

Συμβολή ήχων - Στάσιμα ηχητικά κύματα σε ηχητικούς σωλήνες και σε μεταλλικές ράβδους με τη χρήση MBL - ΣΣΛΑ

Ρούμελης Νικόλαος¹, Γαλλόπουλος Αλέξανδρος²

¹ Δρ. Χημείας - Σχολικός Σύμβουλος ΠΕ04 Κυκλάδων - πρώην Υπεύθυνος ΕΚΦΕ
nroum@sch.gr

² Φυσικός - πρώην Συνεργάτης ΕΚΦΕ Σύρου - Καθηγητής ΓΕΛ Τήνου,
agallopoul@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία προτείνεται η χρήση του *Microcomputer Based Laboratory (MBL)* - Συστήματος Συγχρονικής Λήψης και Απεικόνισης (Σ.Σ.Λ.Α.) σε πειραματικές εφαρμογές μέτρησης ταχύτητας ήχου στον αέρα και σε μεταλλικές ράβδους (Fe και κράματος Al).

Οι δυνατότητες του αισθητήρα ήχου (μικροφώνου) του Vernier LabPro και του λογισμικού του LoggerPro3.2 - Συστήματος ΣΛΑ (MBL) - εργαστηρίων ΦΕ του Ν. Κυκλάδων τα οποία εξοπλίστηκαν από το ΕΠΕΑΕΚ - ΠΕΠ. Ν. Αιγαίου - επιτρέπουν τη μέτρηση χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών ηχητικών παλμών από ανάκλαση ή από ευθύγραμμη διάδοση, που είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ήχου. Επίσης προσφέρουν διαδικασίες προσαρμογής ημιτονοειδών συναρτήσεων σε αρμονικές ηχητικές διαταραχές και τη δυνατότητα ανάλυσης Fourier (FFT-Fast Fourier Transformation) σε πιο σύνθετες ηχητικές διαταραχές, επιτρέποντας έτσι υπολογισμούς συχνοτήτων (θεμελιωδών και αρμονικών) που είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του ήχου.

Σε πείραμα με 2 μικρόφωνα σε απόσταση 3m, προσδιορίζεται το Δt και από εκεί η ταχύτητα του ήχου στον αέρα. Παρουσιάζονται δυο πειράματα προσδιορισμού ταχύτητας του ήχου στον αέρα με χρήση ηχητικού σωλήνα μήκους 1,4 m: το πρώτο με κλειστό στο ένα άκρο και ανοικτό στο άλλο (ανάκλαση παλμού), το δεύτερο με τη δημιουργία στάσιμου κύματος σε σωλήνα ανοικτό και στα δύο άκρα. Επίσης, σε 4 πειράματα προσδιορίζεται η ταχύτητα του ήχου σε μεταλλικές ράβδους μήκους L (σιδήρου=0,8m και αλουμινίου=1,0m), με τη δημιουργία στάσιμων κυμάτων, όπου ισχύει $L=2\lambda/4$ και $L=4\lambda/4$.

Τα πειράματα χρησιμεύουν στη βαθύτερη κατανόηση του κύματος, του στάσιμου κύματος και γενικότερα της συμβολής κυμάτων, έννοιες που περιλαμβάνονται στη Φυσική Γ' Λυκείου Κατεύθυνσης. Στο τέλος, παρουσιάζεται ένα συνοπτικό φύλλο εργασίας με κατάλληλες ερωτήσεις στο οποίο ενσωματώνονται και τα παραπάνω πειραματικά αποτελέσματα, προσφέροντας τη δυνατότητα μιας διερευνητικής εργαστηριακής άσκησης στο κεφάλαιο Στάσιμα Κύματα.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Στάσιμο κύμα, Συμβολή κυμάτων, Ταχύτητα ήχου, Ηχητικοί σωλήνες, Μεταλλικές ράβδοι Fe - Al, Φυσική Κατ/σης Γ' Λυκείου, Ανάλυση Fourier (FFT) σε

πειραματικά δεδομένα, Προσομοίωση ηχητικού κύματος, MBL, ΣΣΛΑ, Vernier LabPro - Logger Pro3.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διδασκαλία του κεφαλαίου «Κύματα» και των εννοιών της ταχύτητας διάδοσης κύματος, της συμβολής κυμάτων και των αποτελεσμάτων της όπως στάσιμο κύμα, επιφανειακή συμβολή και διακρότημα, περιλαμβάνεται στη ύλη της Φυσικής Γ' Θετικής-Τεχνολογικής Κατεύθυνσης (Ιωάννου κ.ά., 2005). Η διδακτική του κεφαλαίου των κυμάτων προϋποθέτει την κατανόηση εννοιών από τους μαθητές, όπως: «Ταλάντωση (ταλαντωτής, περίοδος – συχνότητα – πλάτος – ενέργεια)», το μοντέλο του «ελαστικού μέσου» και την υιοθέτηση της άποψης ότι τόσο τα στερεά υλικά όπως τα μέταλλα, όσο και τα ρευστά όπως νερό και ο αέρας, συμπεριφέρονται σαν «ελαστικά μέσα». Οι μαθητές πρέπει να κατανοήσουν τη «διεύθυνση διάδοσης», τον τρόπο διάδοσης «διαμήκη και εγκάρσια κύματα» και την «ταχύτητα διάδοσης» του κύματος (Ιωάννου 2005).

Η πειραματική διδασκαλία των εννοιών της Ταλάντωσης αρχίζει με το «Εκκρεμές» (Εξάρτηση Περιόδου από παράγοντες - Γ' Γυμνασίου, Β' Λυκείου), τη μελέτη της «Απλής Αρμονικής Ταλάντωσης» (Γ' Λυκείου Κατεύθυνσης - υπολογισμός σταθεράς σκληρότητας ελατηρίων). Για την εποπτικότερη παρουσίαση σε πραγματικό χρόνο των συναρτήσεων πλάτους-ταχύτητας-επιτάχυνσης-δύναμης ως προς το χρόνο, σημαντική βοήθεια προσφέρουν τα Συστήματα ΣΛΑ τόσο του Multilog-Dblab όσο και του Vernier LabPro με δοκιμασμένες και καταξιωμένες πλέον διδακτικές εφαρμογές (Μουρούζης κ.ά. 2005, Βαμβακούσης 2006). Υπάρχουν επίσης εργαστηριακές ασκήσεις Σύνθεσης ταλαντώσεων για τη Γ' Λυκείου, όπως τα Διακροτήματα σε Παλμογράφο από γεννήτριες ακουστικών συχνοτήτων, όπου οι μαθητές ακούνε μέγιστα (ενίσχυση) και ελάχιστα (απόσβεση) και βλέπουν στην οθόνη τη μορφή του Διακροτήματος (2^ο ΕΚΦΕ Λάρισας-Ελασσόνας 2006).

Η πειραματική προσέγγιση των εννοιών του Κύματος αρχίζει από τη Γ' Γυμνασίου με τα Ελατήρια κυματισμού (επιδείξεις μηχανικών κυμάτων για πλάτος-διεύθυνση διάδοσης-διαμήκη και εγκάρσια κύματα κ.ά.), συνεχίζεται με τα κλασικά πειράματα της Γ' Λυκείου Κατεύθυνσης διάδοσης - ανάκλασης - επιφανειακής συμβολής Κυμάτων στη συσκευή κυματισμού των εργαστηρίων ΦΕ των Λυκείων (Καλογήρου-ΕΚΦΕ Ηλείας 2008, Πετρόπουλος&Γάτσιος-ΕΚΦΕ Ν. Σμύρνης 2008). Τέλος, για τα Στάσιμα κύματα υπάρχει η άσκηση εύρεσης ταχύτητας ήχου στον αέρα με τη βοήθεια του ηχητικού σωλήνα Kundt, όπου οι μαθητές ακούνε μέγιστα (κοιλίες) και κάνουν υπολογισμούς βάσει της θεωρίας, χωρίς όμως οπτικοποίηση της συμβολής των ηχητικών κυμάτων (Πετρόπουλος & Γάτσιος - ΕΚΦΕ Ν. Σμύρνης 2008).

