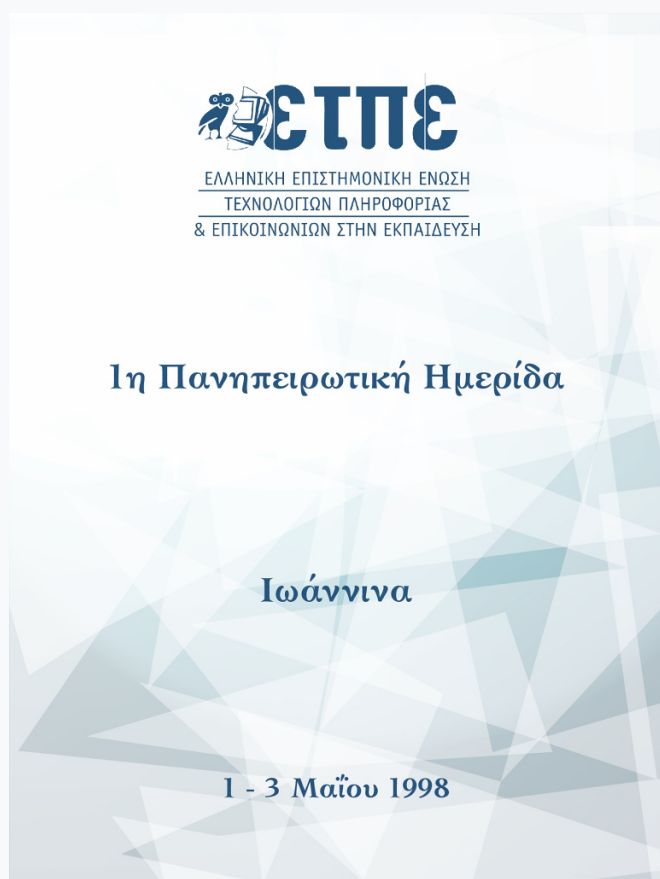


Συνέδρια της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Τεχνολογιών Πληροφορίας & Επικοινωνιών στην Εκπαίδευση

Τόμ. 1 (1998)

1η Πανεπιστημιακή Ημερίδα



Η πληροφορική ως εκπαιδευτικό εργαλείο
Προσομοίωση πειραμάτων φυσικής

Δ. Τσαούσης

Βιβλιογραφική αναφορά:

Τσαούσης Δ. (2022). Η πληροφορική ως εκπαιδευτικό εργαλείο Προσομοίωση πειραμάτων φυσικής. *Συνέδρια της Ελληνικής Επιστημονικής Ένωσης Τεχνολογιών Πληροφορίας & Επικοινωνιών στην Εκπαίδευση*, 1, 159–167. ανακτήθηκε από <https://eproceedings.epublishing.ekt.gr/index.php/cetpe/article/view/4713>

Η πληροφορική ως εκπαιδευτικό εργαλείο

Προσομοίωση πειραμάτων φυσικής

Δ. Τσαούσης

Εισαγωγή

Η Φυσική θεωρείται από τα δυσκολότερα μαθήματα για τους περισσότερους μαθητές σ' όλο τον κόσμο. Σ' αυτήν όμως οφείλουν την ύπαρξη τους αυτοκίνητα, τρένα, αεροπλάνα, τηλέφωνα, τηλεοράσεις και γενικά ο πολιτισμός μας. Είναι η βάση των θετικών επιστημών και για τον πολύ κόσμο είναι μαγικά. Για τον κόσμο που ασχολείται μαζί της βέβαια δεν αποτελεί κάτι μαγικό πλην όμως τους έχει μαγέψει.

