**Open Schools Journal for Open Science**

Vol 6, No 1 (2023)

Open Schools Journal for Open Science - Special Issue -Πρακτικά του «3ου Μαθητικού Συνεδρίου Έρευνας και Επιστήμης»


# Αναπαράγοντας το ιστορικό πείραμα του Γαλιλαίου

*Χαρά Μωραϊτάκη, Vasilis Dimopoulos, Μάριος Γαλερός, Ευάγγελος Κοτρώνης*

doi: [10.12681/osj.32450](https://doi.org/10.12681/osj.32450)

# Αναπαράγοντας το ιστορικό πείραμα του Γαλιλαίου

*Χαρά Μωραϊτάκη*[1]

[1] *Γενικό Λύκειο Κολλεγίου Ψυχικού*
moraitakih@gmail.com

*Επιβλέποντες Καθηγητές: Μάριος Γαλερός*[1], *Βασίλης Δημόπουλος*[2], *Ευάγγελος Κοτρώνης*[3]
[1, 2, 3]*ΠΕ 04, Γενικό Λύκειο Κολλεγίου Ψυχικού*

mgaleros@haef.gr, vdimop@haef.gr, ekotronis@haef.gr

## Περίληψη

Στόχος της εργασίας μας ήταν - με σύγχρονες διατάξεις μέτρησης χρόνου και με σύστημα που αξιοποιεί την εκροή νερού από μία προχοΐδα- να ερευνήσουμε την υπόθεση ότι αντικείμενα διαφορετικών μαζών πέφτουν με την ίδια επιτάχυνση, αναπαράγοντας στο σχολικό εργαστήριο το ιστορικό πείραμα του Γαλιλαίου.

Κατά την πειραματική διαδικασία, χρησιμοποιήσαμε δύο σφαίρες διαφορετικών μαζών και διαμέτρων τις οποίες αφήσαμε από την κορυφή μίας κεκλιμένης σανίδας με οδηγούς. Για την κάθε σφαίρα προσδιορίσαμε το χρόνο που χρειάζονταν για να βρεθεί σε συγκεκριμένες θέσεις με δύο διαφορετικές μεθόδους. Επαναλάβαμε τη διαδικασία για την ίδια κλίση του κεκλιμένου επιπέδου για τις δύο σφαίρες, χρησιμοποιώντας επιπλέον μία διάταξη, που μετρά την μετατόπιση νερού σε μία προχοΐδα ως ένδειξη για τον χρόνο που περνά. Μέσω των πειραμάτων επιβεβαιώθηκε η υπόθεση ότι δύο διαφορετικά σώματα που πέφτουν από το ίδιο ύψος αποκτούν κοινή επιτάχυνση.

**Λέξεις κλειδιά:** ιστορικό πείραμα Γαλιλαίου, πτώση σωμάτων, επιτάχυνση, φωτοπύλη, σύστημα χρονομέτρησης με νερό

## Εισαγωγή

Ο Αριστοτέλης ήταν ο πρώτος φιλόσοφος – επιστήμονας που μελέτησε, επισταμένως, την κίνηση των σωμάτων, διαιρώντας την σε δύο κατηγορίες: τη φυσική και τη βίαιη. Σύμφωνα με εκείνον, κάθε σώμα έχει τη δική του θέση στο Σύμπαν προσδιοριζόμενη από τη «φύση» του, συνεπώς κάθε σώμα που δε βρίσκεται στη σωστή του θέση «προσπαθεί» να βρεθεί σε αυτή. Επιπλέον, τα μεγαλύτερα σώματα είναι φυσικό να κάνουν μεγαλύτερες προσπάθειες, επομένως, τα σώματα πέφτουν με ταχύτητα ανάλογη προς το βάρος τους. Όσο βαρύτερο ένα σώμα τόσο γρηγορότερα πέφτει (Hewitt, 1997). Οι απόψεις του Αριστοτέλη, παρέμειναν στο προσκήνιο για πολλούς αιώνες μέχρι που αυτές αμφισβητήθηκαν από τον Γαλιλαίο. Λέγεται, πως ο Γαλιλαίος έριξε από την κορυφή του κεκλιμένου πύργου της Πίζα αντικείμενα με διαφορετικό βάρος συγκρίνοντας το ρυθμό πτώσης τους και καταλήγοντας στο συμπέρασμα πως μια πέτρα με διπλάσιο βάρος από κάποια άλλη δεν έπεφτε δυο φορές γρηγορότερα (Κόκκοτας, και συν., 2016). Ο Γαλιλαίος, για να ανατρέψει την ιδέα του Αριστοτέλη - σχετικά με την πτώση των σωμάτων- άφηνε σφαίρες από την κορυφή μίας κεκλιμένης σανίδας και μετρούσε το χρόνο -με σύστημα που επινόησε ο ίδιος- για να φθάσει κάθε μία στη βάση του. Ανακάλυψε πως οι σφαίρες αυξάνουν κατά το ίδιο ποσό την ταχύτητά τους σε κάθε διαδοχικό χρονικό διάστημα, δηλαδή κυλούσαν με ομοιόμορφη, ή σταθερή επιτάχυνση. Επιπλέον, ο Γαλιλαίος βρήκε μεγαλύτερες επιταχύνσεις στα επίπεδα με πιο απότομη κλίση (Hewitt, 1997).

