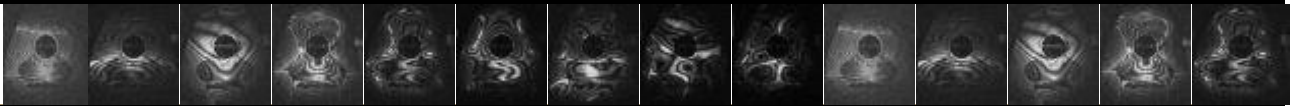




ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ  
ΚΡΗΤΗΣ

# Δυναμική Μεταβολή Ηχοχρώματος, Ακουστικών Εγχόρδων Μουσικών Οργάνων.



*Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία  
στο πλαίσιο του  
Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών:  
“Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής”.*

**ΦΑΝΟΥΡΑΚΗΣ ΑΓΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ - Α.Μ. : ΜΤΗ 49**  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ  
ΠΤΥΧΙΟΥΧΟΣ ΑΝΩΤΑΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ (Α.Σ.ΠΑΙ.Τ.Ε.) - ΑΘΗΝΑ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΔΡ. ΠΑΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ**  
ΠΡΟΕΔΡΟΣ ΤΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ,  
ΣΧΟΛΗΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ, ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ

15 Οκτωβρίου 2016  
Ηράκλειο-Ρέθυμνο

## Δυναμική Μεταβολή Ηχοχρώματος, Ακουστικών Εγχόρδων Μουσικών Οργάνων.

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία  
στο πλαίσιο του  
Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών:  
Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής.

### Μέλη Τριμελούς Επιτροπής Εξέτασης :

Δρ. Δρακάκης Εμμανουήλ

Δρ. Κουδουμάς Εμμανουήλ

Δρ. Παπαδογιάννης Νεκτάριος

### Πίνακας περιεχομένων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	4
ABSTRACT.....	5
<b>1 . ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....</b>	<b>6</b>
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	6
1.1.1 ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΣΤΗ ΜΥΘΟΛΟΓΙΑ. ....	6
1.1.2 ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΙ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑ ΩΣ ΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗ. ....	9
1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ.....	15
1.2.1 ΜΟΥΣΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ (MUSIC ACOUSTICS). ....	15
1.2.2 Η ΜΟΥΣΙΚΗ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΑΙΟΤΗΤΑ ΩΣ ΣΗΜΕΡΑ.....	16
1.2.3 ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΜΟΥΣΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ, ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΟΠΩΙΩΝ, ΕΓΙΝΑΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ.....	18
<b>2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ (AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS).....</b>	<b>20</b>
2.1 ΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΣΤΗ ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΕΠΟΧΗ.....	20
2.2 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ .....	21
2.3 ΕΛΕΓΚΤΗΣ.....	22
2.3.1 ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ – ΨΗΦΙΑΚΟΥ (ANALOG - DIGITAL) ΤΥΠΟΥ ΕΛΕΓΚΤΕΣ.....	23
2.3.2 ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ, ΟΛΟΚΛΗΡΩΤΙΚΟΥ, ΔΙΑΦΟΡΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ ΕΛΕΓΚΤΕΣ.....	24
2.4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	28
2.4.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΟΙΚΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ (OPEN LOOP SYSTEMS). ....	28
2.4.2 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΛΕΙΣΤΟΥ ΒΡΟΧΟΥ (CLOSE LOOP SYSTEMS).....	29
2.5 ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ.....	31
2.6 ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΙ Ο ΕΛΕΓΚΤΗΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ.....	32
<b>3. ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ.....</b>	<b>35</b>
3.1 ΟΛΟΓΡΑΦΙΑ .....	35
3.2 ΟΛΟΓΡΑΦΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ.....	39
3.3 ΧΡΟΝΙΚΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑ ΨΗΦΙΔΩΝ (E. S. P. I.).....	41
3.3.1 Η ΔΙΑΤΑΞΗ E.S.P.I. ΤΟΥ Τ.Ε.Ι. ΚΡΗΤΗΣ. ....	41

3.3.2	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ.....	45
<b>4.</b>	<b>ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....</b>	<b>48</b>
4.1	ΤΟ ΚΑΠΑΚΙ ΩΣ ΔΟΝΟΥΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ.....	48
4.1.1	ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ.....	49
4.1.2	ΗΧΟΒΟΛΙΣΗ ΜΕ ΗΧΕΙΟ.....	51
4.2	ΟΙ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΚΙΟΥ (PLAYMODES).....	52
4.3	ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	54
4.3.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΠΑΚΙΟΥ Χ00.....	54
PLAYMODEZERO.....		54
↳	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΠΑΚΙΟΥ Χ00-PLAYMODEZERO.....	55
4.3.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΠΑΚΙΟΥ Χ01.....	56
PLAYMODE1.....		56
4.3.3	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΠΑΚΙΟΥ Χ10.....	58
PLAYMODE2.....		58
4.3.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΠΑΚΙΟΥ Χ11.....	61
PLAYMODE3.....		61
↳	ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΥΠΟΛΟΙΠΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΚΙΟΥ.....	63
4.3.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ Α'.....	63
4.3.6	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ Β'.....	66
4.4	ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	70
<b>5.</b>	<b>ΥΛΙΣΜΙΚΟ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ( HARDWARE-SOFTWARE).....</b>	<b>73</b>
5.1	ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗΣ.....	74
5.2	ΑΝΤΛΙΑ.....	76
↳	ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΥΠΟΥ PWM.....	80
5.4	ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ ΠΙΕΣΗΣ.....	80
5.5	ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΑΝΑΛΟΓΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΨΗΦΙΑΚΟ (A/D-C ANALOG TO DIGITAL CONVERTER).....	81
↳	ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΓΝΩΣΤΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ.....	82
5.6	ΣΩΛΗΝΕΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ.....	83
5.7	ΟΘΟΝΗ.....	85
5.8	ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΕΣ ΒΑΛΒΙΔΕΣ.....	86
5.9	ΗΛΕΚΤΡΟΝΟΜΟΙ.....	88
5.10	ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ.....	90
5.11	ΜΙΚΡΟΎΛΙΚΑ.....	91
5.12	Η ΗΧΗΤΙΚΗ ΠΛΑΚΑ ΤΟΥ ΛΑΟΥΤΟΥ.....	92
5.13	ΨΗΦΙΑΚΟ ΦΙΛΤΡΟ.....	93
5.14	ΚΩΔΙΚΑΣ ΜΙΚΡΟΕΛΕΓΚΤΗ.....	95
5.14.1	ΔΟΜΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ.....	95
5.14.2	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	96
<b>6.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>99</b>
<b>7.</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>102</b>
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α' , ΚΩΔΙΚΑΣ ARDUINO.....		102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β' , ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB.....		117
<b>8.</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ.....</b>	<b>118</b>

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

---

Στην οικογένειά μου για τη στήριξη της,

στον επιβλέποντα καθηγητή, Δρ. Παπαδογιάννη Α. Νεκτάριο, πρόεδρο του τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής της Σχολής Εφαρμοσμένων Επιστημών του Τ.Ε.Ι. Κρήτης για την καθοδήγηση του και την άψογη συνεργασία μας,

στον Δρ. Ορφανό Γιάννη, από το ίδιο τμήμα, για την πολύτιμη βοήθεια του στις μετρήσεις,

σε όλους τους καθηγητές του προγράμματος και ιδιαίτερος στους: Δρ. Κουδουμά Εμμανουήλ, Δρακάκη Εμμανουήλ και Δρ. Γεωργίου Στρατή,

στον καλό φίλο μου Δασκαλάκη Ιωάννη, Ηλεκτρολόγο Μηχανικό, για τη βοήθεια του,

στον φίλο και συμφοιτητή μου, Χανιωτάκη Ευάγγελο για όλη τη βοήθειά του αυτά τα 2 χρόνια,

στους συμφοιτητές μου: Μπέκα Βασίλειο και Ψυλλάκη Ιωάννη για την άριστη συνεργασία μας,

στους συναδέλφους μου Φουντουλάκη Μαρία και Καγιαμπάκη Εμμανουήλ,

στο Διευθυντή του 1ου Εργαστηριακού Κέντρου Ηρακλείου, Μανατάκη Γιώργο και

στον Υποδιευθυντή του 1ου Εργαστηριακού Κέντρου Ηρακλείου, Τζατζαδάκη Αντώνη,

στον Υπεύθυνο Τομέα Ηλεκτρολόγων του 1<sup>ου</sup> Ε.Κ. Ηρακλείου, Παναγιωτάκη Νικήτα,

και σε όλους τους Συναδέλφους μου στο 1<sup>ο</sup> Ε.Κ. Ηρακλείου,

θέλω να πω ένα θερμό ευχαριστώ.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της Εργασίας ήταν να αποδειχθεί ότι είναι δυνατή η δυναμική μεταβολή του τρόπου δόνησης και συντονισμού ενός ακουστικού έγχορδου μουσικού οργάνου, οπότε κι η δυναμική μεταβολή του ηχοχρώματος που παράγεται, με την υλοποίηση ενός συστήματος αυτοματισμού. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσαν να καλυφθούν διαφορετικές ηχητικά αισθητικές προσεγγίσεις και διαφορετικές ανάγκες από ένα και μόνο ακουστικό όργανο, αλλά πιθανόν να μπορεί να έχει και την αντίστροφη λειτουργία, δηλαδή να επαναφέρει κατά προσέγγιση το αρχικό ηχοχρώμα σε ένα όργανο, το οποίο, έχει επηρεαστεί λόγω υγρασίας ή θερμοκρασίας.

Η υλοποίηση του συστήματος αυτοματισμού, που προσθαφαιρεί μάζα (ύδωρ) από την ηχητική πλάκα ενός ακουστικού έγχορδου μουσικού οργάνου, έγινε με ένα σύστημα σωληνώσεων που ελεγχόταν από μικροελεγκτή Arduino Uno R3 μέσω μιας διεπαφής με τον χρήστη. Για τις μετρήσεις, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, κρίθηκε ιδανική η χρήση της Χρονικά Ολοκληρωμένης Ηλεκτρονικής Συμβολομετρίας Ψηφίδων γνωστής και ως E.S.P.I., ως ιδιαιτέρως ακριβούς, δυναμικής και μη καταστρεπτικής τεχνικής. Έγινε καταγραφή των εικόνων συμβολής των βασικών συντονισμών αλλά και των υπολοίπων καταστάσεων συντονισμού για ένα εύρος μελέτης από 50Hz έως 1500Hz για τις τέσσερις διαφορετικές καταστάσεις, που ονομάστηκαν PlayModes, της ηχητικής πλάκας κρητικού λαούτου που μελετήθηκε. Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή έγινε σε γλώσσα Arduino (με βάση τη Wiring) ενώ όλοι οι υπολογισμοί έγιναν με το λογισμικό MatLab.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των Ακουστικών Μετρήσεων, απεδείχθη ότι η μεταφορά μάζας καθώς κι η μεταβολή της κατανομής της, δυναμικά, σε ένα καπάκι ακουστικού οργάνου μετέφεραν, όπως αναμενόταν, τις συχνότητες ιδιοσυντονισμού. Για παράδειγμα, για την μεταβολή από την Κατάσταση PlayModeZero διαδοχικά σε PlayMode1, PlayMode2 και PlayMode3 έχουμε μέσο όρο μεταφοράς συχνότητας 7.55Hz, 8.00Hz και 8.77Hz, αντίστοιχα. Σε μια περίπτωση μάλιστα, η μετακίνηση ήταν από τα 585Hz στα 560Hz, δηλαδή είχαμε μεταφορά 25Hz.

Συνεπώς, οι δυναμικές μεταβολές της μάζας, μετέβαλαν το ηχοχρώμα του οργάνου και αυτό γίνεται αντιληπτό από το αισθητήριο όργανο του οργανοπαίκτη και των ακροατών, χωρίς την παρεμβολή ηλεκτρικών - ηλεκτρονικών διατάξεων κι ηχείων. Αυτή είναι κι η καινοτομία αυτής της εργασίας, διότι η αλλαγή θα γίνεται πρωτογενώς, εντελώς "ακουστικά", υπό την επίδραση μόνο της μεταβολής της τιμής της μάζας ή της κατανομής της στην ηχητική πλάκα και τη μεταφορά του ήχου μέσω μηχανικών κυμάτων στον αέρα. Αυτά τα δεδομένα ενδέχεται να οδηγήσουν σε μια νέα γενιά ακουστικών μουσικών οργάνων και την εμπορική αξιοποίηση της πρωτότυπης αρχικής ιδέας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε η μελέτη κι άλλων τεχνικών μεταβολής της μάζας και του συντονισμού ενός ακουστικού οργάνου καθώς κι η κατασκευή πιο συμπαγούς αυτοματισμού που θα χωρά σε πραγματικά, λειτουργικά όργανα ακόμα και μικρού μεγέθους όπως το βιολί.

## ABSTRACT

---

Postgraduate Student:

Nikolaos A. Fanourakis, School of Engineering, Department of Electrical Engineering, Technological Educational Institute of Crete, Heraklion.

Supervisor Professor:

Nektarios A. Papadogiannis, School of Applied Science, Department of Music Technology and Acoustics Engineering. Technological Educational Institute of Crete, Rethymno.

Abstract of Master's Thesis, Submitted 15 October 2016:

Dynamic Change in Sound Complexion of String Acoustic Musical Instruments.

The aim of the study is to prove that it is possible to dynamically change the vibration and resonance of an acoustic string instrument, by the implementation of an automatic system, which in turn changes the spectral content of the sound that is emitted. This way we could meet different aesthetic approaches and different needs in terms of sound complexion from a single acoustic instrument, but probably can have the reverse operation too, which is the restoration of the approximate original sound complexion of an instrument, which has been affected by humidity or temperature changes.

The implementation of the automatic system, which adjusts a mass (water) on the sound plate of an acoustic string instrument, has a piping system controlled by a microcontroller Arduino Uno R3 via an user interface. The resonance measurements, which were made in the facilities of Laboratory for Acoustics and Optics Technology of the Department of Music Technology and Acoustics Engineering at T.E.I. of Crete, we used the method of time average Electronic Speckle Pattern Interferometry inlay known as E.S.P.I., as a particularly accurate, dynamic and non-destructive technique. Interferometric images were recorded corresponding to key resonances and other resonance conditions in a range from 50Hz to 1500Hz, for the four different states named PlayModes, on a sound plate of a Cretan lute. The microcontroller programming was done in Arduino language (based on Wiring) and all the calculations were made with MATLAB.

Regarding the results of Acoustic Measurements, we proved that the controlled mass transfer in certain position on the surface of an acoustic instrument moved the Eigenfrequencies. For example a change from PlayModeZero Status sequentially to PlayMode1, PlayMode2 and PlayMode3 gave an average frequency tuning of 7.55Hz, 8.00Hz and 8.77Hz, respectively. In a particular case the frequency was tuned from 585Hz to 560Hz, so we recorded a tuning of 25Hz. Therefore, the dynamic changes of the mass altered the sound complexion of the instrument and this is a change detected by the musician and the audience, without the interference of electric - electronic devices and speakers. This is the novelty of this work, because the change is at a primary, completely acoustic level, under the influence of only the change in mass or its distribution on the sound plate and the transfer of the altered sound through mechanical waves in the air. These data could lead to a new generation of acoustic musical instruments, and the commercialization of the original idea. Of particular interest would be the study and other techniques of mass control and subsequently the resonances of an acoustic instrument and the construction of a more compact automation that will fit in functional instruments as compact as the violin.

# 1 . ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου και Μουσική Ακουστική. Ορισμός και Ιστορική Αναδρομή.

## 1.1 Ορισμός και Ιστορική Αναδρομή των Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου.

Από αρχαιοτάτων χρόνων ο άνθρωπος προσπάθησε αρχικά να επιβιώσει σε ένα δύσκολο περιβάλλον αλλά και να κάνει τη ζωή του ευκολότερη στη συνέχεια. Τα πρώτα εργαλεία έπαιξαν σημαντικό ρόλο σε αυτή τη προσπάθεια, αλλά όπως αποδείχθηκε είναι στη φύση του ανθρώπου να επιζητεί συνεχώς το καλύτερο. Τα εργαλεία γίνονταν όλο και πιο πολύπλοκα, εφευρέθηκαν μηχανές και διαδικασίες. Πάντα όμως ήταν απαραίτητη η παρουσία και η λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο για τη πορεία των εργασιών από τον άνθρωπο – χειριστή. Αυτή η δεσμευτική παρουσία δημιούργησε την ανάγκη συστημάτων που θα λειτουργούν αυτόματα κι αυτόνομα, οπότε με τη πάροδο των ετών από τα πρώτα λίθινα εργαλεία φτάσαμε στα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου.

Ως Σύστημα Αυτομάτου Ελέγχου (Automatic Control System), για συντομία Σ.Α.Ε. στο εξής, θα μπορούσαμε να ορίσουμε ένα σύστημα όπου τα διάφορα λειτουργικά του μέρη, είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με τέτοιο τρόπο ώστε να συμπεριφέρονται αυτόματα κατά ένα προκαθορισμένο επιθυμητό τρόπο (1).

### 1.1.1 Αυτοματισμοί στη Μυθολογία.

Ο παραπάνω ορισμός μπορεί να είναι σύγχρονος αλλά αναφορές σε αυτοματισμούς, ακόμα και σε μηχανές παρόμοιες με τα σύγχρονα ρομπότ, έχουμε ήδη από την Αρχαία Ελλάδα. Φυσικά οι περισσότερες κατατάσσονται στην αρχαία ελληνική μυθολογία κι όχι στην ιστορική πραγματικότητα. Παραδείγματος χάριν στην Ιλιάδα του Ομήρου αναφέρεται πώς ο Ήφαιστος είχε δύο θεραπαινίδες (υπηρέτριες) από χρυσό που τον βοηθούσαν, οι οποίες προικισμένες με λογική, μπορούσαν να περπατήσουν, να μιλήσουν και να μαθαίνουν να εκτελούν διάφορες εργασίες.

*«Χιτώνα ενδόθη, εφούκτωσε σκήπτρο παχύ κι εβγήκε,*

*χωλαίνοντας. Και ανάλαφρα τον κόριον εστηρίζαν*

*θεράπαινες ολόχρυσες, σαν ζωντανά κοράσια.*

*Δύναμιν έχουν και φωνήν, νουν έχουν εις τες φρένες,*

*και τεχνουργήματ' έμαθαν από τους αθανάτους.*

*Εκείνες τον επρόσεχαν. Κι εσύρθη αυτός πλησίον*

*στην Θέτιδα κι εκάθισε σ' ένα θρονί ωραίο.» (2)*

Επίσης στη συλλογή του Ηφαιστου όπως αναφέρεται, υπήρχαν τρίποδες που μπορούσαν να κινηθούν αυτόνομα πάνω σε χρυσούς τροχούς εκτελώντας διάφορες εργασίες εξυπηρετώντας τους θεούς.

*«Ότ' είκοσι όλους τρίποδες τότε φιλοτεχνούσε,*

*τοίχον μεγάρου στερεού τριγύρω να στολίσουν.*

*Κόκλους προσάρμοσε χρυσούς στον κάθε ποδοστάτην*

*όπως στην θείαν σύνοδον κλήσουν μοναχοί τους*

*και θαύμα να τα δει κανείς, στο δώμα να γυρίσουν.» (3)*

Στο ίδιο έπος υπάρχει κι η πρώτη περιγραφή ενός εργαστηρίου που λειτουργεί αυτόματα όταν δώσει εντολή ο Ήφαιστος, θυμίζοντας σύγχρονα εργοστάσια πλήρως αυτοματοποιημένα, όπως της αυτοκινητοβιομηχανίας..

*«Είπε και αυτού την άφησε κι επήγε στες φυσσόνες,*

*στο πυρ τες στρέφει και γοργά να εργάζονται προστάζει.*

*ὡς εἰπὼν τὴν μὲν λίπεν αὐτοῦ, βῆ δ' ἐπὶ φύσας·*

*τὰς δ' ἐς πῦρ ἔτρεψε κέλευσέ τε ἐργάζεσθαι.*

*Φυσσόνες είκοσι φυσσόν στες κάψες τους και βγάζουν*

*ευκολοφύσητην πνοήν σφοδρήν ἢ μετρημένην,*

*πότε με βιά πότε σιγά να υπηρετούν, ως θέλει*

*ο Ήφαιστος, ὡστ' εύκολα το έργον να τελειώσει.» (4)*

Η πιο ευθεία όμως παραπομπή σε ρομπότ από τις αρχαίες περιγραφές είναι ο μυθικός Τάλως, που προστάτευε το νησί της Κρήτης. Ο Τάλως (5) ήταν γιγάντιος, ανθρωπόμορφος, με σώμα από χαλκό. Σχετικά με την προέλευσή του, υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές. Η πιο γνωστή, από τον Απολλόδωρο, λέει πως τον κατασκεύασε ο θεός Ήφαιστος και τον χάρισε στο βασιλιά Μίνωα για να φυλάει την Κρήτη. Είχε μόνο ένα αδύνατο σημείο, στη φτέρνα. Ο Τάλως κατά τον Πλάτωνα ήταν επιφορτισμένος με το καθήκον να επιτηρεί την εφαρμογή των νόμων στην Κρήτη, κουβαλώντας τους μαζί του γραμμένους σε χάλκινες πλάκες. Οι περισσότερες πηγές αναφέρουν ότι ήταν άγρυπνος φύλακας της Κρήτης που γύριζε τις ακτές του νησιού τρεις φορές τη μέρα. Κατά άλλους ήταν φτερωτός και το καθήκον αυτό το εκτελούσε πετώντας. Κρατούσε σε απόσταση τα άγνωστα πλοία που πλησίαζαν την Κρήτη εκτοξεύοντας εναντίον τους μεγάλους ογκόλιθους. Αν οι άγνωστοι είχαν ήδη αποβιβαστεί, τους έκαιγε με την ανάσα του ή πυράκτωνε το χάλκινο σώμα του σε κάποια φωτιά, τους αγκάλιαζε σφιχτά πάνω του κι έτσι τους έκαιγε.





Αργυρός στατήρας ΦΑΙΣΤΟΥ, 280π.Χ.,  
με τον φτερωτό Τάλω και ένα ταύρο.

Πηγή: <http://blogs.sch.gr/2nipagmarin/2014/05/05>

Σχήμα 1.1.1.1

Το τέλος του Τάλου ήρθε από τους Αργοναύτες που γύριζαν από την Κολχίδα. Θέλοντας να δέσουν οι Αργοναύτες στο νησί αντιμετώπισαν τον γίγαντα που τους κρατούσε σε απόσταση. Τότε η Μήδεια, που ταξίδευε μαζί τους, μάγεψε με τα λόγια της τον Τάλω, υποσχόμενη του αθανασία, κι έτσι μπόρεσε ο Ιάσωνας να του αφαιρέσει το καρφί στη φτέρνα του που έκλεινε τη μια και μοναδική φλέβα που διέτρεχε όλο το κορμί του και περιείχε ιχώρ, θανατώνοντάς τον. Άλλη εκδοχή αναφέρει ότι τον σκότωσε ο πατέρας του Φιλοκτήτη Ποίας, χτυπώντας τον με βέλος, στο ίδιο μοναδικό αδύνατο σημείο του. Έχει υπολογιστεί ότι για κάνει τρεις φορές την ημέρα το γύρο του νησιού, έπρεπε να κινείται με ταχύτητα 250 χιλιόμετρα ανά ώρα. Αρκετά νομίσματα στα οποία εικονίζεται ο Τάλως βρέθηκαν στην αρχαία πόλη της Φαιστού. Ο Τάλως, αν και μυθικό όν, ήταν το πρώτο καταγεγραμμένο ρομπότ.

Προσπάθεια για την κατασκευή ρομπότ όμως, δεν έχουμε μόνο σε ελληνικούς μύθους αλλά και σε Αφρικάνικους. Παρακάτω παρατίθεται ένα χαρακτηριστικό απόσπασμα (6).

*Πριν από πολλά χρόνια ζούσε ένας βασιλιάς, που ήθελε να "φτιάξει" έναν άνθρωπο. Φώναξε λοιπόν τον αρχηγό των σιδηρουργών και τον πρόσταξε να του φτιάξει ένα σιδερένιο άνθρωπο.*

*«Μα...» Πήγε να πει ο σιδεράς.*

*«Δεν έχει μα...» Τον διέταξε ο βασιλιάς. «Εδώ σου έχω όλο το σίδηρο που θα χρειαστείς. Έχε υπόψη σου ότι θέλω έναν ζωντανό άνθρωπο, που θ' ανασάνει, με αίμα στο σώμα του και μυαλό στο κεφάλι του»*

*Ο αρχισιδηρουργός πήρε το σίδηρο κ επέστρεψε λυπημένος στο σπίτι του. Ρώτησε όλους τους φίλους του αλλά κανείς δεν ήξερε πως φτιάχνεται ένας αληθινός άνθρωπος.*

*Μια μέρα συνάντησε έναν παλιό του φίλο που ζούσε μόνος του στην ερημιά. Ο αρχισιδηρουργός είπε στο σοφό τα βάσανά του κι αυτός του είπε τι να κάνει.*

*Έχοντας στα αυτιά του τα λόγια του σοφού, πήγε στο βασιλιά και του είπε: «Μεγαλειότατε, πρέπει να διατάξεις όλους τους υπηκόους σου να ξορίσουν τα κεφάλια τους και να μαζευτούν χίλια φορτία κάρβουνο για να λιώσει ο σίδηρος. Μετά θα τους βάλεις να μαζέψουν χίλιους κουβάδες δάκρυα για να σβηστεί η φωτιά. Γιατί όπως καταλαβαίνεις το κάρβουνο από ξύλο και το νερό από ποτάμι δεν αρκούν για να φτιαχτεί ένας άνθρωπος!»*



### Ο Σιδερένιος Άνθρωπος.

Πηγή: Νηλ Φίλιπ – Μύθοι από όλο τον κόσμο,  
Απόδοση: Μαριάννα Τζιαντζή, Εικονογράφηση : Nilesh Mistry  
Εκδόσεις Ερευνητές.

#### Σχήμα 1.1.1.2

Ο βασιλιάς έκανε ότι του ζήτησε. Όλοι οι άνθρωποι ξύρισαν τα κεφάλια τους και έκοψαν τα μαλλιά τους αλλά έβγαλαν μόνο ένα φορτίο κάρβουνο. Μετά όλοι άρχισαν να κλαίνε αλλά μάζεψαν μονάχα δυο κουβάδες δάκρυα.

Ο βασιλιάς κάλεσε ξανά τον αρχηγό των σιδηρουργών. «Δε χρειάζεται να φτιάξεις έναν άνθρωπο» του είπε. «Δυστυχώς δε μπόρεσα να βρω ούτε τα κάρβουνα ούτε τα δάκρυα.»

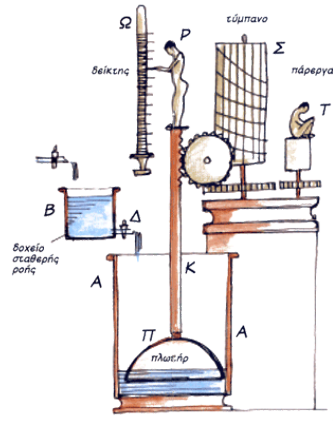
«Μεγαλειότατε» του απάντησε ο αρχισιδηρουργός του, «Χαίρομαι που δε βρήκες αρκετά μαλλιά και δάκρυα, επειδή, για να πω την αλήθεια, δεν θα μπορούσα να σου φτιάξω έναν άνθρωπο!»

## 1.1.2 Αυτοματισμοί από την αρχαιότητα ως τη βιομηχανική επανάσταση.

Πέρα από τη σφαίρα του μύθου όμως, υπάρχουν και καταγεγραμμένες, τεχνολογικές λύσεις αυτομάτου ελέγχου υψηλού επιπέδου για την εποχή τους. Από τις πιο χαρακτηριστικές περιπτώσεις, χωρίς να είναι οι μοναδικές, είναι οι παρακάτω:

### **Το υδραυλικό ωρολόιο. ( Κτησίβιος 270 π.Χ. )**

Το ρολόι αυτό μπορούσε να λειτουργεί συνεχώς, χωρίς ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης, υποδεικνύοντας την ώρα για της 365 ημέρες του έτους (7). Λειτουργούσε με νερό μιας πηγής που τροφοδοτούσε μέσω ενός υπερχειλιστή το ανώτερο μπρούντζινο δοχείο. Αυτό με τη σειρά του τροφοδοτούσε το μικρότερο ενδιάμεσο δοχείο που αποτελούσε έναν ελεγκτή σταθερής στάθμης με ένα σύστημα κωνικής βαλβίδας διακοπής της ροής πάνω σε πλωτήρα που περιείχε. Τότε ένας σταλάκτης τροφοδοτούσε σταγόνα με σταγόνα το μακρόστενο μπρούντζινο δοχείο με σταθερή παροχή νερού. Με την άνοδο της στάθμης του νερού σε αυτό, ένας πλωτήρας ανασηκωνόταν και μέσω μιας ράβδου ανυψωνόταν ισόχρονα ένα αγαλματίδιο με δείκτη.



Το υδραυλικό ρολόι που επινοήθηκε από τον Κτησίβιο.

Πηγή: [http://users.sch.gr/mfanarioti/MHXANES/images/mixanologia/ktisibi\\_us1max.jpg](http://users.sch.gr/mfanarioti/MHXANES/images/mixanologia/ktisibi_us1max.jpg)

Σχήμα 1.1.2.1

Ο δείκτης υποδείκνυε την ώρα του 24ώρου σε ένα περιστρεφόμενο τύμπανο που περιείχε το διάγραμμα των ωρών της ημέρας και της νύκτας ανάλογα με την ημερομηνία. Στο τέλος του 24ώρου το νερό ξεπερνούσε το ενσωματωμένο παράπλευρο σιφόνι κι άδειαζε ταχύτατα. Με την κάθοδο του πλωτήρα ενεργοποιούνταν ένα ευφύες σύστημα μετάδοσης κίνησης με σχέση 1 προς 365 (που αποτελούνταν από έναν οδοντωτό κανόνα, ένα επίσχεστρο, δύο οδοντωτούς τροχούς κι έναν ατέρμονα κοχλία) το οποίο εξασφάλιζε την περιστροφή του βαθμονομημένου τυμπάνου κατά το ένα τριακοσιοστό εξηκοστό πέμπτο της περιφέρειάς του ώστε ο δείκτης του αγαλαματιδίου να υποδεικνύει πλέον με ακρίβεια το ωράριο της επόμενης ημέρας.

- **Μηχανισμός των Αντικυθήρων.**

Ο μηχανισμός των Αντικυθήρων ή χρονολόγιο των Αντικυθήρων ή υπολογιστής των Αντικυθήρων ή αστρολάβος των Αντικυθήρων (8) είναι ένα αρχαίο τέχνημα που πιστεύεται ότι ήταν ένας αρχαίος αναλογικός, μηχανικός υπολογιστής που πραγματοποιούσε πολύπλοκες αστρονομικές παρατηρήσεις και προβλέψεις, που κατασκευαστικά μοιάζει με περίτεχνο ωρολογιακό μηχανισμό.

Θεωρείται ο αρχαιότερος γνωστός αναλογικός υπολογιστής. Η ποιότητα κατασκευής του υποδηλώνει ότι είχε ανακαλυφθεί κατά τη διάρκεια της Ελληνιστικής Περιόδου. Ανακαλύφθηκε σε ναυάγιο ανοικτά του Ελληνικού νησιού Αντικύθηρα, μεταξύ των Κυθήρων και της Κρήτης. Χρονολογείται μεταξύ του 150 π.Χ. και του 100 π.Χ., αρκετά πριν από την ημερομηνία του ναυαγίου, το οποίο ενδέχεται να συνέβη ανάμεσα στο 87 π.Χ. και 63 π.Χ.. Θα μπορούσε να ήταν κατασκευασμένο μέχρι μισόν αιώνα πριν το ναυάγιο. Το ναυάγιο ανακαλύφθηκε το 1900 σε βάθος περίπου 40 με 64 μέτρων και πολλοί θησαυροί, αγάλματα και άλλα αντικείμενα, ανασύρθηκαν από Συμιακούς σφουγγαράδες και βρίσκονται σήμερα στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο στην Αθήνα (9).



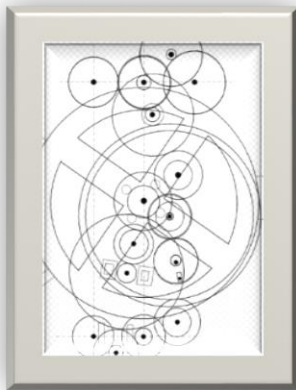
Τα κύρια θραύσματα του μηχανισμού. Αθήνα, Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο.

Πηγή: <http://www.iefimerida.gr/sites/default/files/styles/708x320/public/antikythra708.jpg?itok=w9E3mt1a>

Σχήμα 1.1.2.2

Ο μηχανισμός είναι το αρχαιότερο σωζόμενο μηχάνημα με γρανάζια, είναι φτιαγμένος από μπρούντζο κι είχε ξύλινο πλαίσιο. Η περισσότερο αποδεκτή θεωρία, σχετικά με τη λειτουργία του, υποστηρίζει ότι ήταν ένας υπολογιστής σχεδιασμένος για να υπολογίζει και να απεικονίζει τις κινήσεις των ουρανίων σωμάτων, τις εκλείψεις ηλίου και σελήνης, τις φάσεις της σελήνης. Πρόσφατες λειτουργικές ανακατασκευές της συσκευής υποστηρίζουν αυτήν την ανάλυση. Από τις τελευταίες έρευνες καταρρίφθηκε η θεωρία ότι εμπεριέχει ένα διαφορετικό γρανάζι, όμως ο ανακαλυφθείς μηχανισμός της κίνησης της Σελήνης είναι ακόμα πιο εντυπωσιακός, καθότι δίνει τη δυνατότητα μεταβλητής γωνιακής ταχύτητας στον άξονα που κινεί τη Σελήνη (δεύτερος Νόμος Κέπλερ).

Η μελέτη του συνεχίζεται από ξένους κι Έλληνες ειδικούς των πανεπιστημίων του Κάρντιφ, των Αθηνών, της Θεσσαλονίκης, του Εθνικού Αρχαιολογικού Μουσείου και του Μορφωτικού Ιδρύματος Εθνικής Τραπέζης, σε μια διαπανεπιστημιακή ομάδα. Η σύγχρονη έρευνα υποστηρίζεται από την τελευταία τεχνολογία με τη βοήθεια μεγάλων εταιρειών, με πρωτοποριακά προγράμματα ψηφιακής απεικόνισης κι έναν ειδικό τομογράφο, ο οποίος κατασκευάστηκε ειδικά για την έρευνα του μηχανισμού των Αντικυθήρων. Τα αποτελέσματα την έρευνας επιβεβαίωσαν ότι ο μηχανισμός φέρει 30 οδοντωτούς τροχούς οι οποίοι περιστρέφονται γύρω από 10 άξονες. Η λειτουργία του μηχανισμού κατέληγε σε τουλάχιστον 5 καντράν, με έναν ή περισσότερους δείκτες για το καθένα. Με τη βοήθεια του τομογράφου έχουν διαβαστεί αρκετές από τις επιγραφές που υπήρχαν στις πλάκες και στους περιστρεφόμενους δίσκους, οι οποίες εμπεριέχουν αστρονομικούς και μηχανικούς όρους, κι έχουν χαρακτηριστεί από τους ειδικούς ως ένα είδος "εγχειριδίου χρήσης" του οργάνου.