Η εισαγωγή των μαθηματικών στην Φυσική ήταν σημαντική καμπή στην πορεία της εξέλιξης της και ήταν αυτό που της έδωσε την τεράστια ανάπτυξη. Κατάφερε να περιγράψει τα διάφορα φυσικά φαινόμενα με την χρήση μαθηματικών τύπων. Δεν θα πρέπει όμως, όσοι ασχολούμαστε με την φυσική, να μένουμε στην χρήση των μαθηματικών τύπων μόνο, διότι τότε δεν θα ξέρουμε τι πραγματικά σημαίνουν αυτοί οι τύποι. Και αντιστρόφως ένα φυσικό φαινόμενο δεν θα μπορούμε να το εκφράσουμε με τύπους. Αυτό που συνδέει το φυσικό φαινόμενο με τους τύπους των μαθηματικών είναι το πείραμα. Το πείραμα μπορεί να πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο ή να κάνουμε χρήση του computer για την προσομοίωση του.

Η διδασκαλία της Φυσικής

Η διδασκαλία της φυσικής παρουσιάζει πολύ μεγάλα προβλήματα διεθνώς. Απαιτείται κατ' αρχάς δάσκαλο που και να ξέρει πολύ καλά το αντικείμενο που θα διδάξει, αλλά και να έχει αρκετά μεγάλη μεταδοτικότητα. Η ευρηματικότητα και η φαντασία είναι επίσης προτερήματα που πρέπει απαραίτητα να έχει ο δάσκαλος της φυσικής, αφού καλείται να διδάξει στους μαθητές του πράγματα αφενός καινούργια και αφετέρου πράγματα που αντιστέκονται. Ο τελευταίος όρος έχει την έννοια ότι οι μαθητές πριν τη διδασκαλία είχαν μια διαφορετική άποψη για ένα θέμα, αυτό που πιστεύει ο πολύς ο κόσμος, πείθεται κατά την διάρκεια του μαθήματος για την σωστή άποψη, αλλά μετά από λίγο καιρό επανέρχεται μόνος του στην προηγούμενη άποψη, αυτήν που κοινώς επικρατεί. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι εκείνο της ελεύθερης πτώσης. Επικρατεί η άποψη ότι τα βαρύτερα σώματα πέφτουν γρηγορότερα. Πάρα πολλοί μαθητές, ενώ καταλαβαίνουν κατά την διάρκεια της διδασκαλίας ότι η πρόταση αυτή δεν είναι σωστή, μετά από κάποιο χρονικό διάστημα επανέρχονται στην επικρατούσα άποψη.

Αλλά και από μεριάς των μαθητών το μάθημα της φυσικής απαιτεί ένα αρκετά καλό επίπεδο γλώσσας, αρκετή ευχέρεια στην χρήση των μαθηματικών και αφαιρετι-

κή ικανότητα. Πάρα πολλοί μαθητές στερούνται των παραπάνω ικανοτήτων με αποτέλεσμα να μη μπορούν να κατανοήσουν την φυσική, με αποτέλεσμα να την κατατάσσουν στα δύσκολα μαθήματα και να προσπαθούν να την αποφύγουν. Με το καλό πείραμα θα μπορούσαν να καταλάβουν πολύ καλύτερα όσα δεν μπόρεσαν να κατανοήσουν με τις επίμονες περιγραφές, τους τύπους και τα νοητικά πειράματα που φιλότιμα τους παραθέτει κατά την διάρκεια του μαθήματος ο καθηγητής τους.

Η πραγματικότητα των Ελληνικών σχολείων

Στην σημερινή πραγματικότητα των ελληνικών σχολείων, τα εργαστήρια ελλείπουν σε ένα πολύ μεγάλο ποσοστό. Αλλά και εκεί που υπάρχουν, η πραγματοποίηση εργαστηριακών ασκήσεων επαφίεται στο φιλότιμο και την φιλοπατρία του καθηγητή. Για να ετοιμάσει μια εργαστηριακή άσκηση πρέπει να αφιερώσει πάρα πολύ χρόνο εκτός του προγράμματος του. Θα πρέπει να καταβάλει τεράστια προσπάθεια για να επιβλέψει 30 μαθητές στο εργαστήριο μόνος του με κίνδυνο να έχει κάποιο ατύχημα. Αλλά και αν όλα πάνε καλά κατόπιν πρέπει να ξαναδιαθέσει αρκετό χρόνο εκτός προγράμματος για να τακτοποιήσει πάλι τα διάφορα όργανα στην θέση τους και να επιδιορθώσει μερικά από αυτά ώστε να τα έχει διαθέσιμα για την επόμενη άσκηση. Στο τέλος βέβαια όχι μόνο δεν θα του πει κανένας ευχαριστώ, αλλά πιθανόν να ακούσει και κακά σχόλια αφού απασχολεί τα παιδιά με πράγματα που δεν ζητούνται στις εξετάσεις που μέχρι σήμερα γίνονται.