Το παραπάνω ιστορικό πείραμα αναπαρήγαμε στο εργαστήριο με στόχο τη διερεύνηση της υπόθεσης ότι αντικείμενα διαφορετικών μαζών που αφήνονται να πέσουν έχουν την ίδια επιτάχυνση, χρησιμοποιώντας τρεις μεθόδους.

## Θεωρητική Προσέγγιση

Στην ενότητα αυτή της εργασίας μας θα μελετήσουμε θεωρητικά την κίνηση ενός αντικειμένου που αφήνεται από την κορυφή κεκλιμένου επιπέδου –γωνίας κλίσης φ- και κινείται κατά μήκος του. Η κίνηση αυτή είναι ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη χωρίς αρχική ταχύτητα.

Στο σώμα ασκούνται, το βάρος $\vec{w}$ και η κάθετη δύναμη επαφής με το κεκλιμένο επίπεδο $\vec{N}$. Αναλύουμε το βάρος σε δύο κάθετες συνιστώσες την $w_x = w\eta\mu\varphi$ και την $w_y = w\sigma\upsilon\nu\varphi$. Από το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα είναι:

$$\Sigma\overrightarrow{F_x} = m\vec{a} - \overrightarrow{w_x} = m\vec{a} \Leftrightarrow w_x = ma \Leftrightarrow mg\eta\mu\varphi = ma \Leftrightarrow \alpha = g\eta\mu\varphi \quad \mathbf{(1)}$$

Η σχέση (1) δείχνει ότι η κίνηση ενός σώματος που κινείται κατά μήκος ενός κεκλιμένου επιπέδου είναι ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη και μάλιστα η επιτάχυνση που αποκτά είναι ανεξάρτητη από τη μάζα του σώματος (Giancoli, 2000).

Για την ευθύγραμμη ομαλά επιταχυνόμενη κίνηση χωρίς αρχική ταχύτητα ισχύουν:

$$\Delta x = \frac{1}{2}\alpha\Delta t^2 \;\kappa\alpha\iota\; \upsilon = \alpha\Delta t.$$

Συνδυάζοντας τις δύο σχέσεις προκύπτει ότι: $\Delta x = \frac{\upsilon^2}{2\alpha} \quad \mathbf{(2)}$

Η σχέση (2) δείχνει ότι η γραφική παράσταση της μετατόπισης συναρτήσει της ταχύτητας στο τετράγωνο είναι ευθεία, η κλίση της οποίας δίνεται από την παρακάτω σχέση: $\lambda = \frac{1}{2\alpha} \quad \mathbf{(3)}$

Για τις γραφικές παραστάσεις μετατόπισης συναρτήσει του χρόνου στο τετράγωνο, έχουμε:

$$\Delta x = \frac{1}{2} a \Delta t^2 \Leftrightarrow \Delta t^2 = \frac{1}{2\alpha} \Delta x \ \ (\mathbf{4})$$