Γραφική απεικόνιση του μηχανισμού.

Πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e8/Antikythera\\_mechanism.svg/330pxAntikythera\\_mechanism.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e8/Antikythera_mechanism.svg/330pxAntikythera_mechanism.svg.png)

Σχήμα 1.1.2.3



Ανακατασκευή του μηχανισμού των Αντικυθήρων.

Εθνικό Μουσείο των Αθηνών.

Πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/bd/NAMA\\_MAC\\_hine\\_d%27Anticyth%C3%A8re\\_6.jpg/195pxNAMA\\_MAC\\_hine\\_d%27Anticyth%C3%A8re\\_6.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/b/bd/NAMA_MAC_hine_d%27Anticyth%C3%A8re_6.jpg/195pxNAMA_MAC_hine_d%27Anticyth%C3%A8re_6.jpg)

Σχήμα 1.1.2.4

Ο μηχανισμός αυτός έδινε, κατά την επικρατέστερη σύγχρονη άποψη, τη θέση του ήλιου και της σελήνης καθώς και τις φάσεις της σελήνης. Μπορούσε να εμφανίσει τις εκλείψεις ηλίου και σελήνης βασιζόμενος στον Βαβυλωνιακό κύκλο του Σάρου. Τα καντράν του απεικόνιζαν επίσης τουλάχιστον δύο ημερολόγια, ένα ελληνικό βασισμένο στον Μετωνικό κύκλο κι ένα αιγυπτιακό, που ήταν και το κοινό "επιστημονικό" ημερολόγιο της ελληνιστικής εποχής. Μια μερική ανακατασκευή του μηχανισμού πραγματοποιήθηκε από τον Αυστραλό επιστήμονα των υπολογιστών Άλαν Τζωρτζ Μπρόμλεϋ (Allan George Bromley, 1947-2002), του πανεπιστημίου του Σίδνεϋ και τον ωρολογοποιό από το Σίδνεϋ Φρανκ Πέρσιβαλ (Frank Percival).

Αργότερα, ο Τζων Γκλεβ (John Gleave), Βρετανός κατασκευαστής μηχανικών πλανηταρίων, κατασκεύασε ένα λειτουργικό αντίγραφο του μηχανισμού. Σύμφωνα με την ανακατασκευή του, η ανάγνωση του εμπρόσθιου τροχού υποδεικνύει την ετήσια πορεία του Ήλιου και της Σελήνης διαμέσου του Ζωδιακού Κύκλου κατά το Αιγυπτιακό ημερολόγιο. Η ανάγνωση του επάνω οπίσθιου τροχού παριστάνει μια περίοδο τεσσάρων ετών και συσχετίζεται με άλλες ενδείξεις που παριστάνουν τον Μετωνικό κύκλο των 235 συνοδικών μηνών, ο οποίος ισούται με 19 ηλιακά έτη. Συνοδικός μήνας ονομάζεται η περίοδος που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο νέες σελήνες. Η ανάγνωση του κάτω οπίσθιου τροχού σκιαγραφεί τον κύκλο ενός και μόνου συνοδικού μήνα, ενώ ένας δευτερεύων τροχός καταγράφει το σεληνιακό έτος των 12 συνοδικών μηνών.

Μια ακόμη ανακατασκευή έγινε το 2002 από τον Μάικλ Ράιτ (Michael Wright), τότε έφορο μηχανολογίας μηχανικής του Μουσείου της Επιστήμης του Λονδίνου, σε συνεργασία με τον Μπέρναρντ Γκάρντνερ από το Σίδνεϋ. Επίσης ο μαθηματικός Διονύσιος Κριάρης έκανε το 1999 μια πρώτη ανακατασκευή, βασισμένη στο μοντέλο του Πράις. Ακολούθησε μια ακόμα το 2007 με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, καθότι βασίζεται στα αποτελέσματα των νέων ερευνών από το Πρόγραμμα Έρευνας για τον Μηχανισμό των Αντικυθήρων.

Το 2014 ο Έλληνας φυσικός Μάρκος Σκουλάτος, κατασκεύασε ένα λειτουργικό μοντέλο που έχει μεγάλη πιστότητα σε διαστάσεις και τις γνωστές λειτουργίες του αρχικού μηχανισμού. Ενσωματώνει όλες τις τελευταίες γνώσεις από τις έρευνες, όπως το μηχανισμό πείρου-σχισμής για τη σελήνη, την ένδειξη των Ολυμπιακών αγώνων και τις ακριβείς αναγνώσεις των αρχαίων επιγραφών.

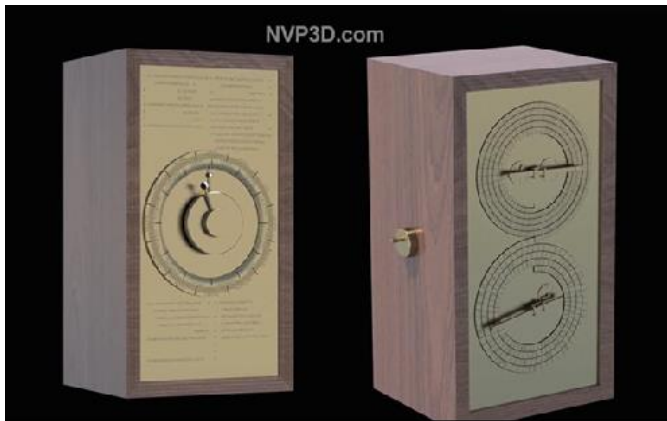


Ανακατασκευή του φυσικού Μάρκου Σκουλάτου.

Πηγή: <http://www.eternalgadgetry.com>

Σχήμα 1.1.2.5

Για την ικανότητα κατασκευής πολύπλοκων μηχανισμών από γρανάζια, έχουμε πολύ λίγες πληροφορίες, γιατί ουσιαστικά σαφή αναφορά στους οδοντωτούς τροχούς έχουμε για πρώτη φορά από τον αλεξανδρινό μηχανικό Ήρωνα. Όμως υπάρχουν ενδείξεις που υποδεικνύουν τον Αρχιμήδη ή και τον Κτησίβιο ως πιθανούς εφευρέτες του οδοντωτού τροχού. Ο Αρχιμήδης είναι γνωστός για τις πολύπλοκες κατασκευές του, που αναπαριστούσαν τις κινήσεις των άστρων και των πλανητών στο στερέωμα, έχουμε όμως πληροφορίες μόνο για το τι λειτουργίες εκτελούσαν κι όχι για το πως τις εκτελούσαν. Πιθανότατα όμως ο τρόπος λειτουργίας τους να ήταν παρόμοιος με του μηχανισμού των Αντικυθήρων.



Ανακατασκευή του μηχανισμού των Αντικυθήρων που απεικονίζει πως περίπου θα ήταν εξωτερικά μέσα στο ξύλινο περίβλημα του.

Πηγή : <http://www.gizmag.com/hublott-antikythera-mechanism-first-computer-watch/20517/pictures>

Σχήμα 1.1.2.6

- **Αυτόματες θύρες και Αιολόσφαιρα. (Έρων 10-85 μ.Χ.)**

Ο Έρων ο Αλεξανδρεύς ήταν μηχανικός και γεωμέτρης (7). Έζησε στην Αλεξάνδρεια της Αιγύπτου περίπου τον 1ο π.Χ. ή 1ο μ.Χ. αιώνα. Η πιο διάσημη εφεύρεση του είναι η αιολόσφαιρα ή ατμοστρόβιλος, η πρώτη ατμομηχανή στην ιστορία. Είχε συγγράψει πολλά βιβλία τεχνικού περιεχομένου, όπως το "Περί αυτοματοποιητικής" που περιγράφει πολλές αυτόματες μηχανές. Στον Έρωνα αποδίδονται οι εφευρέσεις πολλών ελεγκτικών μηχανισμών ανάδρασης που λειτουργούσαν με νερό, φωτιά και συμπιεσμένο αέρα σε διάφορους συνδυασμούς κι η κατασκευή του πρώτου προγραμματιζόμενου αναλογικού υπολογιστή με ένα πολύπλοκο σύστημα γραναζωτών ατράκτων διάστικτων με καβίλιες και δεμένων με σχοινιά που στις άκρες τους είχαν βάρη (σακιά άμμου που άδειαζαν με την πάροδο του χρόνου) και χρησιμοποιείτο στην λειτουργία ενός αυτόματου θεάτρου του.

- **Αυτόματες θύρες**

Ο ναός κατασκευάζεται έτσι ώστε μόλις ανάψει φωτιά, σε ένα βωμό που βρίσκεται στην είσοδό του και γίνει η θυσία, οι πόρτες του ναού να ανοίγουν αυτόματα και μόλις σβήσει η φωτιά πάλι να κλείνουν. Ο Έρων αξιοποιεί στον μηχανισμό αυτό τη διαστολή του θερμαινόμενου αέρα κάτω από τον βωμό. Με την πίεση του αέρα μεταφέρεται υγρό από ένα σταθερό σε ένα κινητό δοχείο και κατόπιν αξιοποιείται σύστημα τροχαλιών και αντίβαρων για την περιστροφή των πυλών του ναού.



Αυτόματες θύρες σε ναό. (Μοντέλο)

Πηγή: <http://reviews.in.gr/science-tech/ancientgreektechnology/article/?aid=1231081879>

Σχήμα 1.1.2.7

- **Αιολόσφαιρα**

Ο περιστροφικός ατμοστρόβιλος που εφεύρε ο Έρων έγινε γνωστός ως αιολόσφαιρα. Η κατασκευή αυτή είναι η βασική αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται η σύγχρονη ατμομηχανή. Πάνω από έναν λέβητα υπάρχουν δύο σωλήνες και γύρω από τα καμπυλωμένα άκρα τους εδράζεται μία σφαίρα με

δύο ακροφύσια. Όταν θερμανθεί το νερό του λέβητα, ατμοποιείται και περνώντας από τους δύο κατακόρυφους σωλήνες εισέρχεται στη σφαίρα και εξέρχεται με ταχύτητα από τα δύο ακροφύσια εξαναγκάζοντάς την σε αντίθετη περιστροφή.



Αιολόσφαιρα του Ήρωνα.

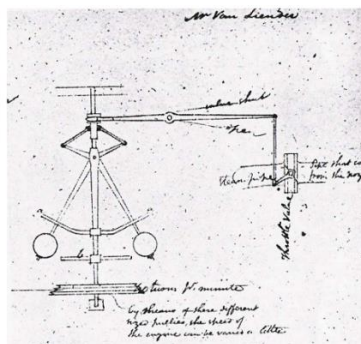
Πηγή:<http://users.sch.gr/mfanarioti/MHXANES/mixanologia/aiolosfaira.html>

Σχήμα 1.1.2.8

Η Αιολόσφαιρα είναι ο πρόδρομος της ατμομηχανής, που με την προσθήκη τροχαλίας που θα έδινε κίνηση σε οποιαδήποτε μηχανή, θα μπορούσε να είχε οδηγήσει ήδη από την Ελληνιστική εποχή (αν αυτή δεν ανακοπτόταν από τη Ρωμαϊκή κατάκτηση) στη Βιομηχανική Επανάσταση επιταχύνοντας σχεδόν 2000 χρόνια την τεχνολογική εξέλιξη στην ανθρωπότητα με ότι αυτό συνεπάγεται.

- **Ρυθμιστής στροφών ατμομηχανών. (James Watt, 1736 - 1819 μ.Χ.)**

Ο James Watt ήταν Σκωτσέζος εφευρέτης και μηχανικός ο οποίος μετά από αρκετές βελτιώσεις και μετατροπές έκανε μια σημαντική βελτίωση στις ατμομηχανές, κατασκεύασε τον "Κυβερνήτη Ιπτάμενων Σφαιρών" (10) ο οποίος ρύθμιζε την ταχύτητα σε μια περιστροφική ατμομηχανή. Αποτελείται από δυο εκκρεμή, στα άκρα των οποίων βρίσκεται ένα βαρίδι και προσαρμόζονται στον άξονα της μηχανής.



Ο Κυβερνήτης Ιπτάμενων Σφαιρών (Ρυθμιστής στροφών μηχανών) του James Watt.

Πηγή:[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c7/Boulton\\_and\\_Watt\\_centrifugal\\_governor-MJ.jpg/330px-Boulton\\_and\\_Watt\\_centrifugal\\_governor-MJ.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c7/Boulton_and_Watt_centrifugal_governor-MJ.jpg/330px-Boulton_and_Watt_centrifugal_governor-MJ.jpg)

Σχήμα 1.1.2.9

Όταν αυξηθεί η ταχύτητα περιστροφής του άξονα τα σφαιρίδια αποκλίνουν λόγω της φυγοκέντρου κι ανέρχονται ανάλογα κλείνοντας τη βαλβίδα εισόδου του ατμού κι η ταχύτητα μειώνεται. Όταν η ταχύτητα μειωθεί κάτω από την επιθυμητή, τότε τα σφαιρίδια κατέρχονται κι ανοίγουν τη βαλβίδα, αυξάνοντας τον ατμό και την ταχύτητα του άξονα της μηχανής. Αποτελεί μια από τις πρώτες επιτυχημένες ανατροφοδοτήσεις κι ένα από τα πρώτα πλήρως λειτουργικά συστήματα κλειστού βρόχου.

## 1.2 Ορισμός και Ιστορική Αναδρομή της Ακουστικής.

Ακουστική (Acoustics) είναι γενικά η επιστήμη που μελετά την παραγωγή, τη διάδοση και τις εφαρμογές των μηχανικών κυμάτων στη ύλη (11). Παρόλα αυτά, στην κατανόηση του μέσου ανθρώπου Ακουστική είναι η επιστήμη που ασχολείται με τα ηχητικά κύματα που συλλαμβάνονται το ανθρώπινο αισθητήριο όργανο, δηλαδή το αυτί. Ασχολείται με όλα γενικά τα μηχανικά κύματα, τα οποία είναι πολλές φορές κι εκτός του ακουστικού φάσματος του ανθρώπινου αυτιού και δεν είναι αντιληπτά από τον άνθρωπο, όπως τα υποηχητικά κύματα (χαμηλής συχνότητας, π.χ. από σεισμούς) και τα υπερηχητικά κύματα (υψηλής συχνότητας).

### 1.2.1 Μουσική Ακουστική (Music Acoustics).

Ειδικότερα Μουσική Ακουστική (Music Acoustics) είναι ο κλάδος της Ακουστικής που μελετά τη φυσική της μουσικής και των μουσικών οργάνων (12). Μελετά την ανάλυση, λειτουργία και σχεδίαση των μουσικών οργάνων, επίσης μελετά κι αναλύει τη μελωδία, την ανθρώπινη φωνή και το τραγούδι. Ως προς την οπτική γωνία της φυσικής, μελετά τον τρόπο παραγωγής και διάδοσης των ηχητικών κυμάτων από μουσικά όργανα, εξετάζοντας την ακουστική τους συμπεριφορά ανά κατηγορία, π.χ. έγχορδα νυκτά ή με δοξάρι, πληκτροφόρα έγχορδα, πνευστά, κρουστά. Φυσικά μια ξεχωριστή κατηγορία αποτελεί η ανθρώπινη φωνή είτε η ομιλία είτε το τραγούδι.

Οι μουσικοί ήχοι, επί το πλείστον σύνθετοι και πλούσιοι σε αρμονικές, είναι από τα κύρια αντικείμενα μελέτης της Μουσική Ακουστικής, μαζί με τις ταλαντώσεις χορδών, μεμβρανών και τη διάδοση του ήχου μέσα σε ηχητικούς σωλήνες ως ήχος πνευστών μουσικών οργάνων. Τα φαινόμενα της συνήχησης και της σύνθεσης, όπως επίσης κι οι μουσικές κλίμακες, διαστήματα, θέματα σχετικά με την αποθήκευση και την αναπαραγωγή του ήχου μελετώνται διεξοδικά από αυτό τον κλάδο της επιστήμης.

Η καλή γνώση της Ακουστικής είναι εξαιρετικά σημαντική για σωστή κι ευχάριστη ακρόαση σε κάθε εφαρμογή που περιλαμβάνει ήχο, όπως ραδιοφωνικά studios και ηχογράφησης, θεατρικές αίθουσες, συνεδριακούς χώρους, παραγωγή μουσικής (ακουστικά, ηλεκτρονικά) αλλά και αίθουσες συναυλιών ή αμφιθέατρα εκπαιδευτικών ιδρυμάτων. Απαραίτητη κρίνεται η ακουστική μελέτη αυτών των χώρων, καθώς ακατάλληλοι χώροι ή ηχητικά συστήματα μπορούν να δημιουργήσουν απαράδεκτες συνθήκες ακρόασης με αποτέλεσμα ένα δυσάρεστο ακουστικό συναίσθημα στο ακροατήριο. Μερικά από τα προβλήματα που δημιουργούνται είναι η ηχώ, τα στάσιμα κύματα, οι τυχαίες ανακλάσεις των ηχητικών κυμάτων, ο χρωματισμός του ήχου που οφείλεται σε ανεπιθύμητους συντονισμούς στην αίθουσα κι άλλα.



## 1.2.2 Η Μουσική Ακουστική από την αρχαιότητα ως σήμερα.

Αναφορές για τη μελέτη του ήχου, την κατασκευή διαφόρων μουσικών οργάνων και τραγουδιού υπάρχουν σε πολλούς αρχαίους πολιτισμούς όπως ο αιγυπτιακός, ο κινεζικός, και σε μεσοποτάμιους (Σουμέριοι, Ασσύριοι, Χαλδαίοι, Βαβυλώνιοι και Πέρσες). Στην Άπω Ανατολή επίσης, στην Ινδουιστική παράδοση, αναφέρεται ότι ο Βράχμα δίδαξε στον σοφό Ναράδα την μουσική ο οποίος τη δίδαξε στους ανθρώπους. Ο Ταοϊσμός, αναφέρεται στον "υπέροχο ήχο της φύσης" και οι Σαμάνοι, ιερείς μιας θρησκείας της Βόρειας Ασίας, χρησιμοποίησαν τον ήχο ως μέσο, για ταξιδεύσουν σε άλλους "κόσμους". Γενικά το τραγούδι κι η μουσική ήταν μια πανάρχαια δημιουργία σε πολλές περιπτώσεις κομμάτι της θρησκείας κάθε λαού και μέρος της λατρευτικής μυσταγωγίας (13).

Οι Αρχαίοι Έλληνες που είχαν αναπτύξει έναν αξιοθαύμαστο πολιτισμό, για την εποχή, δεν θα μπορούσαν να μην ασχοληθούν με τα θέματα της ακουστικής (14). Ίσως γνώριζαν ότι ο ήχος είναι ένα κυματικό φαινόμενο από τις παρατηρήσεις που έκαναν στη φύση. Ο Πυθαγόρας από τη Σάμο (580π.Χ. – 500π.Χ.) (15) ασχολήθηκε εντατικά με θέματα ακουστικής και πιθανότατα πρώτος παρατήρησε ότι ο φθόγγος που παράγεται από μια τεντωμένη χορδή είναι ανάλογος με το μήκος της κι ότι η κρούση τεντωμένων χορδών παράγει αρμονικούς τόνους όταν οι αναλογίες των μηκών των χορδών είναι ακέραιοι αριθμοί. Εφηύρε το μονόχορδο (γίνεται εκτενέστερη αναφορά παρακάτω), το οποίο αποτέλεσε μουσικό κι επιστημονικό όργανο μελέτης, μουσικής και μαθηματικών. Ο Πυθαγόρας προσπάθησε να ανακαλύψει ποια σχέση έχουν η διάμετρος και το τέντωμα της χορδής στην παραγωγή φθόγγων. Πολλοί μαθητές, συνεχιστές κι άλλοι οπαδοί της Πυθαγόρειας σχολής συνεισέφεραν στην Ακουστική, όπως ο Ίππασος από το Μεταπόντιο (500 περίπου π.Χ.), σημαντικός στοχαστής του Πυθαγορισμού, που ως κύριο αντικείμενο μελέτης του είχε τις αριθμητικές μεσότητες κι η δυνατότητα εφαρμογής τους στις μουσικές συμφωνίες, δηλαδή τις συνηχίες δύο φθόγγων. Για τα πειράματά του κατασκεύασε μπρούτζινους δίσκους με ίσες διαμέτρους αλλά διαφορετικά πάχη, για να μελετήσει τους παραγόμενους ήχους, κι αργότερα επανέλαβε όμοια πειράματα χρησιμοποιώντας αγγεία αντί δίσκων, τα οποία γέμιζε με διαφορετικές ποσότητες νερού για την παραγωγή διαφορετικών συμφωνιών. Επίσης ο Αρχύτας (16), ο Ταραντινός (428-365 π.Χ.), στο έργο του "Περί Αρμονίας" αναφέρεται στους ήχους που παράγονται από αντικείμενα, τα οποία συγκρούονται ενώ βρίσκονται σε κίνηση. Κάποιες φορές, λόγω της απόστασης από το ανθρώπινο αυτί, της έντασής τους, ή της μειωμένης ταχύτητας της σύγκρουσης, οι ήχοι αυτοί δεν είναι δυνατόν να γίνουν αντιληπτοί από το ανθρώπινο αυτί. Όσοι όμως συλλαμβάνονται, μπορούν να μελετηθούν και να διακριθούν ως προς την οξύτητά τους, που έχει σχέση με την γρήγορη κίνηση, και την βραδύτητά τους, που αντίστοιχα έχει σχέση με την αργή κίνηση. Ο Αρχύτας μάλιστα προέβη σε μια σειρά πειραμάτων, στην προσπάθειά του να εδραιώσει την θεωρία του, που αναφέρεται στην σχέση του ύψους μιας νότας με την ταχύτητά της. Χρησιμοποίησε μια ράβδο η οποία, κινούμενη με διαφορετικές ταχύτητες, παρήγαγε κάθε φορά ήχο, το ύψος του οποίου, μεταβαλλόταν ανάλογα με την ταχύτητα. Το ίδιο συνέβαινε και με τις νότες που παράγονταν από την χρήση σωλήνων με διαφορετικά μήκη. Η Πυθαγόρεια σχολή προσέφερε πολλά στον κλάδο της Ακουστικής αλλά αντλεί και μεγάλο μέρος της φήμης της σ' αυτήν.

Ο Πλάτων (428 - 347 π.Χ.), ένας από τους επιφανέστερους φιλοσόφους της αρχαιότητας και μαθητής του Σωκράτη, σε μερικά από τα έργα του, τα οποία συνέταξε με την μορφή διαλόγων, ασχολήθηκε με θέματα ακουστικής και μουσικής. Στην "Πολιτεία" (17), δια στόματος Σωκράτη, δείχνει να ειρωνεύεται τους μουσικούς οι οποίοι "ζητούν αριθμούς μέσα στις συμφωνίες που ακούγονται με

τα αυτιά και δεν ανεβαίνουν σε προβλήματα, για να εξετάσουν και να δουν, ποιοι αριθμοί είναι αρμονικοί και ποιοι όχι και γιατί".

Επίσης με την Ακουστική ασχολήθηκαν και μεταγενέστεροι Έλληνες όπως ο Αριστοτέλης που θεωρούσε από τότε ότι ο ήχος γίνεται με αέρινα κύματα κι ότι αυτή η κίνηση του αέρα γεννιέται από κάποια ηχητική πηγή, ένα ηχογόνο σώμα, το οποίο δονούμενο σπρώχνει τον αέρα που το περιβάλλει κι ο ήχος ταξιδεύει αναλλοίωτος για μια απόσταση ανάλογη με την διάρκεια της αναταραχής του αέρα. Στον Στράτωνα τον Λαμψακηνό (330 – 270 π.Χ. περίπου), φυσικό περιπατητικό φιλόσοφο, μαθητή και διάδοχο του Θεόφραστου που ήταν πολυγραφότατος και μελετητής της Αριστοτελικής φιλοσοφίας αποδίδεται το παρακάτω κείμενο, για την θεωρία του ήχου. *"Οι ήχοι, φωνητικοί ή άλλοι, δημιουργούνται από την πρόσκρουση πραγμάτων μεταξύ τους ή από την πρόσκρουση του αέρα πάνω σε πράγματα. Η μετάδοση του ήχου δεν οφείλεται στο ότι ο αέρας παίρνει κάποιο συγκεκριμένο σχήμα, πράγμα που μερικοί πιστεύουν ότι συμβαίνει, αλλά σαν ελαστικό μέσο που είναι, διαστέλλεται ή συστέλλεται σύμφωνα με τις εξωτερικές ωθήσεις που δέχεται. Η πρόσκρουση της αναπνοής στον αέρα εξωθεί αυτόν σε βίαιη κίνηση, η οποία μεταδίδεται στο αμέσως επόμενο στρώμα αέρα. Έτσι, ο ήχος μεταδίδεται προς κάθε κατεύθυνση και τόσο μακριά όσο φθάνει η κίνηση του αέρα"*.

Ο Μάρκος Βιτρούβιος Πολλίων, Ρωμαίος αρχιτέκτων και μηχανικός (70–15π.Χ.) άσκησε μεγάλη επιρροή στην κατασκευή των Αναγεννησιακών θεάτρων με ένα βιβλίο που εξέδωσε (18), καθώς αναφέρεται γενικά στις αναλογίες κι ακουστικές ιδιότητες των ελληνιστικών και ρωμαϊκών θεάτρων. Θεωρεί ότι η φωνή κινείται κατά μήκος αμέτρητων κυκλικών κυματισμών, που απλώνονται από το κέντρο κι επεκτείνονται κινούμενοι, όχι μόνο οριζόντια, αλλά ταυτόχρονα υψούμενοι κατακόρυφα κατά στάδια. Στο βιβλίο αυτό ασχολήθηκε επίσης με θέματα ηχούς κι αντήχησης, ενίσχυσης του ήχου με την εφαρμογή της αρμονικής θεωρίας, καθώς και με την χρήση ηχητικών βάζων στα θέατρα, για μεγαλύτερη καθαρότητα του ήχου.

Ο Άγγλος Robert Grosseteste (1168-1253) διατύπωσε μια θεωρία για την διάδοση του ήχου και του φωτός. Σχολιάζοντας τα "Αναλυτικά Ύστερα" (19), αναφέρει τα εξής « *Η κρούση μιας ηχογόνου πηγής την αναγκάζει να πάλλεται για κάποιο χρονικό διάστημα, γιατί η εξαναγκασμένη κίνησή της και μια φυσική δύναμη εναλλάσσονται μεταξύ τους και την ωθούν σε παλινδρομήσεις, μετακινώντας την από την φυσική της θέση που ήταν η κατάσταση ηρεμίας. Η δόνησή της θέτει σε κίνηση τον αέρα, από τον οποίο περιβάλλεται η πηγή αυτή, ο οποίος επεκτείνεται προς όλες τις κατευθύνσεις σε ευθείες γραμμές*».

Θεμελιωτής της σύγχρονης μηχανικής και της πειραματικής φυσικής, θεωρείται ο Ιταλός μαθηματικός, αστρονόμος και φυσικός Galileo Galilei, ο οποίος γεννήθηκε το 1564 στην Πίζα. Μελέτησε τις παλμικές κινήσεις των ηχογόνων σωμάτων και διατύπωσε νόμους όπως: 1) Το ύψος ενός ήχου εξαρτάται από τον αριθμό των παλμικών κινήσεων που εκτελεί το ηχογόνο σώμα και 2) Το ύψος του ήχου μίας χορδής είναι αντιστρόφως ανάλογο του μήκους της.

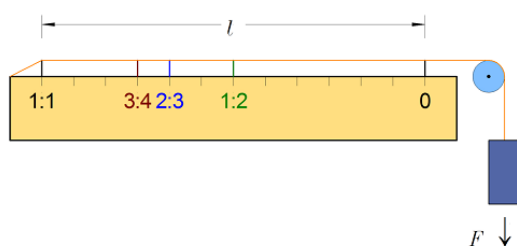
Ο Marin Mersenne (1588-1648), Γάλλος φιλόσοφος, θεολόγος και μαθηματικός, που θεωρείται πατέρας της Ακουστικής. Συνέχισε το έργο του Γαλιλαίου και το 1627 εξέδωσε ένα βιβλίο (20) στο οποίο ασχολήθηκε με την μουσική, τα μουσικά όργανα και την ακουστική. Προσδιόρισε την συχνότητα ενός ακουστού τόνου (84 HZ) κι απέδειξε ότι ο απόλυτος λόγος συχνοτήτων δύο υπό δόνηση χορδών, που εκπέμπουν ένα μουσικό τόνο και την οκτάβα του, είναι 1:2. Οι νόμοι επίσης, οι οποίοι διέπουν τους ήχους που παράγονται από τους ηχητικούς σωλήνες, βρέθηκαν από τον ίδιο και τον Bernoulli. Ισχύουν αποκλειστικά για στενούς και μακρούς σωλήνες, ξύλινους ή μεταλλικούς, με

κυκλική ή τετραγωνική διατομή που περικλείουν αέρα, μέσα στον οποίο ύστερα από κατάλληλη διέγερση, αναπτύσσονται στάσιμα κύματα που έχουν σαν συνέπεια την παραγωγή ήχου. Ο πρώτος από τους τρεις νόμους που διατυπώθηκαν από τους δύο φυσικούς είναι ο νόμος των όμοιων σωλήνων, γνωστός και σαν νόμος του Mersenne, σύμφωνα με τον οποίο, δύο όμοιοι σωλήνες παράγουν ήχους που οι συχνότητές τους είναι αντιστρόφως ανάλογες προς τα μήκη των σωλήνων. Συνεπώς, ένας σωλήνας ο οποίος έχει διπλάσιο μήκος από ένα κατά τα άλλα όμοιό του σωλήνα, παράγει ήχο δύο φορές βαρύτερο από τον ήχο που παράγει ο μισός σε μήκος σωλήνας.

### 1.2.3 Σημαντικά Μουσικά όργανα, μέσω των οποίων, έγιναν Ακουστικές Μελέτες.

#### ΜΟΝΟΧΟΡΔΟ

Το μονόχορδο υπήρξε μουσικό αλλά κι επιστημονικό όργανο από την αρχαιότητα, το οποίο χρησιμοποιούσε ο αρχαίος φιλόσοφος και θεωρητικός της μουσικής, Πυθαγόρας (21). Η ονομασία του οργάνου παραπέμπει ευθέως στη χρήση μίας και μόνης χορδής, αλλά η εφαρμογή 2 χορδών ήταν το πιο σύννητες. Η μία ήταν "ανοιχτή" και η άλλη εφαιπτόμενη σε κινητό τάστο ( σε "καβαλάρη" ή "γέφυρα"). Η πιο απλή μορφή του μονόχορδου φέρει μία χορδή που εκτείνεται σε όλο το μήκος του ηχείου. Η ύπαρξη κινητών τάστων δίνει τη δυνατότητα αλλαγής του ύψους του τόνου, από την οποία προκύπτει η μεταξύ τους μαθηματική σχέση. Αν το τάστο τοποθετηθεί στο ήμισυ του μήκους της χορδής, η μαθηματική σχέση που προκύπτει εκφράζεται με τον λόγο 1:2, η γνωστή στους μουσικούς οκτάβα, ή διάστημα ογδός. Παρομοίως, εάν το τάστο τοποθετηθεί στα 4/5 του μήκους της χορδής προκύπτει το διάστημα μεγάλης τρίτης, στα 5/6 το διάστημα μικρής τρίτης κ.ο.κ.



Σχήμα με τις μαθηματικές σχέσεις που προκύπτουν στο μονόχορδο: στα 3:4 διάστημα τετάρτης, στα 2:3 διάστημα πέμπτης και στα 2:1 διάστημα ογδός.

Πηγή: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5f/Monochord.png>

Σχήμα 1.2.3.1

Η Πυθαγόρεια κλίμακα ή Πυθαγόρειος συγκερασμός (χόρδισμα), όπως αλλιώς αναφέρεται, προκύπτει ακριβώς από τις μαθηματικές αναλογίες που εφαρμόστηκαν στο μονόχορδο, οι οποίες περιγράφονται με μεγάλη λεπτομέρεια από τον αρχαίο Έλληνα φιλόσοφο και μαθηματικό Νικόμαχο, στα έργα του "Εγχειρίδιον Αρμονικής" και "Αριθμητική Εισαγωγή".

Το μονόχορδο αποτέλεσε αντικείμενο εκτενούς μελέτης των μουσικοθεωρητικών του Μεσαίωνα και της Αναγέννησης, ως το εργαλείο πρακτικής απόδειξης της σχέσης μαθηματικών και μουσικής, αλλά κι απαραίτητο εργαλείο των οργανοποιών, μέχρις ότου αντικαταστάθηκε από το διαπασών

(τονοδότης). Απόγονος του μονόχορδου θεωρείται η τρόμπα μαρίνα, ένα μονόχορδο όργανο παρόμοιας κατασκευής, με χαρακτηριστικό ήχο που μοιάζει με της τρομπέτας.

### **ΤΡΟΜΠΑ ΜΑΡΙΝΑ**

Η τρόμπα μαρίνα, tromba marina - θαλασσινή τρομπέτα, είναι έγχορδο μουσικό όργανο, που χρησιμοποιήθηκε πολύ τον Μεσαίωνα και την Αναγέννηση σε χώρες κυρίως της κεντρικής Ευρώπης.

Κατασκευάζεται με τριγωνικό σώμα από ξύλο, φέρει μία χορδή όπως το αρχαίο μονόχορδο. Η χορδή διεγείρεται με δοξάρι, με τα δάκτυλα του αριστερού χεριού να αγγίζουν ελαφρά τη χορδή κατά μήκος της σε διάφορα σημεία, όπως και σε άλλα έγχορδα όργανα.

Το όνομά της οφείλεται στον χαρακτηριστικό χάλκινο ήχο της που παράγει ο ιδιαίτερος καβαλάρης της και στην ομοιότητάς της με το μεσαιωνικό μεγάφωνο, το οποίο χρησιμοποιούνταν στη ναυσιπλοΐα της εποχής.



### **Τρόμπα μαρίνα, γαλλικής κατασκευής του 18ου αιώνα μ.Χ.**

Πηγή: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ad/Trompette\\_marine.jpg/225px-Trompette\\_marine.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/ad/Trompette_marine.jpg/225px-Trompette_marine.jpg)

Σχήμα 1.2.3.2

## 2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ (AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS).

Πέρα από τον ορισμό για τα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου που δόθηκε στην ενότητα 1.1 μπορούν να δοθούν πολλοί παρόμοιοι, πράγμα που εύκολα μπορεί κάποιος να διαπιστώσει μελετώντας την ομολογουμένως πλούσια σε αυτό το αντικείμενο βιβλιογραφία, ελληνική και ξένη. Μια άλλη προσέγγιση θα μπορούσε να είναι: Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου ονομάζουμε τις διατάξεις φυσικών στοιχείων που είναι διασυνδεδεμένες έτσι ώστε να καθοδηγούν, να ελέγχουν ή να ρυθμίζουν τον εαυτό τους ή κι άλλα συστήματα ώστε να συμπεριφέρονται με ένα επιθυμητό αλλά και προδιαγεγραμμένο τρόπο.