Έτσι σήμερα στα ελληνικά σχολεία δεν γίνονται πειράματα. Οι μαθητές μας ασχολούνται μόνο με την θεωρία και ξέρουν να επιλύουν πολύ δύσκολα προβλήματα Φυσικής, χωρίς να κατανοούν τι πράγματι συμβαίνει στην πραγματικότητα. Ή αντίστροφα, αν τους δείξεις ένα φυσικό φαινόμενο δεν μπορούν να το συνδέσουν με τους τύπους που ξέρουν.

Τα φαινόμενα δείχνουν ότι η πολιτεία άρχισε να κατανοεί την αξία του πειράματος στο μάθημα της φυσικής και τουλάχιστον σε επίπεδο προτάσεων και νόμων άρχισαν να φθάνουν ελπιδοφόρα μηνύματα.

Το πείραμα

Για να πραγματοποιηθεί το πείραμα απαιτείται θεσμοθέτηση του πειράματος, εργαστήριο, προσωπικό και κατάλληλα εργαστηριακά όργανα. Όλα τα παραπάνω δεν είναι ούτε εύκολα ούτε φτηνά. Για να φθάσουμε στην λειτουργία του εργαστηρίου απαιτείται και πολιτική βούληση και χρόνος και χρήμα. Αλλά και όταν όλα αυτά γίνουν πραγματικότητα, ένα πείραμα άλλοτε μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα, άλλοτε δύσκολα και άλλοτε είναι ακατόρθωτο. Διότι σε ένα συμβατικό εργαστήριο δεν μπορείς να κάνεις ασκήσεις που προϋποθέτουν έλλειψη βαρύτητας ή έλλειψη τριβών ούτε ασκήσεις που θέλουν μεγάλο χώρο ή εξελίσσονται πολύ γρήγορα και δεν προλαβαίνουν οι μαθητές όχι μόνο να πάρουν μετρήσεις αλλά και να παρατηρήσουν απλώς αυτό που προβλέπει η άσκηση.

Προσομοίωση πειραμάτων

Μια εναλλακτική λύση για όλα τα παραπάνω προβλήματα αποτελεί η προσομοίωση πειραμάτων ή πείραμα με την βοήθεια computer. Με την προσομοίωση πειραμάτων δεν εκτελούμε ένα πραγματικό πείραμα, το οποίο είναι αναντικατάστατο, αλλά δημιουργούμε μια εικονική πραγματικότητα. Στο πρόγραμμα που τρέχουμε έχουμε εισαγάγει όλες τις εξισώσεις-νόμους που περιγράφουν τα διάφορα φυσικά φαινόμενα επάνω στα οποία πειραματιζόμαστε. Έτσι, δεν θα πρέπει να ψάχνουμε για αποκλίσεις μεταξύ της θεωρίας και του πειράματος που πραγματοποιείται με computer. Με άλλα λόγια η προσομοίωση πειραμάτων δεν αποτελεί επιβεβαίωση της θεωρίας όπως στο πραγματικό πείραμα, αλλά μια αντίστροφη μετάφραση της θεωρίας. Με την θεωρία έχουμε καταφέρει να μεταφράζουμε την εξέλιξη ενός φυσικού φαινομένου με την μορφή ενός αριθμού εξισώσεων. Με την προσομοίωση πειραμάτων, δίνοντας τις εξισώσεις που περιγράφουν ένα φυσικό φαινόμενο έχουμε στην οθόνη του computer την εξέλιξη του φαινομένου. Η προσομοίωση πειραμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί από καθηγητές και από μαθητές.