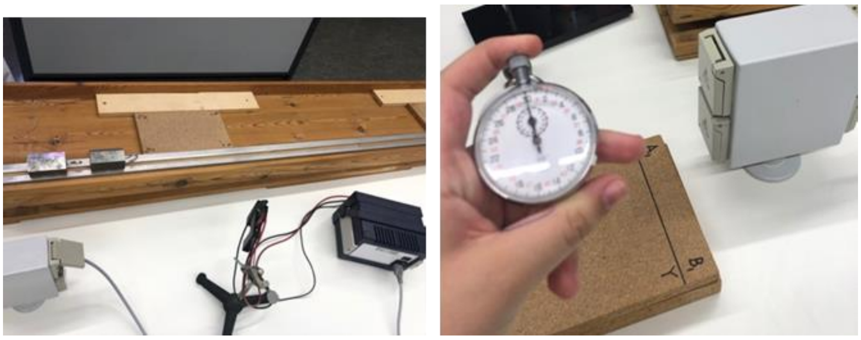
Η σχέση (4) δείχνει ότι η γραφική παράσταση της μετατόπισης συναρτήσει του χρόνου στο τετράγωνο είναι ευθεία, η κλίση της οποίας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\lambda = \frac{1}{2\alpha} \ \ (\mathbf{5})$$

## Υλικά - Μέθοδοι

Για το πείραμα χρησιμοποιήσαμε κεκλιμένο επίπεδο, δύο σφαίρες διαφορετικών μεγεθών και ένα βαρίδιο για την ένδειξη του τέλους της διαδρομής. Στις τρεις διαφορετικές διατάξεις, χρησιμοποίηθηκε μία στήλη με νερό, ένα χρονόμετρο και μία φωτοπύλη αντίστοιχα. Οι διάταξεις, που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στα σχήματα 1α,β αντίστοιχα.

**Σχήμα 1α:** Στην εικόνα αριστερά φαίνεται η στήλη με το νερό, ενώ δεξιά φαίνεται το κεκλιμένο επίπεδο στο οποίο κινήθηκαν οι σφαίρες σε όλες τις μεθόδους.



**Σχήμα 1β:** Στην αριστερή εικόνα φαίνεται το κεκλιμένο και η φωτοπύλη. Στην δεξιά εικόνα φαίνεται το χρονόμετρο που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις.

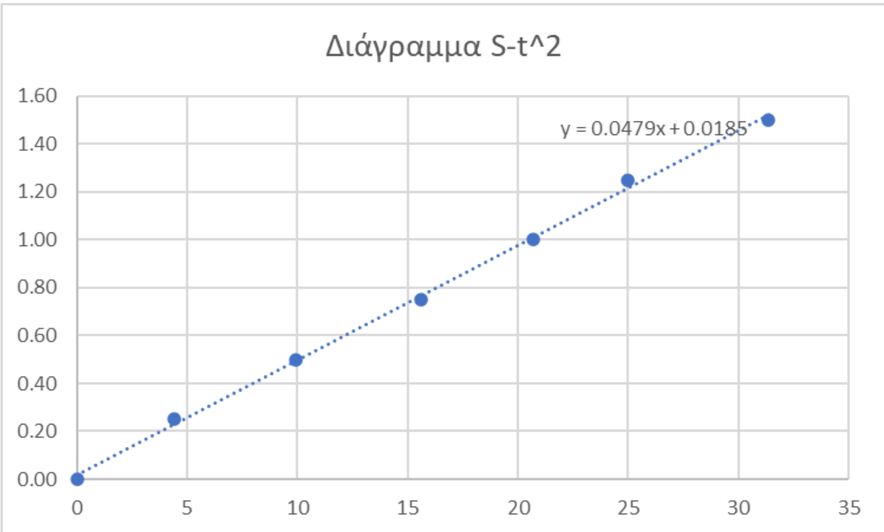
Αρχικά, χρησιμοποιήσαμε διαστημόμετρο για να υπολογίσουμε τις διαμέτρους των σφαιρών και με ηλεκτρονική ζυγαριά μετρήσαμε τη μάζα τους. Η μάζα και η διάμετρος της μικρής σφαίρας (1) μετρήθηκαν ίσες με 197 g και 3,62 cm και της μεγάλης σφαίρας (2) μετρήθηκαν ίσες με 508 g και 4,99 cm αντιστοίχως.