Η χρήση των ΣΣΛΑ-MBL στην πειραματική διδασκαλία των «Ηχητικών Κυμάτων» σπανίζει στη ελληνική βιβλιογραφία. Αξίζει να αναφέρουμε την εργασία για τα Στάσιμα Ηχητικά Κύματα σε σωλήνα Kundt, με οπτική απεικόνιση των διακυμάνσεων της πίεσης του αέρα (κοιλίες) συναρτήσει της θέσης (διάγραμμα ήχου συναρτήσει θέσης), μέσω μικροφώνου και του αισθητήρα διαστήματος, του Multilog Dblab (Τουντουλίδης 2010). Επίσης μνημονεύουμε την υπό δημοσίευση εργασία, η οποία αποτελεί διδακτική πρόταση σε μαθητές 14 ετών στη Φυσική Γ' Γυμνασίου του κεφαλαίου «Ήχος» και των εννοιών: Ταυτοποίηση ήχων, Ακουστότητα, Ύψος και Χροιά των Ηχητικών Κυμάτων,

μέσω οπτικής απεικόνισης των διακυμάνσεων πίεσης αέρα και μέσω διαγραμμάτων ήχων με αισθητήρα μικρόφωνο του Vernier Lab Pro. (Βαμβακούσης & Μπρες 2011).

Το σύστημα Vernier-LabPro (εξοπλισμός του 2005, μέσω ΠΕΠ Ν. Αιγαίου), σε 13 Λύκεια και Λυκειακές Τάξεις Γυμνασίων του Νομού Κυκλάδων, που δεν είχαν εξοπλιστεί από το ΥΠΕΠΘ, δείχνει φιλικό με τεράστιες δυνατότητες επεξεργασίας δεδομένων (προσαρμογές μαθηματικών συναρτήσεων, μαθηματική επεξεργασία διαγραμμάτων, μετασχηματισμούς FFT κά), λόγω του σύγχρονου λογισμικού Logger Pro3.2. Ελπίζουμε ότι οι εκπαιδευτικοί σταδιακά θα το χρησιμοποιούν περισσότερο, διότι δεν παρουσιάζει τα μειονεκτήματα (μη παραθυρικό περιβάλλον - δυσκολίες χρήσης) του Multilog (Βαμβακούσης & Μακρυωνίτης 2003, Ρούμελης 2005).

Χρειάζεται όμως η συμβολή των ΕΚΦΕ, ώστε να υπάρχουν εύκολα εκτελέσιμες πειραματικές εφαρμογές σε μια διδακτική ώρα. Η εργασία αυτή όπως και άλλες με το Vernier (Βαμβακούσης 2006, Βαμβακούσης & Μπρες 2011, Ρούμελης 2005, 2009 & 2010) έχουν στόχο τα παραπάνω.

ΟΡΓΑΝΑ και ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήσαμε:

- MBL (Microcomputer Based Laboratory) - Σύστημα ΣΛΑ Vernier Lab Pro, με λογισμικό χρήσης το Logger Pro 3.2 και αισθητήρα 1 ή και 2 μικρόφωνα (Εγχειρίδιο Vernier 2004)
- Ηχητικό σωλήνα 1,4 m που συναρμολογήθηκε από 2 σωλήνες Kundt, των εργαστηρίων ΦΕ με ανοικτό και τα δύο άκρα ή με κλειστό το ένα άκρο του
- Μεταλλικές ράβδους ορθοστατών από Fe μήκους 0,8 m και από κράμα Al μήκους 1,0 m με αντίστοιχους ορθοστάτες και σφιγκτήρες
- Ως πηγή ηχητικών κυμάτων παλαμάκια με τα χέρια και ξύλινες ράβδους - σφυράκια
- Ψηφιακό θερμόμετρο των εργαστηρίων ΦΕ των Λυκείων

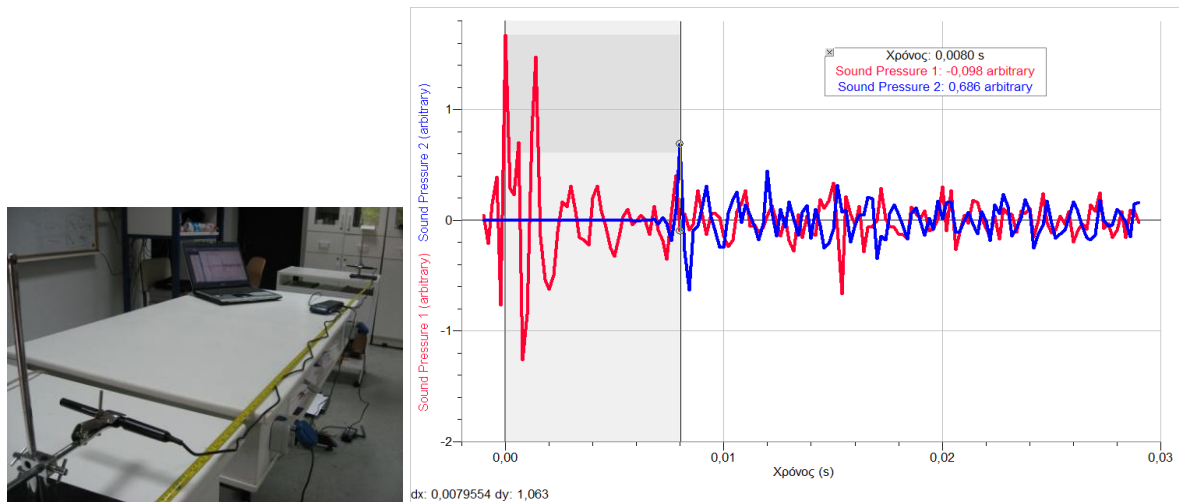
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΗΧΟΥ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ ΜΕ 2 ΜΙΚΡΟΦΩΝΑ

Τοποθετώντας 2 μικρόφωνα στο LabPro στη μέγιστη δυνατή απόσταση $L = 2,75$ m, που καθορίζεται από το μήκος των καλωδίων, μετράμε τη χρονική διάρκεια που διανύει ο ήχος από το μικρόφωνο 1 (Είσοδος 1) έως το μικρόφωνο 2 (Είσοδος 2). Για πηγή χρησιμοποιούμε παλαμάκι με τα χέρια μας σε περίπου 15 cm πίσω από το μικρόφωνο 1 (Σχήμα 1).

ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ: Συλλογή - Βάση Χρόνου: 0,03 s με ρυθμό 5000 δείγματα/s,

Ενεργοποίηση Σκανδαλισμού: Έναρξη συλλογής όταν CH1 - Microphone 1 αυξάνεται

σε 0,05 arbitrary. Επιλέγουμε Συλλογή: 5 σημείων πριν τον σκανδαλισμό.



Σχήμα 1: Καταγραφή ηχητικού παλμού - «παλαμάκι» με 2 αισθητήρες μικροφώνου του Vernier LabPro

Μετράμε το $\Delta t = 0,008s$ μεταξύ της πρώτης πιο χαρακτηριστικής κορυφής του ηχητικού παλμού «παλαμάκι» μεταξύ των 2 μικροφώνων. Από την απόστασή τους που είναι $\Delta x = 2,75m$ βρίσκουμε την ταχύτητα ήχου στον αέρα σε $20\text{ }^\circ C$, $v = \Delta x / \Delta t = 343,75\text{ m/s}$, με σχετικό σφάλμα = $0,1\%$ σε σχέση με τη θεωρητική τιμή των $343,4\text{ m/s}$.