Οι καθηγητές μπορούν να επιδείξουν διάφορα προβλήματα τα οποία μέχρι πρόσφατα μπορούσαν να τα επιδείξουν μόνο με μορφή στατικών σκίτσων και να δώσουν απάντηση με εικόνα στις ερωτήσεις που συνήθως γίνονται κατά την διάρκεια του μαθήματος του τύπου "τι θα συνέβαινε αν στο τάδε φυσικό φαινόμενο αλλάξουμε τον δείνα παράγοντα". Ασφαλώς και μπορούν να χρησιμοποιήσουν το computer σαν εργαστήριο.

Οι μαθητές χρησιμοποιώντας μόνοι τους την προσομοίωση πειραμάτων μπορούν να εκτελούν διάφορα πειράματα αλλάζοντας διαφόρους παραμέτρους. Τα πειράματα αυτά θα προκαλέσουν καινούργια ερωτηματικά στο μυαλό τους και μέσω αυτών των ερωτημάτων μια εις βάθος κατανόηση της φυσικής.

Το πείραμα με computer είναι ένας τρόπος να ξεπεράσει κανείς πολλές δυσκολίες. Διότι:

1. Δεν απαιτεί την ύπαρξη εργαστηριακού χώρου.
2. Μπορεί να μας μεταφέρει σε συνθήκες έλλειψης βαρύτητας και τριβών.
3. Διαθέτει μια αποθήκη με πολλά όργανα πάντα ταξινομημένα, που δεν σου τα παίρνουν. Αυτό δεν είναι λίγο αφού όσοι ζούμε το εργαστήριο γνωρίζουμε πολύ καλά τι σημαίνει ταξινόμηση των εργαστηριακών οργάνων και πόσο χρόνο χρειαζόμαστε να βρούμε ένα όργανο που έχει παραπέσει.
4. Κάνει ορατό κάτι, που επειδή εξελίσσεται γρήγορα, δεν θα εγίνετο αντιληπτό αν γινόταν στο συμβατικό εργαστήριο.
5. Μπορείς να κάνεις ένα πείραμα χρονοβόρο σε πολύ σύντομο χρόνο.
6. Μπορείς να κάνεις ένα πείραμα, που κανονικά θα απαιτούσε μεγάλο χώρο, μέσα στην τάξη.
7. Μπορείς να πάρεις πολλές μετρήσεις και να έχεις γραφικές παραστάσεις που αλλιώς θα ήταν ακατόρθωτο. Αυτό προσφέρει πάρα πολλά διότι πολλές φορές για να δείξεις κάτι πρέπει να πάρεις μετρήσεις και να κάνεις γραφικές

παραστάσεις που σημαίνει όχι μόνο πολύ χρόνο αλλά και ότι τα παιδιά ασχολούμενα με όλα αυτά, ξεχνούν το θέμα της άσκησης.

8. Μπορεί να επαναληφθεί ένα πείραμα το ίδιο καλά πολλές φορές. Δεν είναι λίγες οι φορές που για τυχαίους λόγους το πείραμα δεν επαναλαμβάνεται.
9. Το πείραμα πετυχαίνει πάντα Έχει συμβεί σε όλους μας ένα πείραμα που το προετοιμάσαμε από την προηγούμενη να μη πετύχει την ώρα του μαθήματος.
10. Το πείραμα μπορεί να χρονομετρηθεί και να αφιερώσεις για αυτό όσο χρόνο έχεις προγραμματίσει. Φεύγει με αυτόν τον τρόπο το άγχος του καθηγητή που έχει να κάνει με το αν θα του φθάσει ο χρόνος για να δείξει αυτά που θέλει.
11. Είναι δυνατόν να αλλάξει η πορεία της εργαστηριακής άσκησης εύκολα αν το ζητήσει κάποιος μαθητής, και δεν είναι λίγες οι φορές που οι μαθητές έχουν την απορία πώς θα εξελίσσετο μια άσκηση αν άλλαζε μια παράμετρος του πειράματος.
12. Τέλος μπορούμε να κάνουμε πειράματα που αν τα πραγματοποιούσαμε στο φυσικό χώρο, θα είχαμε πρόβλημα με τους γύρω μας. Φανταστείτε κάποιον να πειραματίζεται στις βολές πετώντας μπάλες στην αυλή ενός σχολείου ή στα χωράφια!

