

**Η περιπλάνηση της αδράνειας στα μονοπάτια της καθημερινότητας:
ένα διδακτικό σενάριο με πραγματικά πειράματα “φιλικό” προς τους
χρήστες (καθηγητές και μαθητές).**

Ηλίας Καλογήρου

Φυσικός, Υπεύθυνος ΕΚΦΕ Ηλίας

Αναστάσιος Νέζης

Φυσικός, 1^ο ΓΕΛ Σαλαμίνας



Η περιπλάνηση της αδράνειας στα μονοπάτια της καθημερινότητας. Ένα διδακτικό σενάριο, με πραγματικά πειράματα, “φιλικό” προς τους χρήστες (καθηγητές και μαθητές)

Ηλίας Καλογήρου και Αναστάσιος Νέζης

Εισαγωγή

Αφορμή γι’ αυτή την εργασία στάθηκε η πρόσκλησή μας από το Γυμνάσιο Βάρδας της Ηλείας προκειμένου να παρουσιάσουμε σε διαθεματικό επίπεδο τη σύνδεση του μαθήματος της Φυσικής με το μάθημα της Γυμναστικής (Γκοτζαρίδης, 2001) αλλά και με τα αθλήματα. Η δομή της εργασίας μας συνίσταται στο σχεδιασμό πολλών πραγματικών πειραμάτων με την αμεσότητα και το κύρος του «ζωντανού» (τα οποία ενέχουν και τη «δόση» του εντυπωσιασμού) και στη συζήτηση πάνω σε αυτά χωρίς μαθηματικούς τύπους. Μπορεί να παρουσιαστεί τόσο σε μαθητές Γυμνασίου (για τους οποίους δεν προβλέπεται η διδασκαλία της περιστροφής στερεού σώματος) όσο και σε μαθητές Λυκείου (οι οποίοι διδάσκονται τη ροπή αδράνειας ξεκινώντας από τον ορισμό $I=mr_1^2+mr_2^2+\dots$, χωρίς καμία αναφορά στην αναγκαιότητα εισαγωγής ενός τέτοιου φυσικού μεγέθους) (Ιωάννου κ.ά., 2007).

Με την εργασία αυτή προσπαθούμε να πετύχουμε τους εξής στόχους: α) την κατανόηση σχεδόν από το σύνολο των μαθητών δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης και κατά συνέπεια πρόκληση ενδιαφέροντος για το αντίστοιχο μάθημα, β) ο σχεδιασμός των πειραμάτων να διευκολύνει τον εκπαιδευτικό να ανιχνεύσει και να ενεργοποιήσει τη κριτική ικανότητα των μαθητών, να εμπνευστεί ερωτήσεις για προβληματισμό ώστε βήμα-βήμα να οδηγήσει τους μαθητές στα επιθυμητά συμπεράσματα, γ) να δίνεται η δυνατότητα αναπαραγωγής των πειραμάτων επειδή τα απαιτούμενα υλικά είναι απλά – καθημερινής χρήσης ή υπάρχουν στα περισσότερα σχολικά εργαστήρια, δ) να καλλιεργηθεί η ενεργός συμμετοχή του μαθητή κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ώστε να αποκτηθεί μια βιωματική εμπειρία ε) να αναδειχθεί η διαθεματικότητα ανάμεσα στη Φυσική και τη Γυμναστική και στ) να γίνει σύνδεση της σχολικής γνώσης με τα φαινόμενα της καθημερινότητας.