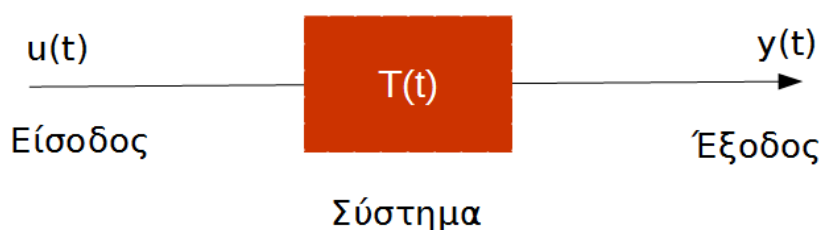
### 2.1 Τα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου στη σύγχρονη εποχή.

Υπάρχουν άπειρα παραδείγματα τέτοιων διατάξεων, οι οποίες αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, στη σύγχρονη εποχή όπως: τηλεπικοινωνίες, ρομπότ, αεροπλάνα, οικονομία, οικιακές συσκευές π.χ. ψυγείο, πλυντήριο, ηλεκτρικός θερμοσίφωνα, βιομηχανικά συγκροτήματα π.χ. παραγωγής και κατανομής ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευής χαρτιού, τροφίμων, λιπασμάτων, αυτοκινήτων και φυσικά η χλωρίδα, η πανίδα και το τελειότερο παράδειγμα συστήματος αυτομάτου ελέγχου που είναι ο άνθρωπος.

Παίρνοντας αφορμή από την ιστορική αναδρομή ως την Βιομηχανική Επανάσταση, που έγινε στην Εισαγωγή, και επεκτείνοντας την ως τη σύγχρονη εποχή μπορούμε να πούμε ότι ως τον 18ο αιώνα δεν είχαμε εφαρμογές αυτοματισμών τέτοιες, που ο αντίκτυπος τους να άλλαξε τη πορεία της ανθρωπότητας. Τη περίοδο 1769-1867 έγινε ένα άλμα με την Βιομηχανική Επανάσταση και την ανάπτυξη τους αλλά έγινε περισσότερο διαίσθητικά χωρίς θεωρητικό υπόβαθρο. Αργότερα κατά τη περίοδο 1868-1930 κυρίως με τις εργασίες των Maxwell, Vyshnegradskii, και Routh τέθηκαν οι βάσεις μαθηματικής τεκμηρίωσης των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου (Σ.Α.Ε.). Η σύγχρονη εποχή όμως των Σ.Α.Ε. ξεκινά από τη περίοδο 1930-1960 όπου αναπτύχθηκε η κλασική θεωρία αυτομάτου ελέγχου (Nyquist, Black, Nichols, Bode) η οποία επικεντρώνεται κυρίως σε συστήματα μιας εισόδου μιας εξόδου (SISO) με τη χρήση γραφικών μεθόδων σχεδίασης (γεωμετρικός τόπος ριζών, διαγράμματα Nyquist, Bode, Nichols κλπ.) και την ανάλυση και σχεδίαση στο πεδίο της συχνότητας. Από το 1960 ως σήμερα έχουμε πλέον την ανάπτυξη της σύγχρονης θεωρίας αυτομάτου ελέγχου (Kalman, Jury, Kailath) η οποία εξετάζει, μεταξύ άλλων συστήματα πολλών εισόδων - πολλών εξόδων (multiple input - multiple output, MIMO), τη χρήση αναλυτικών μεθόδων σχεδίασης (σχεδίαση στο χώρο κατάστασης, βέλτιστος και στοχαστικός έλεγχος, προσαρμοστικός έλεγχος), τη χρήση ψηφιακών μικροϋπολογιστών για έλεγχο συστημάτων αλλά και για επίλυση γραμμικών και μη συστημάτων.

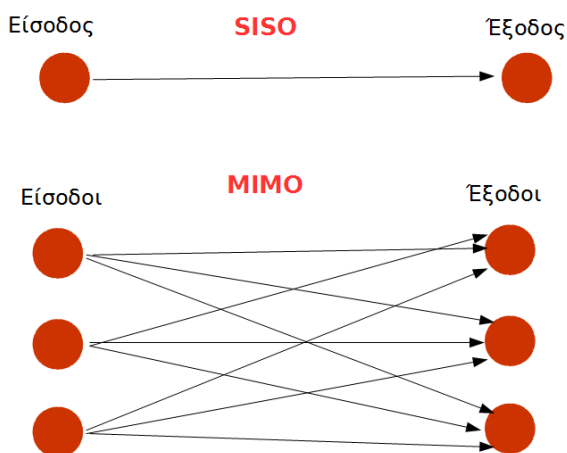
## 2.2 Βασική Δομή Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου

Η βασική δομή των Σ.Α.Ε. αποτελείται από τρία στοιχεία: το **Σύστημα**, την **Είσοδο** και την **Έξοδο**. Σύστημα, έχει αναφερθεί ξανά, ονομάζουμε ένα σύνολο στοιχείων κατάλληλα διασυνδεδεμένων ώστε να επιτελέσουν κάποιο έργο. Είσοδο ονομάζουμε τη διέγερση, την εντολή ή την αιτία, η οποία εφαρμόζεται στο σύστημα ώστε να επιτελεστεί το επιθυμητό έργο και Έξοδο ονομάζουμε το πραγματικό αποτέλεσμα ή απόκριση, η οποία λαμβάνεται από την εφαρμογή της εισόδου στο σύστημα (22). Για τη μελέτη ενός συστήματος, απαιτείται η μαθηματική περιγραφή του μέσω ενός **τελεστή  $T$** , έτσι ώστε  $y(t) = T \cdot u(t)$ . Όπου  $u(t)$  η είσοδος του συστήματος συναρτήσει του χρόνου και  $y(t)$  η έξοδος του συστήματος συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 2.2.1

Σ' ένα Σ.Α.Ε. είναι πιθανό να υπάρχουν περισσότερες από μία εισόδους, οι οποίες μπορεί να είναι δύο ειδών, είτε ελέγχου είτε διαταραχής, δηλαδή υπάρχουν εισόδοι τις οποίες μπορούν να ελεγχθούν κι ονομάζονται **εισόδοι ελέγχου** κι εισόδοι οι οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν κι ονομάζονται **εισόδοι διαταραχής**. Επίσης μπορεί να υπάρχουν πολλές έξοδοι, τότε ορίζονται ως συστήματα πολλών εισόδων - πολλών εξόδων (multiple input - multiple output, MIMO).



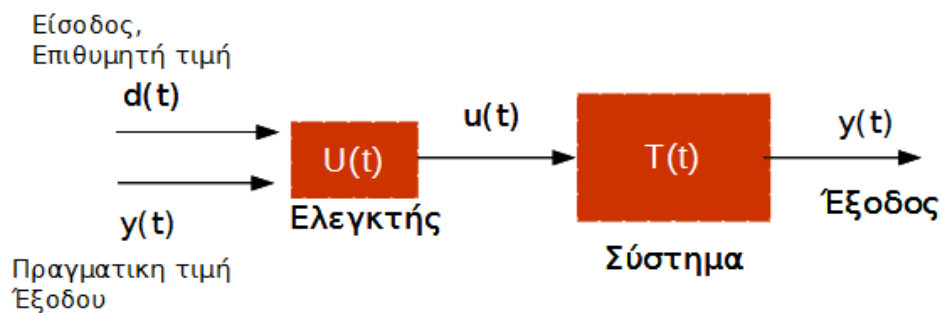
Σύγκριση συστημάτων  
μιας εισόδου – μιας εξόδου (SISO)  
και πολλών εισόδων - πολλών εξόδων  
(MIMO).

Σχήμα 2.2.2

Συνήθως κατά τη μελέτη συστημάτων είναι γνωστά δύο από τα τρία στοιχεία του τριπτύχου **σύστημα** (μαθηματική μοντελοποίηση), **είσοδος**, **έξοδος** κι επιδιώκεται να υπολογιστεί το τρίτο, που στις περισσότερες περιπτώσεις είναι η έξοδος. Αυτή η μελέτη ονομάζεται Ανάλυση Συστήματος, δηλαδή με δεδομένη την είσοδο  $u(t)$  και το σύστημα  $T[\cdot]$ , ζητείται να υπολογιστεί η έξοδος  $y(t)$ . Η ανάλυση ενός συστήματος αφορά τη δυνατότητα προσδιορισμού της εξόδου για κάθε δυνατή είσοδο και γι' αυτό κατά σύμβαση υπολογίζεται η έξοδος του συστήματος σε κάποιες πρότυπες μορφές εισόδου όπως: η κρουστική συνάρτηση (συνάρτηση dirac), η βηματική συνάρτηση (step) κι η μοναδιαία συνάρτηση ράμπας (ramp) (23).

## 2.3 Ελεγκτής

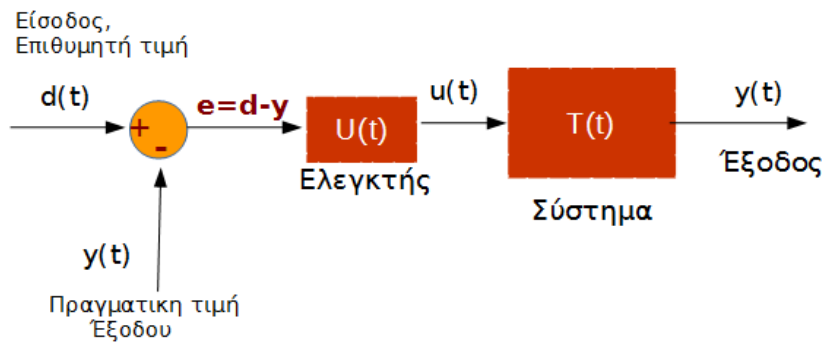
Κατά το σχεδιασμό και τη κατασκευή συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, είναι κρίσιμο το υποσύστημά, που ονομάζεται ελεγκτής ή ρυθμιστής ή αντισταθμιστής, το οποίο δημιουργεί μια είσοδο  $u(t)$ , που ονομάζεται και ρυθμιστικό σήμα, η οποία αν εφαρμοστεί στο Σύστημα δημιουργεί την επιθυμητή έξοδο  $y(t)$ .



Ελεγκτής με ενσωματωμένη τη λειτουργία του Συγκριτή.

Σχήμα 2.3.1

Με τη χρήση των ελεγκτών δύναται να επιτευχθούν καλύτερες επιδόσεις του συστήματος, δηλαδή, να γίνει πιο γρήγορο, πιο ακριβές, πιο ευσταθές, ανεπηρέαστο από τυχόν διαταραχές κ.λπ. Ελεγκτές λοιπόν είναι τα κύρια στοιχεία που ελέγχουν και καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας των διάφορων συστημάτων ανάλογα με τις παραμέτρους που παίρνουν, έτσι ώστε η μεταβλητή της εξόδου (πίεση, θερμοκρασία, θέση κτλ.) να είναι στην επιθυμητή τιμή. Ο ελεγκτής πρέπει να συγκρατεί την έξοδο στην επιθυμητή τιμή ανεξαρτήτως των όποιων ανωμαλιών ή διαταραχών προκύπτουν κατά τη διαδικασία, πράγμα γενικά δύσκολο, αλλά με την ανατροφοδότηση της εξόδου της διαδικασίας επιτυγχάνονται πολύ καλά αποτελέσματα (23).



Ελεγκτής με ξεχωριστή τη λειτουργία του Συγκριτή.

Σχήμα 2.3.2

### 2.3.1 Αναλογικού – Ψηφιακού (Analog - Digital) τύπου Ελεγκτές.

Αναλυτικότερα ο ελεγκτής περιλαμβάνει στις περισσότερες περιπτώσεις και τη λειτουργία του συγκριτή (αν συγκριτής είναι διαφορετική διάταξη, βρίσκεται στην είσοδο του ελεγκτή κι υπολογίζει την διαφορά του επιθυμητού σήματος εξόδου από το πραγματικό, το οποίο ονομάζεται σφάλμα (error), δηλαδή  $e = d - y$ , όπου  $e > 0$  ή  $e < 0$  κι είναι μια αναλογική ή ψηφιακή διάταξη που προσδιορίζει τη σχέση μεταβολής της μεταβλητής που ρυθμίζεται. Δέχεται ως παράμετρο εισόδου, την επιθυμητή τιμή (setpoint - S.P. ή σημείο εκκίνησης) για την έξοδο της ελεγχόμενης διεργασίας κι ανάλογα το είδος της μπορεί να μεταβάλλεται με τη πάροδο του χρόνου ή κι ως συνάρτηση άλλων παραμέτρων λειτουργίας. Στα ψηφιακά συστήματα ελέγχου ο υπολογισμός της σχέσης ρύθμισης γίνεται με ψηφιακό τρόπο, από την επεξεργασία σημάτων διακριτής στάθμης και διακριτού χρόνου. Οι ψηφιακοί ελεγκτές παρέχουν πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους αναλογικούς όπως:

- Ανθεκτικότητα στο θόρυβο.
- Δυνατότητα υλοποίησης πολύπλοκων αλγορίθμων ελέγχου.
- Αυξημένη ευελιξία.
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία.
- Χαμηλότερο κόστος.

Προφανώς οι ψηφιακοί ελεγκτές είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος, σε χρήση, τη σήμερον ημέρα.

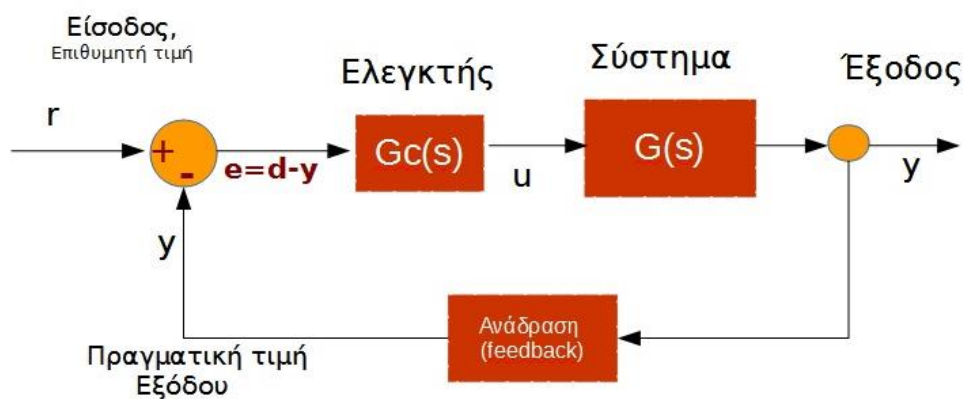


## 2.3.2 Αναλογικού, Ολοκληρωτικού, Διαφορικού τύπου Ελεγκτές.

Στον Κλασικό Έλεγχο και στην βιομηχανία γενικότερα, οι ελεγκτές που συνηθίζονται είναι οι τύποι:

- Αναλογικός (Proportional controller, P ),
- Αναλογικός - Ολοκληρωτικός (Proportional - Integral controller, P I ),
- Αναλογικός - Διαφορικός (Proportional - Differential controller, P D) και
- Αναλογικός - Ολοκληρωτικός - Διαφορικός (Proportional - Integral - Differential , P I D)

Είναι προφανές ότι η σωστή ρύθμιση των παραμέτρων τους, είναι πρωταρχικής σημασίας για την άρτια κι αποτελεσματική λειτουργία του όλου Συστήματος Αυτομάτου Ελέγχου. Οι πιο διαδεδομένοι στην βιομηχανία είναι οι Ελεγκτές τύπου Αναλογικοί-Ολοκληρωτικοί-Διαφορικοί (P I D controllers). Αναπτύχθηκαν την δεκαετία του 1930, στην αρχή λειτουργώντας πνευματικά και μετά το 1950 εμφανίστηκαν τα πρώτα ηλεκτρονικά συστήματα. Αρχές δεκαετίας 1960 εμφανίστηκε ο έλεγχος με Η/Υ στην βιομηχανία χημικών, ενώ από την δεκαετία του 1980 ως σήμερα τα ψηφιακά ηλεκτρονικά κυριαρχούν στις εφαρμογές.



Γραφική παράσταση Συστήματος Κλειστού Βρόχου με τον ελεγκτή, για την εξαγωγή των εξισώσεων κατάστασης.

Σχήμα 2.3.3

Όσον αφορά τα κέρδη κάθε όρου (παράμετροι) έχουμε τα εξής:

Για ελεγκτή τύπου - Αναλογικός (P controller) ισχύει:

$$\text{κέρδος} = Kp$$

σχέση 2.3.2.1

όπου  $Kp$  η αριθμητική τιμή του αναλογικού κέρδους του ελεγκτή.

Για ελεγκτή τύπου - Αναλογικός - Ολοκληρωτικός (P I controller) ισχύει:

$$Kp \left( 1 + \frac{1}{T_I s} \right) \quad \text{σχέση 2.3.2.2}$$

όπου  $Kp$  η αριθμητική τιμή του αναλογικού κέρδους και  $T_I$  ο τελεστής μετατροπής για την αριθμητική τιμή του ολοκληρωτικού κέρδους του ελεγκτή.

Για ελεγκτή τύπου - Αναλογικός - Διαφορικός (P D controller) ισχύει:

$$Kp (1 + T_D s) \quad \text{σχέση 2.3.2.3}$$

όπου  $Kp$  η αριθμητική τιμή του αναλογικού κέρδους και  $T_D$  ο τελεστής μετατροπής για την αριθμητική τιμή του διαφορικού κέρδους του ελεγκτή.

Για ελεγκτή τύπου - Αναλογικός - Ολοκληρωτικός - Διαφορικός (P I D controller) ισχύει:

$$Kp \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad \text{σχέση 2.3.2.4}$$

όπου  $Kp$  η αριθμητική τιμή του αναλογικού κέρδους,  $T_I$  ο τελεστής μετατροπής για την αριθμητική τιμή του ολοκληρωτικού κέρδους και  $T_D$  ο τελεστής μετατροπής για την αριθμητική τιμή του διαφορικού κέρδους του ελεγκτή.

Αναλυτικότερα για το κάθε είδος ελεγκτή και τους συνδυασμούς τους, οι οποίοι είναι συνηθέστεροι όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ισχύουν τα εξής:

### Ελεγκτές Αναλογικοί (P)

Η σχέση μεταξύ εισόδου  $u$  και σήματος σφάλματος  $e$ , στο πεδίο του χρόνου, είναι :

$$u(t) = K_c e(t)$$

σχέση 2.3.2.5

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή, στο πεδίο της συχνότητας, είναι:

$$G_c(s) = K_c = \text{constant}$$

σχέση 2.3.2.6

όπου η  $K_c$  είναι σταθερά (κέρδος).

Στον αναλογικό ελεγκτή όταν το κέρδος  $K_c$  αυξάνεται, η ευαισθησία στις διαταραχές μειώνεται, αλλά συγχρόνως ελαττώνεται κι ο βαθμός ευστάθειας. Επομένως πρέπει να γίνεται χρήση λελογισμένων τιμών του κέρδους  $K_c$  ώστε να μην καταστεί το σύστημα ασταθές. Σημειώνεται επίσης, ως ιδιαίτερος ενδιαφέρον χαρακτηριστικό, ότι ο αναλογικός έλεγχος εγκατάστασης που δεν διαθέτει ελεύθερο ολοκληρωτή στη συνάρτηση μεταφοράς, δεν είναι ικανός να μηδενίσει το σφάλμα μόνιμης κατάστασης πράγμα προβληματικό σε εγκαταστάσεις όπου αυτό είναι απαραίτητο.

### Ελεγκτές Ολοκληρωτικοί (I)

Η σχέση μεταξύ εισόδου  $u$  και σήματος σφάλματος  $e$  είναι:

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt$$

σχέση 2.3.2.7

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$G_c(s) = \frac{K_i}{s}$$

σχέση 2.3.2.8

όπου η  $K_i$  είναι προσαρμοζόμενη σταθερά.

Στον Ολοκληρωτικό ελεγκτή, όταν διπλασιαστεί η τιμή σφάλματος  $e(t)$  θα διπλασιαστεί ο ρυθμός μεταβολής (κλίσης) του  $u$ . Η ολοκλήρωση που κάνει ο ελεγκτής κι η ακόλουθη δράση του σήματος  $u$  στην έξοδο  $y$  συνεχίζεται μέχρι η τιμή της εξόδου φθάσει πολύ κοντά στην τιμή αναφοράς  $r$  μόνιμης κατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο το σφάλμα μόνιμης κατάστασης μηδενίζεται. Το μειονέκτημα του I ελεγκτή όμως είναι ότι ελαττώνει το βαθμό ευστάθειας του συστήματος, καθώς προσθέτει ένα πόλο κι αυξάνεται η τάξη του όλου συστήματος.

### Ελεγκτές Αναλογικοί-Ολοκληρωτικοί (PI)

Η σχέση μεταξύ εισόδου  $u$  και σήματος σφάλματος  $e$  είναι:

$$u(t) = K_c e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

σχέση 2.3.2.9

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

σχέση 2.3.2.10

όπου η σταθερά **K<sub>c</sub>** είναι το αναλογικό κέρδος και **T<sub>i</sub>** είναι η σταθερά ολοκλήρωσης, οι οποίες σταθερές αλλάζουν τιμή (προσαρμόζονται) ανάλογα την περίπτωση.

### Ελεγκτές Αναλογικοί-Ολοκληρωτικοί-Διαφορικοί (PID)

Η σχέση μεταξύ εισόδου **u** και σήματος σφάλματος **e** είναι:

$$u(t) = K_c e(t) + K_c T_d \frac{de(t)}{dt} + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt$$

σχέση 2.3.2.11

Η συνάρτηση μεταφοράς του ελεγκτή είναι:

$$G_c(s) = K_c \left( 1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right)$$

σχέση 2.3.2.12

όπου η σταθερά **K<sub>c</sub>** είναι το αναλογικό κέρδος, **T<sub>d</sub>** είναι η σταθερά διαφόρισης και **T<sub>i</sub>** είναι η σταθερά ολοκλήρωσης, οι οποίες σταθερές αλλάζουν τιμή (προσαρμόζονται) ανάλογα την περίπτωση.

Στη πράξη ένας Ελεγκτής PID είναι το άθροισμα δράσης ελέγχου τριών όρων που περιλαμβάνουν:

- το παρελθόν με την ολοκλήρωση του σφάλματος (παράγοντας Ολοκληρωτικός - I),
- το παρόν (παράγοντας Αναλογικός - P) και
- το μέλλον με την προβολή του σφάλματος (παράγοντας Διαφορικός - D).

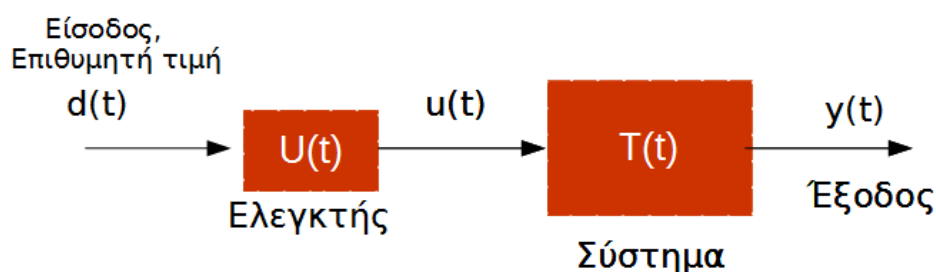
Η δημοτικότητα των ελεγκτών PID οφείλεται κατά ένα μέρος στην πολύ καλή συμπεριφορά του σε εφαρμογές μιας ευρείας κλίμακας λειτουργικών συνθηκών και κατά ένα άλλο μέρος στη σχετική απλή του κατασκευή που επιτρέπει έναν εύκολο κι αξιόπιστο χειρισμό.

## 2.4 Κατηγορίες Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου.

Τα συστήματα αυτομάτου ελέγχου διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα Ανοικτού και τα Κλειστού Βρόχου. Ανοικτό (Open Loop) ονομάζεται ένα Σύστημα όταν η είσοδος  $u(t)$  δεν είναι συνάρτηση της εξόδου  $y(t)$ , ενώ Κλειστό (Close Loop) είναι ένα Σύστημα όταν η είσοδος είναι συνάρτηση της εξόδου.

### 2.4.1 Συστήματα Ανοικτού Βρόχου (Open Loop Systems).

Όπως προκύπτει από το προηγούμενο ορισμό, υπάρχει μια δυσκολία στο να διαπιστωθεί το αν η έξοδος έχει την επιθυμητή τιμή, εν τέλει, στα ανοικτά συστήματα. Δεν υπάρχουν πολλές λύσεις σε αυτό το πρόβλημα κι η πιο απλή και σίγουρη λύση είναι η σωστή ρύθμιση (βαθμονόμηση) που έγινε στο σύστημα. Η σωστή βαθμονόμηση όπως ονομάζεται η ρύθμιση της σχέσης εισόδου – εξόδου ώστε να επιτυγχάνεται η απαιτούμενη ακρίβεια όσον αφορά το επιθυμητό αποτέλεσμα, είναι κρίσιμη για την απόδοση αυτών των συστημάτων. Παράδειγμα βαθμονομήσεως μπορεί να είναι η ρύθμιση του χρονοδιακόπτη (διάρκειας ψησίματος) σε ένα ηλεκτρικό φούρνο ώστε να ψηθεί σωστά το ψωμί.



Συστήμα Αυτομάτου Ελέγχου Ανοικτού Βρόχου.

Σχήμα 2.4.1

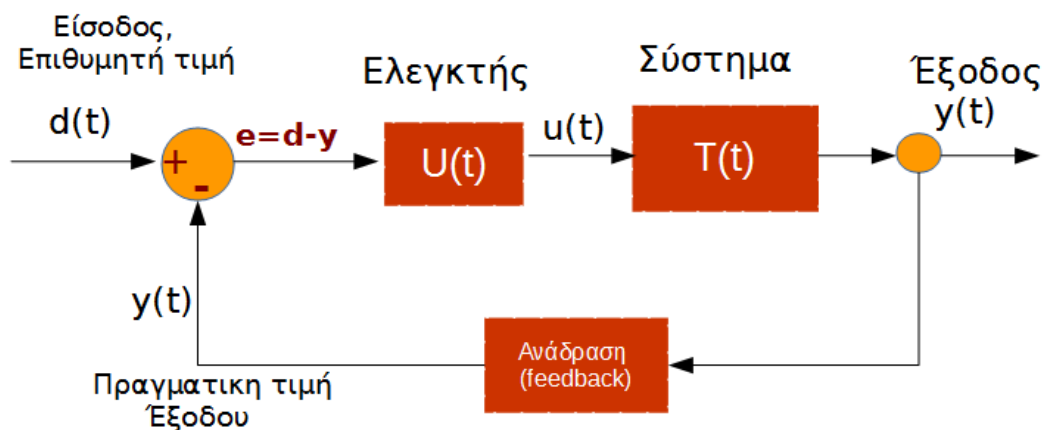
Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των Συστημάτων Ανοικτού Βρόχου είναι ότι δεν παρουσιάζουν προβλήματα ευστάθειας, παραδείγματος χάριν, στην περίπτωση του φούρνου δεν υπάρχει περίπτωση αδιάκοπης λειτουργίας επειδή δεν έχει επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή να ψηθεί σωστά το ψωμί. Παραδείγματα τέτοιων συστημάτων αυτομάτου ελέγχου αποτελούν το :

- Πλυντήριο: Το πρόγραμμα λειτουργιών δεν λαμβάνει υπόψη την έξοδο του συστήματος (ο βαθμός καθαρισμού των ρούχων) στον καθορισμό της επόμενης λειτουργίας.

- Τοστιέρα: Δεν λαμβάνεται υπόψη η έξοδος του συστήματος (η θερμοκρασία) για να μεταβληθεί η είσοδος (η τάση τροφοδοσίας).
- Τα φρένα στα ποδήλατα: Η περιστροφή του τροχού δεν λαμβάνεται υπόψη για τη πίεση που ασκεί η δαγκάνα.

## 2.4.2 Συστήματα Κλειστού Βρόχου (Close Loop Systems).

Τα Συστήματα Κλειστού Βρόχου ονομάζονται και συστήματα ανατροφοδότησης ή ανάδρασης (feedback), διότι Ανάδραση ονομάζεται η διαδικασία μεταφοράς πληροφορίας όσον αφορά την **τρέχουσα τιμή της εξόδου** του συστήματος **στην είσοδό** του. Μεγάλο πλεονέκτημα των Συστημάτων Κλειστού Βρόχου είναι το γεγονός ότι έχουν λιγότερη ευαισθησία σε εξωτερικές διαταραχές που μπορεί να επηρεάσουν το σύστημα, όπως μεταβολές του περιβάλλοντος ή του ίδιου του συστήματος ή άλλες αιτίες που μπορεί να αποκλίνουν την έξοδο του συστήματος από την επιθυμητή τιμή (22).



Συστήμα Αυτόματου Ελέγχου Κλειστού Βρόχου.

Σχήμα 2.4.2

Παραδείγματα συστημάτων αυτομάτου ελέγχου κλειστού βρόχου αποτελούν το:

- Ηλεκτρικό Θερμοσίφωνο: Ο ελεγκτής είναι ο θερμοστάτης που ανοιγοκλείνει το κύκλωμα τροφοδοσίας. Όταν το νερό φτάσει στην επιθυμητή θερμοκρασία (συνήθως  $70-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ο διακόπτης ανοίγει οπότε διακόπτεται η τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος. Όταν η θερμοκρασία του νερού πέσει κάτω από μια συγκεκριμένη τιμή, ο διακόπτης κλείνει κι επανέρχεται η τροφοδοσία ρεύματος.

- Ψυγείο: Ομοίως ο ελεγκτής είναι ο θερμοστάτης που ανοιγοκλείνει το κύκλωμα τροφοδοσίας του κινητήρα του συμπιεστή, περιορίζοντάς τη θερμοκρασία από 3 έως 5 °C.
- Φρένα: Σε αυτοκίνητα με τεχνολογία Αντιμπλοκαρίσματος Τροχών (ABS) κλπ.

Συμπερασματικά μπορεί να ειπωθεί ότι τα κλειστά συστήματα χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις είναι μεγάλες ενώ τα ανοικτά συστήματα χρησιμοποιούνται σε πιο απλές περιπτώσεις εφαρμογών αυτοματισμού. Γι' αυτό τα κλειστά συστήματα είναι περισσότερο πολύπλοκα στη σχεδίαση και στην υλοποίηση τους από τα ανοικτά κι ως εκ τούτου έχουν υψηλότερο κόστος και φυσικά αντιμετωπίζουν προβλήματα ευστάθειας, μια έννοια που θα αναφερθεί λεπτομερέστερα παρακάτω.

Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με τα ανοικτά συστήματα στον έλεγχο της διεργασίας εξαρτάται από το κατά πόσο είναι γνωστή η συμπεριφορά της σε δεδομένο σήμα εισόδου (βαθμονόμηση) ενώ τα κλειστά πετυχαίνουν υψηλό βαθμό ακρίβειας ακόμα και με περιορισμένη γνώση των παραμέτρων της διεργασίας. Οι τυχούσες διαταραχές και μεταβολές της ακρίβειας των στοιχείων ενός ανοικτού συστήματος συνεπάγονται απόκλιση της εξόδου από την επιθυμητή τιμή σε αντίθεση με τα κλειστά που μπορούν να ανταπεξέλθουν σε εξωτερικές διαταραχές και σε μεταβολές των παραμέτρων της ελεγχόμενης διεργασίας με επιτυχία. Από τα παραπάνω εύκολα προκύπτει ότι τα κλειστά συστήματα υπερτερούν των ανοικτών συστημάτων κι όντως αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται περισσότερο στη πράξη.

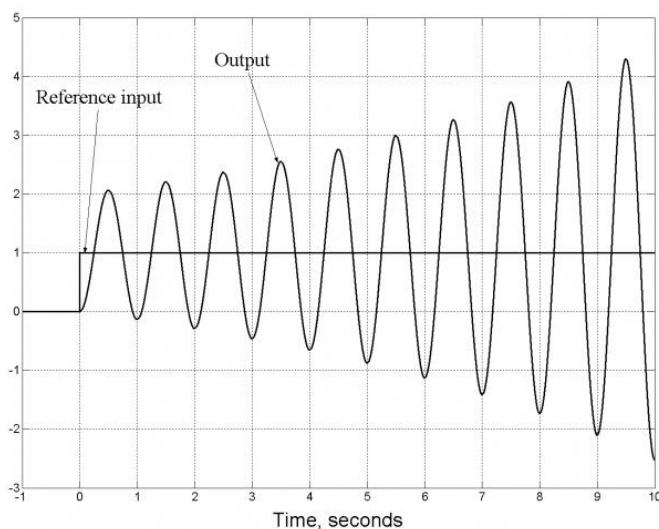
Συνδέοντας την ιστορική αναδρομή με την προαναφερθείσα γνώση είναι δυνατόν να χαρακτηριστεί ένας αυτοματισμός από τη βιομηχανική Επανάσταση όπως παραδείγματος χάριν, ο Φυγοκεντρικός Ρυθμιστής Ταχύτητας του Watt που περιγράφηκε στην Ενότητα 1.1.2 ως ένα Σύστημα Αυτόματου Ελέγχου Κλειστού Βρόχου, όπου τα δομικά του στοιχεία είναι:

- Είσοδος: Ατμός
- Σύστημα προς έλεγχο: Ατμομηχανή ( ταχύτητα περιστροφής )
- Έξοδος: Γωνιακή ταχύτητα περιστροφής ατμομηχανής **w**
- Ελεγκτής: Φυγοκεντρικό Σύστημα, μάζες **m**, βαλβίδα

## 2.5 Ευστάθεια Συστημάτων Αυτόματου Ελέγχου.

Ίσως το πιο κρίσιμο χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτόματου ελέγχου που έχει βασικό ρόλο στη συμπεριφορά τους είναι η ευστάθεια, είναι λοιπόν απαραίτητο, ήδη από τη σχεδίαση ενός συστήματος διασφάλιση της ευστάθειας του πάνω από όλα τα άλλα χαρακτηριστικά του (24). Όταν είναι ένα σύστημα ευσταθές τότε επιδιώκεται κι η ικανοποίηση των υπόλοιπων απαιτήσεων όπως η ταχύτητα, η ακρίβεια απόκρισης, το εύρος ζώνης, το σφάλμα στη μόνιμη κατάσταση κ.λπ. Ένα σύστημα χαρακτηρίζεται ως ευσταθές όταν για πεπερασμένη είσοδο παρουσιάζει πεπερασμένη απόκριση, ειδάλως αν ένα σύστημα έστω και για μια πεπερασμένη είσοδο δεν παρουσιάζει πεπερασμένη απόκριση τότε ονομάζεται ασταθές.

Πολλά συστήματα από τη φύση τους είναι ασταθή συστήματα ανοιχτού βρόχου αλλά με τη βοήθεια της ανάδρασης δύναται μια ασταθής διεργασία να μετατραπεί σε ευσταθή με μια μελετημένη επιλογή των παραμέτρων του ελεγκτή του αντίστοιχου συστήματος ελέγχου και να προσαρμοστεί κατάλληλα η μεταβατική συμπεριφορά του συστήματος στις κατά περίπτωση απαιτήσεις. Η ανάδραση χρησιμοποιείται επίσης και για ευσταθείς διεργασίες ανοιχτού βρόχου με σκοπό να προσαρμοστεί η συμπεριφορά του συστήματος κλειστού βρόχου στις επιθυμητές προδιαγραφές.