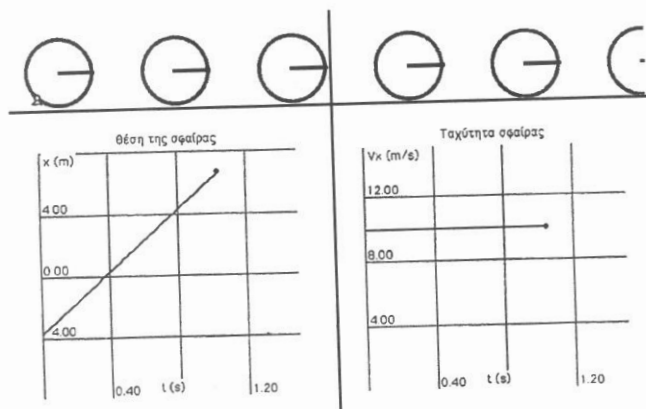
Η χρησιμοποίηση προγραμμάτων προσομοίωσης πειραμάτων σε *computer* δεν είναι ισοδύναμη με την παραδοσιακή εκτέλεση των πειραμάτων στο εργαστήριο. Κατά την εργαστηριακή άσκηση οι μαθητές ζούνε το πείραμα στιγμή προς στιγμή, αντιλαμβάνονται τις δυσκολίες του, κατανοούν καλύτερα την λογική του, επεξεργάζονται τα αποτελέσματα, εκτελούν τους υπολογισμούς και κάνουν τις γραφικές παραστάσεις μόνοι τους. Γι' αυτό δεν πρέπει να αποφεύγεται η άσκηση των μαθητών στο εργαστήριο.

Τα προγράμματα προσομοίωσης είναι πολύ χρήσιμα όταν συνδυάζονται με το πραγματικό πείραμα και μάλιστα όταν έπονται αυτού. Έτσι δίνεται όχι μόνο η ευκαιρία να επαναληφθεί εύκολα και γρήγορα το πείραμα στο *computer*, αλλά και να γίνει επέκταση του πειράματος με αλλαγή παραμέτρων και συνθηκών. Η έλλειψη βέβαια εργαστηρίων και διαθέσιμου χρόνου τα καθιστούν απαραίτητα εργαλεία στη διδασκαλία της φυσικής.

Η παρουσίαση στη συνέχεια μερικών πειραμάτων, έχει σκοπό να δείξει την δυνατότητα των προγραμμάτων προσομοίωσης από την οποία ευελπιστώ ο καθένας μας να βρει κάτι χρήσιμο για τον εαυτό του ή για μια διαφορετική παρουσίαση του μαθήματος στην τάξη.