Η αδράνεια στην ευθύγραμμη κίνηση

Σύμφωνα με το νόμο της αδράνειας, ένα αντικείμενο διατηρεί την κινητική του κατάσταση αν δεν ενεργεί καμία δύναμη σε αυτό. Αν ασκηθεί δύναμη στο αντικείμενο, τότε, σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, η μεταβολή της ταχύτητάς του θα είναι τόσο δυσκολότερη όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα, η οποία είναι ένα ποσοτικό μέτρο της αδράνειας (Feynman, 2009, σ. 129), και όσο μικρότερος είναι ο χρόνος άσκησης της δύναμης:

$$\Delta v = \frac{F \Delta t}{m}$$

Έτσι όταν πλένουμε τα χέρια μας και τα τινάζουμε, θέτουμε τις σταγόνες του νερού, μαζί με τα χέρια μας, σε κίνηση. Αν μετά το τίναγμα σταματήσουμε απότομα τα χέρια, οι σταγόνες συνεχίζουν να κινούνται «λόγω αδράνειας»: δεν ασκείται σε αυτές δύναμη ικανή να μεταβάλλει την κινητική τους κατάσταση (να τις σταματήσει) κι έτσι απομακρύνονται από τα χέρια μας.

Αν χτυπήσουμε με σφυρί μια σφαίρα τεσσάρων κλών -του σφαιροβόλου- που στηρίζεται πάνω σε ένα χάρτινο ή πλαστικό κυπελλάκι του καφέ (Εικόνα 1), θα δούμε ότι το κυπελλάκι δεν υποχωρεί. Η δύναμη που θα ασκηθεί στο κυπελλάκι από τη σφαίρα (πέρα από το βάρος της) θα είναι ίση με τη μεταβολή της ορμής της σφαίρας κατά την κρούση της με το κυπελλάκι προς το χρόνο που διαρκεί η κρούση της σφαίρας στο κυπελλάκι. Η αρχική ορμή της σφαίρας είναι ελάχιστη διότι για την ασκούμενη από το σφυρί στη σφαίρα δύναμη ισχύει η σχέση $F=m \cdot a$ και επειδή η μάζα της (η αδράνειά της) είναι μεγάλη, η επιτάχυνση της σφαίρας είναι ασήμαντη. Άρα

ασήμαντη θα είναι και η ταχύτητά της (αρχικά ηρεμούσε) επομένως και η ορμή της, (κατά συνέπεια και η μεταβολή της ορμής της κατά την κρούση της με το κυπελάκι) άρα και η δύναμη που θα ασκηθεί τελικά στο κυπελάκι.

Εάν αντίστοιχα κρατήσουμε στη παλάμη μας τη σφαίρα αυτή και κάποιος χτυπήσει το σφυρί πάνω της, θα διαπιστώσουμε ότι είναι ανεπαίσθητη η αίσθηση της επιπλέον δύναμης που ασκείται από τη σφαίρα στο χέρι μας, πέραν του βάρους της. Αν τώρα η ίδια σφαίρα αφηθεί από κάποιο ύψος να πέσει πάνω στο ίδιο κυπελλάκι (Εικόνα 2α), τότε το κυπελλάκι συνθλίβεται (Εικόνα 2β) λόγω της ασκούμενης σε αυτό δύναμης από τη σφαίρα, η οποία αναπτύσσεται κατά την πρόσκρουση της σφαίρας στο κυπελάκι λόγω της μεταβολής της ορμής της σφαίρας ($F = \frac{\Delta P}{\Delta t}$). Η μεγάλη μάζα (αδράνεια) της σφαίρας οδηγεί σε μεγάλη μεταβολή της ορμής της και άρα στην άσκηση δύναμης που συνθλίβει το κυπελλάκι (Gerardo, 2015).

Σε όλα τα στάδια της παρουσίασης ο εκπαιδευτικός μπορεί να ρωτάει τους μαθητές να προβλέπουν κάθε φορά τι θα συμβεί και για ποιο λόγο (δηλαδή να ωθεί τους μαθητές να κάνουν υποθέσεις). Συγχρόνως μπορεί να καλεί τους μαθητές ώστε να εκτελούν αυτοί τα πειράματα ενθαρρύνοντας την ενεργό συμμετοχή και τη συνεργασία.