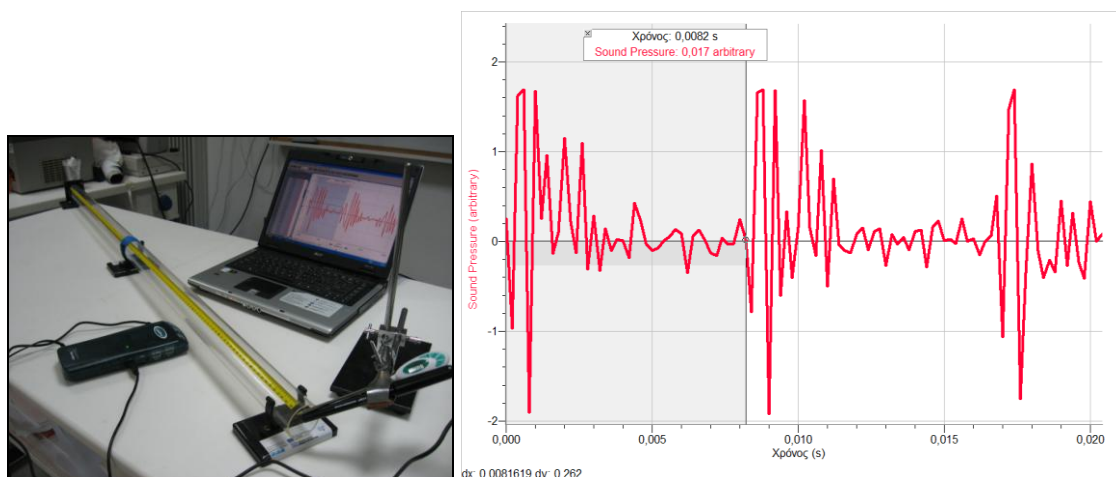
ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΗΧΟΥ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ ΑΠΟ ΑΝΑΚΛΑΣΗ ΣΕ ΗΧΗΤΙΚΟ ΣΩΛΗΝΑ 1,4 m

Τοποθετώντας 1 μικρόφωνο και μετρώντας και τη θερμοκρασία, στην είσοδο του ηχητικού σωλήνα που προκύπτει από συνένωση 2 ηχητικών σωλήνων Kundt με χαρτοταινία και κλείνοντας την απέναντι άκρη με πλαστικό κάλυμμα, προκύπτει ηχητικός σωλήνας συνολικού μήκους $1,41\text{ m}$ (Σχήμα 2).

ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ: Συλλογή - Βάση Χρόνου: $0,03\text{ s}$ με ρυθμό 5000 δείγματα/s ,

Ενεργοποίηση Σκανδαλισμού: Έναρξη συλλογής όταν CH1 -
Microphone 1

αυξάνεται κατά $0,05\text{ arbitrary}$



Σχήμα 2: Καταγραφή ηχητικών παλμών - «παλαμάκι» από ανάκλαση σε ηχητικό σωλήνα με κλειστό στο ένα άκρο και ανοικτό στο άλλο

Για πηγή χρησιμοποιούμε παλαμάκι με τα χέρια μας σε περίπου 10-15 cm από το μικρόφωνο, στην ευθεία του σωλήνα, έτσι ώστε ο ήχος να ανακλαστεί στο εσωτερικό κλειστό άκρο του σωλήνα. Μετρώντας το χρόνο Δt μεταξύ του παραγόμενου παλμού που φτάνει στο μικρόφωνο από πίσω και του ανακλώμενου από το άλλο άκρο του σωλήνα, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ήχου.

Η συνολική απόσταση που διανύει η ηχητική διαταραχή έως την πρώτη του ανάκλαση είναι $\Delta x = 2 \times 1,41 = 2,82$ m και η χρονική διάρκεια που διανύει ο ήχος από την πρώτη φορά που φτάνει στο μικρόφωνο 1 (Είσοδος 1) έως την πρώτη ανακλώμενη κυματική μορφή είναι $\Delta t = 0,0082$ s. Υπολογίζοντας της ταχύτητα του ήχου στον αέρα για 19-20 °C βρίσκουμε $v = \Delta x / \Delta t = 343,9$ m/s, με σχετικό σφάλμα = 0,15 % σε σχέση με τη θεωρητική των 343,4 m/s.

Οι δύο παραπάνω απλοί τρόποι μέτρησης της ταχύτητας του ήχου - με καλή επαναληψιμότητα για διάφορους τρόπους παραγωγής ήχου (πιο δυνατά ή πιο χαμηλά παλαμάκια ή από μεγαλύτερη απόσταση, δημιουργία ήχων με άλλα μέσα με χτυπήματα ξύλων, μεταλλικών υλικών κλπ) - χρησιμεύουν στην κατανόηση της μορφής μιας απλής ηχητικής διαταραχής στον αέρα. Επίσης χρησιμεύουν στην οπτικοποίηση της μεταβολής της πίεσης του αέρα, μέσω του μικροφώνου, που η λειτουργία του προσομοιάζει με τη λειτουργία του ανθρώπινου αυτιού και μπορούν να εξηγήσουν τη βασική διαφορά μεταξύ των ταλαντώσεων των μορίων του ελαστικού μέσου και της διάδοσης του διαμήκου κύματος στο μέσο. Σημαντικό ρόλο έχει και ο απλός τρόπος υπολογισμού της ταχύτητας διάδοσης του ηχητικού κύματος ως το κλάσμα της Απόστασης που διανύει το κύμα μέσα σε κάποια χρονική διάρκεια προς αυτή τη Χρονική διάρκεια.

Τέτοια απλά πειράματα καταπολεμούν ενυπάρχουσες αντιλήψεις των μαθητών:

- ✓ εξαρτούν την ταχύτητα διάδοσης του ήχου από το πλάτος των δονήσεων και τη δύναμη που ασκούμε για την παραγωγή ήχων. Οι μαθητές πιστεύουν ότι διαφορετικού πλάτους δονήσεις έχουν και διαφορετική ταχύτητα διάδοσης.
- ✓ συνδέουν πλάτος, συχνότητα και ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων, έχοντας την άποψη ότι μια γρήγορη ταλάντωση εγγυάται μεγάλο πλάτος και μεγάλη ταχύτητα διάδοσης.
- ✓ σκέφτονται τη συχνότητα με όρους χρονικών μονάδων και τη συγχέουν με την περίοδο. (Βαμβακούσης & Μπρες 2011).

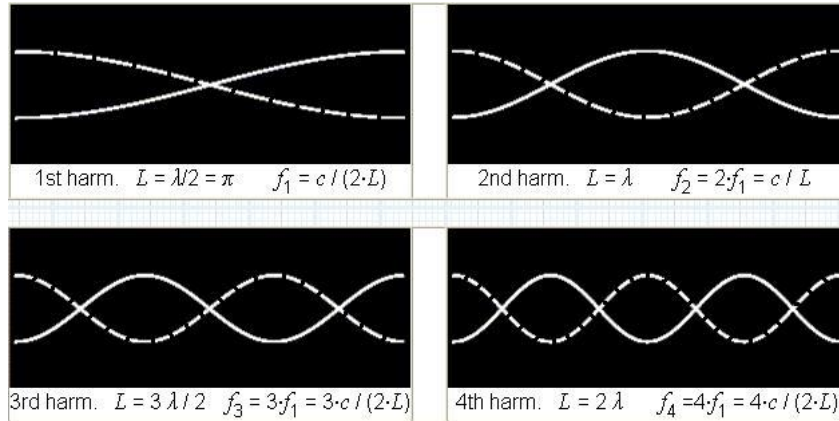
ΣΤΑΣΙΜΑ ΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΣΤΟΝ ΑΕΡΑ ΣΕ ΗΧΗΤΙΚΟ ΣΩΛΗΝΑ 1,4 m

Τα διαμήκη κύματα που κινούνται μέσα σε σωλήνα, ανακλώνται στα άκρα του και επιστρέφοντας συμβάλουν και μπορούν να δημιουργήσουν στάσιμα διαμήκη κύματα. Στα ανοικτά άκρα δημιουργούνται πάντα κοιλίες κίνησης και ενδιάμεσα δημιουργούνται δεσμοί. Δημιουργείται ένα σύνολο από στάσιμα κύματα (θεμελιώδης και ανώτερες αρμονικές του) των οποίων η συχνότητα είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της θεμελιώδους συχνότητας f_1 . Όπως φαίνεται και στο σχήμα 3 τα μήκη κύματος (λ_N) των αρμονικών συνδέονται με το μήκος (L) του σωλήνα, από το γενικό τύπο

$$L = N \lambda_N / 2, \text{ όπου } N = 1, 2, 3, \dots$$

Άρα η θεμελιώδης έχει $\lambda_1 = 2L$, και οι αρμονικές του έχουν $\lambda_2 = L$, $\lambda_3 = 2L/3$, $\lambda_4 = L/2$, αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες συχνότητες των αρμονικών έχουν σχέση $f_N = N f_1$.