Παρουσίαση μερικών πειραμάτων

1. Ευθύγραμμη ομαλή κίνηση



Σχ. 1. Ευθύγραμμη ομαλή κίνηση

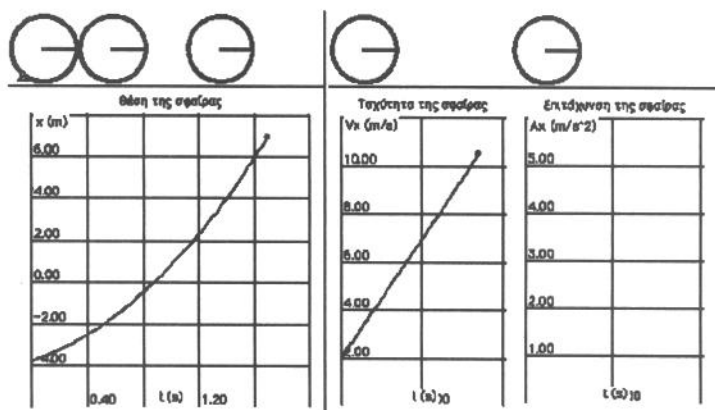
Η ευθύγραμμη ομαλή κίνηση είναι η απλούστερη των κινήσεων, αλλά παρ' όλα αυτά είναι αδύνατο να επιτύχουμε μια τέτοια κίνηση σε συμβατικό εργαστήριο, αφού πρέπει να απαλείψουμε εντελώς τις τριβές. Ακόμη και στις αεροτράπεζες, η κίνηση δεν είναι ευθύγραμμη ομαλή αφού υπάρχουν οι τριβές με τον αέρα. Στο εργαστήριο θα μπορούσαμε να δείξουμε την ευθύγραμμη ομαλή κίνηση χρησιμοποιώντας την οριακή ταχύτητα. Ρίχνουμε μια σφαίρα μέσα σε ένα ποτήρι με κάποιο υγρό και αφού αποκτήσει την οριακή της ταχύτητα, κάνει Ε.Ο.Κ. Αν όμως θελήσουμε να πάρουμε μετρήσεις για να βγάλουμε διαγράμματα τότε τα πράγματα δυσκολεύουν πάρα πολύ. Θα χαθεί πολύτιμος χρόνος με αμφίβολα αποτελέσματα.

Η κίνηση αυτή μπορεί ναδειχτεί εύκολα με την προσομοίωση. Στο σχήμα 1 φαίνεται η οθόνη του computer από ένα πρόγραμμα προσομοίωσης μιας Ε.Ο.Κ. Οι μαθητές μπορούν να δουν την κίνηση ζωντανά, αλλά μπορούν να πάρουν και στο θρανίο τους από ένα αντίγραφο του σχήματος και να μετρήσουν τις αποστάσεις των διαδοχικών θέσεων της σφαίρας και να κατανοήσουν την έννοια ότι σε ίσους χρόνους έχουν ίσα διαστήματα. Ασφαλώς παίρνουν και τα αντίστοιχα διαγράμματα του διαστήματος και της ταχύτητας.

Θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι για να τρέξει το πρόγραμμα και να πάρουμε τις μετρήσεις και τις γραφικές παραστάσεις μας αρκούν μόλις πέντε λεπτά και μας μένει η υπόλοιπη ώρα για να λύσουμε απορίες, ασκήσεις, να συζητήσουμε με τους μαθητές και να ξαναδείξουμε το "πείραμα" με διαφορετική ταχύτητα, ή με δύο κινητά με ίδιες ή διαφορετικές ταχύτητες.

Το πείραμα είναι ασφαλές, γρήγορο, θα πετύχει σίγουρα και θα μας περισσέψει χρόνος για εμβάθυνση και λύση αποριών. Στο πείραμα που γίνεται στο εργαστήριο, μας ξεφεύγουν τα παιδιά, δεν μπορούμε να ελέγξουμε απόλυτα τον χρόνο ενώ αν χρησιμοποιούμε βοηθητικά όργανα όπως φωτοκύτταρα ή άλλα όργανα αυτοματισμού αποσπάται η προσοχή των παιδιών και δεν παίρνουν τελικά αυτό το οποίο είχαμε θέσει σαν στόχο του μαθήματος.