Εικόνα 1. Η μεγάλη αδράνεια της ακίνητης βαριάς σφαίρας προφυλάσσει το χάρτινο κυπελλάκι παρ' όλο το χτύπημα του σφυριού



Εικόνα 2. (α) Η βαριά σφαίρα αφήνεται να πέσει πάνω στο χάρτινο κυπελλάκι, (β) το κυπελλάκι συνθλίβεται

Τόσο το άθικτο όσο και το συμπιεσμένο κυπελλάκι αποδίδονται στη μεγάλη μάζα (αδράνεια) της σφαίρας: η σφαίρα είτε τίθεται δύσκολα σε κίνηση είτε ακινητοποιείται δύσκολα. Με άλλα λόγια οι δύο όψεις του ίδιου νομίσματος που πάντα θα κυκλοφορεί και ποτέ δεν θα εξαργυρώνεται!

Η αδράνεια στην περιστροφή

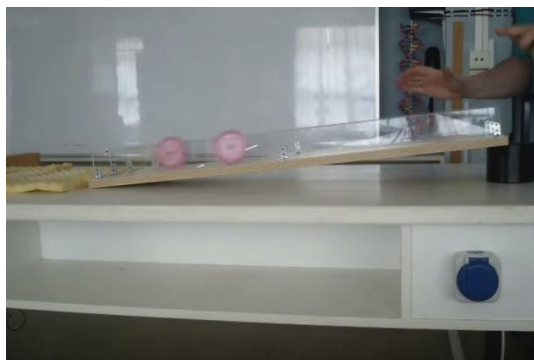
Ο νόμος της αδράνειας εμφανίζεται ακόμη και στην περίπτωση όπου έχουμε περιστροφή του αντικειμένου γύρω από κάποιο άξονα π.χ. η περιστροφή του ποδιού κατά τη βάδιση και το τρέξιμο γύρω από άξονα που διέρχεται από την άρθρωση του ισχίου, η περιστροφή του χεριού γύρω από άξονα που διέρχεται από την άρθρωση του ώμου, η περιστροφή της χορεύτριας γύρω

από κατακόρυφο άξονα στο καλλιτεχνικό πατινάζ, η περιστροφή του αθλητή των καταδύσεων κατά τη πτώση του, η περιστροφή του αυγού γύρω από τον άξονά του για να βρεθεί αν είναι ωμό ή βρασμένο και πολλά άλλα.

Για να εξηγήσουμε την αδράνεια στη περίπτωση αυτή, χρησιμοποιούμε την πιο κάτω πειραματική διάταξη: από το πάνω μέρος ενός κεκλιμένου επιπέδου αφήνουμε την ίδια στιγμή για να κυλήσουν δύο πανομοιότυπα κυλινδρικά κουτάκια (μάζας 107 g το καθένα στην περίπτωσή μας) από συσκευασία καραμελών (Εικόνα 3). Κατά τη διάρκεια της καθόδου παρατηρούμε ότι τα κουτάκια, περιστρεφόμενα γύρω από οριζόντιο άξονα που διέρχεται από το κέντρο τους, δεν κατέρχονται με την ίδια ταχύτητα οπότε το ένα φτάνει γρηγορότερα από το άλλο (Εικόνα 4). Στο σημείο αυτό ο εκπαιδευτικός μπορεί να ανοίξει μια συζήτηση – προβληματισμό για ποιο λόγο τα πανομοιότυπα κουτάκια δεν φτάνουν την ίδια στιγμή στο κάτω μέρος του κεκλιμένου επιπέδου συλλέγοντας τις απαντήσεις. Αν ανοίξουμε τα κουτάκια θα διαπιστώσουμε ότι περιέχουν πλαστελίνη ίσης μάζας (ρωτάμε το γιατί) αλλά τοποθετημένης σε διαφορετικό σχηματισμό σε κάθε κουτάκι. Στο κουτάκι που έφτασε πρώτο η πλαστελίνη είναι τοποθετημένη σε συμπαγή μορφή στο κέντρο, ενώ στο άλλο κουτάκι σχηματίζει δακτύλιο κατανεμημένο στη περιφέρεια (Εικόνα 5).