Γράφημα της απόκρισης ενός ασταθούς συστήματος.

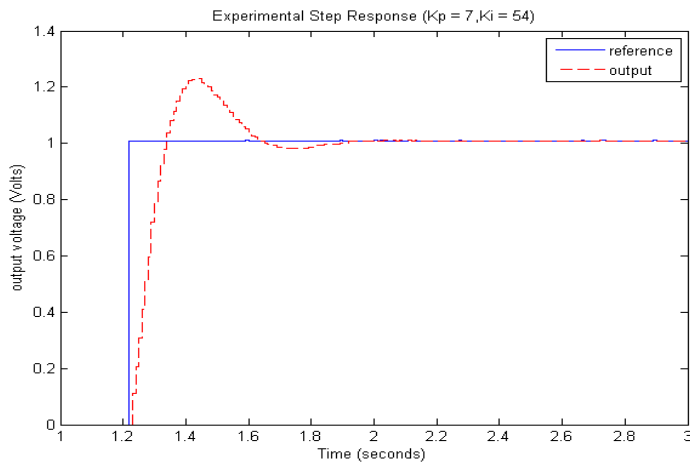
Πηγή: <http://www.ledin.com/wp-content/uploads/2014/12/image040-e1419132048877.png>

Σχήμα 2.5.1

Η απόλυτη ευστάθεια είναι αυτή που χαρακτηρίζει ένα σύστημα κλειστού βρόχου ως ευσταθές ή ασταθές. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον όμως σε ένα ευσταθές σύστημα κλειστού βρόχου είναι ο βαθμός ευστάθειάς του ή η σχετική ευστάθεια του όπως λέγεται. Σε κάποια συστήματα για παράδειγμα,



συστήματα αεροσκαφών, η σχετική ευστάθεια είναι ιδιαίτερως σημαντική διότι όσο περισσότερο ευσταθές είναι ένα αεροσκάφος, τόσο δυσκολότερος είναι ο χειρισμός του. Ένα σύγχρονο μαχητικό αεροσκάφος είναι αρκετά λιγότερο ευσταθές από ένα επιβατηγό αεροσκάφος, αλλά μπορεί να ανταποκρίνεται ταχύτατα στις αλλαγές κατευθύνσεων και να προσφέρει αυξημένη δυνατότητα ελιγμών.



Γράφημα της απόκρισης, ενός ευσταθούς συστήματος.

Πηγή:<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/Content/Activities/figures/RCvolts2.png>

Σχήμα 2.5.1

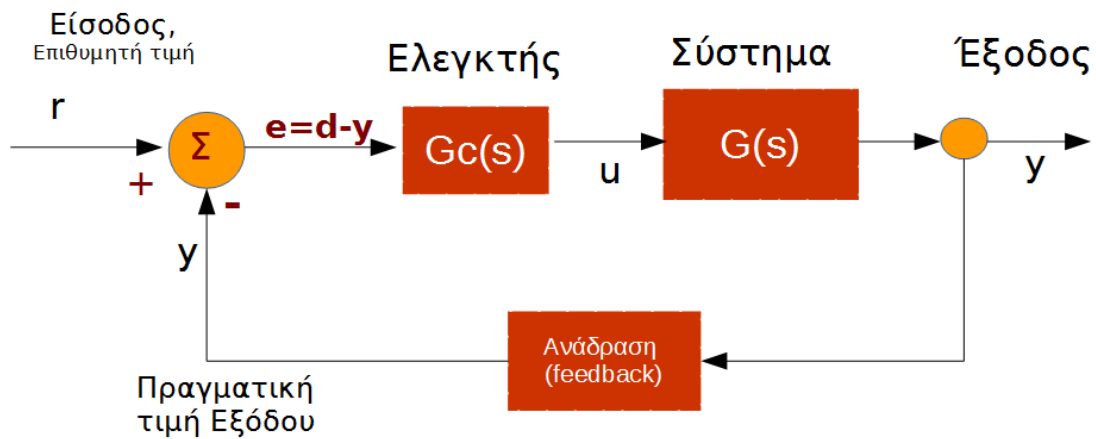
Ένα σύστημα θεωρείται ότι βρίσκεται σε ισορροπία εάν, χωρίς να υπάρχει κάποια διαταραχή, η έξοδος του διατηρεί σταθερή τιμή. Στη περίπτωση ενός γραμμικού και χρονικά αμετάβλητου Συστήματος αυτό θεωρείται ευσταθές εάν μετά την επίδραση κάποιας διαταραχής, η έξοδος του συστήματος επανέρχεται στην κατάσταση ισορροπίας. Εάν μετά την επίδραση της οποιασδήποτε διαταραχής το σύστημα δεν ισορροπεί στην αρχική κατάσταση του, αλλά αποκλίνει συνεχώς από αυτήν με την πάροδο του χρόνου, τότε το σύστημα θεωρείται ασταθές.

Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις όπου το σύστημα, με την επίδραση της διαταραχής, εκτελεί ταλαντώσεις, οπότε χαρακτηρίζεται ως οριακά ευσταθές.

Για τη μελέτη της ευστάθειας έχει αναπτυχθεί πληθώρα τεχνικών, γραφικού, αλγεβρικού κι εμπειρικού τύπου, η ανάλυση των οποίων ξεφεύγει από τους σκοπούς αυτής της εργασίας.

## 2.6 Το σύστημα κι ο ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε.

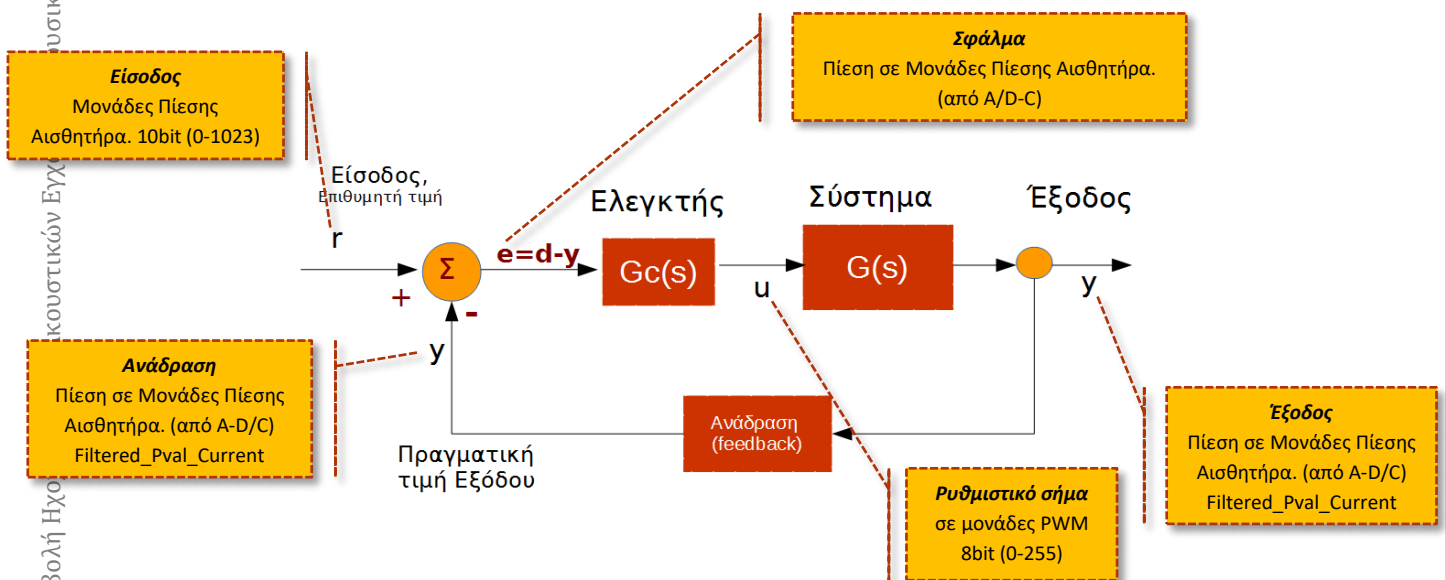
Τα δομικά στοιχεία και το διάγραμμα λειτουργίας του Συστήματος Αυτόματου Ελέγχου που αναπτύχθηκε για την υλοποίηση της ιδέας της δυναμικής μεταβολής του ηχοχρώματος ακουστικών μουσικών οργάνων, απεικονίζονται παρακάτω.



Δομή του Συστήματος Αυτόματου Ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε.

Σχήμα 2.6.1

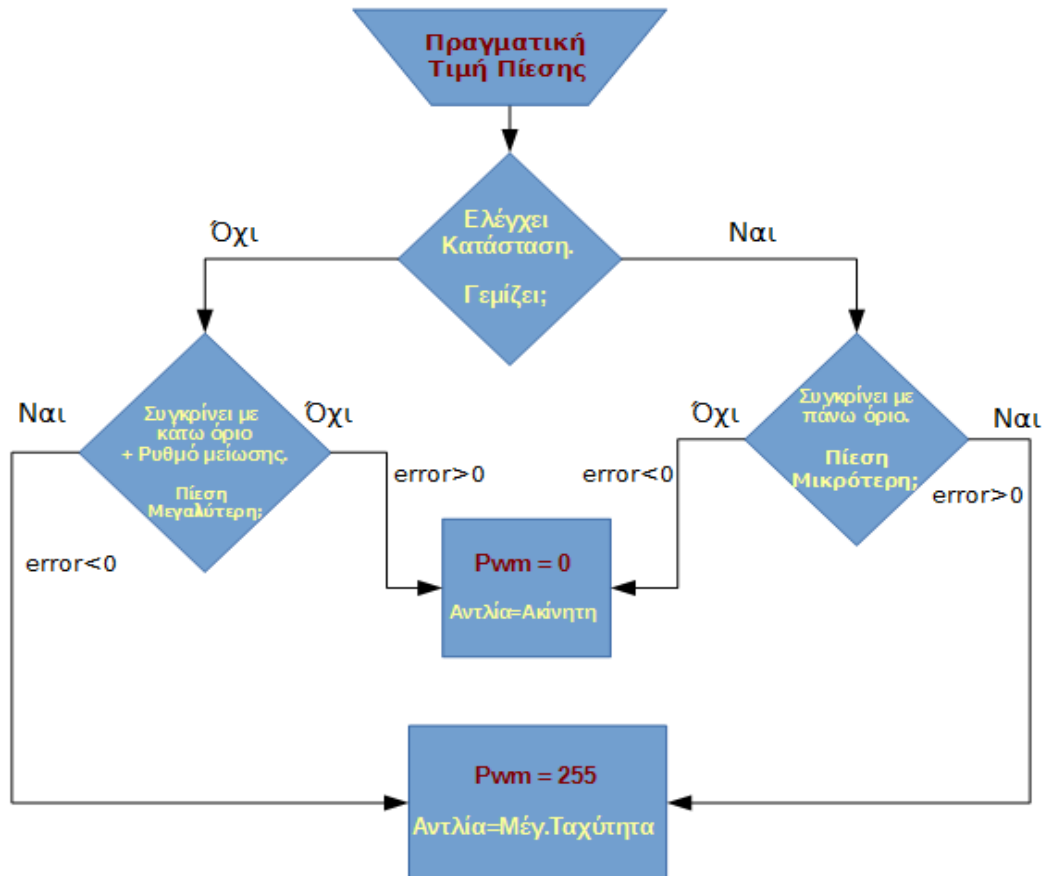
Ο Ελεγκτής υλοποιήθηκε ψηφιακά στο κώδικα του μικροελεγκτή. Σε κάθε κύκλο προγράμματος μετρίεται η πραγματική πίεση του υδραυλικού κυκλώματος, φιλτράρεται από ένα ψηφιακό φίλτρο, χαμηλοπερατό 1ης τάξης, ελέγχεται "λογικά" σύμφωνα με τις παραμέτρους που τέθηκαν (πάνω όριο, κάτω όριο πίεσης & ρυθμός μεταβολής) και τότε το ρυθμιστικό σήμα **u** καθορίζεται στην επιθυμητή τιμή, αφού έχει οριστεί ως μια μεταβλητή τύπου byte (8 bit) με όνομα **SpeedPump**.



Μονάδες των βασικών μεγεθών στα δομικά στοιχεία του Συστήματος Αυτόματου Ελέγχου που χρησιμοποιήθηκε.

Σχήμα 2.6.2

Όταν λοιπόν και σύμφωνα με το παρακάτω λογικό διάγραμμα, ξεκινήσει το πρόγραμμα ελέγχει την τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας και την πίεση κι αν πρέπει να γεμίσει ή να αδειάσει τότε ο ελεγκτής δίνει τη μέγιστη ηλεκτρική τάση στην αντλία μέσω του PWM που μπορεί να πάρει δηλαδή **SpeedPump = 255** που είναι **12V DC** , ενώ αν πρέπει να περιέλθει σε αδράνεια του δίνει το σήμα που πρέπει δηλαδή **SpeedPump = 0** που είναι **0V**.



Λογικό διάγραμμα λειτουργίας του ελεγκτή.

Σχήμα 2.6.3

Αυτή η υλοποίηση είναι μια παρόμοια εφαρμογή ενός αναλογικού ελεγκτή (Proportional controller,P) με ένα πολύ μεγάλο κέρδος **Kp** το οποίο δίνει ένα ρυθμιστικό σήμα στον κόρο (μαθηματικά το  $u > 255$ , οπότε καθορίζεται στο μέγιστο  $u = 255$ ) για το μεγαλύτερο διάστημα λειτουργίας και μόνο κάποια χιλιοστά του δευτερολέπτου είναι μικρότερο. Αρχικά είχε χρησιμοποιηθεί ένας τέτοιος ελεγκτής (Proportional) ο οποίος έκανε το σύστημα έγινε πιο αργό. Αυτός ο ελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε εντέλει ήταν ο γρηγορότερος, με ένα ελάχιστο σφάλμα μόνιμης κατάστασης (που κρίθηκε αμελητέο για τη φύση της εν λόγω εφαρμογής), το οποίο λόγω της μεγάλης ελαστικότητας των λατέξ σωλήνων δε δημιουργεί κανένα πρόβλημα στο υδραυλικό κύκλωμα.

## 3. ΟΠΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Οπτικές Μέθοδοι Μετρήσεων και Καταγραφής Δεδομένων. Η περίπτωση E.S.P.I.

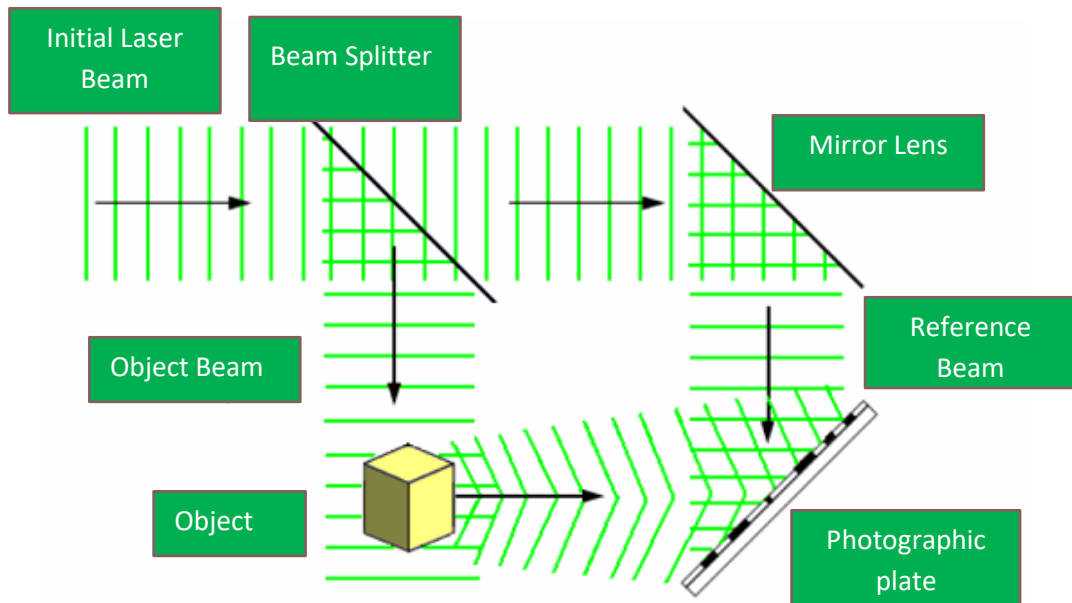
Οι οπτικές τεχνικές χρησιμοποιούνται ευρέως από ερευνητές και μηχανικούς στην ανάλυση αντικειμένων καθώς είναι από τη φύση τους μη καταστρεπτικές. Αυτό δίδει σ' αυτές τις τεχνικές σοβαρά πλεονεκτήματα κατά την ανάλυση ευαίσθητων σε μηχανικές καταπονήσεις αντικείμενα, όπως είναι στη συγκεκριμένη περίπτωση τα μουσικά όργανα. Τα οπτικά κύματα έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν τις απαιτούμενες κατά περίπτωση πληροφορίες, χωρίς να εφάπτεται κάποιου είδους αισθητήρας στο υπό μελέτη καπάκι λαούτου.

Η οπτική τεχνική που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία είναι μια εξέλιξη της ολογραφικής συμβολομετρίας και ονομάζεται "Χρονικά Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική Συμβολομετρία Ψηφίδων (E. S. P. I.)". Αυτή η τεχνική παρέχει πληροφορίες υψηλής ανάλυσης όσων αφορά το πλάτος, τη συχνότητα ταλάντωσης του αντικειμένου και τη φάση (θέση κροσσών). Επίσης οι μετρήσεις οπτικοποιούνται σχεδόν σε πραγματικό χρόνο, ταυτόχρονα σε ένα εκτεταμένο χωρικό πεδίο. Η τεχνική αυτή θα αναλυθεί, για λόγος πληρότητας, αφού γίνει πρώτα μια σύντομη αναφορά, γενικά στην ολογραφία και στην ολογραφική συμβολομετρία.

### 3.1 Ολογραφία

Η δημιουργία του "Bragg X-ray μικροσκοπίου" είχε βάση τα πονήματα των Wolfke (1920) (25) και Bragg (1939, 1932) στην κρυσταλλογραφία με ακτίνες X, στο ίδιο επιστημονικό αντικείμενο, ο Dennis Gabor (1948, 1949, 1951) πρότεινε την ιδέα της ολογραφικής απεικόνισης με σκοπό να εξασφαλίσει τη βελτίωση της διακριτικής ικανότητας των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων. Σε αυτή την εργασία του 1948, πρώτος επινόησε τον όρο "ολογραφία", η οποία είναι σύνθετη λέξη από τις ελληνικές λέξεις "όλος" και "γραφή". Είναι μία οπτική τεχνική που καταγράφει τόσο το πλάτος όσο και τη φάση του ηλεκτρικού πεδίου ενός αντικειμένου δίδοντας τη λήψη φωτογραφιών τριών διαστάσεων, σε αντίθεση με τη την απλή φωτογραφία, στην οποία η κατανομή της φωτεινής έντασης ενός τρισδιάστατου αντικειμένου καταγράφεται μόνο σε δύο διαστάσεις. Έτσι δεν μπορεί να αναπαραχθεί το αρχικό αντικείμενο σε τρεις διαστάσεις διότι η φωτογραφία δεν είναι πιστή αναπαραγωγή του ηλεκτρικού πεδίου που έχει φωτίσει το αντικείμενο, αλλά μόνο του τετραγώνου του πλάτους του ηλεκτρικού πεδίου αυτού.

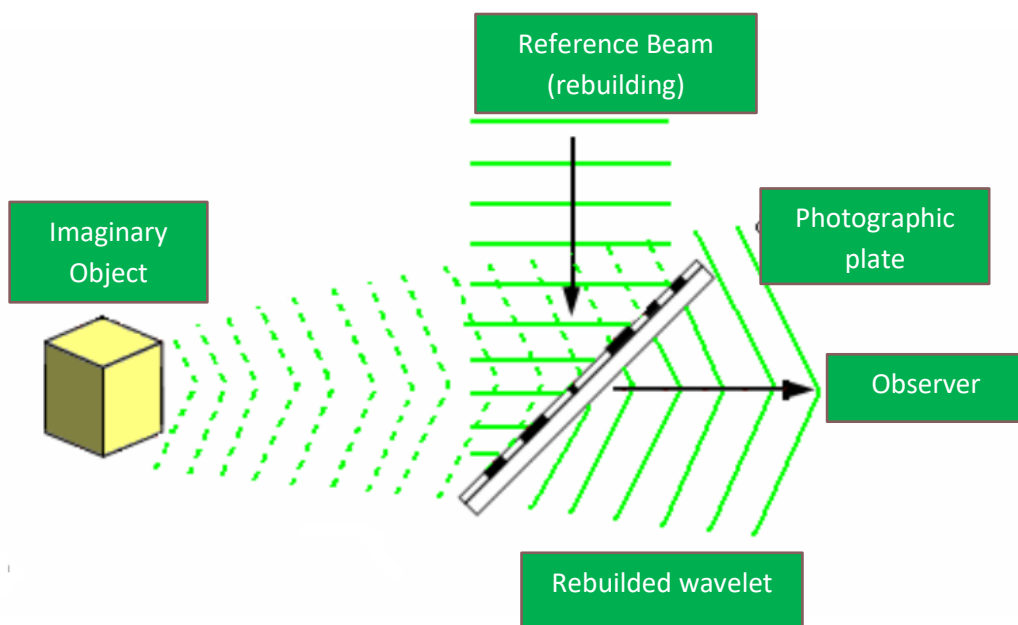
Στη τεχνική της ολογραφίας είναι απαραίτητη η χρήση μιας δέσμης σύμφωνης ακτινοβολίας (όπως το laser), η οποία χωρίζεται με έναν διαχωριστή δέσμης σε δύο μέρη για την ταυτόχρονη καταγραφή της φωτεινής έντασης και φάσης. Το ένα μέρος, η δέσμη αναφοράς, κατευθύνεται απ' ευθείας στο καταγραφικό υλικό (π.χ. μια φωτογραφική πλάκα), ενώ το άλλο μέρος, η δέσμη αντικειμένου, φωτίζει το αντικείμενο προς ολογράφηση. Το σκεδαζόμενο φως του αντικειμένου μαζί με την δέσμη αναφοράς συμβάλλουν πάνω στην φωτογραφική πλάκα και δημιουργούν το χαρακτηριστικό διάγραμμα συμβολής που αποτελείται από κροσσούς συμβολής, που περιέχουν μία πλήρη καταγραφή του αρχικού αντικειμένου (ένταση και φάση) και οι τυχόν παρεκκλίσεις του (π.χ. λόγω κίνησης) να αποδίδονται σε διαφορές φάσης στην δέσμη του αντικειμένου.



Τυπική διάταξη ολογραφίας για αποτύπωση αντικειμένου.

Σχήμα 3.1.1

Αν η εμφανισμένη πλάκα λάβει την αρχική της θέση, δηλαδή τη θέση όταν εκτέθηκε στο φως, και το αντικείμενο προς ολογράφηση απομακρυνθεί, τότε όταν η πλάκα φωτιστεί με δέσμη ίδια με την δέσμη αναφοράς, το αρχικό αντικείμενο ανακατασκευάζεται πλήρως σε ένταση και φάση και το είδωλο απεικονίζεται τρισδιάστατο. Αυτό συμβαίνει λόγω της περίθλασης της δέσμης ανακατασκευής από το διάγραμμα συμβολής της φωτογραφικής πλάκας που είχε καταγράψει.

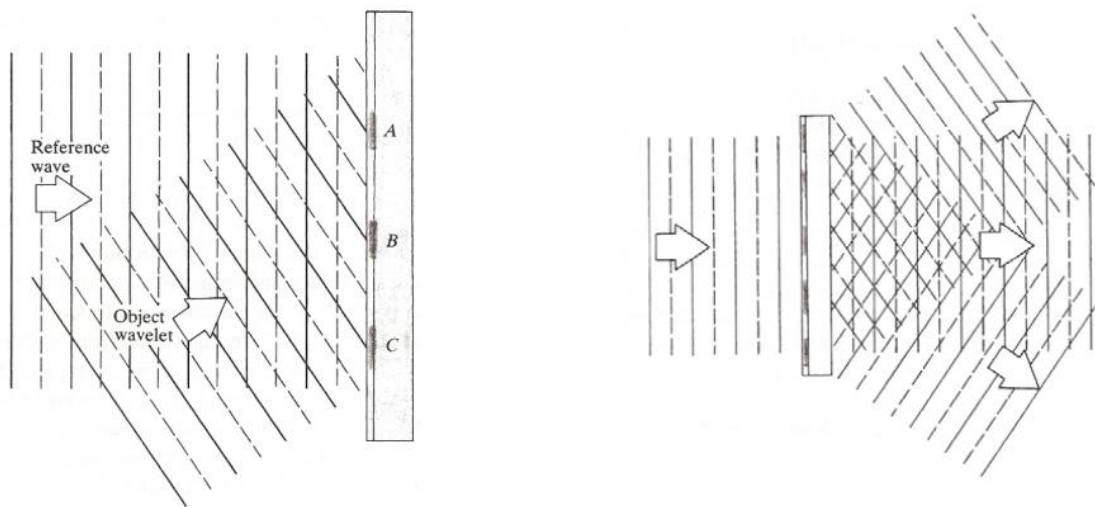


Τυπική διάταξη ολογραφίας για ανακατασκευή αντικειμένου.

Πηγή: (26)

Σχήμα 3.1.2

Αυτό το φαινόμενο μπορεί να γίνει πιο εύληπτο θεωρώντας την απλή εκδοχή, συμβολής δύο κυμάτων και την μαθηματική του ανάλυση. Στο παρακάτω Σχήμα (Σχήμα 3.1.3), έχουμε τη δέσμη αναφοράς που έχει κορυφή κατά μήκος του επιπέδου της προσόψεως της φωτογραφικής πλάκας, ενώ το σκεδασμένο από το αντικείμενο φως έχει κορυφές στα σημεία A, B και C και προσπίπτει υπό γωνία  $\theta$  στην φωτογραφική πλάκα. Καθ' όλη τη διάρκεια που τα κύματα κατευθύνονται προς τα δεξιά, θα παραμείνουν σε φάση στα σημεία αυτά, οι κοιλίες του ενός θα επικαλύπτονται από τις κοιλίες του άλλου και τα μέγιστα θα εμφανίζονται στα σημεία A, B και C. Συνεχίζοντας όμως τα κύματα να προχωρούν προς τα δεξιά, στα σημεία αυτά παραμένουν σε φάση, οι κοιλίες τους επικαλύπτονται, και τα μέγιστα παραμένουν στα σημεία A, B και C. Με τον ίδιο τρόπο, ανάμεσα στα σημεία αυτά, η κοιλία του ενός θα επικαλύπτεται με την κορυφή του άλλου, εμφανίζοντας ελάχιστα συμβολής



α) Συμβολή δύο κυμάτων στην φωτογραφική πλάκα.

β) Ανακατασκευή αντικειμένου.

Πηγή: (26)

Σχήμα 3.1.3

Η σχετική φάση  $\varphi$  των δύο κυμάτων, μεταβάλλεται σε κάθε σημείο πάνω στη φωτογραφική πλάκα, μπορεί να γραφεί ως συνάρτηση του  $\chi$  (βλέπε Σχήμα 3.1.4).

Όταν το  $\chi$  αλλάζει κατά  $\overline{AB}$  η φάση  $\varphi$  αλλάζει κατά  $2\pi$ , ισχύει λοιπόν η σχέση:

$$\frac{\varphi}{2\pi} = \frac{\chi}{\overline{AB}}$$

σχέση 3.1.1

Αφού όμως ισχύει ότι:

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{\overline{AB}}$$

σχέση 3.1.2

η φάση (συναρτήσει του  $x$ ) γράφεται:

$$\varphi(x) = \frac{2\pi x \sin\theta}{\lambda}$$

σχέση 3.1.3

Αν θεωρήσουμε τα δύο κύματα ότι έχουν ίδιο πλάτος  $E_0$ , η συμβολή του ηλεκτρικού πεδίου είναι:

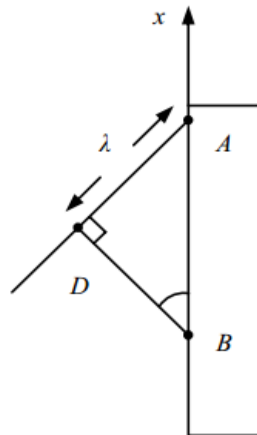
$$E = 2 E_0 \cos \frac{1}{2} \varphi \sin(\omega t - kx - \frac{1}{2} \varphi)$$

σχέση 3.1.4

Οπότε η κατανομή της έντασης, αφού είναι ανάλογη του τετραγώνου του ηλεκτρικού πεδίου, είναι:

$$I(x) = 2ce_0 E_0^2 + 2ce_0 E_0^2 \cos\varphi$$

σχέση 3.1.5



Η σχέση φάσης και μετατόπισης.

Πηγή: (26)

Σχήμα 3.1.4

Από τη σχέση 3.1.5 προκύπτει ότι υπάρχει μια συνημιτονοειδής κατανομή της έντασης κατά μήκος του επιπέδου της φωτογραφικής πλάκας, έχουμε λοιπόν ένα συνημιτονοειδές φράγμα περίθλασης όταν εμφανιστεί η φωτογραφική πλάκα. Αν αυτό το απλό ολόγραμμα φωτιστεί με ένα επίπεδο κύμα ίδιο με τη δέσμη αναφοράς δημιουργούνται τρεις δέσμες (Σχήμα 3.1.3.β). Μια δέσμη μηδενικής τάξης και δύο δέσμες πρώτης τάξης. Από τις δέσμες πρώτης τάξης, η μια κινείται στην κατεύθυνση του αρχικού αντικειμένου και αντιστοιχεί στο ανακατασκευασμένο αντικείμενο. Για να έχουμε μια επιτυχημένη ολογραφία πρέπει να πληρούνται τρεις προϋποθέσεις:

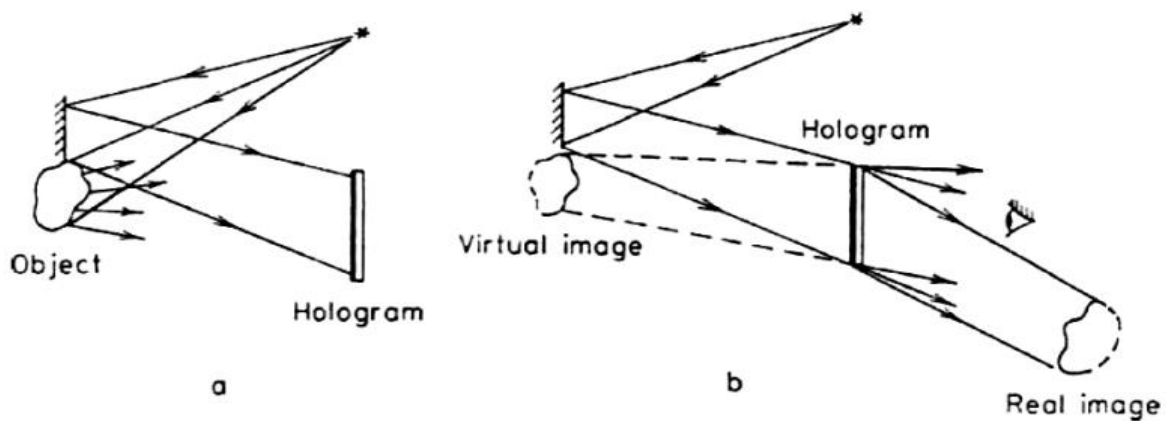
α) Η διακριτική ικανότητα της φωτογραφικής πλάκας πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε να μπορεί να καταγράφει τους κροσσούς συμβολής.

β) Δεν πρέπει να αλλάξουν καθ' όλη τη διάρκεια της έκθεσης της πλάκας οι θέσεις αντικειμένου, πλάκας και δέσμης laser. Επιτρέπονται κινήσεις μικρότερες από μισό μήκος κύματος του laser. Οπότε αντικείμενο, φωτογραφική πλάκα και laser πρέπει να τοποθετούνται σταθερά χωρίς επίδραση από δονήσεις, ανέμους κτλ.

γ) Η ύπαρξη επαρκούς μήκους συμφωνίας (με την έννοια της χωρικής και χρονικής συμφωνίας) της δέσμης laser για τον σχηματισμό των κροσσών συμβολής στην πλάκα.

### 3.2 Ολογραφική συμβολομετρία.

Η ολογραφική συμβολομετρία ως έννοια συμπεριλαμβάνει την κατασκευή, παρατήρηση και ερμηνεία κυμάτων που προέκυψαν από συμβολή και ένα τουλάχιστο έχει καταγραφεί και ανακατασκευασθεί από ολόγραμμα. Η βασική αρχή της ολογραφικής συμβολομετρίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2.1 το οποίο απεικονίζει μία γενική διάταξη δημιουργίας ολογράμματος και ανακατασκευής του κύματος που καταγράφηκε.



α) Διάγραμμα δημιουργίας ολογράμματος

β) Διάγραμμα ανακατασκευής κύματος

Πηγή: (27)

Σχήμα 3.2.1

Η αλληλεπίδραση του ανακατασκευασμένου κύματος με την αλληλουχία που καταγράφηκε στο ολόγραμμα μπορεί να ανακατασκευάσει το αντικειμενικό κύμα. Αν το ανακατασκευασμένο κύμα είναι πανομοιότυπο του κύματος αναφοράς, η φάση και το πλάτος του αντικειμενικού κύματος αναπαράγεται. Στη περίπτωση που προβληθεί το ολόγραμμα ενώ έχει αφαιρεθεί το αντικείμενο, η



εικόνα του αντικειμένου αναπαράγεται ακριβώς στην ίδια τοποθεσία και κατάσταση που βρισκόταν στην καταγραφή του ολογράμματος. Αν δεν έχει αφαιρεθεί το αντικείμενο, δύο κύματα θα διαδοθούν πίσω από το ολόγραμμα, το ένα είναι το ανακατασκευασμένο από το ολόγραμμα και ένα από ανάκλαση απευθείας του αντικειμένου. Τα δυο αυτά κύματα είναι σχετικά, οπότε μπορούν να συμβάλουν. Η μορφή της συμβολής τους χαρακτηρίζει τις αλλαγές έγιναν στο αντικείμενο κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ της καταγραφής του ολογράμματος και της παρατήρησης της μορφής. Αν η κατάσταση του αντικειμένου αλλάξει κατά την παρατήρηση λόγω παραμόρφωσης ή μετατόπισης, η μορφή επίσης θα αλλάξει. Αυτή είναι μια από τις μεθόδους ολογραφικής συμβολομετρίας και ονομάζεται «συμβολομετρία πραγματικού χρόνου (Real time interferometry)».

Άλλη παραλλαγή της, που ονομάζεται «μέθοδος διπλής - πολλαπλής έκθεσης (double – multi exposure method)» έχουμε όταν δύο ή και παραπάνω ολογράμματα, αποθηκεύουν διαφορετικές καταστάσεις του ίδιου αντικειμένου, διαδοχικά καταγράφονται σε φωτογραφικό φιλμ. Αν ανακατασκευαστούν ταυτόχρονα, τα κύματα αυτά που είναι πανομοιότυπα των αρχικών κυμάτων, θα συμβάλουν.