2. Ευθύγραμμη ομαλά μεταβαλλόμενη κίνηση



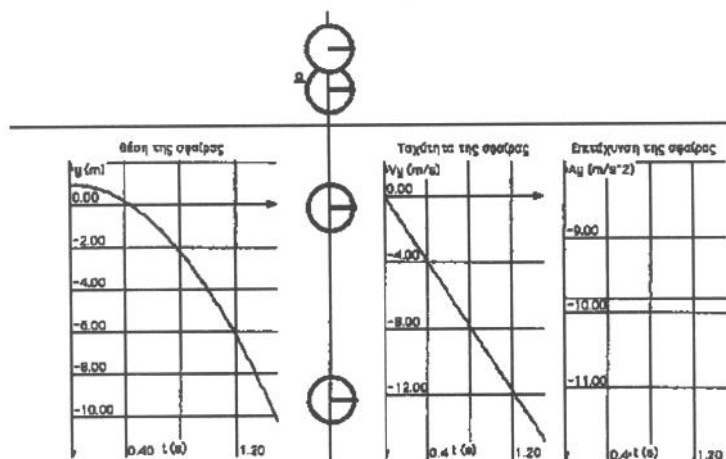
Σχ. 2 .Ευθύγραμμη ομαλά μεταβαλλόμενη κίνηση

Για το είδος αυτό της κίνησης, έχουν δοθεί κατά καιρούς οδηγίες από το υπουργείο να πειραματίζονται οι μαθητές με βαγονάκια, που τα τραβούν με σταθερή δύναμη, ενώ ένας χρονομετρητής σημαδεύει την θέση του κινητού κατά ίσα χρονικά διαστήματα. Κατόπιν μετρούν τις διαδοχικές θέσεις του κινητού με σκοπό να ανακαλύψουν ότι τα διαστήματα είναι ανάλογα του τετραγώνου του χρόνου. Όσοι συνάδελφοι έχουν δουλέψει την άσκηση στην τάξη και έχουν αυτή την κακή εμπειρία, βλέποντας το σχήμα 2, θα παραδεχθούν ότι με την προσομοίωση μπορούν τελικά να κάνουν καλύτερα αυτά που είχαν σχεδιάσει και ότι οι μαθητές τους θα καταλάβουν το μάθημα.

Ασφαλώς, εκτός από τα διαδοχικά αποτυπώματα, έχουμε την ευχέρεια και μετρήσεις και γραφικές παραστάσεις να πάρουμε, ενώ αν θέλαμε να επεκταθούμε περισσότερο θα μπορούσαμε να βάλουμε δύο κινητά και να κάνουμε άπειρους συνδυασμούς.

Ασκήσεις που περιλαμβάνουν δύο κινητά και το ένα προσπερνά το άλλο παρουσιάζουν δυσκολία να τις καταλάβουν οι μαθητές. Εδώ μας δίνεται η ευκαιρία να τους παρουσιάσουμε με εικόνα όσα τόσα χρόνια τους λέγαμε να φανταστούν.

3.Ελεύθερη πτώση

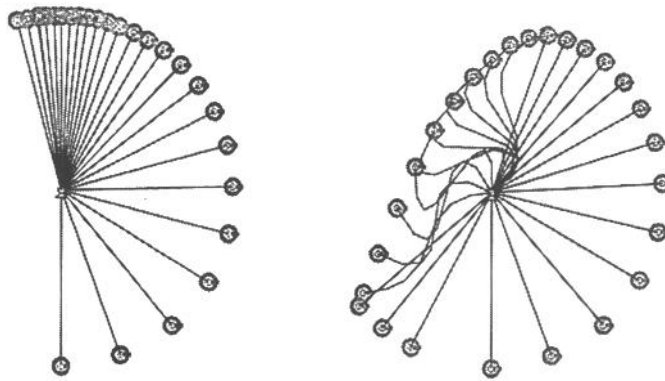


Σχ. 3. Ελεύθερη πτώση

Σαν επιταχυνόμενη κίνηση που είναι, η προσομοίωση εδώ έχει όλα τα πλεονεκτήματα του προηγούμενου παραδείγματος. Στο σχήμα 3, φαίνεται μια ελεύθερη πτώση με τις γραφικές παραστάσεις θέσης, ταχύτητας και επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου. Για μια εργαστηριακή άσκηση, -στον πραγματικό χώρο, το σχήμα 3 θα ήταν ότι καλύτερο θα μπορούσε να γίνει. Εδώ επί πλέον μας δίνεται η δυνατότητα να αλλάξουμε την τιμή του g . Επίσης μπορούμε να δείξουμε ότι στο κενό δύο σώματα πέφτουν συγχρόνως, ενώ όταν υπάρχει αέρας όχι. Αν δείξουμε πολλά πειράματα ίσως τελικά να καταφέρουμε να κάνουμε κτήμα των μαθητών ότι δεν έχει σχέση η βαρύτητα με την πυκνότητα του αέρα, μια που οι περισσότεροι άνθρωποι πιστεύουν ότι στο κενό δεν υπάρχει βαρύτητα αν και έχουν τελειώσει το λύκειο.