Εικόνα 3. Δύο πανομοιότυπα κουτάκια αφήνονται από το ίδιο ύψος σε κεκλιμένο επίπεδο



Εικόνα 4. Τα κουτάκια δεν φτάνουν ταυτόχρονα στη βάση του κεκλιμένου επιπέδου



Εικόνα 5. Η κατανομή τη μάζας της πλαστελίνης στα δύο κουτάκια είναι διαφορετική

Βγάζουμε τη πλαστελίνη από κάθε κουτάκι και επαναλαμβάνουμε το πείραμα, ρωτώντας τους μαθητές ποιο κουτάκι θα φτάσει πρώτο. Φυσικά τα κουτάκια φτάνουν την ίδια στιγμή, όταν αφήνονται να κινηθούν ταυτόχρονα (το σχετικό βίντεο είναι αναρτημένο στη διεύθυνση: <https://www.youtube.com/watch?v=i6bbIO6nQss>). Έτσι φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι παρατηρείται κάποια βραδύτητα (ή αντίσταση) στην έναρξη και την εξέλιξη της περιστροφής όταν τμήματα του σώματος απέχουν περισσότερο από τον άξονα περιστροφής. Ένα μέτρο αυτής της αντίστασης είναι η ροπή αδράνειας. Ένα σώμα θα έχει μεγάλη ροπή αδράνειας όταν τμήματα του σώματος απέχουν περισσότερο από τον άξονα περιστροφής. Π.χ. η χορεύτρια στο καλλιτεχνικό πατινάζ που περιστρέφεται γύρω από κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το κέντρο βάρους της έχει μεγαλύτερη ροπή αδράνειας όταν εκτείνει τα χέρια της.

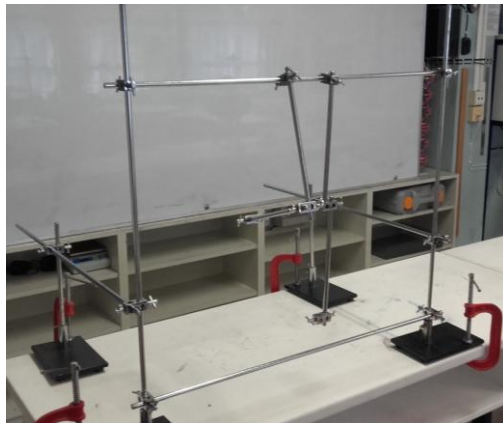
Γιατί όταν τρέχουμε λυγίζουμε τα πόδια μας;

Όπως είπαμε, κατά τη βόδιση κάθε πόδι περιστρέφεται γύρω από άξονα που διέρχεται από την άρθρωση του ισχίου. Όταν θέλουμε να τρέξουμε θα πρέπει η περιστροφή του ποδιού μπρος - πίσω να γίνεται γρήγορα ή με άλλα λόγια να υπάρχει μικρή αντίσταση στην εξέλιξη της κίνησης. Αυτό το πετυχαίνουμε μειώνοντας τη ροπή αδράνειας του ποδιού με το λύγισμα. Το τμήμα του ποδιού από το γόνατο και κάτω πλησιάζει τον άξονα περιστροφής κι έτσι η περιστροφή γίνεται γρηγορότερα. Στο πλαίσιο του εντυπωσιασμού του ακροατηρίου μας, έχουμε κατασκευάσει ομοίωμα των ποδιών του ανθρώπου παίρνοντας τα κάτω άκρα από το μοντέλο του ανθρώπινου σκελετού (Εικόνα 6). Μέσω ενός σπάγκου το ένα πόδι είναι μόνιμα λυγισμένο. Αν απομακρύνουμε κατά την ίδια γωνία τα δύο πόδια, παρατηρούμε ότι το λυγισμένο περιστρέφεται γρηγορότερα.