Αν γνωρίζουμε τη συχνότητα f_N και το σε ποια αρμονική αντιστοιχεί, μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ήχου στον αέρα, ως εξής $u = \lambda_N f_N$. Πχ. για τη θεμελιώδη θα ισχύει $u = \lambda_1 f_1 = 2L f_1$. Άρα αν προσδιορίσουμε την f_1 πειραματικά (ή την οποιαδήποτε f_N), θα μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ήχου στον αέρα.



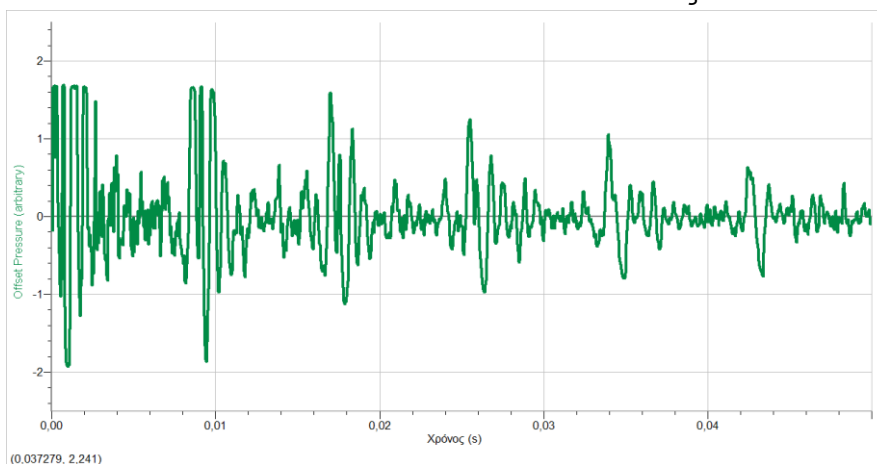
Σχήμα 3: Στάσιμα ηχητικά Κύματα σε ανοικτό σωλήνα και από τις δυο μεριές (Tontechnik, 2011)

Δημιουργώντας με τα χέρια μας ήχο από παλαμάκι, σε απόσταση περίπου 10-15cm από τα ανοικτό άκρο του σωλήνα, μήκους $L=1,42$ m και καταγράφοντας τον ήχο με τον αισθητήρα μικρόφωνο στο άλλο άκρο, δημιουργούμε διαγράμματα σύνθεσης όλων των αρμονικών στάσιμων κυμάτων συναρτήσε του χρόνου (Σχήμα 4).

ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ: Συλλογή - Βάση Χρόνου: 0,05 s με ρυθμό 50.000 δείγματα/s,

Ενεργοποίηση Σκανδαλισμού: Έναρξη συλλογής όταν CH1 -
Microphone 1

αυξάνεται κατά 0,2 arbitrary

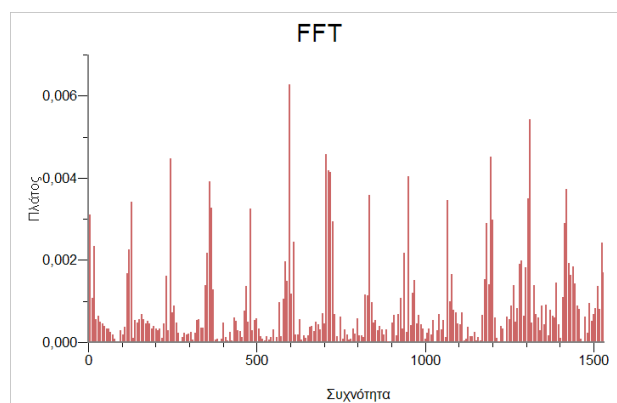


Σχήμα 4: Διάγραμμα πίεσης αέρα - χρόνου, σε σωλήνα ανοικτό και στις δυο άκρες όπως καταγράφεται από τον αισθητήρα μικρόφωνο στο αντίθετο άκρο της διαταραχής.

Επιλέγοντας: Εισαγωγή → Επιπλέον Γραφημάτων → Γράφημα FFT, το λογισμικό του Logger Pro 3.2 υπολογίζει όλες τις αρμονικές συχνότητες f_1, f_2, \dots, f_N , βάσει του μαθηματικού μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform). Ο μετασχηματισμός

FFT είναι ένας μαθηματικός αλγόριθμος με τον οποίο υπολογίζουμε γρήγορα το φάσμα όλων των αρμονικών συχνοτήτων, από τις οποίες αποτελείται ένα σύνθετο κύμα, όπως και τα στάσιμα κύματα των σωλήνων που εδώ μελετάμε.

Όπως προσδιορίζεται από το παρακάτω διάγραμμα FFT, οι τιμές των 10 πρώτων αρμονικών συχνοτήτων βρέθηκαν: 120, 242, 360, 480, 596, 717, 833, 950, 1078, 1193 Hz, αντίστοιχα.

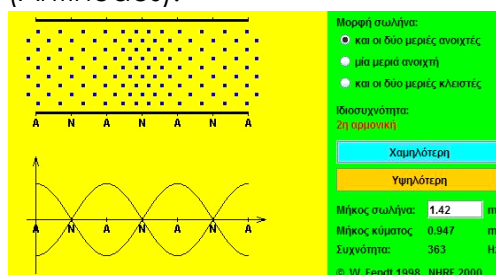


Σχήμα 5: Διάγραμμα FFT, δηλαδή υπολογισμός όλων των αρμονικών συχνοτήτων, του διαγράμματος του σχήματος 4.

Υπολογίζοντας την ταχύτητα του ήχου, από την θεμελιώδη συχνότητα $f_1 = 120$ Hz και από το $\lambda_1 = 2L = 2,84$ m, βρίσκουμε $v = 340,8$ m/s (στους 19-20 °C), σε καλή συμφωνία με τη θεωρητική των 343,4 m/s. Κάνοντας παρόμοιους υπολογισμούς μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα του ήχου και από τις υπόλοιπες αρμονικές. Πχ. για $f_5 = 596$ Hz αντιστοιχεί $\lambda_5 = 0,568$ m (από τον τύπο $L = 5\lambda_5/2$), άρα η $v = 338,52$ m/s, σε σχετικά καλή συμφωνία με τη θεωρητική.

Οι τιμές των αρμονικών επιβεβαιώνονται και από το applet «Διαμήκη Κύματα», http://www.walter-fendt.de/ph14gr/stlwaves_gr.htm, εφαρμογή που προσομοιάζει και υπολογίζει συχνότητες στάσιμων ηχητικών κυμάτων σε σωλήνες (ανοικτούς στα δύο άκρα ή με κλειστό το ένα ή και τα δυο άκρα). Εδώ παρουσιάζεται ο υπολογισμός της τρίτης αρμονικής, $f_3 = 363$ Hz για σωλήνα $L=1,42$ m, πολύ κοντά στην δική μας πειραματική τιμή των 360 Hz.

Στην προσομοίωση φαίνονται οι αρμονικές σε ένα σωλήνα με αέρα, ως παράδειγμα δημιουργίας στάσιμων διαμηκών κυμάτων. Επίσης απεικονίζεται η κίνηση των μορίων κατά τη διάρκεια μίας τέτοιας ταλάντωσης. Οι δεσμοί σημειώνονται με N (Nodes) και οι κοιλιές με A (Antinodes).