Τέλος, τρίτη παραλλαγή, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ακραία εκδοχή της μεθόδου πολλαπλής έκθεσης και χρησιμοποιείται ευρέως για τη μελέτη ταλαντευμένων αντικειμένων με μικρό πλάτος και μεγάλο ρυθμό ταλάντωσης, είναι η «χρονικά ολοκληρωμένη μέθοδος (time average technique)». Στην τεχνική αυτή, η φωτογραφική πλάκα εκτίθεται στο φως για σχετικά μεγάλο χρόνο κατά τον οποίο, το δονούμενο αντικείμενο έχει εκτελέσει έναν αριθμό ταλαντώσεων. Το ολόγραμμα που προκύπτει μπορεί να θεωρηθεί ως η υπέρθεση πολλαπλών εικόνων, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός σχήματος στάσιμου κύματος.

## Πλεονεκτήματα ολογραφικής συμβολομετρίας

Η ολογραφική συμβολομετρία συγκεντρώνει αρκετά πλεονεκτήματα στον υπολογισμό παραμορφώσεων και στον μη καταστροφικό έλεγχο. Ελαστικές παραμορφώσεις, π.χ. από δονήσεις σε τραχείς, θολές ή έντονα ανακλαστικές επιφάνειες, μετρούνται με ακρίβεια μεγαλύτερη του μήκους κύματος του χρησιμοποιούμενου laser. Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι:

- οι μετρήσεις γίνονται μακριά από την επιφάνεια και δεν επιδρούν σε αυτήν,
- δεν απαιτείται κατοπτρική ανάκλαση για τις μετρήσεις,
- μεγάλη ανιχνευσιμότητα τοπικών παραμορφώσεων καθώς αποκτούνται διαρκείς, δισδιάστατες πληροφορίες για τη κατάσταση του υπό εξέταση αντικειμένου
- η επιφάνεια μπορεί να έχει αυθαίρετο σχήμα,
- οι περιοχές της υπό εξέτασης επιφάνειας μπορεί να κυμαίνονται από λίγα mm<sup>2</sup> μέχρι μερικά m<sup>2</sup>,
- μπορούν να υπολογιστούν παραμορφώσεις από 0.05 μm έως και 500 μm,
- η μέθοδος είναι ανεξάρτητη των ιδιοτήτων των υλικών,
- οι μετρήσεις μπορούν να διεξαχθούν σε κινούμενες επιφάνειες,
- οι μετρήσεις μπορούν να γίνουν ακόμα και σε κλειστές κατασκευές, π.χ. σε δοχεία πίεσης, μέσω παραθύρων και τέλος
- η ανάλυση των πληροφοριών μπορεί να χωριστεί τοπικά και χρονικά.

### 3.3 Χρονικά Ολοκληρωμένη Ηλεκτρονική Συμβολομετρία Ψηφίδων (E. S. P. I.).

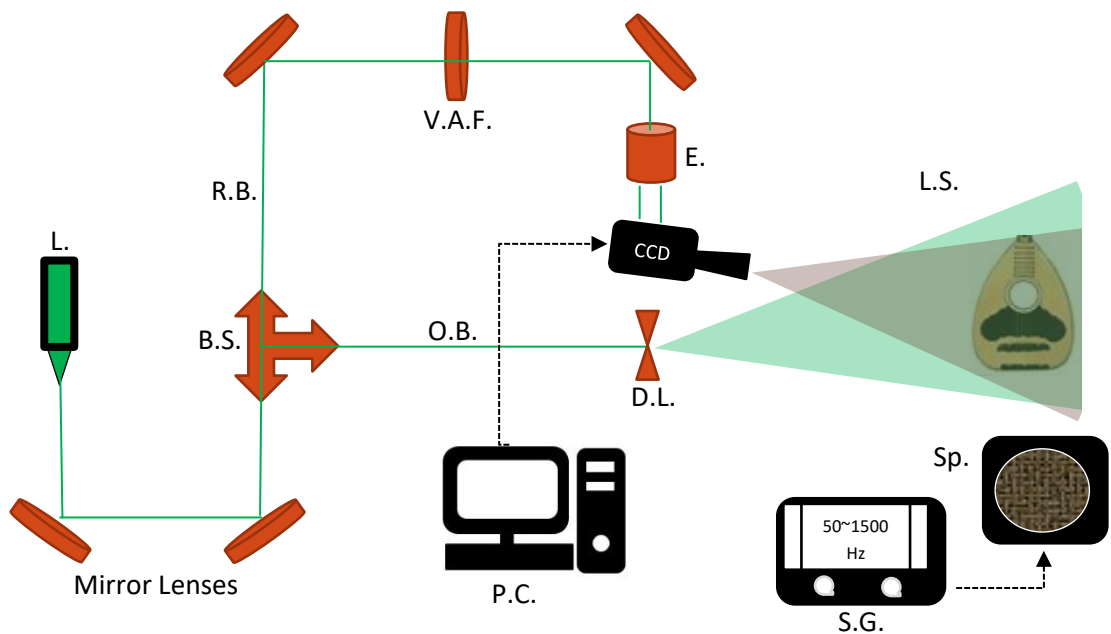
Ιστορικά, η τεχνική (time averaged Electronic Speckle Pattern Interferometry - E.S.P.I.), εισάγεται το 1971 (28). Σημείωσε σημαντική ανάπτυξη μετά την ψηφιακή ανάλυση κροσσών με ηλεκτρονικό υπολογιστή και σήμερα αποτελεί μία από τις κύριες συμβολομετρικές τεχνικές στη μελέτη δονήσεων ή παραμορφώσεων αντικειμένων, απαραίτητο εργαλείο στην έρευνα, θεωρητικά και πειραματικά. Κατατάσσεται στις τεχνικές ψηφιακής συμβολομετρίας ψηφίδων, μια κατηγορία συμβολομετρίας, στην οποία ένα από τα συμβάλλοντα πεδία είναι ένα πεδίο ψηφίδων, το οποίο προκύπτει από την ανάκλαση φωτός από μια οπτικά ανώμαλη επιφάνεια. Ψηφίδα λέγεται η διάστικτη, κοκκιδωτή και τυχαία φύση της κατανομής έντασης του ανακλώμενου φωτός, όπως βλέπει και ο παρατηρητής από ορισμένη απόσταση από το αντικείμενο.

Η τεχνική E.S.P.I. θεωρείται απλούστερη από την ολογραφική συμβολομετρία καθώς δεν απαιτείται καταγραφή ολογράμματος κατά την πειραματική διαδικασία. Η κάμερα χρησιμοποιείται ως ψηφιακό καταγραφικό δίνοντας το πλεονέκτημα της δυνατότητα καταγραφής και ταυτόχρονης απεικόνισης των κροσσών σε πραγματικό χρόνο.

Η τεχνική E.S.P.I. στη πράξη είναι η καταγραφή δύο φωτεινών δεσμών από έναν οπτικό αισθητήρα όπως μια κάμερα CCD (Charged Coupling Devices, μετατρέπουν τις εικόνες από αναλογικά σήματα φωτός σε ψηφιακά pixels). Οι δύο δέσμες προκύπτουν από το διαχωρισμό μια αρχικής δέσμης laser που ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές (διάταξη συμβολόμετρου). Η πρώτη που είναι και δέσμη αναφοράς προσπίπτει στον αισθητήρα της κάμερας οδηγούμενη από ένα σύστημα φακών και καθρεπτών. Η δεύτερη είναι η ανακλώμενη από το υπό μελέτη αντικείμενο που προσπίπτει και αυτή στον αισθητήρα της κάμερας. Οι φωτογραφίες που συλλέγονται από την κάμερα αφαιρούνται διαδοχικά καθώς το υπό μελέτη αντικείμενο δονείται και δημιουργούνται συμβολογράμματα της δόνησής του (29).

#### 3.3.1 Η διάταξη E.S.P.I. του Τ.Ε.Ι. Κρήτης.

Στο Εργαστήριο Ακουστικής και Οπτικής Τεχνολογίας του τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης (Ρέθυμνο) έχει αναπτυχθεί μια διάταξη E.S.P.I. προκειμένου να εξυπηρετήσει τις ερευνητικές και εκπαιδευτικές ανάγκες του ιδρύματος. Παρακάτω απεικονίζεται ένα παραστατικό σχεδιάγραμμα της διάταξης και μερικές φωτογραφίες από τη διαδικασία των μετρήσεων.



L.S. = Lute Soundboard (Καπάκι Λαούτου), P.C. = Personal Computer (Προσωπικός Υπολογιστής, Σύστημα Καταγραφής), L = Laser (Λέιζερ), B.S. = Beam Splitter (Διαχωριστής δέσμης 80-20), O.B. = Object Beam (δέσμη προς αντικείμενο - Καπάκι Λαούτου), R.B. = Reference Beam (Δέσμη αναφοράς), V.A.F. = Variable Absorption Filter (Φίλτρο μεταβλητής απορρόφησης), E = Παραλληλοποιητής δέσμης, μεγεθυντής  $\times 20$ , C.C.D. = CCD Camera (Φωτογραφική κάμερα τεχνολογίας αισθητήρα CCD), D.L. = Diverging Lens (Αποκλίνων φακός), S.G. = Variable Frequency Signal Generator (Γεννήτρια συχνοτήτων ημιτόνου), Sp = Speaker (Αυτοενισχυόμενο ηχείο)

Σχήμα 3.3.1.1

Αναλυτικότερα, το υλισμικό και λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις, εκτός από αυτά που περιγράφονται στο παραπάνω σχέδιο είναι:

### Ηλεκτρονικός υπολογιστής με το λογισμικό LabView 7.1

Με το LabView 7.1 παρέχονται δύο δυνατότητες καταγραφής των εικόνων συμβολής:

- α) Subtract Two Continuous (για δυναμικές, γρήγορες, συνεχόμενες μετρήσεις) και
- β) Subtract (για πιο σταθερές μετρήσεις).

Η πρώτη τεχνική δέχεται δύο αρχικές εικόνες ως είσοδο και αφαιρεί τις εικόνες (αφαιρεί την πρώτη από την δεύτερη), ενώ η δεύτερη τεχνική δέχεται μία αρχική εικόνα ως είσοδο και αφαιρεί την αρχική εικόνα αναφοράς από κάθε μία εικόνα που έρχεται. Ακολουθώντας τη τεχνική Α', της αφαίρεσης δύο συνεχόμενων εικόνων, ακολουθούμε συγκεκριμένα βήματα ενεργειών με βασικό στόχο την αντιστάθμιση της έντασης των δύο δεσμών (αντικειμένου και αναφοράς). Αρχικά αποκόπτεται η δέσμη αναφοράς και καταγράφεται η μέση τιμή έντασης της δέσμης αντικειμένου (Maximal / Mean Value στο υπομενού Camera Control 7). Ρυθμίζεται το διάφραγμα της κάμερας έτσι ώστε να απεικονίζεται ισοφωτισμένη κατά το δυνατό ολόκληρη η επιφάνεια του αντικειμένου που μετριέται

και αποθηκεύεται η τιμή της προκύπτουσας έντασης. Στη συνέχεια, ελευθερώνεται η δέσμη αναφοράς και αποκόπτεται η δέσμη αντικειμένου με αποτέλεσμα στο φακό της κάμερας να προσπίπτει μόνο η δέσμη αναφοράς. Αφού ρυθμιστεί η τιμή της έντασης αναφοράς μέσω κατάλληλου φίλτρου (μεταβλητής έντασης) με σκοπό να επιτευχθεί ίδια φωτεινότητα στις δύο δέσμες, αποθηκεύεται η μέση τιμή έντασης της δέσμης αναφοράς. Επιστρέφοντας στο κυρίως πρόγραμμα επιλέγουμε τις επιθυμητές τιμές Delay (msec – χρονική καθυστέρηση μεταξύ των εισερχομένων εικόνων), Zoom Subtracted (εστίαση) και Control BCG (Brightness, Contrast, Gamma).

### Laser Cobolt Samba™

- Στερεάς κατάστασης Nd:YAG με κρύσταλλο 2ης αρμονικής (532 nm).
- Διοδικής άντλησης.
- CW μέγιστη ισχύς εξόδου πάνω από 100mW (Περίπου 150mW).
- Μήκος κύματος  $\lambda = 532$  nm (Πράσινο χρώμα).
- Μονή διαμήκης κατάσταση.
- Στενό φασματικό εύρος, μονορυθμικό με ψύξη.
- Θόρυβος βάθους < 0.3% rms

### Ηχείο Genelec 8030A

- Μέγιστη στάθμη: 100 dB
- Απόκριση συχνότητας: 58 Hz - 20 kHz (  $\pm 2$  dB ) , 55 Hz - 21 kHz ( -3 dB )
- Συχνότητα Crossover: 3,0 kHz
- Διάσταση Driver: Bass 5 + Treble 3/4 σε μεταλλικό θόλο + DC W™
- Ισχύς Ενισχυτή: Bass 40 W + 40 W Πρίμα
- Διαστάσεις: Υ x Π x Β 299 x 189 x 178 χιλιοστά με Iso - Pod™
- Βάρος: 5,6 kg
- Συνδέσεις: 1 x αναλογική XLR

### CCD camera

- Μέγεθος αισθητήρα: 1392×1040 pixels
- Μέγεθος pixel: 6.45×6.45  $\mu$ m
- Μέγιστος ρυθμός καταγραφής: 15 frames/sec
- Βάθος χρώματος: 8 Bits

### Απορροφητική βάση στήριξης οργάνων.

Το καπάκι λαούτου που μετρήθηκε στηρίχθηκε σε απορροφητική αντικραδασμική βάση (σε δύο αντιδιαμετρικά σημεία του κατακόρυφου άξονα) sorbothane® (<http://www.sorbothane.com/>). Ένα απορροφητικό, στο φως, πλαίσιο τοποθετήθηκε πίσω ακριβώς από τη βάση στήριξης του οργάνου με σκοπό την εξάλειψη ανεπιθύμητων ανακλάσεων της δέσμης που φωτίζει την επιφάνεια του οργάνου.

## Καλώδια για τις συνδεσμολογίες.

Διαφόρων τύπων καλώδια, για τη διασύνδεση των συσκευών, για παροχή ισχύος και μεταφορά δεδομένων.

## Οπτική τράπεζα.

Όλη η διάταξη τοποθετείται πάνω στην επιφάνεια μιας οπτικής τράπεζας με αερο-αναρτήσεις προς αποφυγή των δονήσεων - κραδασμών που προέρχονται από εξωγενείς παράγοντες όπως το κτίριο, φυσικό περιβάλλον ή τους χρήστες της διάταξης.

## Περιγραφή Διάταξης

Στο παραπάνω παραστατικό σχεδιάγραμμα της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε, το οποίο μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένα Mach-Zehnder συμβολόμετρο, έχουμε τα εξής: Πάνω σε μια αντικραδασμική τράπεζα, στηρίχθηκε σε ειδική βάση και με ειδικό απορροφητικό υλικό (sorbothane) το καπάκι του λαούτου. Έχουμε μία μονορυθμική πηγή λέιζερ Nd:YAG, που η δεύτερη αρμονική της (μέσω ειδικού κρυστάλλου διπλασιασμού συχνότητας) εκπέμπει φωτεινή ακτινοβολία πράσινου φωτός ( $\lambda = 532 \text{ nm}$  και μέγιστη ισχύ  $150 \text{ mW}$ ). Η δέσμη αυτή προσομοιάζει με καλή ακρίβεια ένα επίπεδο H/M κύμα που διαδίδεται στο χώρο με αρκετά μεγάλο μήκος συμφωνίας (πάνω από  $1 \text{ m}$ ). Αυτή η δέσμη περνά μέσα από ένα διαχωριστή δέσμης που τη χωρίζει σε αναλογία ενέργειας 80/20. Η μικρότερης έντασης δέσμη χρησιμοποιείται ως δέσμη αναφοράς (R.B.) και οδηγείται μέσω ανακλάσεων σε φακούς- καθρέπτες σε ψηφιακή κάμερα υψηλής ανάλυσης (CCD), αφού έχει υποστεί παράλληλη χωρική μεγέθυνση (E.).

Η μεγαλύτερης έντασης δέσμη προσπίπτει στο καπάκι του λαούτου και ονομάζεται δέσμη αντικειμένου (O.B.) η οποία φωτίζει ομοιόμορφα το καπάκι διαμορφωμένη από κατάλληλο αποκλίνοντα φακό (D.L.).

Η ανάκλαση της δέσμης αντικειμένου, από την υπό μελέτη επιφάνεια, συλλέγεται με ειδικό οπτικό σύστημα απεικόνισης και συμβολής μαζί με την δέσμη αναφοράς και διαμορφώνεται περνώντας από διαχωριστή δέσμης 80/20 που βρίσκεται μεταξύ του φακού και του αισθητήρα της κάμερας και εξασφαλίζει την κάθετη πρόσπτωση και των δύο ομο-διαδιδόμενων (co-propagated) δεσμών στον αισθητήρα με παρόμοια ένταση για την ενίσχυση του βάρους της συμβολής. Ένα φίλτρο μεταβλητής διαπερατότητας (V.A.F.) χρησιμοποιείται για να ρυθμίσει την ένταση της δέσμης αναφοράς επιτυγχάνοντας την ορθή σχέση έντασης των δύο φωτεινών δεσμών κατά την διαδικασία ισοστάθμισης της διάταξης.

Στη συνέχεια διεγείρουμε το καπάκι του λαούτου με το ηχείο (S.), το οποίο είναι συνδεδεμένο με τη γεννήτρια συχνοτήτων (S.G.), που παράγει ημιτονικά σήματα και τα δεδομένα από την ψηφιακή κάμερα συλλέγονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή (P.C.) όπου επεξεργάζονται και αποθηκεύονται σε πραγματικό χρόνο, μέσω ενός ειδικού λογισμικού που έχει αναπτυχθεί σε περιβάλλον LabView.



Φωτογραφίες από την Πειραματική Διάταξη E.S.P.I. και του καπακιού.

Σχήμα 3.3.1.2

### 3.3.2 Μαθηματική Θεμελίωση.

Έστω ότι μία επιφάνεια δονείται εγκάρσια. Η κάθετη απόκλιση από τη θέση ισορροπίας  $w$ , σε κάθε σημείο με συντεταγμένες  $(x,y)$  για κάθε χρονική στιγμή  $t$ , δίδεται από τη σχέση 3.3.1, όπου  $A(x,y)$  είναι η κατανομή του πλάτους ταλάντωσης πάνω στη επιφάνεια,  $\omega$  είναι η κυκλική συχνότητα της ταλάντωσης και  $\phi_0(x,y)$  η κατανομή της φάσης.

$$w(x, y, t) = A(x, y) \cos[\omega t + \phi_0(x, y)]$$

Σχέση 3.3.1

Τότε η κατανομή φωτεινής έντασης σε χρόνο έκθεσης  $\tau$ , που ανιχνεύει η κάμερα είναι:

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \left\{ I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cdot \cos \left[ \varphi + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos\theta) A \cos(\omega t + \phi_0) \right] \right\} dt$$

Σχέση 3.3.2

όπου  $I_A$  είναι η κατανομή της έντασης της δεσμής του αντικειμένου,  $I_B$  είναι η κατανομή της έντασης της δεσμής αναφοράς,  $\varphi$  είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο παραπάνω δεσμών,  $\lambda$  είναι το μήκος κύματος της πηγής laser, και  $\theta$  είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης φωτισμού του αντικειμένου και της διεύθυνσης παρατήρησης.

Αν θεωρήσουμε ότι στη συγκεκριμένη διάταξη είναι  $\theta \cong 0^\circ$ , θέσουμε  $\Gamma = 4\pi\lambda$  και  $t = 2m\pi/\omega$  (όπου  $m$  είναι ακέραιος),  $\Gamma = (2\pi/\lambda)(1 + \cos\theta)$  και  $\tau = 2m\pi/\omega$ , ολοκληρώνοντας (εξίσωση 3.3.2) προκύπτει ότι:

$$I_1 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} |(\cos\varphi)J_0(\Gamma A)|$$

Σχέση 3.3.3

όπου  $J_0$  είναι η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης πρώτου είδους. Παρατηρείται ότι στην σχέση 3.3.3 έχει απαλειφθεί η φάση της δόνησης  $\varphi_0$  λόγω της χρονικής ολοκλήρωσης. Καθώς η ταλάντωση συνεχίζεται, θεωρείται ότι το πλάτος ταλάντωσης αλλάζει λίγο από  $A$  σε  $A+\Delta A$ , λόγω διαφόρων αστάθμητων παραγόντων και τότε καταγράφεται μια δεύτερη εικόνα, της οποίας η κατανομή φωτεινής έντασης μπορεί με τον ίδιο τρόπο να εκφραστεί, μετά από ανάπτυγμα Taylor (θεωρώντας το  $\Delta A$  πολύ μικρό).

$$I_2 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \left| (\cos\varphi) \left[ 1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(\Gamma A) \right|$$

Σχέση 3.3.4

Οι δύο διαδοχικές εικόνες  $I_1$  και  $I_2$ , αφαιρούνται μέσω του κατάλληλου λογισμικού που προαναφέρθηκε και το αποτέλεσμα είναι:

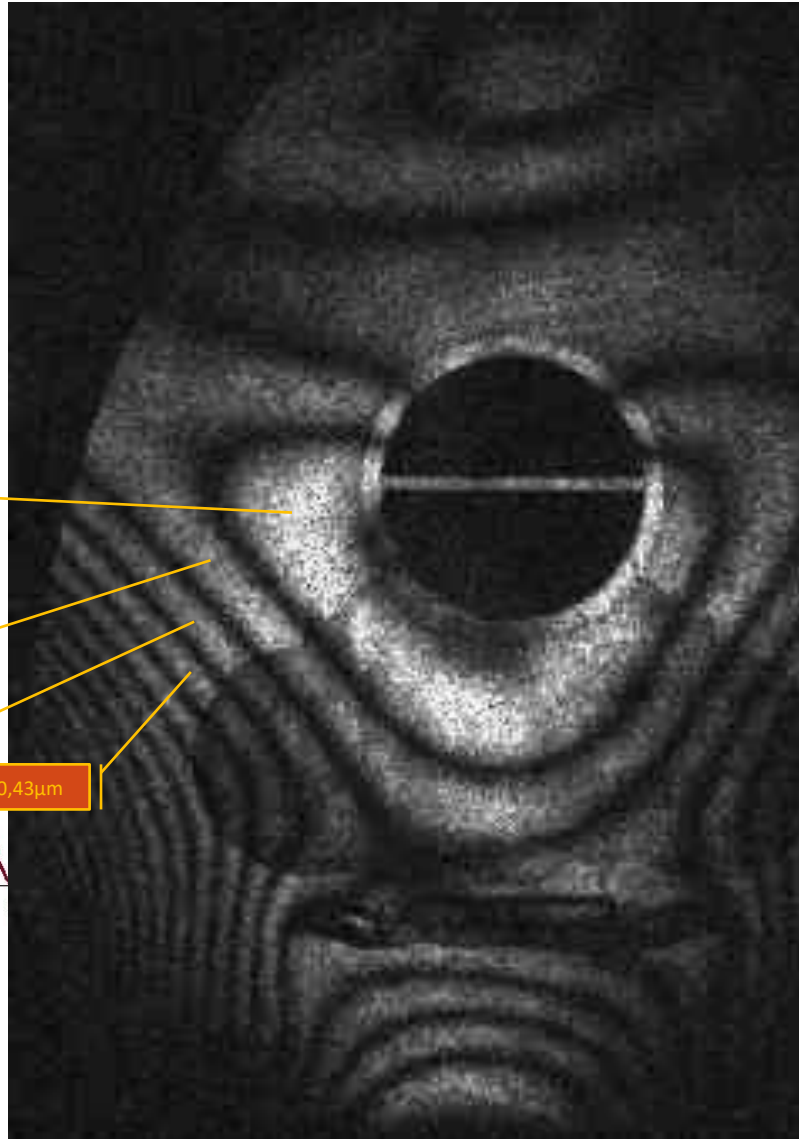
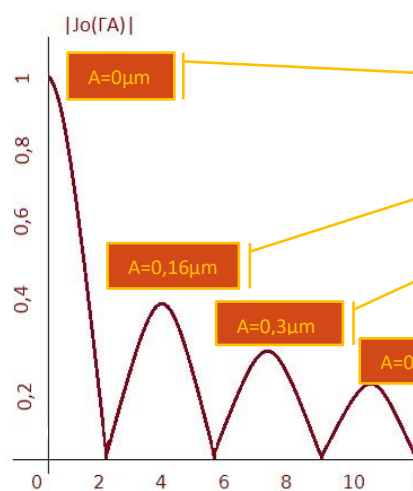
$$I = I_1 - I_2 = \frac{\sqrt{I_A I_B}}{2} |(\cos\varphi) \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A)|$$

Σχέση 3.3.5

Από την σχέση 3.3.5 προκύπτει ότι το χρονικά ολοκληρωμένο συμβολόγραμμα  $I$ , είναι διαμορφωμένο από τη συνάρτηση Bessel  $|J_0(\Gamma A)|$ .

Οι εναλλασσόμενοι φωτεινοί και σκοτεινοί κροσσοί είναι ουσιαστικά ισοΰψεις καμπύλες ίδιου πλάτους ταλάντωσης. Οι φωτεινοί κροσσοί αντιστοιχούν στα μέγιστα της  $|J_0(\Gamma A)|$ , με τον φωτεινότερο κροσσό να αντιστοιχεί σε δεσμό  $A = 0$ .

Οι υπόλοιποι φωτεινοί κροσσοί, διαδοχικά μειούμενης φωτεινότητας, αντιστοιχούν σε τιμές πλάτους ταλάντωσης:  $0.3 \times \lambda$ ,  $0.56 \times \lambda$ ,  $0.81 \times \lambda$ ,  $1.07 \times \lambda$  κ.τ.λ. Οπότε για  $\lambda = 532 \text{ nm}$  (το μήκος κύματος 2<sup>ης</sup> αρμονικής του λέιζερ στη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε) η αντιστοιχία που υπάρχει για τις τιμές πλάτους ταλάντωσης είναι:  $0.1596\mu\text{m}$ ,  $0.2979\mu\text{m}$ ,  $0.4309\mu\text{m}$ ,  $0.5692\mu\text{m}$  και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα με στρογγυλοποίηση των τιμών.



Τα μέγιστα της συνάρτησης Bessel  $|J_0(\Gamma A)|$  όπως αντιστοιχούν στην κατανομή πλάτους ταλάντωσης που μετριοούνται με την πειραματική διάταξη E.S.P.I.

Σχήμα 3.3.2.1

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της παρούσας εργασίας με την τεχνική E.S.P.I. παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.



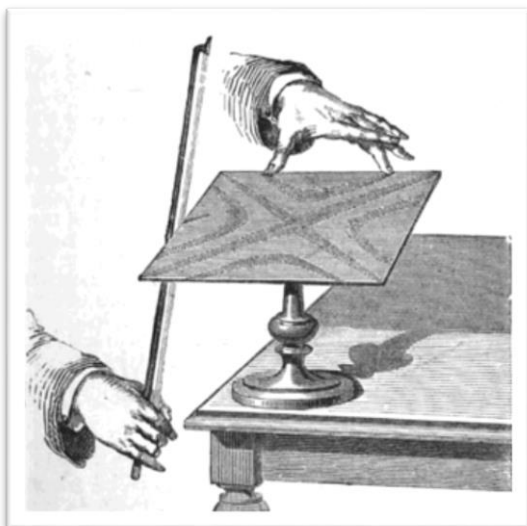
## 4. ΑΚΟΥΣΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.

Τεχνικές, αποτελέσματα και συμπεράσματα.

### 4.1 Το καπάκι ως δονούμενη επιφάνεια.

Από αιώνες οι οργανοποιοί γνώριζαν την σπουδαιότητα του ρόλου της ηχητικής πλάκας (soundboard) στα μουσικά όργανα από καθαρά εμπειρικές παρατηρήσεις. Πολύ πριν η επιστημονική έρευνα ασχοληθεί με την μελέτη των ακουστικών ιδιοτήτων των επιμέρους τμημάτων των μουσικών οργάνων αλλά και του όλου αυτών, οι οργανοποιοί έκρουαν τα καπάκια σε διαφορετικά σημεία (tapping), προσπαθώντας να διεγείρουν τους διαφορετικούς τρόπους δόνησης του ξύλου. Με αυτόν τον τρόπο, χρησιμοποιώντας την ακοή και την εμπειρία τους, είχαν μια ανατροφοδότηση και έκαναν τις απαραίτητες διορθώσεις αποσκοπώντας στο ιδανικό αποτέλεσμα. Η ανακάλυψη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και των laser έδωσε μεγάλη ώθηση σε αυτή την έρευνα όπως περιγράφηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο με τις οπτικές μεθόδους και τις τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί και στο T.E.I. Κρήτης.

Πριν από τη σύγχρονη εποχή όμως, ένας πρωτοπόρος πραγματοποίησε ένα γνωστικό άλμα. Αυτός ήταν ο Γερμανός Ernst Florens Friedrich Chladni (1787) ο οποίος παρατήρησε πως όταν ένα κοκκώδες υλικό (π.χ. άμμος), καλύψει μια δονούμενη επιφάνεια, κατά το συντονισμό αυτής το υλικό έχει την τάση να συγκεντρώνεται στις περιοχές με μικρό πλάτος ταλάντωσης, διαγράφοντας τους δεσμούς ταλάντωσης και απεικονίζοντας τους διαφορετικούς τρόπους δόνησης της επιφάνειας (30).



Η Μέθοδος με την οποία ο Chladni δημιουργούσε τα διαγράμματα του.

Πηγή:[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/03/Bowing\\_chladni\\_plate.png/330px-Bowing\\_chladni\\_plate.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/0/03/Bowing_chladni_plate.png/330px-Bowing_chladni_plate.png)

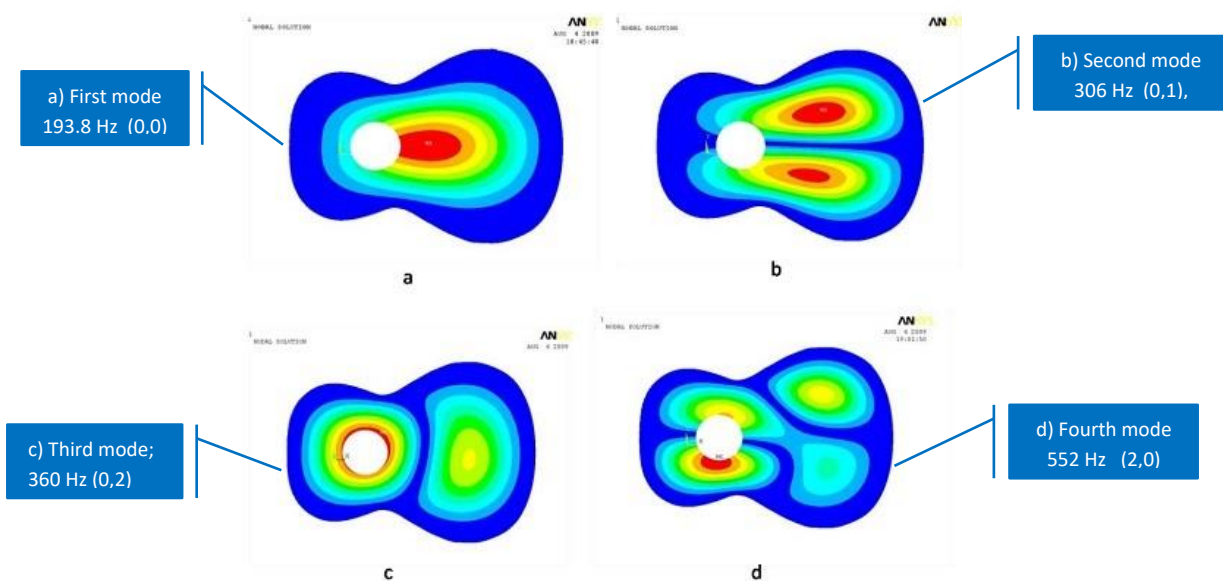
Σχήμα 4.1.1

Η τεχνική αυτή έχει αρκετά μειονεκτήματα όπως την αδυναμία υπολογισμού του ακριβούς πλάτους της ταλάντωσης, τον περιορισμό της παράλληλης τοποθέτησης με το έδαφος των επιφανειών

(θέματα βαρύτητας) και την αδυναμία της μελέτης τυχαίων, καμπύλων επιφανειών. Το σημαντικότερο όμως μειονέκτημά της είναι ότι προσδίδει μάζα στο υλικό (μάζα κόκκων άμμου) και έτσι αλλοιώνει τις μετρήσεις των ιδιοσυχνοτήτων και τα ακριβή σχήματα των κανονικών τρόπων ταλάντωσης. Τα μειονεκτήματα αυτά ξεπεράστηκαν με την ολογραφική συμβολομετρία και την εξέλιξή της, την τεχνική E.S.P.I., με την οποία έγιναν όλες οι μετρήσεις στην εργασία αυτή.

### 4.1.1 Συντονισμός

Το γνωστό σε όλους, από τη Φυσική, φαινόμενο του συντονισμού συμβαίνει και στα μουσικά όργανα και ιδιαίτερα στα καπάκια τους, όταν διεγερθούν ημιτονικά σε μια συχνότητα που συμπίπτει με τους σημαντικούς τρόπους δόνησής του. Η επιφάνεια ταλαντώνεται κυρίως εγκάρσια σχηματίζοντας περιοχές με μέγιστο πλάτος ταλάντωσης που ονομάζονται **κοιλίες** και περιοχές με μηδενικό ή πολύ μικρό πλάτος που ονομάζονται αντίστοιχα **δεσμοί**. Ο υπολογισμός των σημαντικών τρόπων δόνησης (normal modes), σε επιφάνειες και άλλες απλές δομές, μπορεί να γίνει μαθηματικά με την εφαρμογή της κυματικής εξίσωσης σε περισσότερες διαστάσεις. Όταν οι υπολογισμοί γίνουν πολυσύνθετοι, παραδείγματος χάριν στα ολοκληρωμένα καπάκια μουσικών οργάνων, μπορούν να εφαρμοστούν σήμερα αριθμητικά μοντέλα όπως η Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (finite element method – F.E.M.) που είναι μια μέθοδος υπολογισμού με χρήση Η/Υ για την εύρεση προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων.

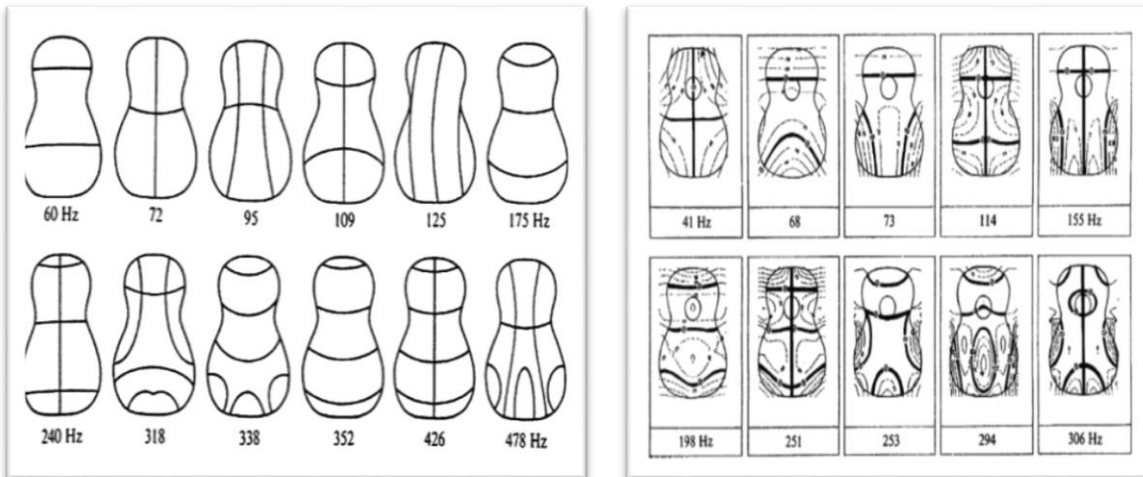


Οι πρώτοι 4 τρόποι δόνησης ενός καπακιού κιθάρας, υπολογισμένοι με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων. Οι μπλε περιοχές συμβολίζουν το μηδενικό πλάτος ταλάντωσης.