Εικόνα 6. Το λυγισμένο πόδι περιστρέφεται γρηγορότερα απ' ό,τι το τεντωμένο

Στο πλαίσιο της υπάρχουσας υποδομής στα σχολικά εργαστήρια προτείνουμε ένα μηχανικό ανάλογο για το λυγισμένο και το τεντωμένο πόδι με μεταλλικές ράβδους διαμέτρου 10 mm και διαφόρων μηκών (Εικόνα 7). Δύο ράβδοι μήκους 30 cm η κάθε μία που συνδέονται μέσω απλού συνδέσμου υπό ορθή γωνία αναπαριστούν το λυγισμένο πόδι. Δύο άλλες ράβδοι των 30 cm που συνδέονται με απλό σύνδεσμο ώστε να σχηματίζουν ευθεία αναπαριστούν το τεντωμένο πόδι. Τα δύο ζευγάρια των ράβδων μπορούν να περιστρέφονται γύρω από οριζόντιο άξονα που διέρχεται από το ένα άκρο τους. Αν τα δύο ζευγάρια απομακρυνθούν κατά την ίδια γωνία από τη θέση ισορροπίας και αφεθούν ελεύθερα, τότε το ζευγάρι της ορθής γωνίας ταλαντώνεται γρηγορότερα λόγω μικρότερης ροπής αδράνειας ως προς τον κοινό άξονα περιστροφής. Η διεύθυνση του βίντεο στο διαδίκτυο για τη παρακολούθηση της κίνησης του μηχανικού αναλόγου είναι η εξής: <https://youtu.be/msHT8qm6QUw>



Εικόνα 7. Μηχανικό ανάλογο λυγισμένου και τεντωμένου ποδιού με μεταλλικές ράβδους

Μπορούμε τώρα να θέσουμε ερωτήσεις όπως γιατί ο αθλητής του βάδην δεν μπορεί να αναπτύξει μεγάλη ταχύτητα ή γιατί οι αιωρήσεις των ψηλών ποδιών της καμηλοπάρδαλης είναι πιο αργές από τις αντίστοιχες ενός πεκινουά.

Γιατί όταν τρέχουμε λυγίζουμε τα χέρια μας

Κατά τη βάδιση όταν το αριστερό πόδι προβάλλει τότε το αριστερό χέρι πηγαίνει προς τα πίσω. Συγχρόνως όταν το δεξί πόδι πηγαίνει προς τα πίσω, το δεξί χέρι προβάλλει. Με αυτό τον τρόπο το σώμα μας διατηρεί την ισορροπία του. Η ισορροπία αυτή πρέπει να διατηρείται και στη περίπτωση του τρεξίματος. Για να παρακολουθούν τα χέρια τις γρήγορες περιστροφές των ποδιών πρέπει να λυγίσουν ώστε να μειωθεί η ροπή αδράνειας τους ως προς τον άξονα περιστροφής που διέρχεται από την άρθρωση των ώμων. Επομένως και τα χέρια κινούνται μπρος πίσω με τον ίδιο ρυθμό με αυτό των ποδιών (Εικόνα 8, όπου ο «Δρομέας» του Βαρώτσου δεν θα αισθανόταν άνετα κατά το τρέξιμο καθώς τεντώνει τα χέρια προς τα πίσω) (in.gr, 2015).