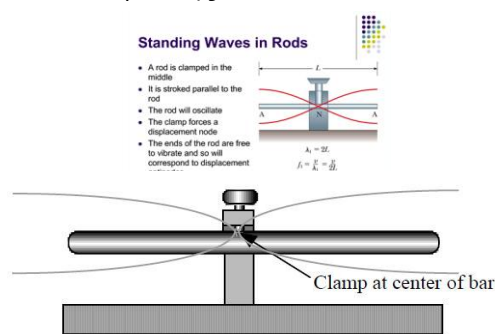


Σχήμα 6: Το περιβάλλον της προσομοίωσης στάσιμων κυμάτων σε σωλήνα (Walter-Fendt 2000)

ΣΤΑΣΙΜΑ ΗΧΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΣΕ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΡΑΒΔΟΥΣ

Εκτός από τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου στον αέρα, είναι ενδιαφέρον να προσδιοριστεί η ταχύτητα του ήχου και σε άλλα υλικά μέσα όπως είναι τα μέταλλα. Η μεθοδολογία των στάσιμων διαμηκών κυμάτων που ακολουθήσαμε για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ήχου στον αέρα, μας επιτρέπει παρόμοιο υπολογισμό και στα μέταλλα. Χρησιμοποιώντας σύνδεσμο-σφιγκτήρα, μπορούμε να ακινητοποιήσουμε επιλεγμένα σημεία της ράβδου και με τον τρόπο αυτό να δημιουργήσουμε Στάσιμο Ηχητικό Κύμα συγκεκριμένου μήκους κύματος.

Χρησιμοποιούμε δύο ράβδους, από ορθοστάτες του εργαστηρίου ΦΕ, ένα από Σίδηρο - Fe μήκους 0,8 m και ένα άλλο από Αλουμίνιο - Al μήκους 1 m. Για σφιγκτήρα χρησιμοποιούμε απλούς Συνδέσμους τύπου 'T'. Οι ράβδοι στηρίχθηκαν οριζόντια σε ορθοστάτες με τη βοήθεια συνδέσμων. Για τη δημιουργία ήχου χρησιμοποιήσαμε ξύλινο σφυρί, με το οποίο χτυπήσαμε τη μία άκρη της ράβδου κατά μήκος του άξονα της, ενώ το μικρόφωνο βρισκόταν στο αντίθετο άκρο της.



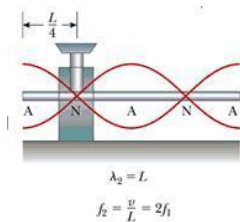
Σχήμα 7: Διάταξη στάσιμου κύματος σε μεταλλική ράβδο με σφιγκτήρα στο μέσον (Un. Texas-Arlington 2005)

Τοποθετώντας το σφιγκτήρα στο μέσο της ράβδου δημιουργούμε στάσιμο κύμα που αντιστοιχεί στη θεμελιώδη συχνότητα, με μήκος κύματος $\lambda_1 = 2L$ (Σχήμα 7).

Παρατηρούμε ότι επειδή στα δυο άκρα της ράβδου σχηματίζονται Κοιλίες, θα ισχύει ο ίδιος τύπος για το μήκος κύματος με αυτό του ανοικτού και στα δυο άκρα ηχητικού σωλήνα, δηλαδή $L = N \lambda_N / 2$, όπου $N = 1, 2, 3, \dots$ και οι αντίστοιχες συχνότητες συνδέονται με τη σχέση $f_N = N f_1$.

Αν προσδιορίσουμε πειραματικά τη θεμελιώδη συχνότητα f_1 , τότε από το γνωστό τύπο $v = \lambda_1 f_1$, προσδιορίζεται εύκολα η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο μέταλλο.

Τοποθετώντας το σφιγκτήρα σε απόσταση $L/4$ από το ένα άκρο της ράβδου δημιουργούμε στάσιμο κύμα που αντιστοιχεί στη δεύτερη αρμονική συχνότητα, με μήκος κύματος $\lambda_2 = L$ και με αντίστοιχη συχνότητα $f_2 = 2 f_1$ (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Στιγμιότυπο στάσιμου κύματος σε μεταλλική ράβδο με σφιγκτήρα στο $L/4$

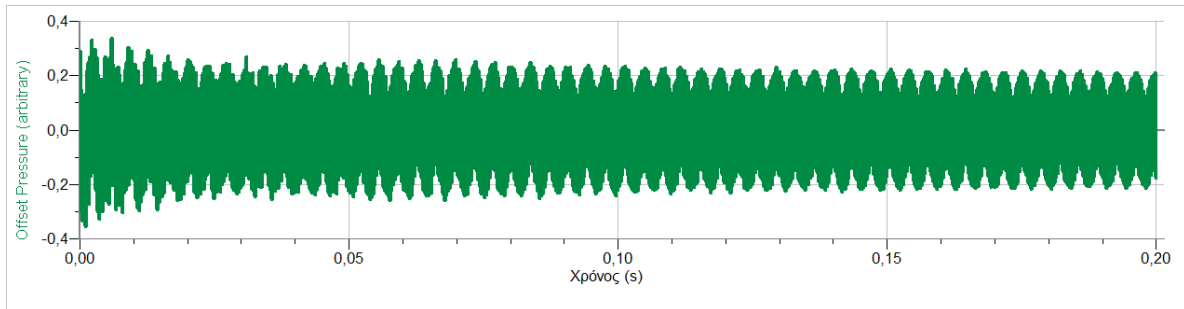
Πραγματοποιήσαμε δυο ειδών πειράματα και για τις δυο ράβδους Fe και Al, το ένα με το σφιγκτήρα στη μέση της ράβδου και το άλλο με το σφιγκτήρα στη θέση $L/4$. Και στις δυο περιπτώσεις προσδιορίσαμε πειραματικά τις συχνότητες f_1 και f_2 , τόσο για το Fe όσο και για το Al.

ΡΥΘΜΙΣΕΙΣ: Συλλογή - Βάση Χρόνου: 0,2 s με ρυθμό 10.000 δείγματα/s,

Ενεργοποίηση Σκανδαλισμού: Έναρξη συλλογής όταν CH1 -
Microphone 1

αυξάνεται κατά 0,1 arbitrary

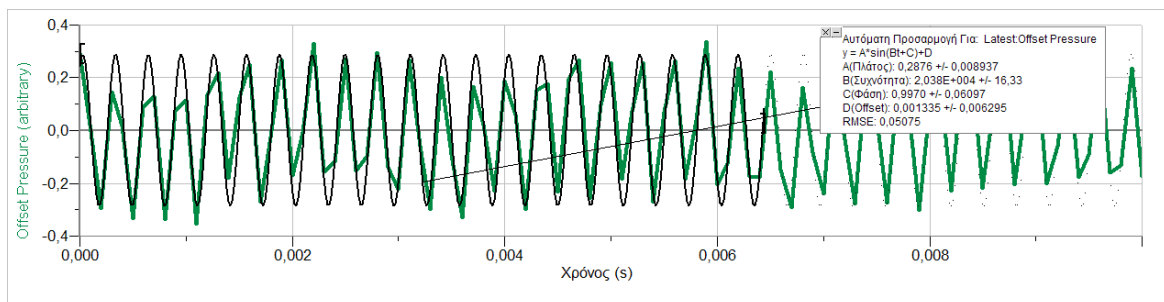
Χτυπώντας κατά μήκος το ένα άκρο της ράβδου με το ξύλινο σφυρί, δημιουργούμε διάμηκες κύμα, με την παρακάτω κυματομορφή. Να σημειώσουμε ότι το μικρόφωνο παρόλο που δεν είναι σε επαφή με τη ράβδο (απλώς είναι πολύ κοντά, σχεδόν σε επαφή), καταγράφει τη διαταραχή που διαδίδεται στη μεταλλική ράβδο, διότι τα μόρια του αέρα ταλαντώνονται με την ίδια συχνότητα με τα σημεία της μεταλλικής ράβδου.