Από την κορυφή κεκλιμένου επιπέδου αφήσαμε την μικρή σφαίρα να κινηθεί προς τα κάτω. Με την χρήση ενός χρονομέτρου μετρήσαμε το χρόνο που χρειάστηκε να διανύσει μια απόσταση (S), η οποία αυξανόταν κάθε φορά ανά 0,25cm χωρίς να μεταβάλλουμε την κλίση της αεροτροχιάς. Εκτελέσαμε την διαδικασία τρεις φορές για κάθε θέση, κρατώντας μία μέση τιμή (t). Αφού προσδιορίσαμε τον χρόνο και στη συνέχεια τον χρόνο στο τετράγωνο, κατασκευάσαμε τη γραφική παράσταση απόστασης συναρτήσει του χρόνου στο τετράγωνο. Οι μετρήσεις που πήραμε εμφανίζονται στον πίνακα 1. Στον πίνακα 1, παρουσιάζονται επιπλέον οι τιμές του χρόνου στο τετράγωνο.

| **Απόσταση S (m)** | **Χρονική διάρκεια t (s)** | **Χρονική διάρκεια στο τετράγωνο t^2 (s^2)** |
|---|---|---|
| 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,25 | 2,10 | 4,41 |
| 0,50 | 3,15 | 9,92 |
| 0,75 | 3,95 | 15,60 |
| 1,00 | 4,55 | 20,70 |
| 1,25 | 5,00 | 25,00 |
| 1,50 | 5,60 | 31,36 |

**Πίνακας 1**: Τιμές μετρήσεων και τιμές για την χρονική διάρκεια στο τετράγωνο για την μικρή σφαίρα με χρήση χρονομέτρου.

Η αντίστοιχη γραφική παράσταση ταχύτητας στο τετράγωνο συναρτήσει της θέσης φαίνεται στο Σχήμα 2. Η κλίση του διαγράμματος ισούται με 0,0479.

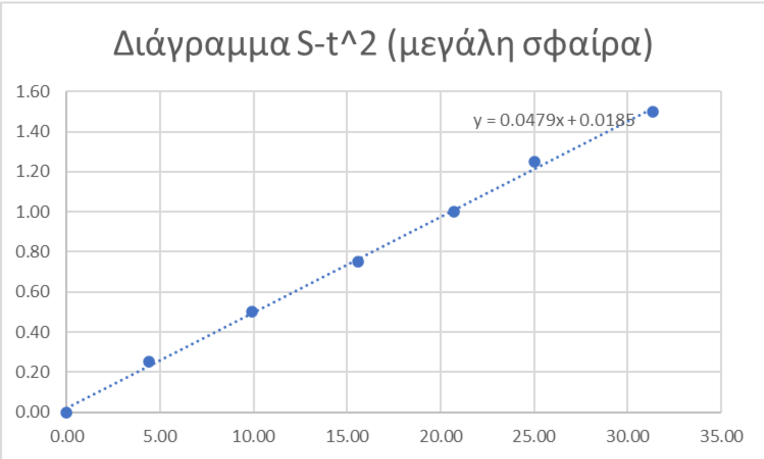



**Σχήμα 2:** Γραφική παράσταση απόστασης συναρτήσει του χρόνου στο τετράγωνο για την μικρή σφαίρα με την χρήση χρονομέτρου.

Ύστερα επαναλάβαμε την ίδια διαδικασία για την μεγάλη σφαίρα. Οι τιμές που λάβαμε καθώς και η γραφική παράσταση απόστασης συναρτήσει του χρόνου στο τετράγωνο εμφανίζονται στον Πίνακα 2 και στο σχήμα 3 αντίστοιχα. Η κλίση του διαγράμματος είναι ίση με 0,479.

| **Απόσταση S (m)** | **Χρονική διάρκεια t (s)** | **Χρονική διάρκεια στο τετράγωνο t^2 (s^2)** |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 0,25 | 2,10 | 4,41 |
| 0,5 | 3,15 | 9,92 |
| 0,75 | 3,95 | 15,60 |
| 1,00 | 4,55 | 20,70 |
| 1,25 | 5,00 | 25,00 |
| 1,50 | 5,60 | 31,36 |

**Πίνακας 2:** Τιμές μετρήσεων και τιμές για την χρονική διάρκεια στο τετράγωνο για την μεγάλη σφαίρα με χρήση χρονομέτρου.




**Σχήμα 3:** Γραφική παράσταση απόστασης συναρτήσει του χρόνου στο τετράγωνο για την μεγάλη σφαίρα με την χρήση χρονομέτρου.