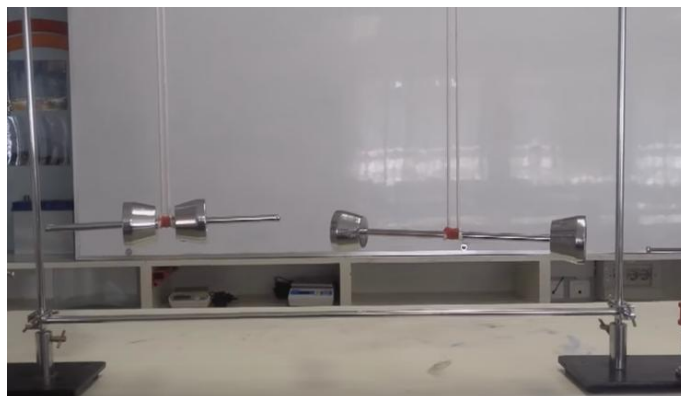
Εικόνα 8. Όταν τρέχουμε λυγίζουμε και τα χέρια, εκτός από τα πόδια (Πηγή φωτογραφίας Associated Press)

Σχοινοβάτης

Προκειμένου να εξηγήσουμε το ρόλο της μακριάς και βαριάς ράβδου που κρατά ο σχοινοβάτης εκτελούμε το ακόλουθο πείραμα. Σε μια οριζόντια ράβδο που μπορεί να περιστρέφεται γύρω από οριζόντιο άξονα κάθετο στο μέσον της (Εικόνα 9), έχουμε στερεώσει δύο απλούς συνδέσμους αριστερά και δύο δεξιά σε ίσες αποστάσεις από το μέσον της. Η μικρή οριζόντια ράβδος μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα μέσα στον αφαλό της χυτοσιδερένιας βάσης. Αν δοκιμάσουμε να περιστρέψουμε τη ράβδο γύρω από τον άξονά της γυρίζοντας το άκρο της μικρής ράβδου που υποδεικνύεται από το βέλος, θα αισθανθούμε μεγάλη δυσκολία. Αν όμως οι βαρείς σύνδεσμοι πλησιάσουν προς το μέσον της ράβδου, τότε η δυσκολία περιστροφής μειώνεται. Το ίδιο πείραμα μπορεί να εκτελεστεί και με τη διάταξη της Εικόνας 10. Το βίντεο του πειράματος είναι διαθέσιμο στη διεύθυνση: <https://youtu.be/p-R95zE2R2M>



Εικόνα 9. Όσο οι απλοί σύνδεσμοι απομακρύνονται από το μέσο της ράβδου, η δυσκολία περιστροφής αυξάνεται



Εικόνα 10. Όταν οι κωνικές βάσεις τύπου A, απέχουν πιο πολύ από το μέσον της οριζόντιας ράβδου, η περιστροφή της ράβδου γύρω από κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το μέσον της είναι πιο αργή

Προφανώς στη περίπτωση της μεγαλύτερης απόστασης των βαριδίων από τον άξονα περιστροφής η ροπή αδράνειας της ράβδου έχει μεγαλώσει και επομένως εμφανίζεται μεγαλύτερη αντίσταση κατά τη περιστροφή της. Έτσι η ράβδος του σχοινοβάτη είναι μεγάλου μήκους και βαριά ώστε να έχει μεγάλη ροπή αδράνειας και να αποφεύγεται η ανατροπή (Εικόνα 11). Όμοια για την αποφυγή της ανατροπής φέρνει τα χέρια της στην έκταση η αθλήτρια πάνω στη δοκό ισορροπίας.



Εικόνα 11. Η μεγάλη στιγμή που ο Φιλίπ Πετίτ περπατά ανάμεσα στους Δίδυμους Πύργους (Πηγή φωτογραφίας: Associated Press) (kathimerini.gr, 2015)

Μια αναπαράσταση του σχοινοβάτη πάνω σε ποδήλατο είναι η πειραματική διάταξη της Εικόνας 12 όπου η τροχαλία αναπαριστά το ποδήλατο και η οριζόντια ράβδος με τις αναρτημένες κόλουμες βάσεις στα άκρα αναπαριστά τη ράβδο του ποδηλάτη. Προφανώς το κέντρο βάρους της κατασκευής βρίσκεται κάτω από το σημείο στήριξης. Υπάρχει η δυνατότητα στο σχολικό εργαστήριο να στηθεί η διάταξη. Για τη παρακολούθηση του αντίστοιχου βίντεο, η διεύθυνση είναι: <https://youtu.be/QJ00IBNOU4g>