Σχήμα 9: Κυματομορφή ηχητικής διαταραχής σε μεταλλική ράβδο από Fe με $\lambda = 2L$

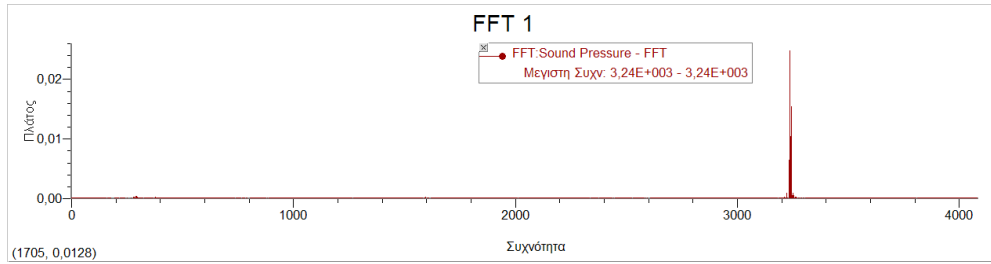
Για το παραπάνω διάγραμμα, με ράβδο Fe μήκους $L=0,8$ m, με τη βοήθεια του Logger Pro3.2, πρώτα μεγεθύνουμε το διάγραμμα ώστε να εμφανίζεται χρόνος 0,01s, και κατόπιν επεξεργαζόμαστε τη συνάρτηση της πίεσης - χρόνου με δυο τρόπους:

α) προσαρμόζοντας ημιτονοειδές συνάρτηση από τις εντολές Προσαρμογή Καμπύλης \rightarrow Ημίτονο \rightarrow Δοκιμή Προσαρμογής, εμφανίζεται ο μαθηματικός τύπος της συνάρτησης $A\sin(Bt+C)+D$, απ' όπου προσδιορίζουμε τη γωνιακή συχνότητα ω (είναι το B της προσαρμογής) και από εκεί υπολογίζουμε τη συχνότητα $f = \omega/2\pi$.



Σχήμα 10: Κυματομορφή ηχητικής διαταραχής σε μεταλλική ράβδο από Fe, $\lambda=2L$, με ημιτονοειδή προσαρμογή

β) επιλέγοντας Εισαγωγή \rightarrow Επιπλέον Γραφημάτων \rightarrow Γράφημα FFT, το λογισμικό του Logger Pro υπολογίζει τη συχνότητα f_1 (για $\lambda=2L$), βάσει του μαθηματικού μετασχηματισμού FFT-Fourier.

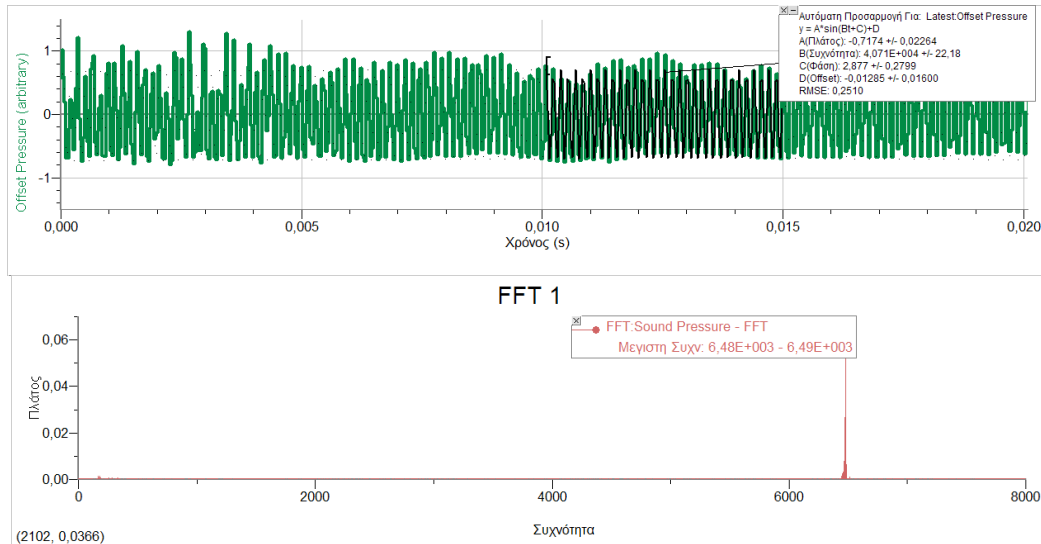


Σχήμα 11: Μετασχηματισμός Fourier-FFT σε μεταλλική ράβδο από Fe, $\lambda_1=2L$

Έτσι για τη ράβδο Fe, με το σφινγκτήρα στη μέση της ράβδου, υπολογίσαμε την ταχύτητα του ήχου στο Fe, στους 20°C :

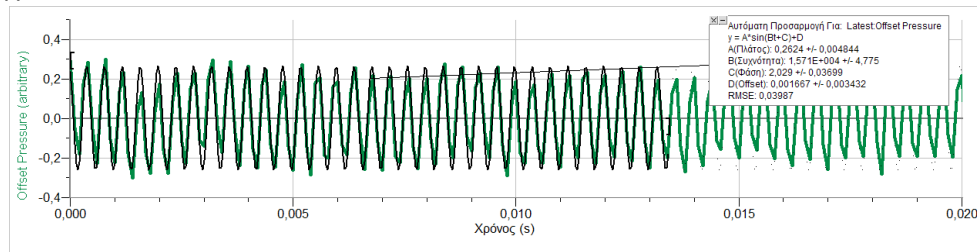
α) από την ημιτονοειδή προσαρμογή: $f_1 = 20380/6,28 = 3245$ Hz, $v_{Fe} = \lambda_1 f_1 = 2L f_1 = 2 \cdot 0,8 \cdot 3245 = 5192$ m/s και β) από το FFT, $f_1 = 3240$ Hz, άρα $v_{Fe} = 5184$ m/s, με σχετικό σφάλμα 1,2 % και 1,0 %, αντίστοιχα. Η βιβλιογραφική τιμή είναι $v_{Fe} = 5130$ m/s στους 20°C (Aldred 1972).

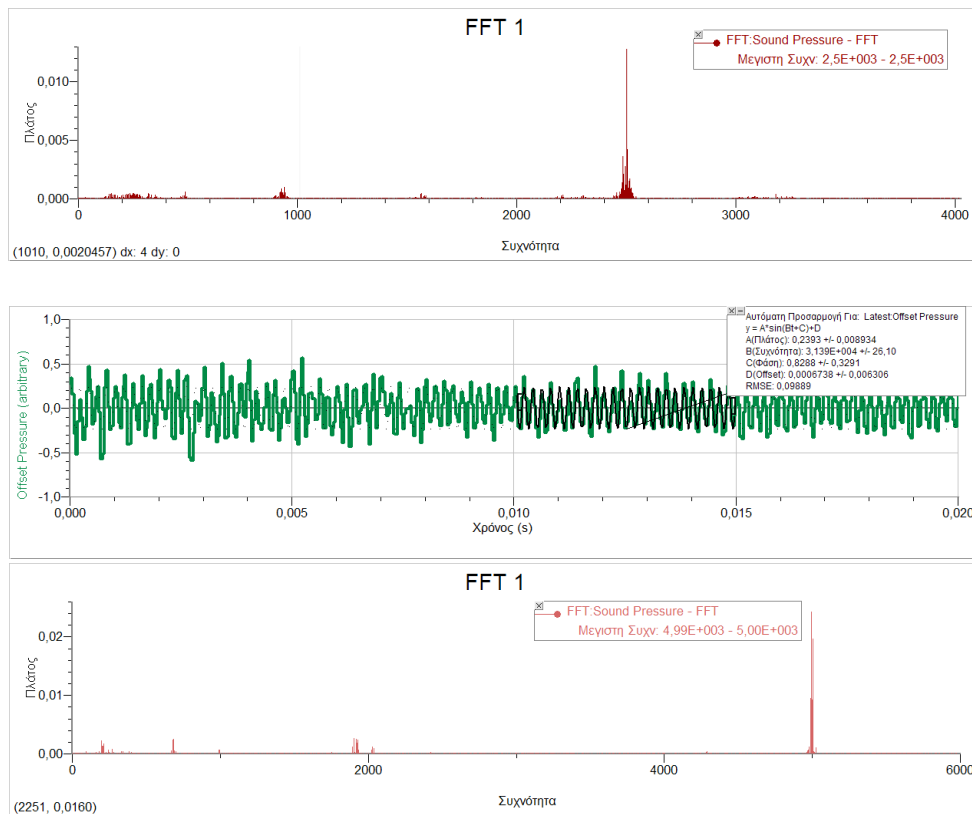
Τα αντίστοιχα διαγράμματα και οι προσαρμογές τους για ράβδο Fe με $\lambda_2 = L$ (σφινγκτήρας σε $L/4$), είναι στο Σχήμα 11. Από το FFT η ταχύτητα προσδιορίστηκε $v_{Fe} = 0,8 \cdot 6480 = 5184$ m/s (20°C).