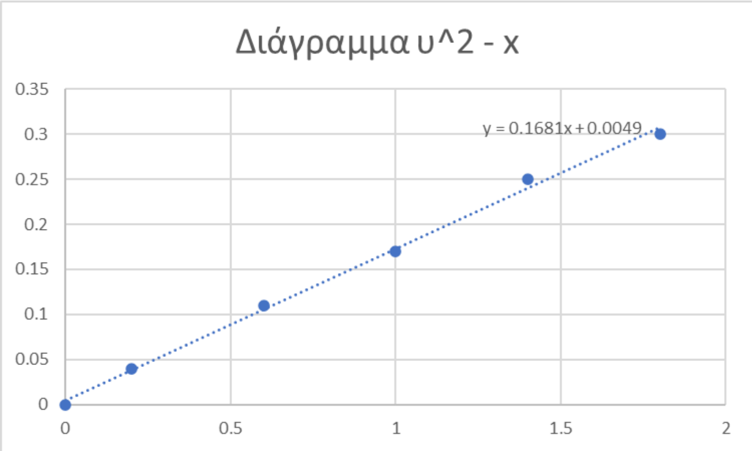
Ύστερα επαναλάβαμε την διαδικασία, με την μικρή σφαίρα, και την χρήση φωτοπύλης για την συλλογή των μετρήσεων. Η φωτοπύλη χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της στιγμιαίας ταχύτητας της σφαίρας. Η φωτοπύλη μετρά το χρονικό διάστημα από τη στιγμή που διακόπτεται η φωτεινή δέσμη (η σφαίρα αρχίζει να διέρχεται από τη φωτοπύλη), μέχρις ότου αποκαθίσταται η δέσμη (η σφαίρα ολοκληρώνει τη διέλευσή της από τη φωτοπύλη). Επειδή αυτό το χρονικό διάστημα είναι πολύ μικρό θεωρούμε ότι είναι δυνατό να προσδιορίσουμε τη στιγμιαία ταχύτητα της σφαίρας από τη σχέση $\upsilon = dx/dt$ στη θέση που είναι τοποθετημένη η φωτοπύλη. Χωρίς να μεταβάλουμε την κλίση της αεροτροχιάς, μετακινήσαμε διαδοχικά το σύστημα της φωτοπύλης ανά 40 cm και εκτελέσαμε -για μεγαλύτερη ακρίβεια- τη διαδικασία τρεις φορές σε κάθε θέση, προσδιορίζοντας τη μέση τιμή για κάθε χρονική διάρκεια (dt). Αφού προσδιορίσαμε την ταχύτητα και στη συνέχεια την ταχύτητα στο τετράγωνο, κατασκευάσαμε τη γραφική παράσταση θέση συναρτήσει της ταχύτητας στο τετράγωνο. Οι μετρήσεις που πήραμε εμφανίζονται στον πίνακα

3. Στον πίνακα 3, παρουσιάζονται επιπλέον οι τιμές της ταχύτητας και της ταχύτητας στο τετράγωνο.

| **Θέση x (m)** | **Χρονική διάρκεια (s)** | **Ταχύτητα υ (m/s)** | **Ταχύτητα στο τετράγωνο υ^2 ($m^2/s^2$)** |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0,20 | 0,18 | 0,19 | 0,04 |
| 0,60 | 0,11 | 0,33 | 0,11 |
| 1,00 | 0,09 | 0,41 | 0,17 |
| 1,40 | 0,07 | 0,50 | 0,25 |
| 1,80 | 0,07 | 0,55 | 0,30 |

**Πίνακας 3:** Τιμές μετρήσεων και τιμές για την ταχύτητα και την ταχύτητα στο τετράγωνο για την μικρή σφαίρα με χρήση φωτοπύλης.

Η αντίστοιχη γραφική παράσταση ταχύτητας στο τετράγωνο συναρτήσει της θέσης φαίνεται στο σχήμα 4. Η κλίση του διαγράμματος ισούται με 0,99858.




**Σχήμα 4:** Γραφική παράσταση ταχύτητας στο τετράγωνο συναρτήσει της θέσης για την μικρή σφαίρα με χρήση φωτοπύλης.

Στη συνέχεια επαναλάβαμε την ίδια διαδικασία, κρατώντας μετρήσεις χρησιμοποιώντας μια μέθοδο όμοια με του Γαλιλαίου, με την χρήση μιας στήλης νερού. Ανοίγαμε τον μοχλό της στήλης του νερού την στιγμή που αφήναμε την σφαίρα να κινηθεί, και τον κλείναμε όταν διένυε την απόσταση. Η μετατόπιση του νερού στην στήλη λειτούργησε ως ένδειξη του χρονικού διαστήματος. Οι μετρήσεις φαίνονται στους πίνακες 4,5.