Εικόνα 12. Αναπαράσταση του σχοινοβάτη με ποδήλατο

Συμπεράσματα

Στην εργασία μας αυτή ακολουθήσαμε ένα διδακτικό σενάριο σύμφωνα με το οποίο παρουσιάζουμε αρχικά τη πειραματική συσκευή και μετά γίνεται συζήτηση και αναπτύσσεται προβληματισμός με σκοπό να καταλήξουμε στο συμπέρασμα. Έτσι από την αδράνεια στην ευθύγραμμη κίνηση περνάμε στην αδράνεια στην περιστροφική κίνηση για να καταλήξουμε να εξηγούμε πολλά φαινόμενα της καθημερινότητας. Έχουμε σχεδιάσει πειράματα με απλά υλικά ή όργανα που υπάρχουν σχεδόν σε όλα τα σχολικά εργαστήρια, κάνοντας τη πρότασή μας «φιλική» προς τους χρήστες, λόγω της εύκολης αναπαραγωγής. Καλλιεργούμε τη κριτική ικανότητα των μαθητών και την ενεργό συμμετοχή τους. Η διάρκεια της παρουσίασης ανέρχεται σε μία ώρα περίπου και δεν απαιτείται οργανωμένο εργαστήριο.

Τρέφουμε την ελπίδα ότι σε ένα μελλοντικό αναλυτικό πρόγραμμα σπουδών, τα φυσικά μεγέθη δεν θα ορίζονται με «ουρανοκατέβαστο» τρόπο, όπου αυτό είναι δυνατό, αλλά αφού πρώτα αναδειχτεί η αναγκαιότητα εισαγωγής τους. Παράδειγμα ενός τέτοιου προσανατολισμού αποτελεί η εργασία μας. Η ανάλυση που έγινε στο κείμενο για τα διάφορα φαινόμενα είναι απλή ώστε να γίνει κατανοητή από τους μαθητές αλλά και από εκπαιδευτικούς άλλης ειδικότητας στο πλαίσιο διαθεματικής συνεργασίας.

Η εργασία αυτή παρουσιάστηκε σε Γυμνάσια της Ηλείας, σε 20 καθηγητές Φυσικής Αγωγής που παρακολούθησαν θερινό σχολείο στην Αρχαία Ολυμπία τον Αύγουστο 2015 και σε 120 καθηγητές Φυσικής Αγωγής της ΔΔΕ Ανατολικής Αττικής στις 25/9/2015 κατά τη διάρκεια του επιμορφωτικού προγράμματος διδασκαλίας των διδακτικών αντικειμένων του αναλυτικού προγράμματος Φυσικής Αγωγής, με την εποπτεία της Σχολικής Συμβούλου Φυσικής Αγωγής Ανατολικής Αττικής Δρος Νέλλης Αρβανίτη.

Αναφορές

Gerardo G., (2015). The Physics of Warfare. *The Physics Teacher*, 53, 151-154.

Γκοτζαρίδης, Χ. (2001). *Κάνω γυμναστική και μαθαίνω φυσική*, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη.

Ιωάννου, Α., Ντάνος, Γ., Πήττας, Α., Ράπτης, Σ. (2007). *Φυσική Θετικής και Τεχνολογικής Κατεύθυνσης Γ' Τάξη Γενικού Λυκείου*. Αθήνα, ΟΕΔΒ

in.gr (2015). <http://news.in.gr/science-technology/article/?aid=1231335482> Ημερομηνία προσπέλασης 31/1/2016

kathimerini.gr (28/9/2015) <http://www.kathimerini.gr/832682/article/epikairothta/kosmos/o-sxoinovaths-twn-didymwn-pyrgwn> Ημερομηνία προσπέλασης 31/1/2016

Feynman, R. (2007). *Οι διαλέξεις Φυσικής του Feynman. Τόμος Α*. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.