Πηγή: (31)

Σχήμα 4.1.2

Οι τρόποι δόνησης μιας επιφάνειας ή και οποιοδήποτε αντικείμενου σε διαφορετικές συχνότητες διέγερσης, ονομάζονται resonances ή modes, στα ελληνικά ιδιοσυχνότητες ή βασικές καταστάσεις συντονισμού και με τη μελέτη αυτών, μπορεί να προβλεφθεί ο τρόπος παραγωγής του ήχου από την επιφάνεια καθώς και το είδος του ήχου αυτού. Οι τρόποι δόνησης στα ελεύθερα καπάκια χαρακτηρίζονται από τον αριθμό των δεσμών ταλάντωσης που είναι παράλληλοι κατά μήκος και κατά πλάτος ως ένα ζευγάρι ακεραίων  $(x, y)$ , όπου  $x$  ο αριθμός δεσμών στον οριζόντιο άξονα και  $y$  ο αριθμός δεσμών στον κατακόρυφο άξονα.



A) Χωρίς Οπλισμό στο καπάκι.  
(Χωρίς καμάρια)

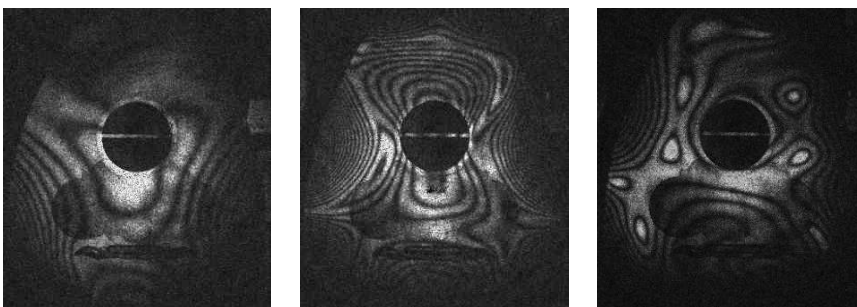
B) Με Παραδοσιακό Οπλισμό.  
(τύπου Βεντάλιας)

### Τρόποι δόνησης μιας κλασσικής κιθάρας

Πηγή: (32)

Σχήμα 4.1.3

Οι μετρήσεις στην παρούσα εργασία, έγιναν όλες με την εφαρμογή της τεχνικής E.S.P.I, η οποία όπως περιγράφηκε και παραπάνω, παρέχει τις μετρήσεις ως φωτογραφίες σε κλίμακα του γκρι. Η μεταβολή της φωτεινής δέσμης ανάκλασης όταν συμβάλει με την δέσμη αναφοράς, δημιουργεί τις χαρακτηριστικές μορφές κροσσών συμβολής και διαβαθμίσεων του γκρι στις φωτογραφίες των υπό μελέτη αντικειμένων, εν προκειμένω της ηχητικής πλάκας λαούτου.



Εικόνες Συμβολής από την εφαρμογή της τεχνικής E.S.P.I. στο υπό μελέτη καπάκι λαούτου.

Σχήμα 4.1.4

Για να γίνει περισσότερο κατανοητό το παραπάνω σχήμα, αναφέρεται ότι τα σκοτεινά σημεία και οι κροσσοί συμβολής των φωτογραφιών από την E.S.P.I. είναι σημεία όπου υπάρχει ταλάντωση. Ανάλογα με τις διαβαθμίσεις του γκρι μεταβάλλεται και το πλάτος της ταλάντωσης. Όσο πλησιάζει

προς το λευκό μειώνεται το πλάτος και στις λευκές περιοχές το πλάτος της ταλάντωσης είναι μηδέν, όπου υπάρχουν οι λεγόμενοι “δεσμοί ταλάντωσης”. Το μέγιστο πλάτος ταλάντωσης, είναι ανάλογο με τον αριθμό των κροσσών συμβολής που σχηματίζονται και βρίσκεται στο κέντρο τους, κάνοντάς τις φωτογραφίες αυτές να μοιάζουν με υψομετρικούς χάρτες, όπου κάθε κροσσός υποδηλώνει ένα υψόμετρο.

#### 4.1.2 Ηχοβόλιση με ηχείο.

Η ηχοβόλιση του καπακιού έγινε με ένα monitor ηχείο (τα χαρακτηριστικά του αναφέρονται αναλυτικά στην ενότητα 3.3.1) με ημιτονικά σήματα που παρήγαγε μια γεννήτρια. Ο χειριστής ανέβαζε σταδιακά τη συχνότητα καταγράφοντας μετρήσεις όπου ανιχνεύονταν βασικές συχνότητες συντονισμού (modes), αλλά και ενδιάμεσες με καλή διακριτότητα, οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον καθώς είναι κι αυτές κριτήριο καλής συμπεριφοράς μιας δονούμενης επιφάνειας όπως η ηχητική πλάκα ενός μουσικού οργάνου.



Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, ο χειριστής ανέβαζε σταδιακά τη συχνότητα καταγράφοντας εικόνες συμβολής όπου ανιχνεύονταν βασικές συχνότητες συντονισμού (modes).

[Δείτε το αντίστοιχο βίντεο πατώντας εδώ.](#)

Σχήμα 4.1.4

Το εύρος μελέτης είναι από 50 Hz έως 1500 Hz (όπου εκεί βρίσκονται όλες οι βασικές συχνότητες της ακουστικής εκπομπής του οργάνου και κάποιες βασικές αρμονικές), ενώ έγινε προσπάθεια να διατηρηθεί η ένταση κατά το δυνατόν σταθερή. Αυτή η μέθοδος διέγερσης παρουσιάζει το

πλεονέκτημα ότι δεν προσθέτει επιπλέον βάρος πάνω στο καπάκι του οργάνου το οποίο μπορεί να επηρεάσει τους τρόπους δόνησης του, πράγμα εξαιρετικά σημαντικό για τη παρούσα εργασία αφού αυτό ακριβώς πραγματεύεται. Δυστυχώς όμως παρουσιάζονται και μειονεκτήματα, όπως η συμμετοχή της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου όπου δημιουργούνται αρμονικά, στάσιμα κύματα και άλλοι ανεπιθύμητα ακουστικά φαινόμενα που αλλοιώνουν το αρχικό ημιτονικό κύμα με το οποίο διεγείρεται η επιφάνεια του καπακιού. Επίσης η ύπαρξη της βάσης στήριξης, του υπό μελέτη καπακιού, δημιουργεί κόμβους στα σημεία επαφής της βάσης με τη δονούμενη επιφάνεια. Γενικά μιλώντας, ο τρόπος στήριξης πρέπει να προσομοιάζει τον τρόπο στήριξης του οργάνου από τον μουσικό κατά την εκτέλεσή του.

## 4.2 Οι καταστάσεις του καπακιού (PlayModes).

Όπως έχει αναφερθεί, η τεχνική με την οποία γίνεται η μεταβολή της μάζας του καπακιού, είναι το γέμισμα και άδειασμα σωλήνων από λατέξ, με απιονισμένο νερό κάτω από τα καμάρια. Έγιναν δοκιμές με 2 και 3 σωλήνες, τοποθετημένους κάτω από τα καμάρια, πλησίον της Γέφυρας αφού αυτή η περιοχή είναι και η πλέον δραστήρια όπως διαπιστώθηκε και από τις μετρήσεις. Η αρχική προσέγγιση που έγινε, αφορά τις δυο θεμελιώδεις καταστάσεις του σωλήνα δηλαδή τη κατάσταση ΑΔΕΙΟ και την κατάσταση ΓΕΜΑΤΟ. Αυτή η προσέγγιση έδινε για τους 2 σωλήνες  $2^2 = 4$  διαφορετικές καταστάσεις (PlayModes), και  $2^3 = 8$  διαφορετικές καταστάσεις (PlayModes) για τους 3 σωλήνες. Για αυτή τη γραπτή αναφορά, επιλέχθηκε να παρουσιαστούν οι μετρήσεις που αφορούν τους 2 σωλήνες καθότι οι μεταβολές ήταν πιο ξεκάθαρες.

Θα παρουσιαστούν λοιπόν οι μετρήσεις με την κωδική ονομασία:

**x00 - PlayModeZero** → Σημαίνει **κάτω και πάνω σωλήνας άδειος**.

**x01 - PlayMode1** → Σημαίνει **κάτω σωλήνας άδειος και πάνω σωλήνας γεμάτος**.

**x10 - PlayMode2** → Σημαίνει **κάτω σωλήνας γεμάτος και πάνω σωλήνας άδειος**.

**x11 - PlayMode3** → Σημαίνει **κάτω και πάνω σωλήνας γεμάτος**.

Είναι προφανές ότι η υλοποίηση που έγινε, με το σύστημα κλειστού βρόχου, δίνει τη δυνατότητα να έχουμε όλες τις ενδιάμεσες καταστάσεις του κάθε σωλήνα και όχι μόνο τις δυο ακραίες (ΑΔΕΙΟ και ΓΕΜΑΤΟ). Αυτή η επιλογή υλοποίησης μπορεί να δώσει άπειρες διαφορετικές καταστάσεις καπακιού (PlayModes) για άπειρα (μέσα σε ένα λογικό εύρος) ηχοχρώματα στο λαούτο.

## > Η μεταφερόμενη Μάζα.

Η μάζα που προστέθηκε στο αρχικό καπάκι του λαούτου ήταν οι δυο σωλήνες από λατέξ μήκους 260 mm ο καθένας, οι οποίοι ζύγιζαν 12 gr ο καθένας (με την τάπα) όταν ήταν άδειοι. Στο καπάκι επίσης προστέθηκε η θερμόκολλα σιλικόνης που χρησιμοποιήθηκε για στηριχθούν οι σωλήνες κάτω από τα καμάρια η οποία ζύγιζε 2 gr για τον καθένα. Συνολικά προστέθηκαν από τους σωλήνες και την κόλλα 28 gr εφάπαξ. Εκτός βέβαια από τη μάζα που προστέθηκε λόγω του υδραυλικού συστήματος του αυτοματισμού, έχει καταγραφεί και η μάζα που μεταφέρεται από το απιονισμένο νερό μέσα στους σωλήνες από την αντλία, η οποία για τις μετρήσεις με την ESPI ήταν 17 gr για τον καθένα.

### Η ΜΑΖΑ ΤΟΥ ΚΑΠΑΚΙΟΥ ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ.

Κατάσταση Καπακιού.	Μάζα (gr)
Αρχικά χωρίς καμιά παρέμβαση.	250
Με το υδραυλικό κύκλωμα.	$250+28=278$
Στην κατάσταση καπακιού x00 - PlayModeZero	278
Στην κατάσταση καπακιού x01 - PlayMode1	$278+17=295$
Στην κατάσταση καπακιού x10 - PlayMode2	$278+17=295$
Στην κατάσταση καπακιού x11 - PlayMode3	$278+2*17=312$

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια των μετρήσεων δεν υιοθετήθηκαν ακραίες τιμές πίεσης του νερού μέσα στους σωλήνες, για λόγους ασφαλείας, καθότι θεωρήθηκε υπερβολικά τολμηρό να ταλαντωθούν σωλήνες υπό υψηλή πίεση λόγω του κίνδυνου διαρροών και κατά συνέπεια πιδάκων νερού σε μια τέτοια εγκατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι δεν επετεύχθη η μέγιστη μεταφορά μάζας στο καπάκι με ότι αυτό συνεπάγεται για την επίδραση επιπλέον μάζας στις μετρήσεις και εν τέλει στην ακουστική συμπεριφορά της ηχητικής πλάκας λαούτου. Σε πειραματικές δοκιμές που έγιναν εκτός της διάταξης ESPI, η συσκευή κατόρθωσε να μεταφέρει, για τους δεδομένους σωλήνες των 9 mm, μέχρι και 25 gr στον καθένα.



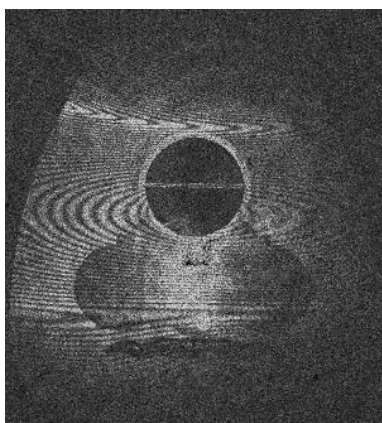
Οι σωλήνες λατέξ κολλημένοι στα καμάρια κατά τη διάρκεια των μετρήσεων.

Σχήμα 4.2.1

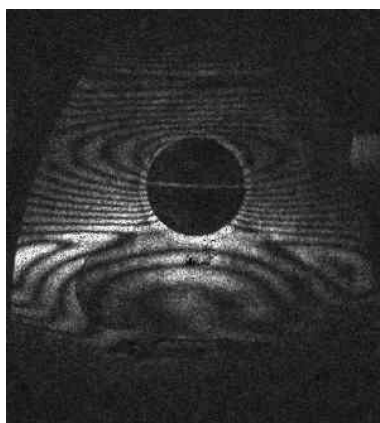
### 4.3 Τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Σ' αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται οι εικόνες συμβολής (μετρήσεις), που προέκυψαν από την εφαρμογή της τεχνικής E.S.P.I. στο καπάκι λαούτου, για τις διάφορες καταστάσεις του (PlayModes) καθώς και μια σύντομη περιγραφή και ερμηνεία των μετρήσεων.

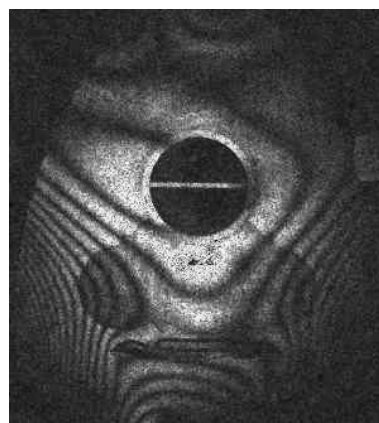
#### 4.3.1 Αποτελέσματα μέτρησης για την κατάσταση καπακιού x00 PlayModeZero



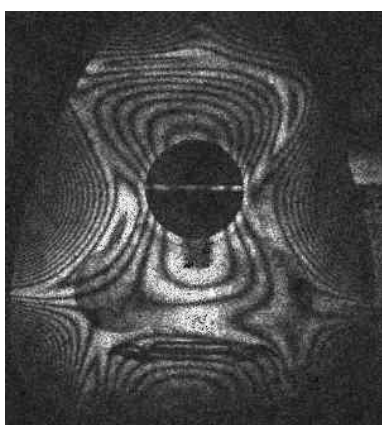
131 Hz



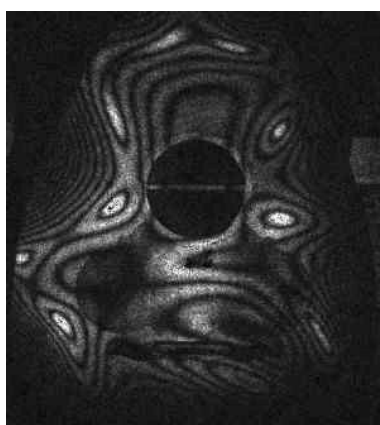
230 Hz



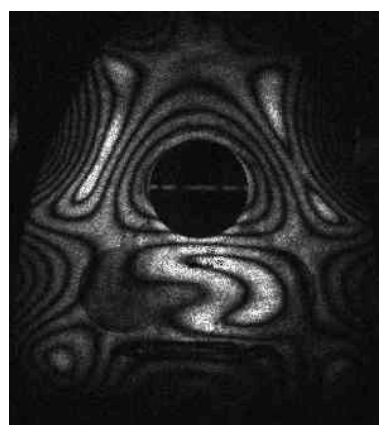
314 Hz



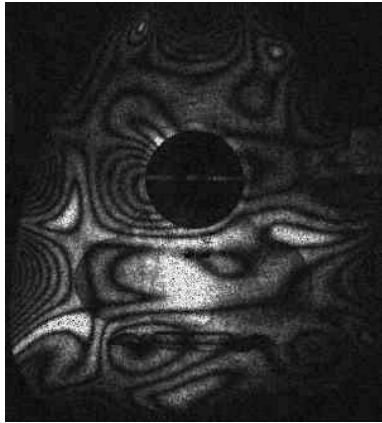
404 Hz



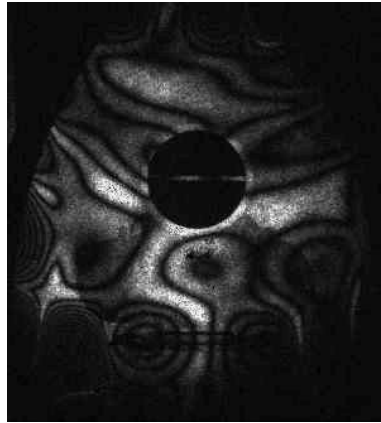
537 Hz



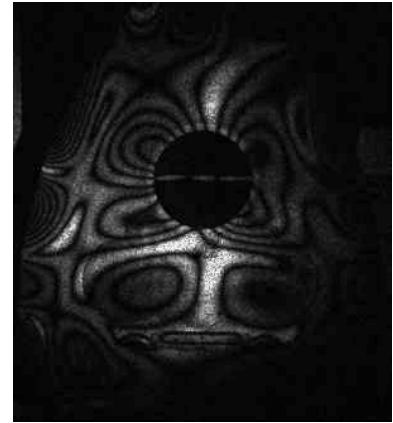
585 Hz



855 Hz



1096 Hz



1210 Hz

Οι μετρήσεις για την κατάσταση καπακιού x00 - **PlayModeZero**

Σχήμα 4.3.1

### ↳ Παρατηρήσεις για την κατάσταση καπακιού x00-PlayModeZero

Ξεκινώντας τις μετρήσεις από τα 50 Hz (με τους σωλήνες και τους 2 άδειους) και αυξάνοντας σταδιακά τη συχνότητα, από τον επιλογέα της γεννήτριας, μέχρι τα 1500 Hz παρατηρήθηκαν 9 συντονισμοί (modes). Στις χαμηλές συχνότητες, ο πρώτος απαντάται στα 131 Hz με έναν ευδιάκριτο κεντρικό λοβό κροσσών στην ηχητική οπή του οργάνου, ο δεύτερος στα 230 Hz όπου έχουμε 2 λοβούς κροσσών στον κεντρικό κατακόρυφο άξονα, ο τρίτος στα 314 Hz όπου σχηματίζεται ένας παρ' ολίγον σταυρός από 3 λοβούς κροσσών, δεξιά, αριστερά και κάτω (λείπει ο πάνω) από την ηχητική οπή. Ο τέταρτος συντονισμός βρίσκεται στα 404 Hz όπου εμφανίζονται ένας σταυρός από 4 λοβούς κροσσών, δεξιά, αριστερά, κάτω και πάνω από την ηχητική οπή, μαζί με άλλους 3 κάτω και συμμετρικά από τη γέφυρα του οργάνου.

Στις μεσαίες συχνότητες έχουμε 2 καταστάσεις συντονισμού, με την πρώτη να βρίσκεται στα 537 Hz και τη δεύτερη να είναι στα 585 Hz, αφήνοντας μια νεκρή ζώνη 133 Hz χωρίς διακριτές, αξιομνημόνευτες καταστάσεις συντονισμού για τη μετάβαση από τις χαμηλές συχνότητες στις μεσαίες. Η δεύτερη κατάσταση στα 585 Hz μπορεί να χαρακτηριστεί ως βασικός συντονισμός με 9 λοβούς κροσσών, σε 3 σειρές των τριών λοβών. Όπως διαπιστώνεται εύκολα από τις εικόνες συμβολής, τα σχήματα είναι πιο πολύπλοκα από τις χαμηλές συχνότητες έχοντας όμως μικρότερα πλάτη ταλάντωσης. Στη μεταβατική περιοχή, από τις μεσαίες στις υψηλές συχνότητες, και συγκεκριμένα στα 855 Hz υπάρχει μια κατάσταση συντονισμού με αρκετά πολύπλοκο σχήμα αλλά αρκετά ξεκάθαρη, έχοντας 3 λοβούς κροσσών στην αριστερή πλευρά, 5 λοβούς κροσσών στον κατακόρυφο άξονα και αρκετούς δεξιά, περιμετρικά.

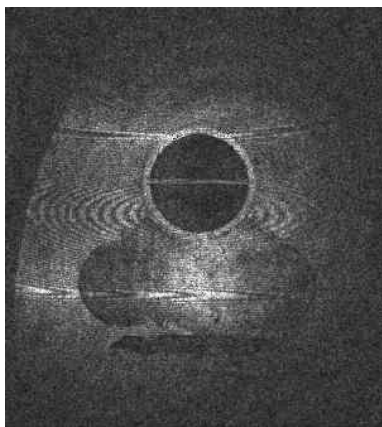
Στην υψηλή περιοχή συχνοτήτων, άνω των 1000 Hz, υπάρχει πρώτα μια κατάσταση στα 1096 Hz με λοβούς μεγάλου πλάτους στο κάτω μισό του καπακιού, ενώ στο πάνω μισό έχουμε πολύ μικρές



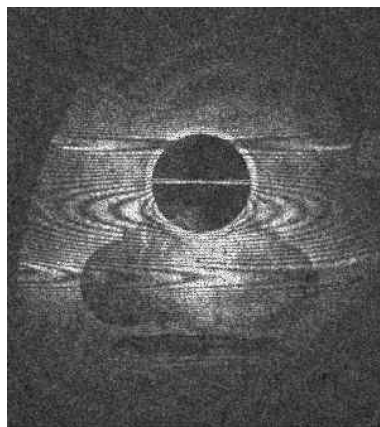
κινήσεις. Στα 1210 Hz ανιχνεύτηκε ένας συντονισμός με εμφανείς 6 λοβούς κροσσών γύρω από την οπή. Στην αριστερή περιοχή του καπακιού επίσης η επιφάνεια του ταλαντώνεται σημαντικά σε 2 σημεία ψηλά και λιγότερο σε άλλα 2 χαμηλά. Στη δεξιά περίμετρο δεν έχουμε ευδιάκριτους λοβούς κροσσών. Αυξάνοντας περαιτέρω τη συχνότητα διέγερσης δεν διαπιστώθηκε κάποια αξιόλογη κατάσταση συντονισμού, όπως αναμενόταν, αφού η καμπύλη απόκρισης ενός λαούτου δεν υποστηρίζεται σε τόσο υψηλές συχνότητες.

### 4.3.2 Αποτελέσματα μέτρησης για την κατάσταση καπακιού x01

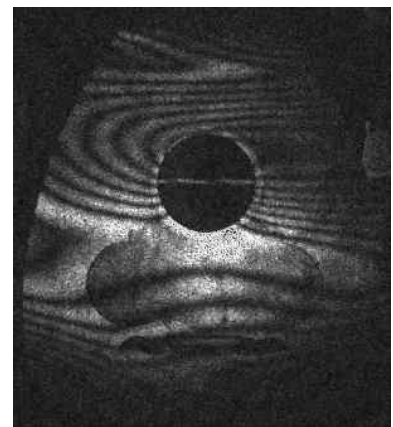
#### PlayMode1



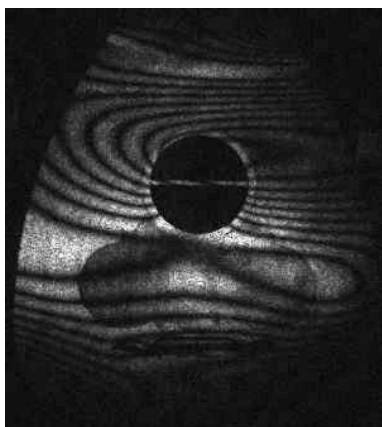
125 Hz



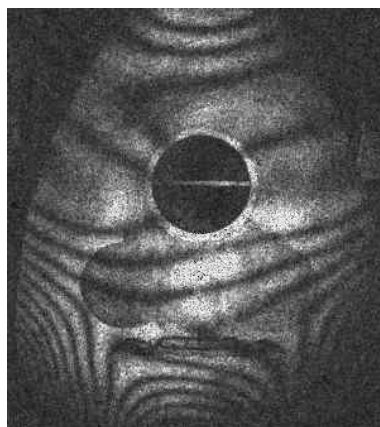
131 Hz



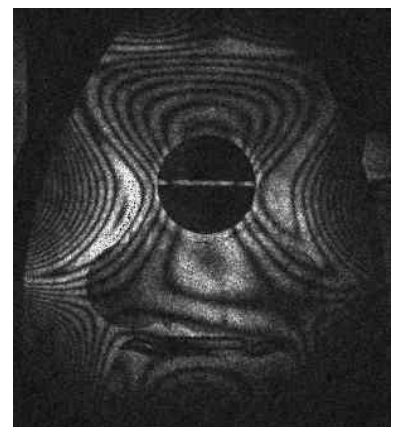
230 Hz



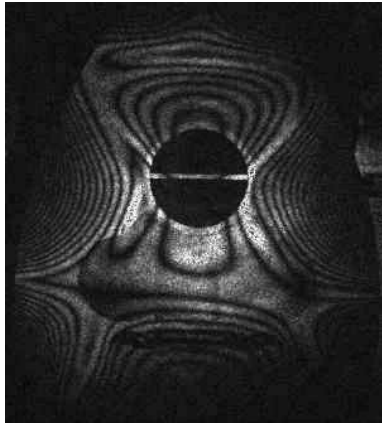
238 Hz



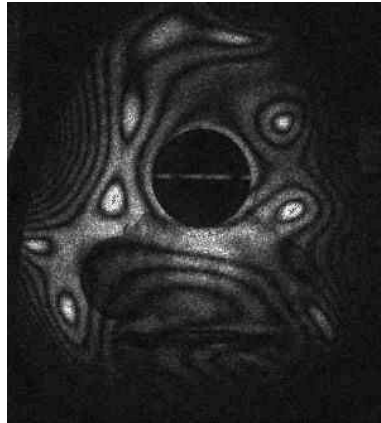
314 Hz



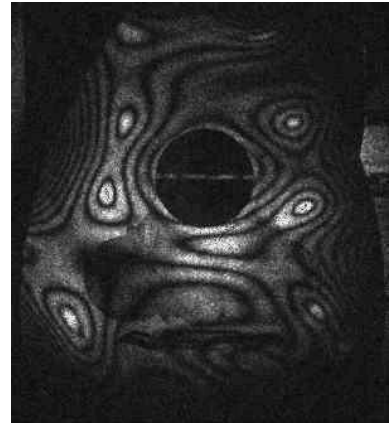
396 Hz



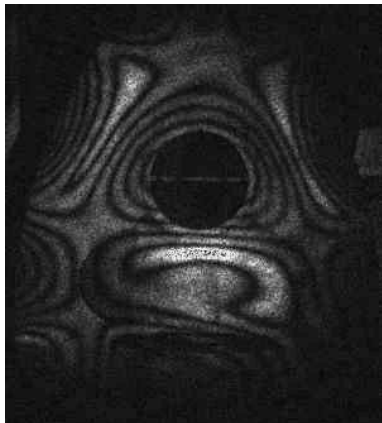
404 Hz



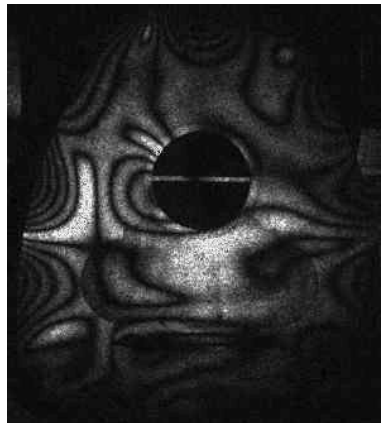
537 Hz



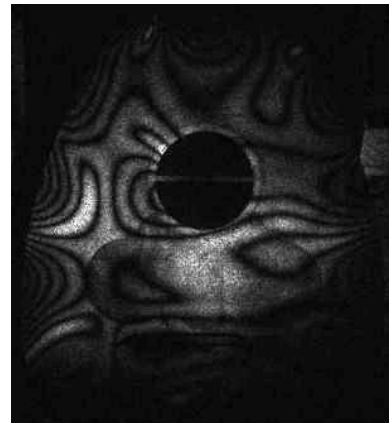
542 Hz



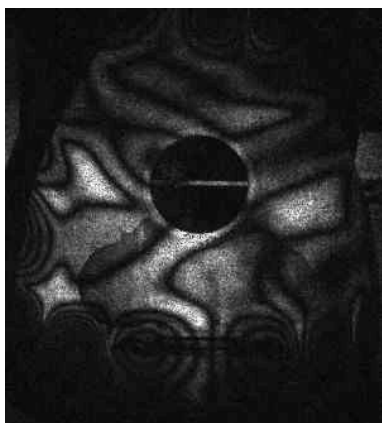
585 Hz



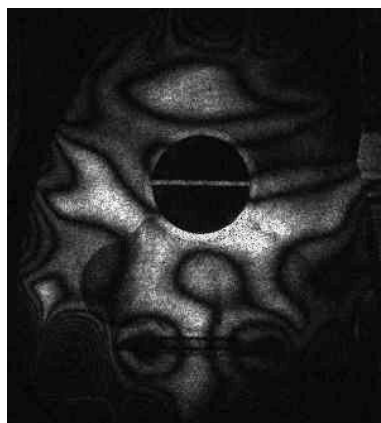
845 Hz



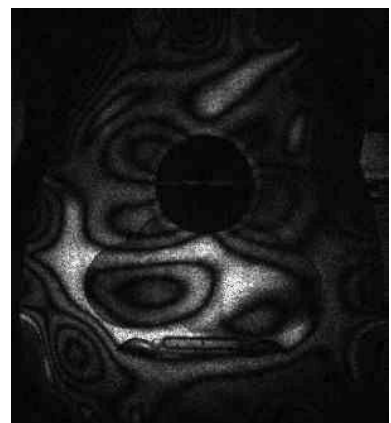
855 Hz



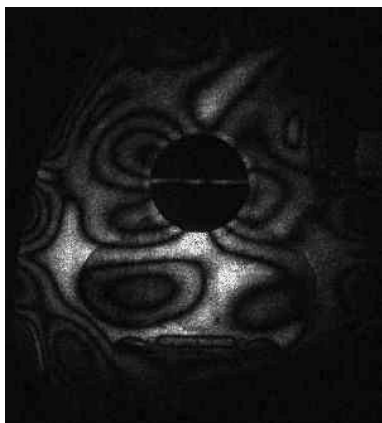
1081 Hz



1096 Hz



1201 Hz



1210 Hz

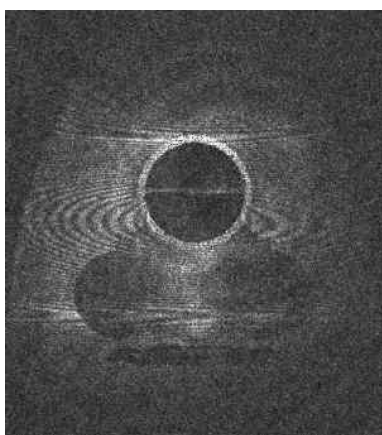
Οι μετρήσεις για την κατάσταση καπακιού x01