Σχήμα 11: Ημιτονοειδής προσαρμογή και μετασχηματισμός Fourier-FFT σε μεταλλική ράβδο από Fe, $\lambda_2=L$

Τα αντίστοιχα διαγράμματα για τα πειράματα με τη ράβδο από Al, μήκους $L = 1$ m, είναι στο Σχήμα 12, για $\lambda_1 = 2L$ και $\lambda_2 = L$, με τον σφινγκτήρα στη μέση ($L/2$) και στο $L/4$, αντίστοιχα:





Σχήμα 12: Ημιτονοειδής προσαρμογή και μετασχηματισμός Fourier-FFT σε μεταλλική ράβδο από Al, με $\lambda_1 = 2L$ και $\lambda_2 = L$ (σφιγκτήρας στη μέση και σε $L/4$)

Έτσι για τη ράβδο Al ή κράματος Al, με το σφιγκτήρα στη μέση της ράβδου, υπολογίσαμε την ταχύτητα του ήχου, στους 20°C : α) από την ημιτονοειδή προσαρμογή: $f_1 = 15710/6,28 = 2501$ Hz, $u_{Al} = \lambda_1 f_1 = 2L f_1 = 2 \cdot 2501 = 5002$ m/s και β) από το FFT, $f_1 = 2500$ Hz, $u_{Al} = 5000$ m/s. Για το σφιγκτήρα στο $L/4$ με $\lambda_2 = L$, η συχνότητα προσδιορίζεται $f_2 = 4990$ Hz και η $u_{Al} = 4990$ m/s.

Η βιβλιογραφική τιμή u_{Al} κυμαίνεται στη βιβλιογραφία από 4900-5100 έως και 6000 m/s (20°C) περίπου, ανάλογα με την αναφορά. Από το αναλυτικό ψάξιμο της βιβλιογραφίας καταλήξαμε ότι οι πιο αξιόπιστες αναφορές προσδιορίζουν πειραματικές τιμές από 4900 - 5100 m/s (Aldred 1972, Narayanan 1995). Από ότι φαίνεται λοιπόν οι παλιοί αλουμινένιοι ράβδοι των εργαστηρίων ΦΕ είναι από καθαρό Al.

ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ

Τα παραπάνω πειράματα θα μπορούσαν να αποτελέσουν αφορμή για τη δημιουργία εργαστηριακής άσκησης Κυμάτων - Στάσιμων Κυμάτων – Ταχύτητας Διάδοσης του Ήχου στο μάθημα της Φυσικής Κατεύθυνσης Γ' Λυκείου. Στο προτεινόμενο Φύλλο Εργασίας θα μπορούσαμε να εντάξουμε τα πλέον χαρακτηριστικά πειράματα της παρούσας και τις παρακάτω ερωτήσεις :

1. Ποια η διαφορά μεταξύ της ταχύτητας διάδοσης κύματος και της ταχύτητας ταλάντωσης των σημείων του ελαστικού μέσου;
2. Υπάρχει εξάρτηση μεταξύ πλάτους ταλάντωσης των μορίων του μέσου και ταχύτητας διάδοσης του κύματος στο ελαστικό μέσο;

3. Τι είναι στάσιμο κύμα και σε τι διαφέρει από ένα τρέχον κύμα; Ποιά η διαφορά στη μαθηματική τους περιγραφή ;
4. Ποιά μορφή έχει ένα στιγμιότυπο στάσιμου ηχητικού κύματος σε σωλήνα ανοιχτό και στα δύο άκρα, και ποια η μορφή στάσιμου ηχητικού κύματος σε μεταλλική ράβδο με τα άκρα της ελεύθερα (κοιλίες); Ομοιότητες και διαφορές μεταξύ των δύο.
5. Αν ο ηχητικός σωλήνας είναι κλειστός στο ένα άκρο και ανοιχτός στο άλλο (π.χ. σωλήνας Kundt), πως διαφοροποιείται το στιγμιότυπο στάσιμου κύματος σε σχέση με τη περίπτωση όπου ο σωλήνας είναι ανοιχτός και στα δύο άκρα;
6. Αν στη μεταλλική ράβδο τοποθετήσουμε το σφιγκτήρα σε απόσταση $L/4$ από το ένα άκρο πως διαφοροποιείται το στιγμιότυπο στάσιμου κύματος σε σχέση με τη περίπτωση όπου ο σφιγκτήρας βρίσκεται στο μέσο της ράβδου;
7. Πόσοι δεσμοί δημιουργούνται σε μεταλλική ράβδο όταν σε αυτή δημιουργούνται στάσιμα κύματα με σφιγκτήρα στο $L/2$ και στο $L/4$; Να σχεδιαστεί το στιγμιότυπό τους.
8. Ενώ στα πειράματα με τον ηχητικό σωλήνα έχουμε σειρά στάσιμων κυμάτων, στη περίπτωση της μεταλλικής ράβδου παρουσιάζεται μόνο ένα στάσιμο κύμα! Μήπως το παραπάνω πειραματικό δεδομένο οφείλεται στη τοποθέτηση του σφιγκτήρα σε επιλεγμένη θέση της μεταλλικής ράβδου; Τι θα συμβεί αν ο σφιγκτήρας τοποθετηθεί σε τυχαία θέση της ράβδου;
9. Θεωρήστε τη περίπτωση χορδής κιθάρας με τα δύο άκρα της σταθερά (δεσμοί). Πως διαμορφώνονται τα στάσιμα κύματα που αντιστοιχούν στη θεμελιώδη συχνότητα και στις ανώτερες αρμονικές; Πως εκφράζεται ο μαθηματικός τύπος που συνδέει το μήκος κύματος λ του στάσιμου κύματος με το μήκος χορδής L ;
10. Ενώ η ταχύτητα διάδοσης του ήχου υπολογίζεται από το θεμελιώδη τύπο $v = \lambda f$, η ταχύτητα αυτή δεν εξαρτάται από συχνότητα και μήκος κύματος. Από ποιές παραμέτρους θα μπορούσε να εξαρτάται η ταχύτητα του ήχου σε ηχητικούς σωλήνες και μεταλλικές ράβδους;
11. Συγκρίνετε τις ταχύτητες που υπολογίσατε για τον αέρα, το σίδηρο και το αλουμίνιο. Γιατί διαφέρουν τόσο πολύ; Πως σχετίζεται η σημαντική αυτή διαφοροποίηση σε σχέση με την φάση της ύλης στην οποία βρίσκονται τα παραπάνω υλικά; Πως σχετίζεται με τη μέση απόσταση που έχουν τα μόρια στις διάφορες φάσεις της ύλης;