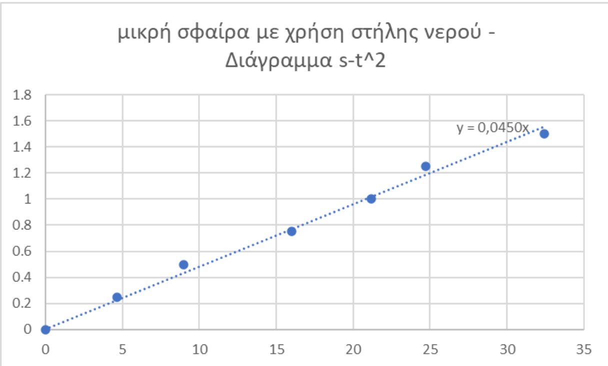
| **Απόσταση S (m)** | **Χρονική διάρκεια t^2 (s)** |
|---|---|
| 0,00 | 0.0 |
| 0,25 | 4.65 |
| 0,50 | 8.98 |
| 0,75 | 16 |
| 1,00 | 21.2 |
| 1,25 | 24.7 |

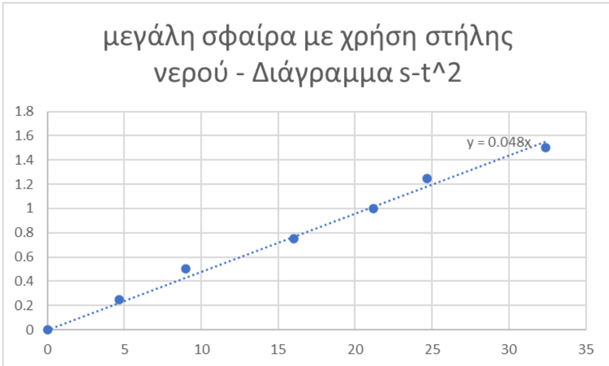
| | |
|---|---|
| 1,50 | 32.4 |

**Πίνακας 4:** Τιμές μετρήσεων και τιμές για την χρονική διάρκεια στο τετράγωνο για την μικρή σφαίρα με χρήση στήλης νερού.

| Απόσταση S (m) | Χρονική διάρκεια στο τετράγωνο t^2 (s^2) |
|---|---|
| 0,00 | 0.0 |
| 0,25 | 4.38 |
| 0,50 | 8.54 |
| 0,75 | 15.8 |
| 1,00 | 20.8 |
| 1,25 | 24.1 |
| 1,50 | 32.1 |

**Πίνακας 5:** Τιμές μετρήσεων και τιμές για την χρονική διάρκεια στο τετράγωνο για την μεγάλη σφαίρα με χρήση στήλης νερού.






**Σχήμα 4:** Γραφικές παραστάσεις θέσης συναρτήσει του τετραγώνου για τις δύο σφαίρες με χρήση της στήλης νερού.

Στον πίνακα 6 εμφανίζονται οι τιμές για την κλίση των γραφικών παραστάσεων στις διαφορετικές μεθόδους που χρησιμοποιήσαμε. Μέσω των τιμών των κλίσεων και των σχέσεων (3) και (5) προσδιορίζουμε τις τιμές των επιταχύνσεων σε κάθε περίπτωση. Οι τιμές αυτές, επίσης, εμφανίζονται στον πίνακα 6.

| | Μικρή σφαίρα με χρήση χρονομέτρου | Μικρή σφαίρα με χρήση φωτοπύλης | Μικρή σφαίρα με χρήση στήλης νερού | Μεγάλη σφαίρα με χρήση χρονομέτρου | Μεγάλη σφαίρα με χρήση στήλης νερού |
|---|---|---|---|---|---|
| **κλίση** | 0,0479 | 0,1681 | 0.0450 | 0,0479 | 0,0480 |
| **Επιτάχυνση ($m/s^2$)** | 0,0958 | 0,08405 | 0.090 | 0,0958 | 0,0960 |

**Πίνακας 6:** Τιμές κλίσεων και οι τιμές των επιταχύνσεων που προσδιορίζονται μέσω των σχέσεων (3),(4) για τις διαφορετικές μεθόδους που χρησιμοποίησαμε.