**PlayMode1**

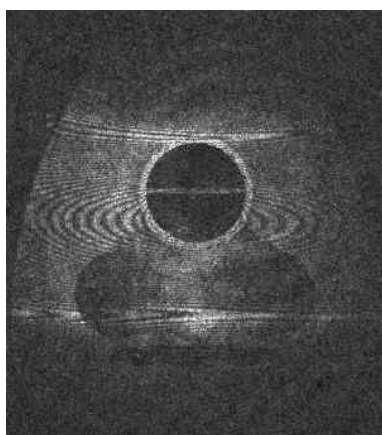
Σχήμα 4.3.2

### 4.3.3 Αποτελέσματα μέτρησης για την κατάσταση καπακιού x10

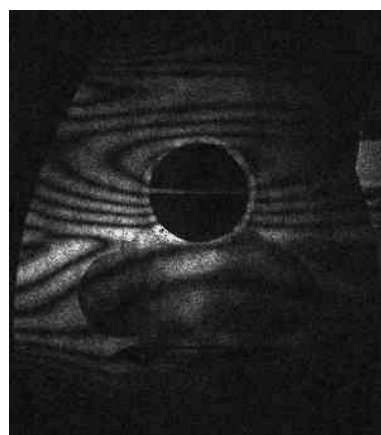
**PlayMode2**



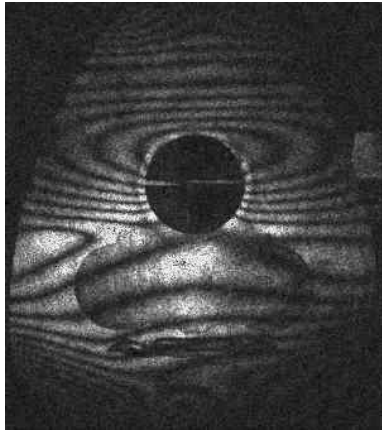
129 Hz



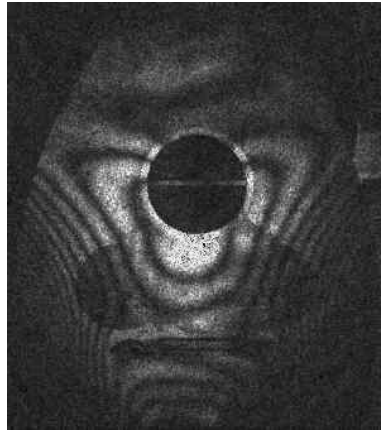
131 Hz



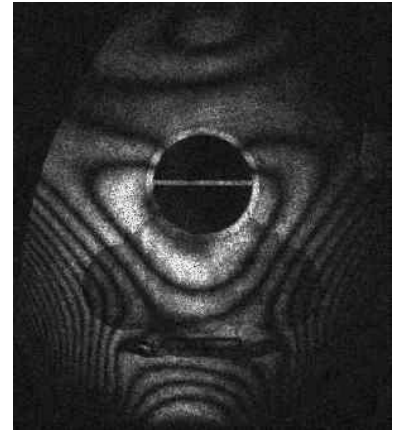
228 Hz



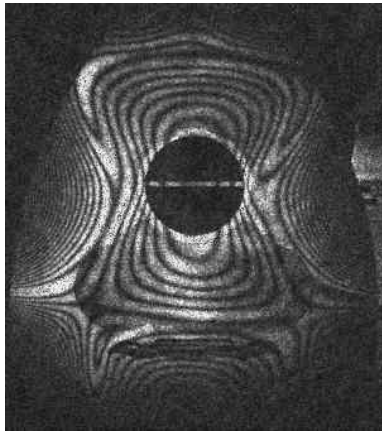
230 Hz



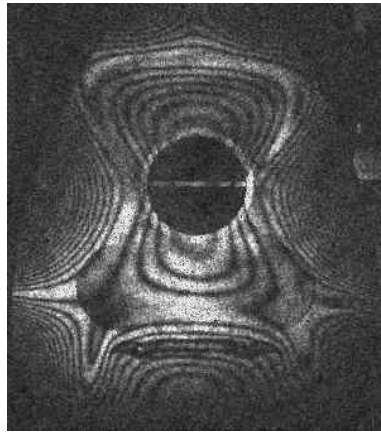
310 Hz



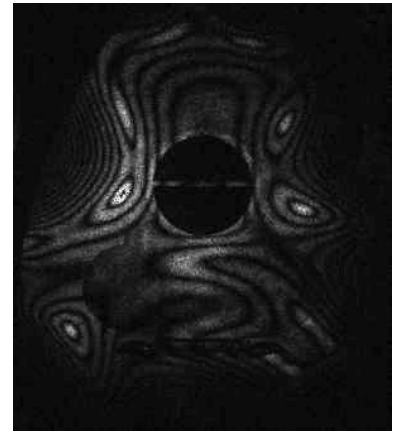
314 Hz



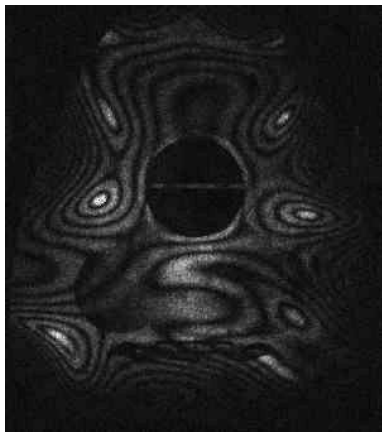
397 Hz



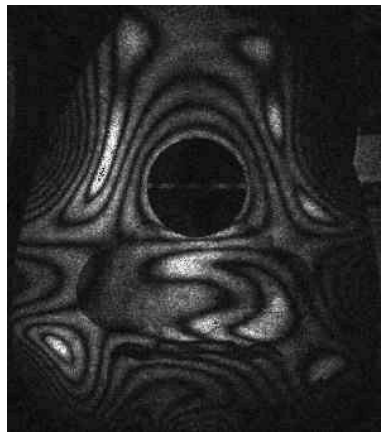
404 Hz



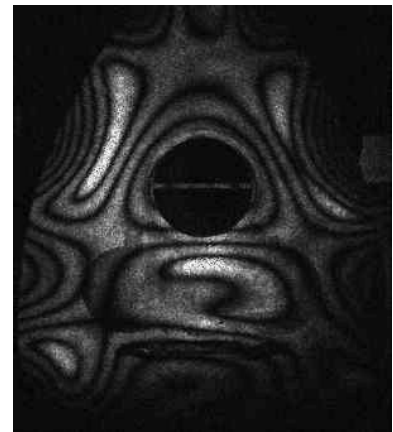
537 Hz



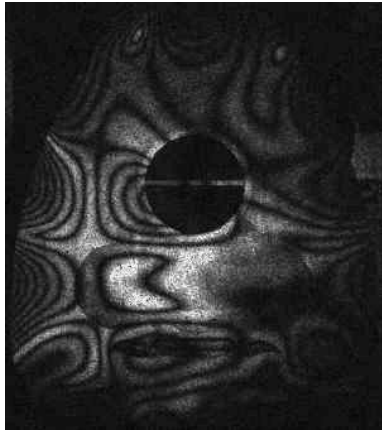
544 Hz



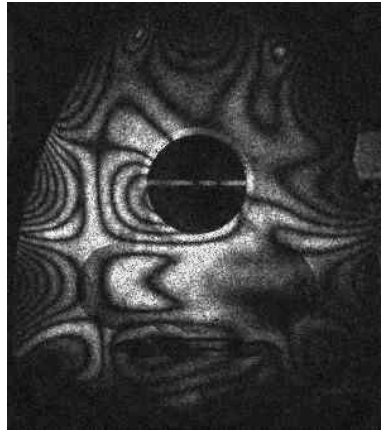
560 Hz



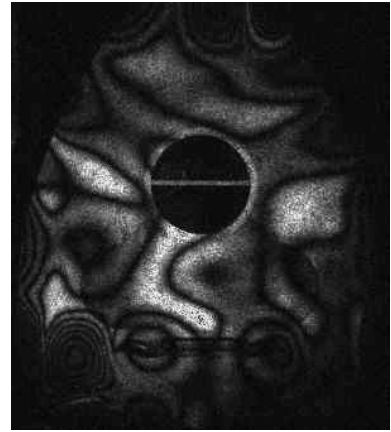
585 Hz



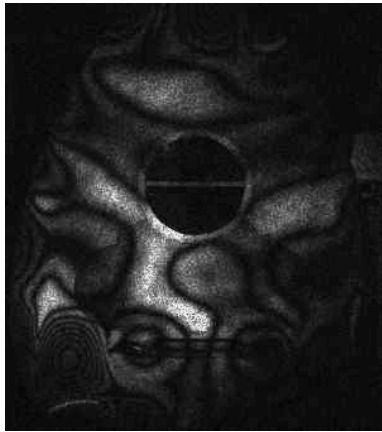
854 Hz



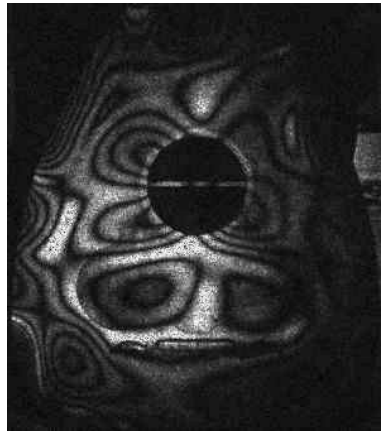
855 Hz



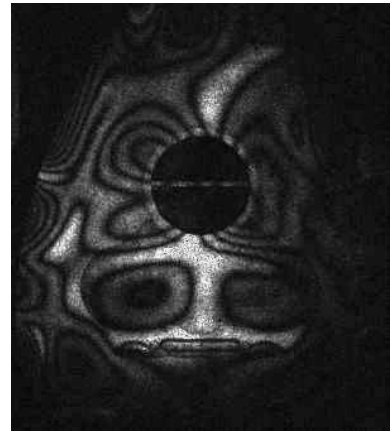
1084 Hz



1096 Hz



1198 Hz



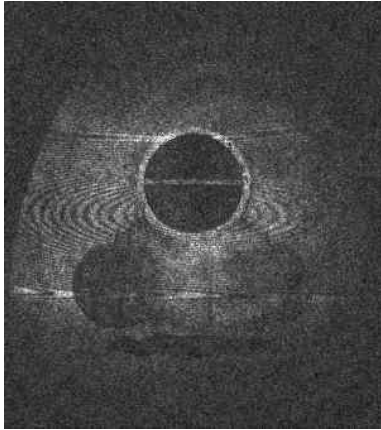
1210 Hz

Οι μετρήσεις για την κατάσταση καπακιού x10 - **PlayMode2**

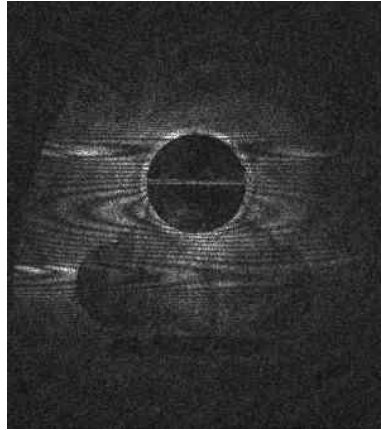
Σχήμα 4.3.3

#### 4.3.4 Αποτελέσματα μέτρησης για την κατάσταση καπακιού x11

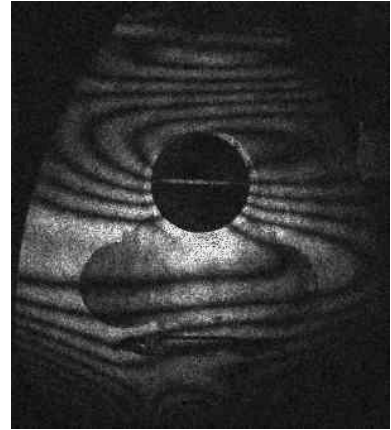
PlayMode3



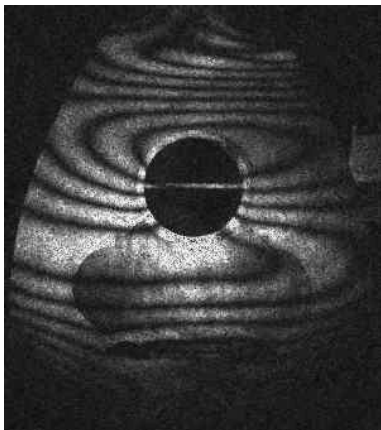
125 Hz



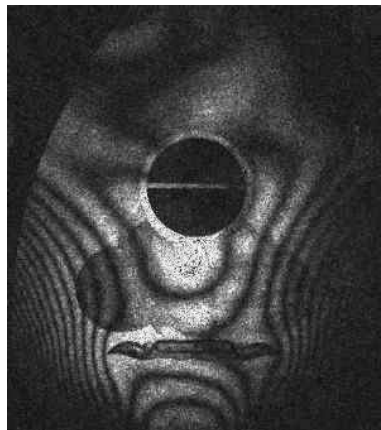
131 Hz



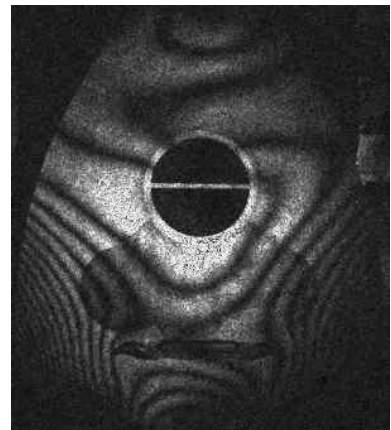
230 Hz



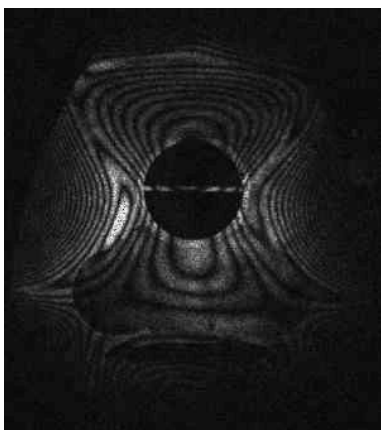
240 Hz



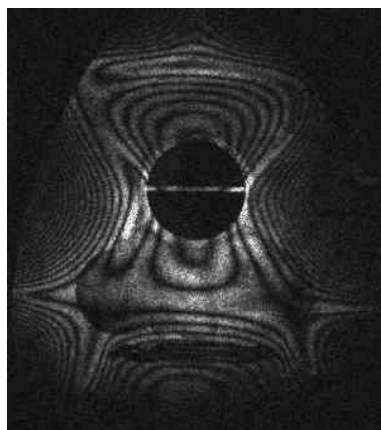
309 Hz



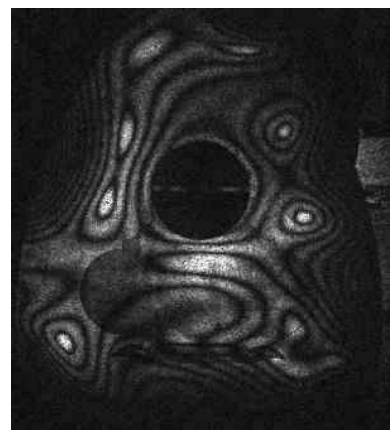
314 Hz



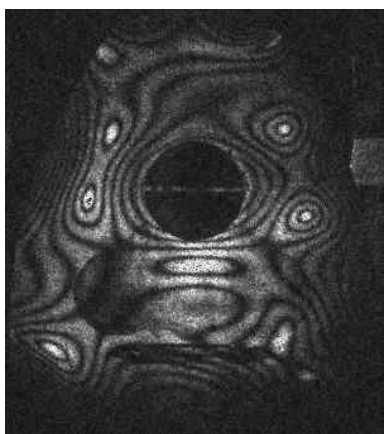
394 Hz



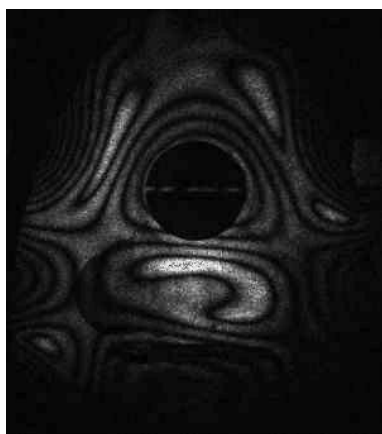
404 Hz



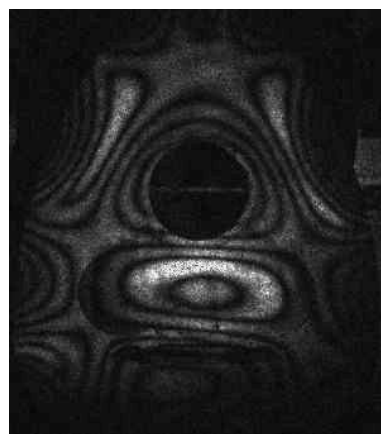
537 Hz



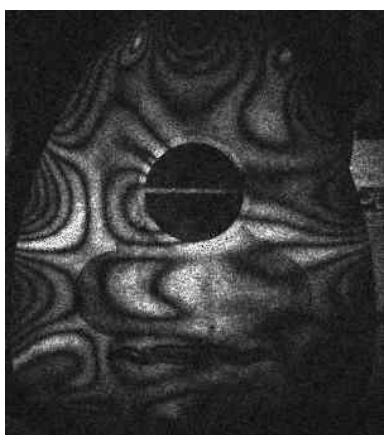
544 Hz



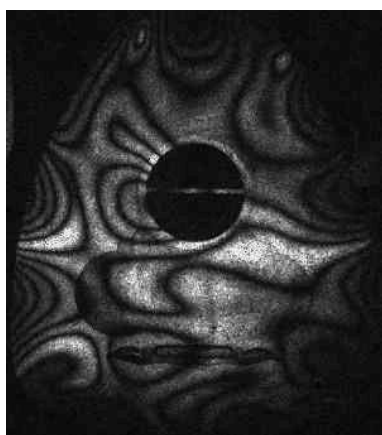
577 Hz



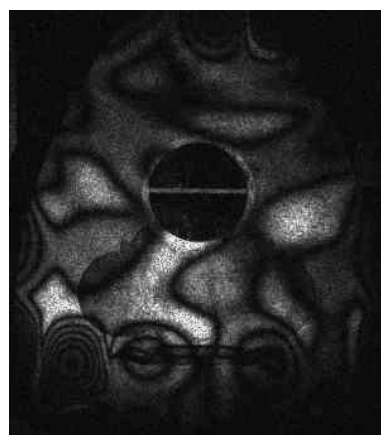
585 Hz



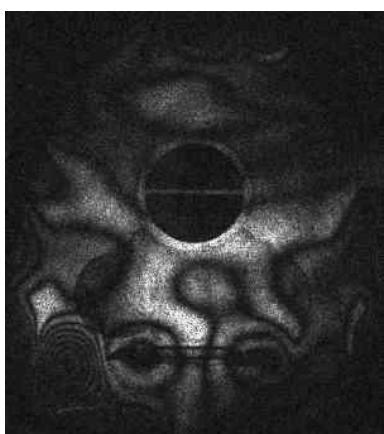
855 Hz



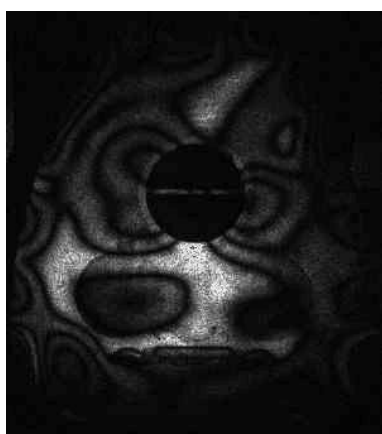
858 Hz



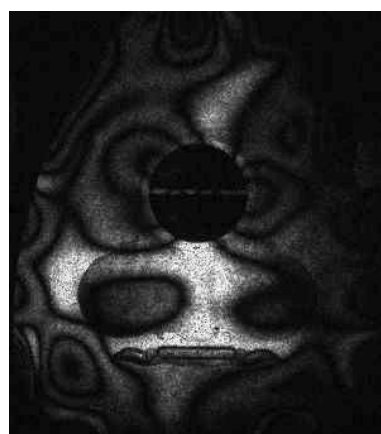
1083 Hz



1096 Hz



1210 Hz



1227 Hz

Οι μετρήσεις για την κατάσταση καλακιού x11 - **PlayMode3**

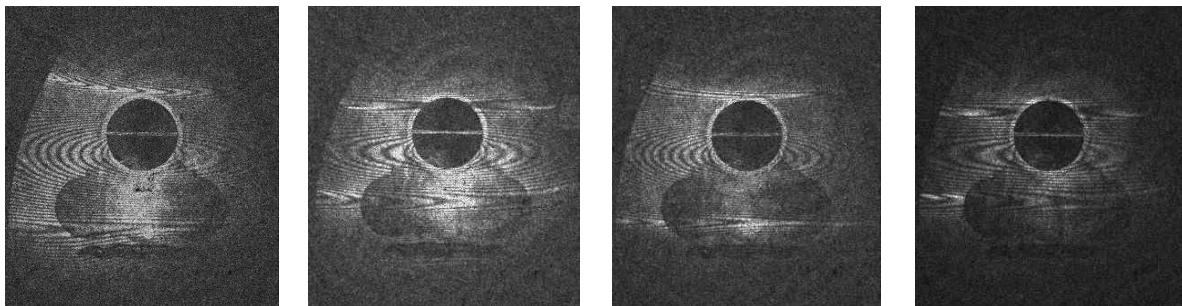
Σχήμα 4.3.4

## ↳ Παρατηρήσεις για τις υπόλοιπες καταστάσεις του καπακιού.

Από τις μετρήσεις για τις υπόλοιπες καταστάσεις του καπακιού (PlayModes), με τον ίδιο τρόπο, ίδια ένταση ηχείου και διατηρώντας κατά το δυνατόν όλες τις συνθήκες ίδιες, ξεκινώντας από τα 50 Hz και αυξάνοντας σταδιακά τη συχνότητα από τον επιλογέα της γεννήτριας έως τα 1500 Hz παρατηρήθηκαν και πάλι οι 9 συντονισμοί (modes) με μικρές διαφορές, σε όλες τις καταστάσεις. Η σημαντική μεταβολή που προέκυψε αφορά τις τιμές των συχνοτήτων που συναντώνται αυτοί οι ιδιοσυντονισμοί καθώς έχουν μετακινηθεί κατά κάποια Hertz, πάνω ή κάτω, από τη συχνότητα που παρατηρήθηκε στην αρχική κατάσταση (PlayModeZero).

### 4.3.5 Σύγκριση Μετρήσεων Α'

Για να γίνουν πιο εύληπτες αυτές οι μεταβολές, αρχικά θα γίνει μια συγκριτική παράθεση των μετρήσεων, δηλαδή των εικόνων συμβολής και για τις τέσσερις καταστάσεις του καπακιού (PlayModes), με αναφορά τις αρχικές συχνότητες συντονισμού (ιδιοσυντονισμούς) που παρατηρήθηκαν στην κατάσταση καπακιού x00 (PlayModeZero).



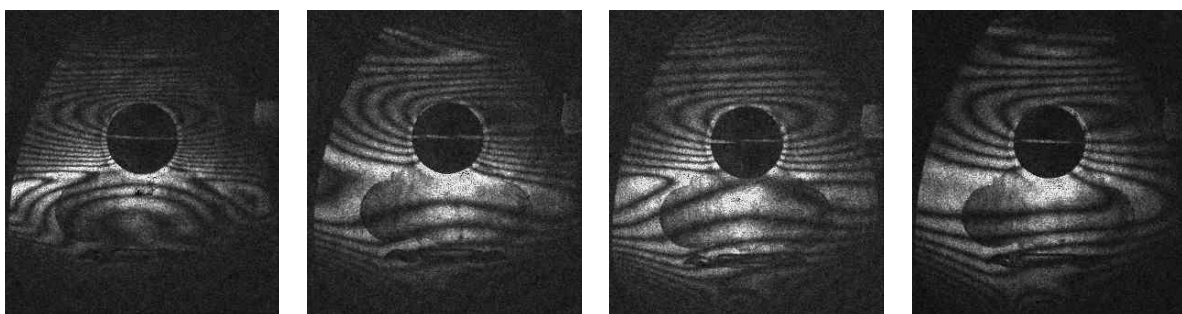
x00

x01

x10

x11

131 Hz



x00

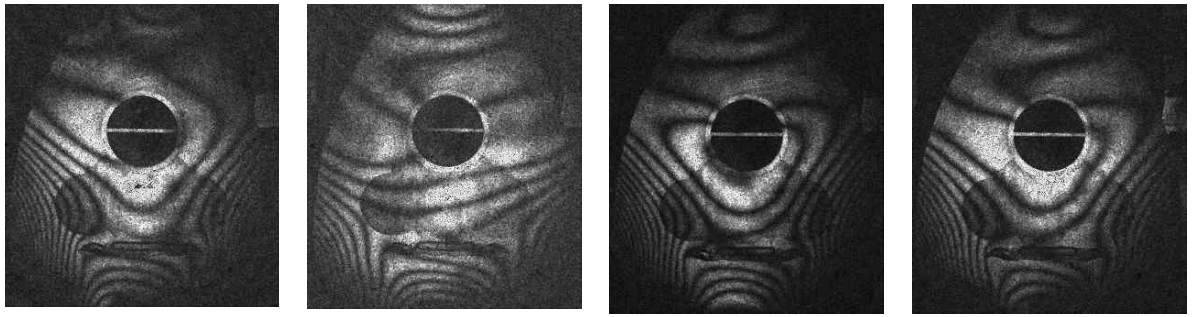
x01

x10

x11

230 Hz





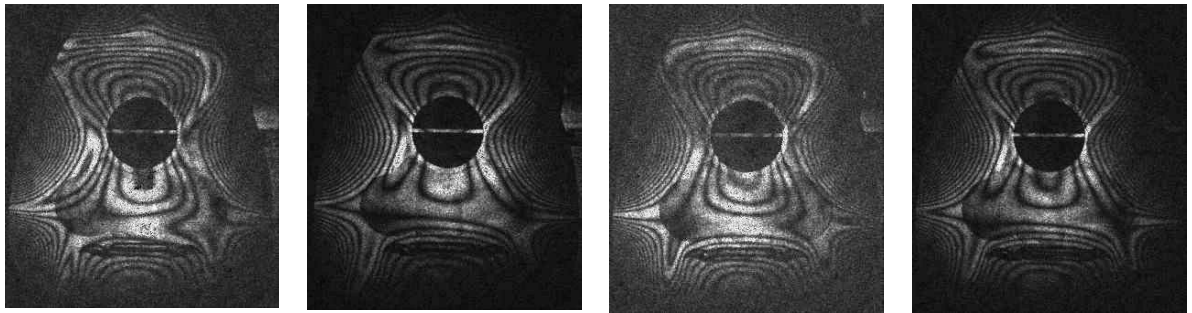
x00

x01

x10

x11

314 Hz



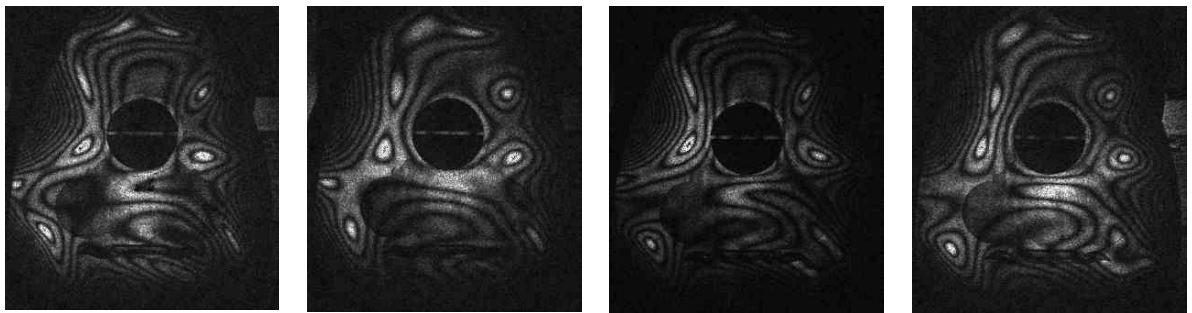
x00

x01

x10

x11

404 Hz



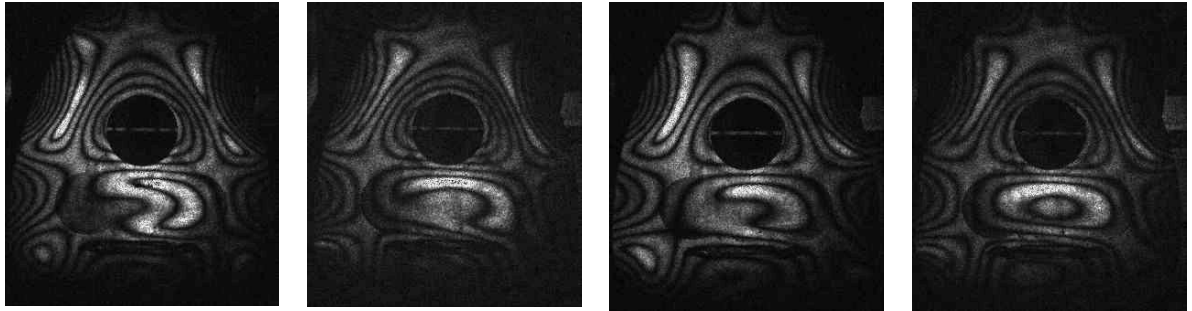
x00

x01

10

x11

537 Hz



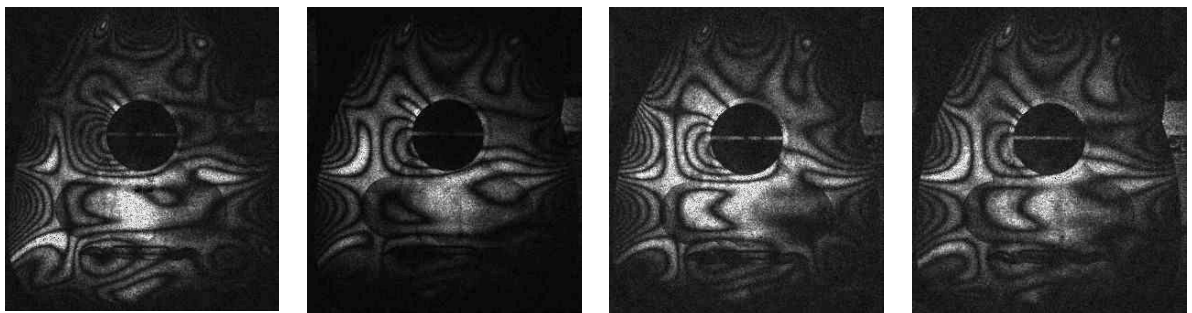
x00

x01

x10

x11

585 Hz



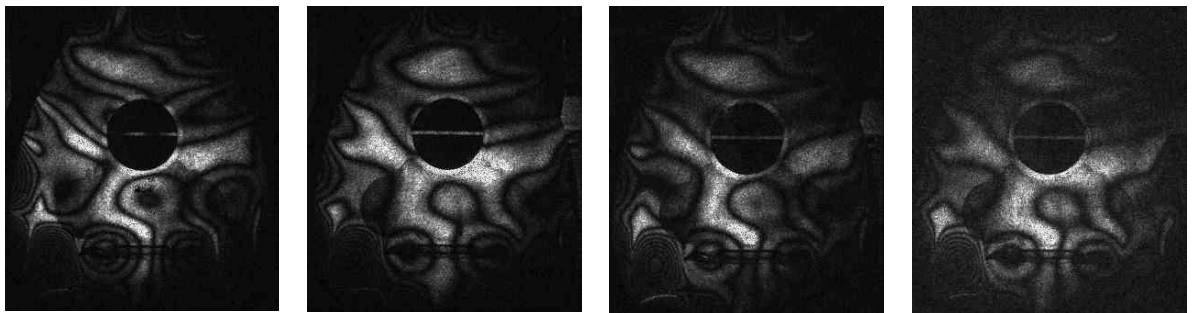
x00

x01

x10

x11

855 Hz



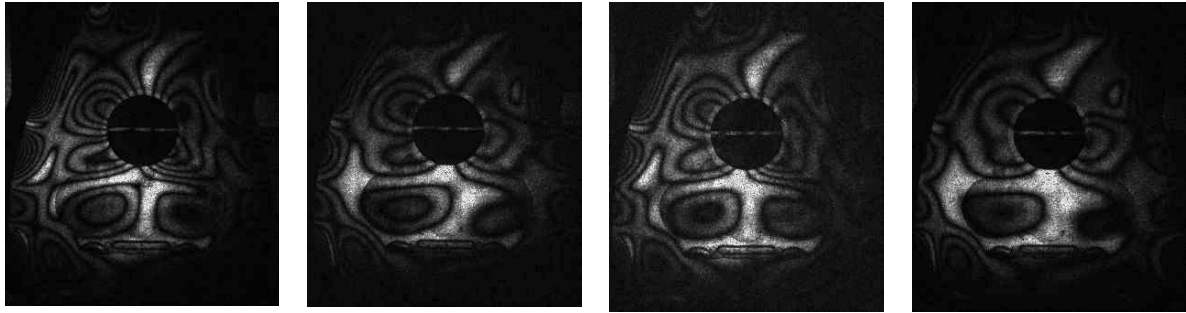
x00

x01

x10

x11

1096 Hz



x00

x01

x10

x11

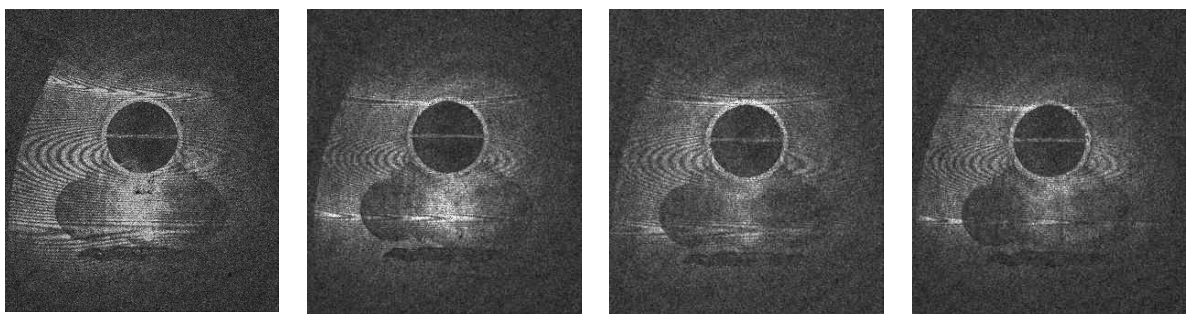
1210 Hz

Οι μετρήσεις για τις τέσσερις καταστάσεις καπακιού, με αναφορά τις συχνότητες ιδιοσυντονισμών του **PlayModeZero**.

Σχήμα 4.3.5

### 4.3.6 Σύγκριση Μετρήσεων Β'

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η συγκριτική παράθεση των μετρήσεων, με αναφορά όχι τις ακριβείς συχνότητες που παρατηρήθηκαν ιδιοσυντονισμοί στην κατάσταση καπακιού x00 (PlayModeZero), όπως έγινε στην προηγούμενη ενότητα, αλλά τις εικόνες συμβολής για τους ιδιοσυντονισμούς αυτούς. Είναι αναμενόμενο οι εικόνες συμβολής των κοινών συντονισμών για τις τέσσερις καταστάσεις του καπακιού (PlayModes) να μην είναι πανομοιότυπες αλλά έγινε προσπάθεια κατά τη σάρωση να καταγραφούν αυτές που μοιάζουν μορφολογικά περισσότερο με αυτές που θεωρήθηκαν ως αναφορά.



131 Hz

125 Hz

129 Hz

125 Hz

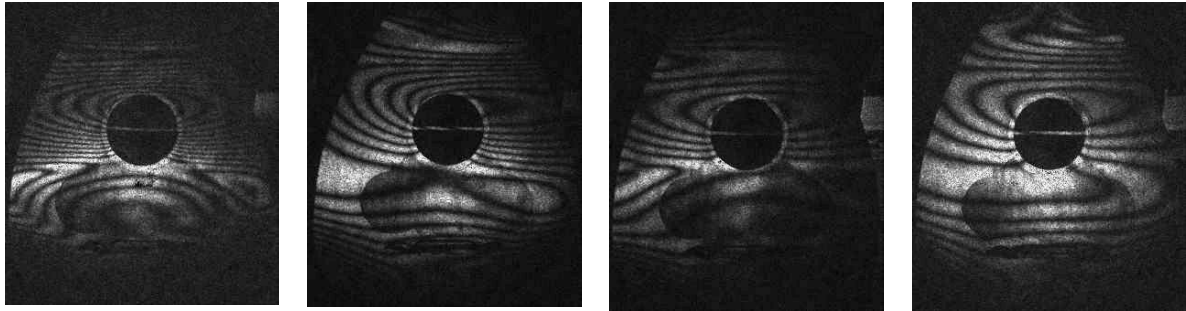
x00

x01

x10

x11

Αναφορά η εικόνα συμβολής στα 131 Hz του PlayModeZero.



230 Hz

238 Hz

228 Hz

240 Hz

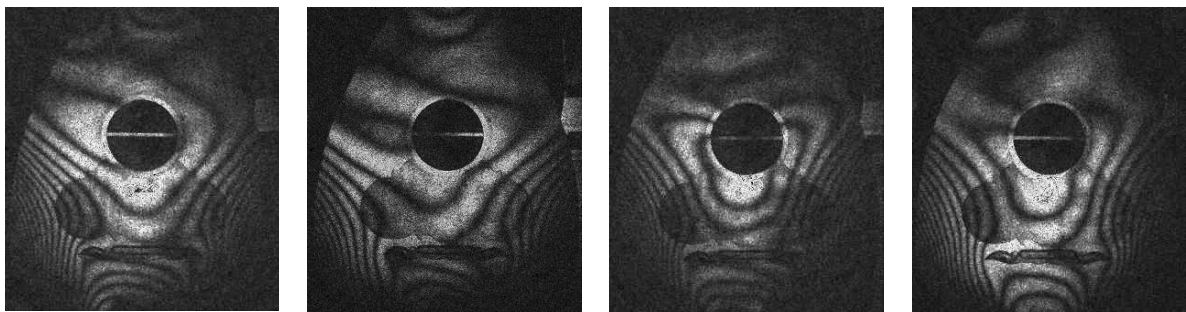
x00

x01

x10

x11

Αναφορά η εικόνα συμβολής στα 230 Hz του PlayModeZero.