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διδασκαλία των εννοιών Κύμα, Ηχητικό (Διάμηκες) Κύμα, Συμβολή Κυμάτων και Στάσιμο Κύμα είναι δύσκολη και σύνθετη διαδικασία, καθώς από τη διδακτική πράξη απουσιάζει σε μεγάλο βαθμό η οπτικοποίηση τους. Τα λίγα κλασικά πειράματα δεν επαρκούν στην πλήρη κατανόηση από τους μαθητές όλων των εννοιών, καθώς υστερούν στο θέμα της οπτικοποίησης. Σε αυτό το σημείο έρχονται να συμβάλουν τα εργαλεία της ΤΠΕ, όπως τα προγράμματα προσομοίωσης, τα οποία όμως δεν είναι πάντοτε πειστικά στον μαθητή. Τα Συστήματα ΣΛΑ - MBL προσφέρουν πειραματικό και ταυτόχρονα εποπτικό τρόπο και συνδέουν τον πειραματισμό με την άμεση οπτικοποίηση και την εύκολη επεξεργασία και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Η παρούσα εργασία αξιοποιεί τα Συστήματα ΣΛΑ όπως το Vernier LabPro - LoggerPro3.2, τα οποία υπάρχουν στα εργαστήρια των Φ.Ε. των Λυκείων-Λυκ.Τάξεων

των Κυκλάδων, αλλά με περιορισμένο βαθμό χρήσης (Βαμβακούσης & Μπρες 2011, Ρούμελης 2009). Τέλος, η εργασία αυτή αξιοποιεί τη δυνατότητα του λογισμικού Logger Pro 3.2 με το μαθηματικό μετασχηματισμό Fast Fourier Transform και συνέχειά της θα μπορούσε να είναι η επεξεργασία των μουσικών νοτών και η συσχέτιση των μεταξύ τους συχνοτήτων, από ίδια αλλά και από διαφορετικά μουσικά όργανα.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Βαμβακούσης Χ. (2006). Μελέτη ΑΑΤ με το MBL - Vernier LabPro. Πρακτικά 11ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ένωσης Ελλήνων Φυσικών, Συνεδρία ΕΚΦΕ, Λάρισα 1-3/4/2006,

http://dide.kyk.sch.gr/3ekfekyk/Download/fisiki/F_apli_armoniki_talantosi_2.zip

Βαμβακούσης Χ., Μακρυωνίτης Γ. (2003). Σύστημα ΣΛΑ. Ένας χρόνος παρουσίας στα εργαστήρια Φ.Ε. των Ενιαίων Λυκείων. 2^ο Πανελ. Συνέδριο για την Αξιοποίηση των ΤΠΕ στη Διδακτική Πράξη, Ερμούπολη, Τόμος Α', σελ 529-538 και www.epynh.eu

Βαμβακούσης Χ., Μπρες Α. (2011). Υποκειμενικά Χαρακτηριστικά του Ήχου. Πρόταση Διδασκαλίας σε 14χρονους Μαθητές με τη Συνδρομή: Διαδραστικής Προσομοίωσης – Συστήματος Συγχρονικής Λήψης και Απεικόνισης, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο για την Αξιοποίηση των ΤΠΕ στη Διδακτική Πράξη, Ερμούπολη-Σύρος 6-8/5/2011.

Εγχειρίδιο Vernier Software & Technology (2004). Εγχειρίδιο Ταχείας αναφοράς LabPro - LoggerPro3, Εκδόσεις Vernier Software, μετάφραση Multiramata,

Καλογήρου Η.-ΕΚΦΕ Ηλείας (2008). Συμπληρωματικά στοιχεία για τη συσκευή κυματισμού, Ανακτήθηκε τον 1/2011 από: <http://ekfe.ilei.sch.gr/Fysiki/SyskevikiKymat.doc>

ΕΚΦΕ Λάρισας-Ελασσόνας (2006), Διακρότημα - Φύλλο εργασίας πειραματικής άσκησης, 2/2011 - http://2ekfe.lar.sch.gr/lab_exersise/fysiki/lyk/g_lykio/ph_g_lyk_kat_diakrotimata.zip

Ιωάννου Α., Ντάνος Γ., Πήττας Α., Ράπτης Σ. (2005). Φυσική Θετικής και Τεχνολογικής Κατεύθυνσης Γ' τάξη Γενικού Λυκείου, Ανακτήθηκε το 2/2011 από τη διεύθυνση : <http://www.pi-schools.gr/lessons/physics/>

Μουρούζης Π, Παληός Γ., Παπαμιχάλης Κ., Τουντουλίδης Γ., Τσιτοπούλου Τζ., Χριστακόπουλος Ι. (2005). 1. ΑΑΤ-Μελέτη ταλάντωσης ελατηρίου. Εργαστηριακή άσκηση Φυσικής Γ'Λυκ., Έγκριση ΠΙ 43/2005/20-12-05 ανάκτηση 2/2011: <http://www.ekfe.gr/portal/eggrafa/pimultilog/talantosi.zip>

Πετρόπουλος Μ., Γάτσιος Ι. - ΕΚΦΕ Ν. Σμύρνης (2008). 1. Μελέτη Στάσιμων Ακουστικών Κυμάτων και 2. Συμβολή Κυμάτων στην επιφάνεια υγρού, Φύλλα εργασίας του ΕΚΦΕ Ν. Σμύρνης, έκδ. ΕΚΦΕ Ν. Σμύρνης, Αθήνα 2008, σ. 181-183 και σ. 178-180, αντίστοιχα.

Ρούμελης Ν. (2005). Μελέτη του μαγνητικού πεδίου σωληνοειδούς «ελατηρίου κυματισμού(slinky)» με το Vernier-LabPro το νέο ΣΣΛΑ στα σχολεία των Κυκλάδων. Πρακτικά 3^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των Τεχνολογιών της Πληροφορίας και της Επικοινωνίας (ΤΠΕ) στη Διδακτική Πράξη, Ερμούπολη-Σύρος 13-15/5/2005, τομ. Α', σ. 399-405 και στο <http://www.e-yliko.sch.gr/resource/resource.aspx?id=44>

- Ρούμελης Ν. (2009). Μελέτη της ταχύτητας των χημικών αντιδράσεων $Mg + HCl$ και $Na_2S_2O_3 + HCl$ με τη χρήση ΣΣΛΑ (MBL), Multilog-DbLab & Vernier-LabPro Πρακτικά 5^{ου} Παν. Συνεδρίου για την Αξιοποίηση των ΤΠΕ στη Διδακτική Πράξη, Σύρος 13-15/5/2009,
- Ρούμελης Ν. (2010). Κινητική Μελέτη χαρακτηριστικών χημικών αντιδράσεων με χρήση αισθητήρων MBL - ΣΣΛΑ πίεσης και φωτός, 13^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ένωσης Ελλήνων Φυσικών, Πάτρα, 17 – 21 Μαρτίου 2010 , (αρ. εργ. 166, ISBN 978-960-9457-00-2, ΕΕΦ)
- Τουντουλίδης Γ. (2010). Αξιοποίηση των αισθητήρων στη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου με τον σωλήνα Kundt, «Φυσική και Άνθρωπος- Ερευνητικά αποτελέσματα και τεχνολογίες για βελτίωση της ποιότητας ζωής», 13^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ένωσης Ελλήνων Φυσικών, Πάτρα, 17 – 21 Μαρτίου 2010 , (αρ. εργ. 94, ISBN 978-960-9457-00-2, ΕΕΦ) και στο http://ekfe-nikaias.att.sch.gr/portal/files_pdf/taxitiita_ixou.zip
- Aldred J. (1972), Manual of sound recording London Fountain press, στο Speed of Sound in Solids που ανακτήθηκε το 2/2011 από <http://www.potto.org/gasDynamics/node73.html>
- Narayanan AV. (1995), Speed of sound in tuning fork metal, ανακτήθηκε 2/2011 από <http://www.ikhebeenvraag.be/mediastorage/FSDocument/137/Tuning+Fork+Physics+Teacher.pdf>
- Tontechnik-Rechner-sengpielaudio (2011), Στάσιμα Ακουστικά Κύματα, Ανακτήθηκε το 2/2011 από την διεύθυνση <http://www.sengpielaudio.com/StandingWaves.htm>
- University of Texas - Arlington, Physics Department (2005), Speed of Sound in metal, <http://www.uta.edu/physics/labs/1401/1401Lab9.pdf>
- Walter-Fendt (2000), Στάσιμα διαμήκη κύματα, ανακτήθηκε το 2/2012 από τη διεύθυνση http://www.walter-fendt.de/ph14gr/stlwaves_gr.htm