4. Κυκλική κίνηση

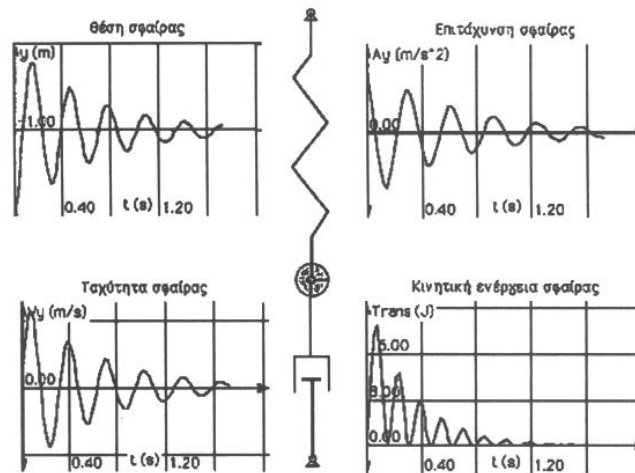
Το σχήμα 4 παρουσιάζει την εξέλιξη δύο πειραμάτων. Στο πρώτο, σώμα περιστρέφεται κατακόρυφα σε βαρυτικό πεδίο, με αρχική ταχύτητα στηριζόμενο σε αβαρή ράβδο. Εδώ ο μαθητής μπορεί να αντιληφθεί ότι το σώμα ανεβαίνοντας χάνει κινητική ενέργεια και άρα ταχύτητα, από τα μικρότερα διαστήματα που διανύει το σώμα σε ίσους χρόνους, με την πάροδο του χρόνου.



Σχ. 4. Περιστροφή σώματος που αιωρείται α) μέσω αβαρούς ράβδου β) μέσω σχοινιού. Τα δύο σώματα έχουν την ίδια αρχική ταχύτητα.

Στο δεύτερο πείραμα η αβαρής ράβδος έχει αντικατασταθεί από νήμα. Από μόνο του το σχήμα μιλάει και θα μπορούσε είναι αυτό η αφορμή να εμβαθύνει ο μαθητής για την ανακύκλωση ενός σώματος ή να είναι το ξεκίνημα στην τάξη για μια καλύτερη προσέγγιση του θέματος.

5. Φθίνουσα ταλάντωση



Σχ. 5. Φθίνουσα ταλάντωση

Το σχήμα 5 περιλαμβάνει πειραματική διάταξη με την οποία επιτυγχάνουμε

την πραγματοποίηση μιας φθίνουσας ταλάντωσης. Εκτός από την πειραματική διάταξη που έχει πολλές δυνατότητες αφού είναι δυνατόν να μεταβάλουμε τις τιμές της μάζας, της σταθεράς του ελατηρίου και της σταθεράς απόσβεσης, από τις γραφικές παραστάσεις έχουμε την δυνατότητα να παρατηρήσουμε τις διαφορές φάσης μεταξύ της απομάκρυνσης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Επίσης φαίνεται σε όλα τα μεγέθη η εκθετική μείωση του πλάτους και η διαφορά στην συχνότητα της κινητικής ενέργειας από τα υπόλοιπα μεγέθη.

Αναφορές

1. Τσαπαρλής Γ, Θέματα διδακτικής φυσικής και χημείας στη μέση εκπαίδευση, Ιωάννινα 1988.
2. E. F. Taylor, Physics Education, 22, 202, 1987.
3. The Physics Teacher, 25, 5, 1987.
4. Interactive Physics, Knowledge Revolution, San Francisco, 1992.