## Συζήτηση

Οι γραφικές παραστάσεις μετατόπισης συναρτήσει του χρόνου στο τετράγωνο και η γραφική παράσταση μετατόπισης συναρτήσει της ταχύτητας στο τετράγωνο είναι ευθείες συνεπώς οι κινήσεις που αντιπροσωπεύουν αντιστοιχούν σε ευθύγραμμες ομαλά επιταχυνόμενες κινήσεις. Διατηρώντας την κλίση σταθερή –χρησιμοποιώντας σφαίρες διαφορετικών μαζών- οι τιμές που προσδιορίζουμε για τις επιταχύνσεις, κρατώντας την μέση τιμή για κάθε σφαίρα από τα ποικίλα είδη μέτρησης, είναι: $α_1$= $0.090 m/s^2$(σφαίρα $m_1$=197g) και $α_2$=$0.096 m/s^2$ (σφαίρα $m_2$=508g). Παρατηρούμε πως παρά το γεγονός ότι αυξήθηκε σημαντικά η συνολικά μάζα του αντικειμένου που αφήνουμε από την κορυφή του κεκλιμένου επιπέδου οι τιμές των επιταχύνσεων είναι πολύ κοντά η μία στην άλλη. Η διαφορά στις τιμές είναι δυνατό να θεωρήσουμε ότι οφείλεται σε πειραματικά σφάλματα. Καταρχάς η χρήση της στήλης νερού και το γεγονός ότι την ελέγχαμε χειροκίνητα επέτρεψε να υπάρχουν μερικές διαφοροποιήσεις από τον πραγματικό χρόνο. Όμοια, η χειροκίνητη χρήση του χρονομέτρου μπορεί να συνέβαλλε στο πειραματικό σφάλμα. Επιπλέον, για τη λήψη των μετρήσεων της φωτοπύλης μετακινούσαμε διαδοχικά το σύστημα της φωτοπύλης ανά 40cm. Είναι πιθανό, η τοποθέτηση της φωτοπύλης να μη γινόταν πάντα με την ίδια ακρίβεια. Τέλος, κάποιες φορές όταν αφήναμε την σφαίρα να κινηθεί της δίναμε και μία αρχική ώθηση με αποτέλεσμα να μην ξεκινά σε κάποιες από τις μετρήσεις με μηδενική αρχική ταχύτητα.

## Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προηγούμενης ενότητας της εργασίας μας, φαίνεται ότι η επιτάχυνση που αποκτά ένα σώμα καθώς πέφτει είναι ανεξάρτητη από τη μάζα του σώματος. Τα συμπεράσματα αυτά συμφωνούν τόσο με τα αποτελέσματα των πειραμάτων του Γαλιλαίου όσο και και με τη θεωρία σύμφωνα με τη σχέση (1). Τέλος, θα θέλαμε να σχολιάσουμε το ότι είναι εντυπωσιακό το γεγονός ότι ο Γαλιλαίος χωρίς να έχει στη διάθεσή του τόσο σύγχρονα μέσα όσο εμείς, κατάφερε να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι όλα τα σώματα, ανεξάρτητα από το βάρος τους πέφτουν με την ίδια σταθερή επιτάχυνση.

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον παρασκευαστή του Εργαστηρίου Φυσικών Επιστημών του σχολείου κ. Νικόλαο Κόγια για την πολύτιμη βοήθειά του στην εκτέλεση των πειραμάτων.

## Βιβλιογραφικές Πηγές

Giancoli, D. C. (2000). *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics.* New Jersey: Prentice Hall.

Hewitt, P. (1997). *Οι έννοιες της Φυσικής - Τόμος 1.* Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

Κόκκοτας, Π. Β., Βλάχος, Ι. Α., Γραμματικάκης, Ι. Γ., Καραπαναγιώτης, Β. Α., Περιστερόπουλος, Π. Ε., & Τιμοθέου, Γ. Β. (2016). *Φυσική Γενικής Παιδείας Α΄ Γενικού Λυκείου .* ΑΘΗΝΑ: Ινστιτούτο Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων "ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ".