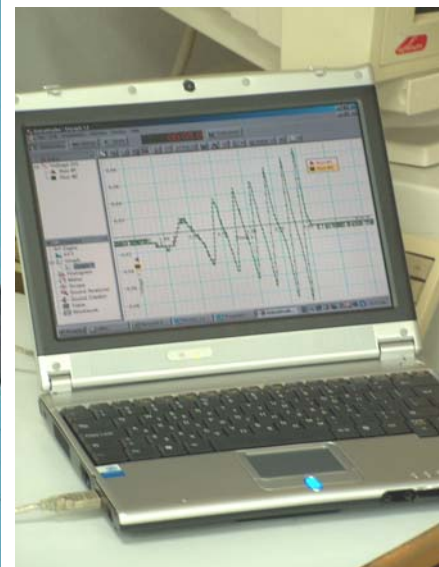
Βιβλιογραφία

1. Takahashia Ken and Thompsonb D., (1999), Measuring air resistance in a computerized laboratory, *Am. J. Phys.* 67, No 8, 709-711.
2. Ιωάννης Σιανούδης (2001), Πειράματα Φυσικής με χρήση PC: «Πτώση σώματος: Προσδιορισμός της επιτάχυνσης της βαρύτητας», *Φυσικός Κόσμος*, τεύχος 3, σ. 45.
3. D.E. Shaw, (2004), *Free Fall and Resistive Forces*, Villanova University
4. Ingo Buell, (1998), *Physik mit dem PC*, B.G. Teubner, Stuttgart-Leipzig.
5. Lingard Michael (2003), Using spreadsheet modelling to teach about feedback in physics, *Physics Education* 38 (5), p. 418-422.
6. Staudenmeier, H.M. (1995), *Physics Experiments Using PCs*, Springer Verlag

7. R. Tinker, (ed), (1996), Microcomputer-Based Labs, Educational Research and Standards, Springer-Verlag Berlin,
8. <http://www.phys.vill.edu/staff/shaw/lab/freefall.htm>
9. <http://phys.wcupa.edu/courses/phy170/labs/freefall.htm>
10. <http://www.physics.lsa.umich.edu/IP-LABS/Mechlabs/FFhints.html>

Αναφορές

Η παρούσα εργασία έχει πραγματοποιηθεί στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος «Αρχιμήδης», αριθμός υποέργου 39, το οποίο υλοποιείται στο ΤΕΙ Αθήνας και χρηματοδοτείται από κονδύλια του ΕΠΕΑΕΚ Β' (75% από την Ε.Ε. και 25% από το Ελληνικό Δημόσιο).



Εικόνες 4 και 5.:
Φωτογραφίες από την πειραματική διάταξη κατά την διαδικασία της μέτρησης και το αποτέλεσμα της μέτρησης στην οθόνη του υπολογιστή (Βλέπε video).