314 Hz

309 Hz

310 Hz

309 Hz

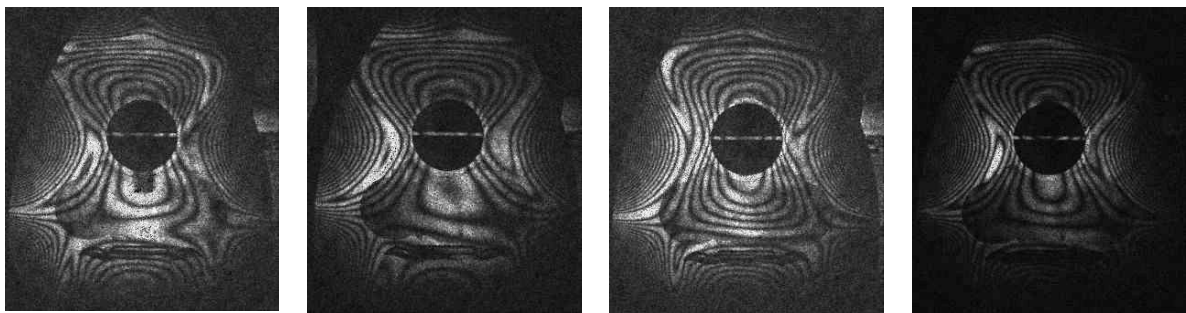
x00

x01

x10

x11

Αναφορά η εικόνα συμβολής στα 314 Hz του PlayModeZero.



404 Hz

396 Hz

397 Hz

394 Hz

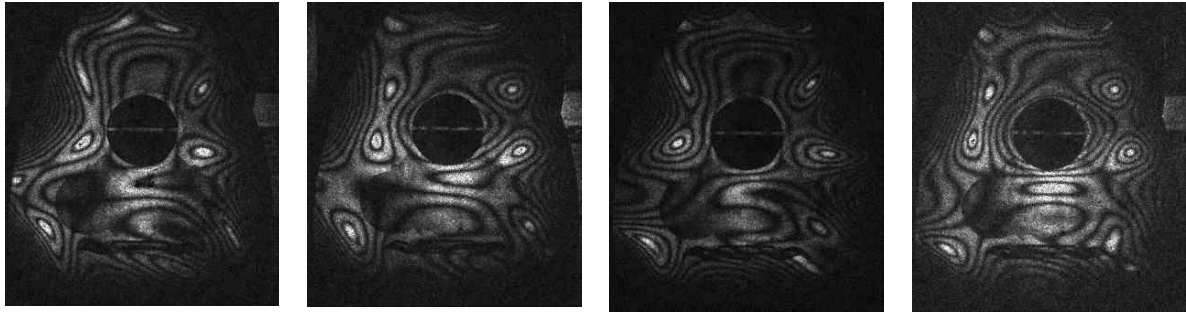
x00

x01

x10

x11

Αναφορά η εικόνα συμβολής στα 404 Hz του PlayModeZero.



537 Hz

542 Hz

544 Hz

544 Hz

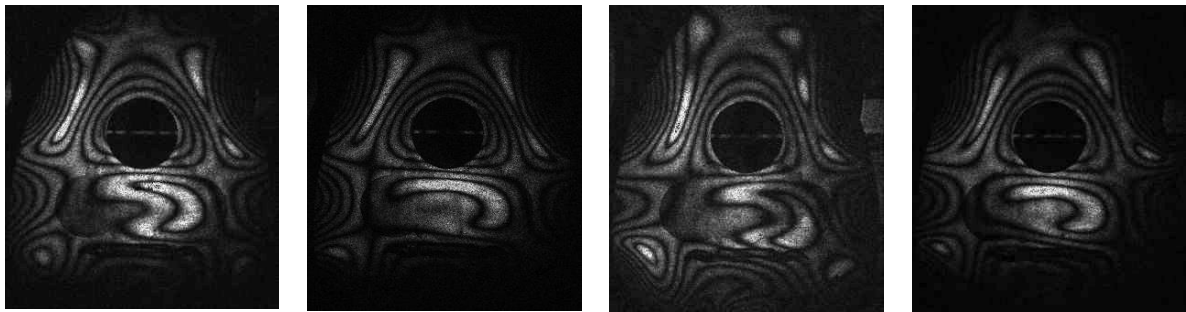
x00

x01

x10

x11

Αναφορά η εικόνα συμβολής στα 537 Hz του PlayModeZero.



585 Hz

583 Hz

560 Hz

577 Hz

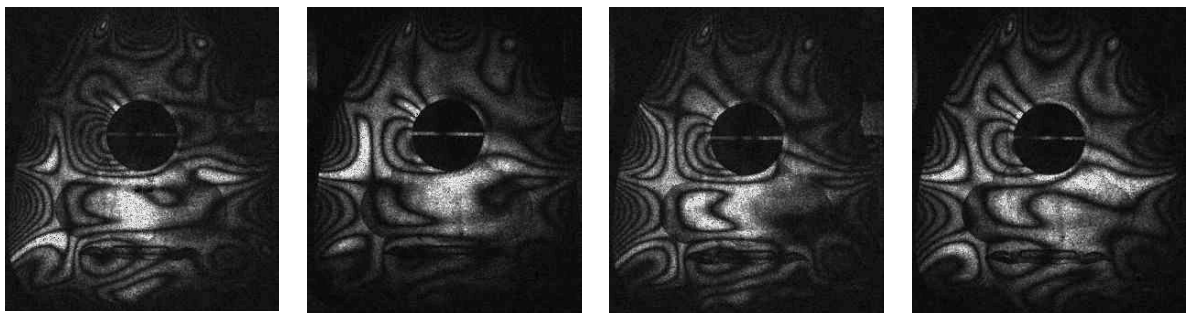
x00

x01

x10

x11

Αναφορά η εικόνα συμβολής στα 585 Hz του PlayModeZero.



855 Hz

845 Hz

854 Hz

858 Hz

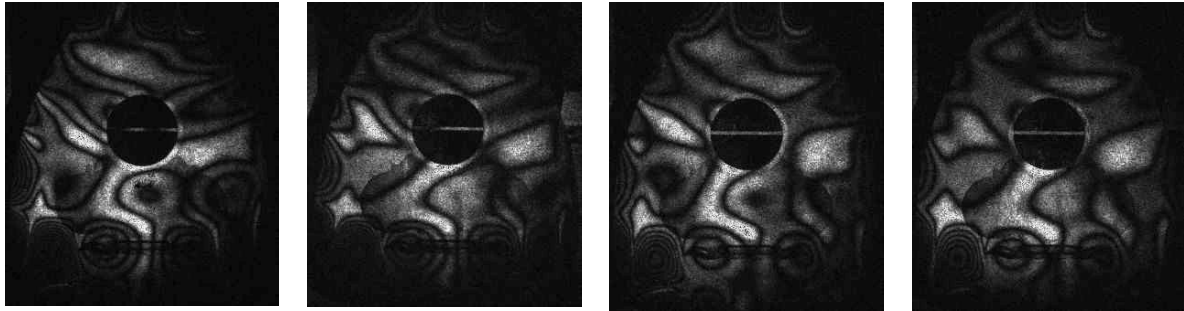
x00

x01

x10

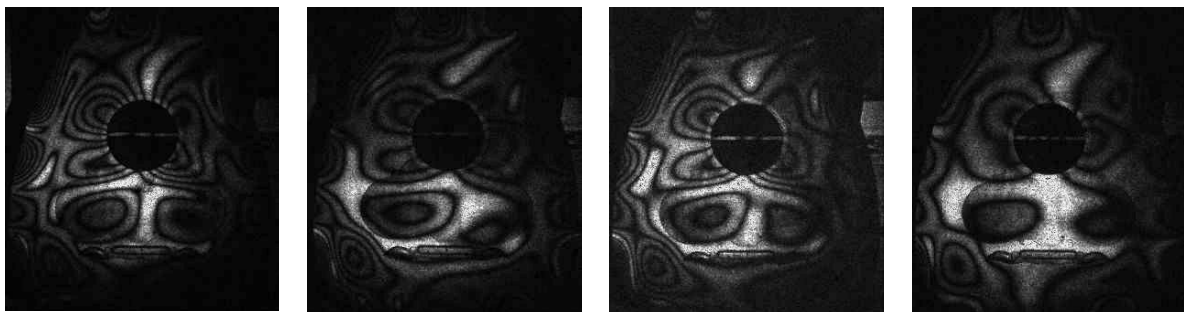
x11

Αναφορά η εικόνα συμβολής στα 855 Hz του PlayModeZero.



1096 Hz	1081 Hz	1084 Hz	1083 Hz
x00	x01	x10	x11

Αναφορά η εικόνα συμβολής στα 1096 Hz του PlayModeZero.



1210 Hz	1201 Hz	1198 Hz	1227 Hz
x00	x01	x10	x11

Αναφορά η εικόνα συμβολής στα 1210 Hz του PlayModeZero.

Οι μετρήσεις των Κοινών Συντονισμών για όλες τις καταστάσεις καπακιού, με **αναφορά** τους ιδιοσυντονισμούς του **PlayModeZero**.

Σχήμα 4.3.6

## 4.4 Ερμηνεία και αξιολόγηση των μετρήσεων.

Ως γενική παρατήρηση μπορεί να καταγραφεί ότι το συγκεκριμένο καπάκι (με τους σωλήνες κολλημένους) αποδίδει ένα ικανοποιητικό εύρος για λαούτο καθώς έχει ισχυρούς συντονισμούς που μπορούν να καταγραφούν με τη μέθοδο της ολογραφικής συμβολομετρίας από τα 131 Hz έως και 1210 Hz. Το πλάτος της ταλάντωσης παρουσιάζει τις μέγιστες τιμές του στις συχνότητες 314 Hz και 404 Hz με λίγο μικρότερα πλάτη ταλάντωσης στην χαμηλότερη και υψηλότερη περιοχή καταγραφής. Επίσης παρατηρήθηκε ότι παρουσιάζονται 2 νεκρές περιοχές από τα 585 Hz έως τα 855 Hz και από τα 855 Hz έως τα 1096 Hz.

Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι κάποιοι από τους σημαντικούς τρόπους δόνησης δεν ανιχνεύτηκαν, οπότε δεν είναι δυνατόν να χαρακτηριστεί ως "πρότυπη" η συμπεριφοράς της συγκεκριμένης ηχητικής πλάκας (καπάκι). Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στα κατασκευαστικά στοιχεία του συγκεκριμένου καπακιού όπως αποδείχθηκε και σε παλαιότερες μελέτες, με τις ίδιες τεχνικές στο ίδιο καπάκι, χωρίς τους σωλήνες κολλημένους στα καμάρια (27) .

Όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων καταστάσεων του καπακιού (PlayModes) και τις μεταβολές που προκύπτουν, παρατηρείται ότι και στα τέσσερα PlayModes έχουμε τους εννέα ιδιοσυντονισμούς που καταγράφηκαν αρχικά. Οι εικόνες συμβολής που καταγράφηκαν σε όλο το εύρος μελέτης, δηλαδή από 50 Hz έως και τα 1500 Hz, διαφέρουν επαρκώς ως προς την ένταση, την κατανομή και θέση των κροσσών. Αυτό σημαίνει ότι το πλήθος και η συμμετρία των εντοπισμένων κροσσών διαφέρουν ελάχιστα για κάθε ιδιοσυντονισμό στις τέσσερις καταστάσεις, ώστε να χαρακτηριστούν ως όμοιοι αλλά αυτή η ελάχιστη μεταβολή είναι αρκετή ώστε να ισχυρισθεί κανείς, ότι προκύπτει μεταβολή του τρόπου ταλάντωσης, οπότε και μεταβολή του παραγόμενου ηχοχρώματος από το καπάκι λόγω της μεταφοράς μάζας από τον αυτοματισμό που κατασκευάστηκε γι' αυτό το σκοπό.

Στην ενότητα 4.3.5 όπου έχουμε τη «Σύγκριση Μετρήσεων Α'» αυτό μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό, καθώς έχουμε ως αναφορά τις συχνότητες ιδιοσυντονισμού του PlayModeZero ενώ δίπλα παρατίθενται για τις ίδιες συχνότητες και οι εικόνες συμβολής των άλλων 3 καταστάσεων. Προφανώς, ενώ δεν υπάρχει αμφιβολία ότι πρόκειται για τους ίδιους ακριβώς συντονισμούς σε όλες τις περιπτώσεις, δεν είναι δυνατόν να χαρακτηριστούν οι εικόνες συμβολής ως πανομοιότυπες. Υπάρχουν διαφορές στο πλήθος και στη κατανομή των κροσσών που παραπέμπουν σε διαφορετικό πλάτος και είδος δόνησης για κάθε κατάσταση καπακιού. Παραδείγματος χάριν παρατηρείται μια μετάλλαξη των κροσσών γύρω από την ηχητική σπή από το PlayModeZero ως και το PlayMode3 για τη συχνότητα 314 Hz με πιο σαφή διαφοροποίηση από το PlayModeZero στο PlayMode2 για τη ίδια συχνότητα. Επίσης γύρω από την ηχητική σπή για τη συχνότητα 537 Hz οι κροσσοί είναι αρκετά μεταλλαγμένοι στο PlayModeZero και PlayMode2 σε σχέση με το PlayMode3, το οποίο φαίνεται να ταλαντώνεται περισσότερο σαν το PlayMode1. Παρόμοιες διαφορές μπορούν να βρεθούν σε όλες τις συχνότητες της μελέτης αυτής παρατηρώντας το σχήμα 4.3.5 . Δεν μπορεί να μην γίνει αναφορά στην ασυμμετρία που χαρακτηρίζει πολλές εικόνες συμβολής, η οποία ίσως να οφείλεται σε μια πιθανή ανομοιομορφία της κατασκευής του καπακιού, όπως διαφορετικό πάχος σε διάφορα σημεία του,

διαφορετική πυκνότητα του ξύλου, τα νερά του ξύλου και τη πιθανή ανομοιομορφία της κόλλησης των σωλήνων.

Αρκετά διαφωτιστική είναι η συγκριτική παράθεση των αποτελεσμάτων της ενότητας 4.3.6 όπου έχουμε τη " Σύγκριση Μετρήσεων Β' " και την καταγραφή συγκεκριμένων στοιχείων για τις αποκλίσεις στις συχνότητες των κοινών συντονισμών σε κάθε PlayMode. Αυτές οι αποκλίσεις από την αρχική συχνότητα, της εικόνας συμβολής αναφοράς, κρίνονται σημαντικές για την αξιολόγηση της δονητικής συμπεριφοράς των τεσσάρων καταστάσεων του καπακιού. Προκειμένου να γίνει μια πιο μαθηματική προσέγγιση για τις τιμές της απόκλισης σε Hertz και να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα, συντάχθηκε μια συνάρτηση σε περιβάλλον Matlab (υπάρχει στο Παράρτημα Β' με το όνομα: **master thesis function2**) όπου υπολογίστηκαν αρχικά οι αποκλίσεις αφαιρώντας διαδοχικά από τις τιμές συχνοτήτων των modes του PlayModeZero αυτές των υπόλοιπων PlayModes και ανά δυο, έχοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς. Στη συνέχεια από τους πίνακες που βρέθηκαν υπολογίστηκαν οι απόλυτες τιμές τους και τέλος ο μέσος όρος αυτών. Οι τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.4.1 .

**ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ ΙΔΙΟΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ,  
ΓΙΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΚΑΠΑΚΙΟΥ (PlayModes),  
ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΣΧΗΜΑ 4.3.6 .**

<i>Αλλαγή Κατάστασης Καπακιού.</i>	<i>Μεταβολή Βάρους (gr)</i>	<i>Μέσος όρος Απόκλισης Συχνότητας (Hz)</i>
<b>Από PlayModeZero σε PlayMode1</b>	<b>1 Γεμάτος σωλήνας = 17</b>	<b>7.5556</b>
<b>Από PlayModeZero σε PlayMode2</b>	<b>1 Γεμάτος σωλήνας = 17</b>	<b>8.0000</b>
<b>Από PlayModeZero σε PlayMode3</b>	<b>2 Γεμάτοι σωλήνες = 34</b>	<b>8.7778</b>
<b>Από PlayMode1 σε PlayMode2</b>	<b>0 (Αλλαγή Κατανομής Μάζας)</b>	<b>6.2222</b>
<b>Από PlayMode1 σε PlayMode3</b>	<b>1 Γεμάτος σωλήνας = 17</b>	<b>5.8889</b>
<b>Από PlayMode2 σε PlayMode3</b>	<b>1 Γεμάτος σωλήνας = 17</b>	<b>7.8889</b>

Πίνακας 4.4.1

Από τη ανάγνωση των αποτελεσμάτων είναι προφανές ότι συντελείται μια σημαντική μετακίνηση της συχνότητας ιδιοσυντονισμού κατά μέσο όρο από το ένα PlayMode σε ένα άλλο. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η αυξητική τάση, στον μέσο όρο της απόκλισης, που παρατηρείται κατά τη προσθήκη βάρους. Από το PlayModeZero, στο οποίο είναι όλοι οι σωλήνες άδειοι, σε PlayMode1 όπου είναι μόνο ο πάνω σωλήνας γεμάτος έχουμε απόκλιση 7.5556 Hz ενώ από το PlayModeZero σε PlayMode2 όπου είναι γεμάτος μόνο ο κάτω σωλήνας έχουμε απόκλιση 8 Hz, γεγονός που οφείλεται στη προσθήκη βάρους σε μια από τις πιο δραστήριες περιοχές του καπακιού όπως αυτή που βρίσκεται ο κάτω σωλήνας, ειδικά αν συγκριθεί με αυτή που βρίσκεται ο πάνω. Στη συνέχεια έχουμε μια



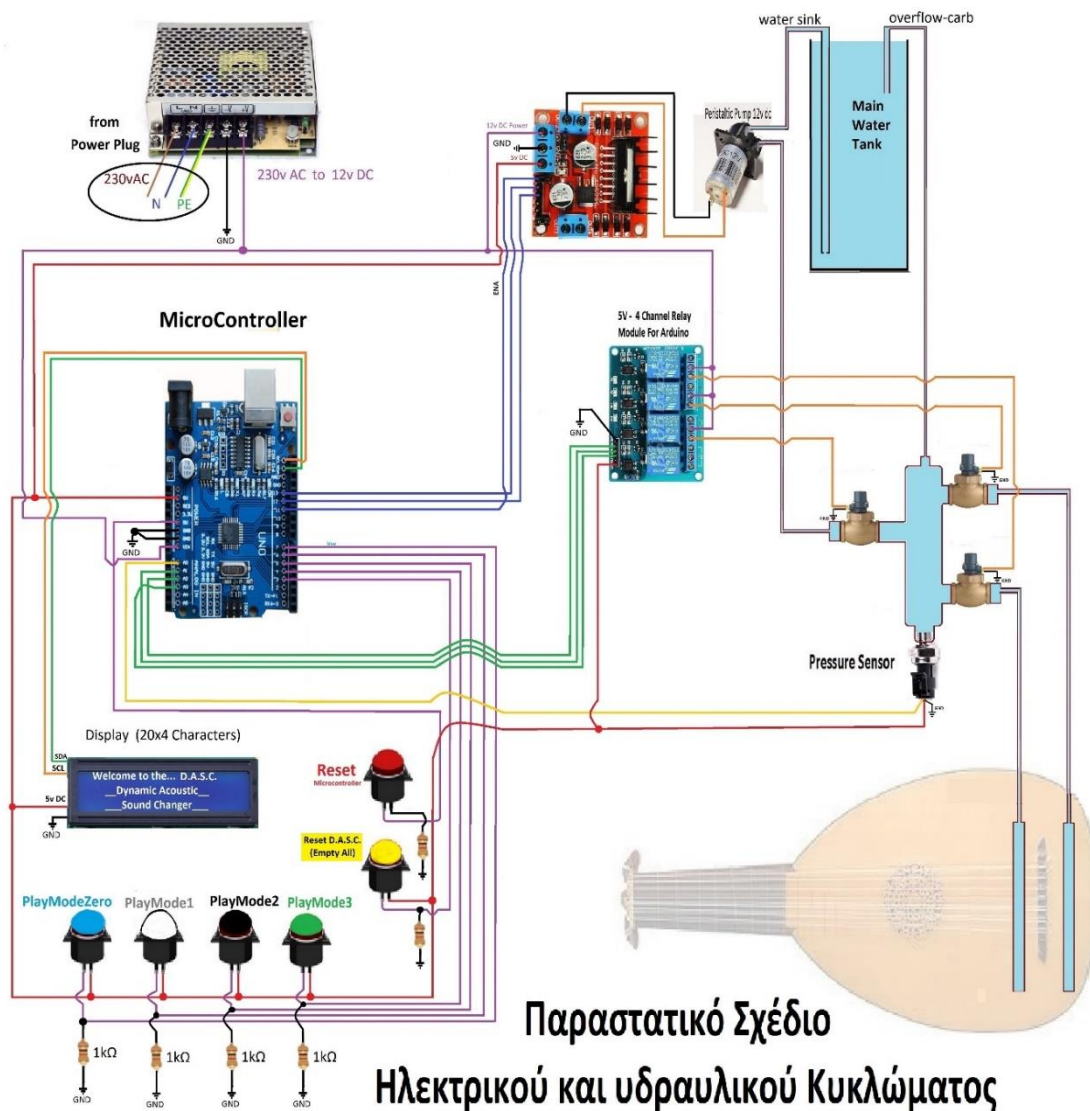
περαιτέρω αύξηση από το PlayModeZero σε PlayMode3 της τάξης των 8.7778 Hz γεγονός απολύτως λογικό αν συνυπολογιστεί ότι προστέθηκε ακόμα ένας γεμάτος σωλήνας.

Διαφορές στις εικόνες συμβολής και στις ιδιοσυχνότητες όμως προκύπτουν κι από την αλλαγή από PlayMode1 σε PlayMode2, δηλαδή από γεμάτο μόνο πάνω σωλήνα σε γεμάτο μόνο κάτω. Σε αυτή την περίπτωση παρότι η διαφορά πριν και μετά της συνολικής μάζας του καπακιού είναι μηδέν (0 gr), η μεταβολή στη κατανομή της, επιφέρει μια απόκλιση των 6.2222 Hz. Επίσης καταγράφεται μια απόκλιση των 5.8889 Hz από PlayMode1 σε PlayMode3 καθώς προστίθεται ένας γεμάτος σωλήνας δηλαδή 17 gr και μια απόκλιση των 7.8889 Hz από PlayMode2 σε PlayMode3 για την ίδια προσθήκη βάρους. Σε κάθε περίπτωση πάντως παρατηρούνται αποκλίσεις από τη μεταβολή της συνολικής μάζας ή της κατανομή της, με την αύξησή της να επιφέρει μείωση των κροσσών κι άρα του πλάτους ταλάντωσης της επιφάνειας του καπακιού που μεταφράζεται σε ένα όργανο με μικρότερη ισχύ ακουστικής εκπομπής για ίδια διέγερση.

## 5. ΥΛΙΣΜΙΚΟ ΚΑΙ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ( HARDWARE-SOFTWARE)

Περιγραφή του Υλικών και του Κώδικα Προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε.

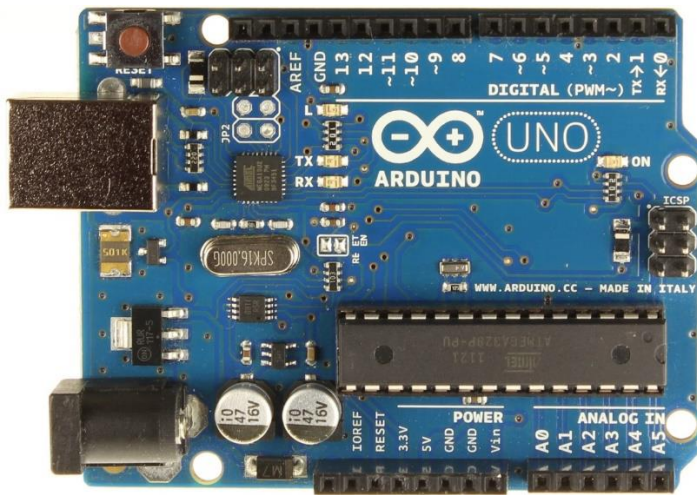
Η υλοποίηση της αρχικής ιδέας έγινε με όσο το δυνατόν πιο απλά υλικά, τα οποία μπορεί εύκολα να βρει οποιοδήποτε το επιθυμεί. Η κατασκευή αποτελείται από 3 κυρίως μέρη. Από α) τον ξύλινο σκελετό που γίνεται η στήριξη όλων των εξαρτημάτων, β) το ηλεκτρικό κύκλωμα και γ) το υδραυλικό κύκλωμα. Ο ξύλινος σκελετός αποτελείται από ένα κεντρικό κορμό ο οποίος είναι ένα κατακόρυφο επίπεδο, έτσι ώστε το ηλεκτρικό και υδραυλικό κύκλωμα να είναι ξεχωριστά, και το καθένα σε διαφορετική πλευρά του σκελετού, για λόγους ασφαλείας. Συνεπώς πιθανή διαρροή από το υδραυλικό κύκλωμα δεν θα επηρεάσει το ηλεκτρικό, ειδικά το τμήμα με την επικίνδυνη τάση των 230V AC του τροφοδοτικού.



Σχήμα 5.0.1

## 5.1 Μικροελεγκτής

Ο μικροελεγκτής που χρησιμοποιήθηκε είναι ο Arduino Uno R3, ο διαθέτει 14 ψηφιακές εισόδους/εξόδους (6 από αυτές με δυνατότητα PWM), 6 αναλογικές εισόδους, ρολόι στα 16 MHz, σύνδεση USB, υποδοχή τροφοδοσίας, υποδοχή ICSP, ένα κρύσταλλο χαλαζία 16 MHz, μια σύνδεση USB, μια υποδοχή ρεύματος και ένα κουμπί επαναφοράς. Περιέχει όλα όσα χρειάζονται για τη στήριξη του μικροελεγκτή, απλά συνδέεται σε έναν υπολογιστή με ένα καλώδιο USB ή με ένα προσαρμογέα AC σε DC ή μπαταρία για να ξεκινήσει. Οι μικροελεγκτές Arduino έχουν γίνει διάσημοι για την ευκολία και την απλότητα χρήσης τους και σήμερα χρησιμοποιούνται ευρέως από απλές μαθητικές εφαρμογές μέχρι και εξελιγμένους Ρομποτικούς μηχανισμούς σε όλο τον κόσμο.



Ο μικροελεγκτής Arduino Uno r3.

Πηγή:[http://d2rormqr1qwzpz.cloudfront.net/photos/2013/06/12/48912-arduinouno\\_r3\\_front.jpg](http://d2rormqr1qwzpz.cloudfront.net/photos/2013/06/12/48912-arduinouno_r3_front.jpg)

Σχήμα 5.1.1

Παρακάτω γίνεται μια σύντομη περιγραφή των Εισόδων και Εξόδων του Arduino Uno R3 πάνω στον οποίο στηρίχθηκε η κατασκευή μας.

### ΑΚΡΟΔΕΚΤΕΣ ΠΑΡΟΧΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**VIN.** Η τάση εισόδου στην πλακέτα Arduino όταν χρησιμοποιεί μια εξωτερική πηγή ενέργειας (σε αντιδιαστολή των 5 βολτ από τη σύνδεση USB ή άλλες πηγή ενέργειας) . Μπορεί να παραλάβει τάση μέσω αυτού του ακροδέκτη από 5-20V .

**5V.** Αυτός ο ακροδέκτης εξάγει μια ρυθμιζόμενη 5V από τον ρυθμιστή της κεντρικής πλακέτας.

**3.3V.** Αυτός ο ακροδέκτης εξάγει μια ρυθμιζόμενη 3.3V από τον ρυθμιστή της κεντρικής πλακέτας. Η μέγιστη κατανάλωση ρεύματος είναι 50 mA.

## ΕΙΣΟΔΟΙ ΚΑΙ ΈΞΟΔΟΙ

Κάθε ένας από τους 14 ψηφιακούς ακροδέκτες και τους 6 αναλογικούς για το UNO μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως είσοδος ή έξοδος, χρησιμοποιώντας τις εντολές `pinMode()`, `digitalWrite()`, και `digitalRead()`. Οι αναλογικοί ακροδέκτες θα δοκιμάσουν τα επίπεδα τάσης και αναφέρουν μια ψηφιακή τιμή χρησιμοποιώντας `analogRead()`. Οι αναλογικοί ακροδέκτες και ένα υποσύνολο των ψηφιακών προσφέρουν Pulse Width Modulation ( PWM ) χρησιμοποιώντας την εντολή `analogWrite()`.

Κάθε ακροδέκτης λειτουργεί σε 0-5 V DC, μπορεί να προσφέρει ή να λάβει ένα απόλυτο ανώτατο όριο των 40 mA (20 mA συνιστάται), και έχει εσωτερική αντίσταση pull-up (αποσυνδέεται από προεπιλογή) 20-50 kOhms.

## ΕΞΕΙΔΙΚΕΥΜΕΝΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΕΣ

**Κωδικός:** Serial 0 (RX) και 1 (TX). Χρησιμοποιείται για τη λήψη (RX) και διαβίβαση σειριακών δεδομένων (TX) TTL.

Pins 0 και 1 είναι επίσης συνδεδεμένα με τα αντίστοιχα του Serial του USB-to-TTL.

**Interrupt - Εξωτερικές διακοπές:** Αυτοί οι ακροδέκτες μπορούν να ρυθμιστούν ώστε να προκαλέσουν μια διακοπή με τη λειτουργία `attachInterrupt`.

**PWM:** 3,5,6,9,10,11 και A0 έως A5 παρέχουν 8-bit εξόδου PWM με τη λειτουργία `analogWrite ()`.

**LED:** 13. Υπάρχει ένα ενσωματωμένο LED που συνδέεται με τον ψηφιακό ακροδέκτη 13. Το LED είναι αναμμένο με 1, είναι off με 0.

**I2C / TWI:** SDA και SCL. I2C υποστήριξη aka IIC aka επικοινωνία TWI χρησιμοποιώντας τη βιβλιοθήκη Wire.

## ΑΝΑΛΟΓΙΚΕΣ ΕΙΣΟΔΟΙ

Το Uno έχει 6 αναλογικές εισόδους, κάθε μία από τις οποίες παρέχει 10 bit (δηλαδή 1024 διαφορετικές τιμές). Εξ ορισμού μετρούν από τη γείωση (0) σε 5 βολτ, αλλά είναι δυνατόν να αλλάξει το άνω άκρο του εύρους τους, χρησιμοποιώντας τον AREF και την εντολή `analogReference ()`.

Όλοι οι αναλογικοί ακροδέκτες λειτουργούν και σαν αναλογικές εξοδοί χρησιμοποιώντας PWM. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως Digital είσοδοι ή έξοδοι.

## ΆΛΛΕΣ ΕΙΣΟΔΟΙ ΚΑΙ ΈΞΟΔΟΙ

**AREF:** Τάση αναφοράς για τις αναλογικές εισόδους. Χρησιμοποιείται με `analogReference ()`.

**Reset:** Με 0 επαναφέρει τον μικροελεγκτή.

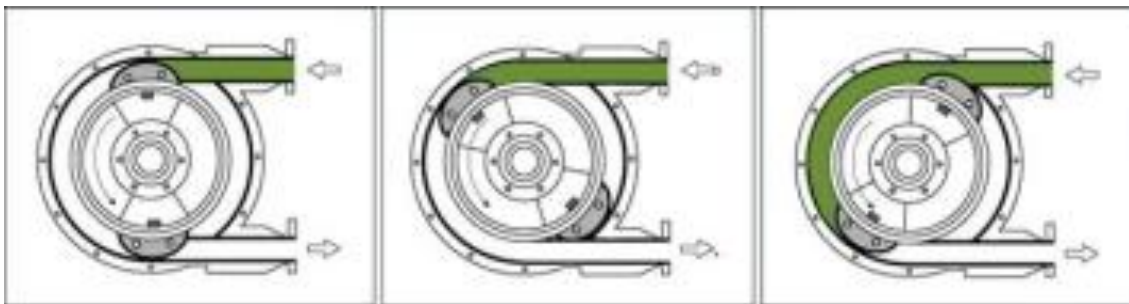
## ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ:

- Μικροελεγκτής ATmega328P
- Τάση λειτουργίας: 5V
- Τάση εισόδου (συνιστώμενη): 7-12V
- Τάση εισόδου (όριο): 6-20V
- Ψηφιακοί I/O ακροδέκτες 14 (6 εκ των οποίων παρέχουν έξοδο PWM)
- Αναλογικοί ακροδέκτες Εισόδου: 6

- DC ρεύμα ανά I / O ακροδέκτη: 20 mA
- DC ρεύμα για 3.3V ακροδέκτη: 50 mA
- Flash Memory: 32 KB εκ των οποίων 0.5 KB χρησιμοποιείται από τον bootloader
- SRAM: 2 KB
- EEPROM: 1 KB
- Clock Speed: 16 MHz
- Μήκος: 68.6 mm
- Πλάτος: 53.4 mm
- Βάρος: 25 g

## 5.2 Αντλία.

Η αντλία που χρησιμοποιήθηκε είναι περισταλτική ή αλλιώς και αντλία ελαστικού σωλήνα. Αξιοποιεί την αρχή της περισταλτικής κίνησης για να αντλήσει ρευστά μέσω ενός ελαστικού σωλήνα, που εφαρμόζει γύρω από ένα δρομέα με ράουλα, ο οποίος όταν περιστρέφεται, πιέζει ένα τμήμα του ελαστικού σωλήνα. Η πίεση στο συγκεκριμένο τμήμα απελευθερώνεται καθώς ο ρότορας περιστρέφεται και ο ελαστικός σωλήνας ανακάτ το αρχικό του σχήμα. Έτσι δημιουργείται στιγμιαία μια υποπίεση η οποία προκαλεί επαναπλήρωση του ελαστικού σωλήνα με υγρό.



Αρχή λειτουργίας της περισταλτικής αντλίας.

Πηγή:<http://www.michos.gr/photos/12457711434a40f587d174f.jpg>

Σχήμα 5.2.1

Η συμπίεση που ασκείται στον ελαστικό σωλήνα προκαλεί μία προσωρινή στεγανοποίηση και καθώς ο ρότορας περιστρέφεται, το αντλούμενο υγρό προωθείται και εκτοπίζεται από το στόμιο εξόδου της αντλίας. Από αυτή τη συνδυασμένη λειτουργία στην αναρρόφηση και στην κατάθλιψη προκύπτει μία αντλία θετικής εκτόπισης με ικανότητα αρνητικής αναρρόφησης.

Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της είναι:

- Λειτουργεί στεγνή χωρίς να φθείρεται.
- Δεν χρειάζεται στεγανοποίηση.
- Αντιστρεφόμενη φορά περιστροφής.
- Είναι ανθεκτική στην φθορά.
- Έχει μεγάλη ακρίβεια δοσομέτρησης.
- Είναι ανθεκτική στην διάβρωση.
- Είναι αθόρυβη.
- Εύκολη στον καθαρισμό.

Χρησιμοποιείται σε μια ευρεία γκάμα εφαρμογών όπως:

Γαλακτοκομικά προϊόντα, κρασιά, σάλτσες, μαρμελάδες, αυγά σε υγρή μορφή, μαγιονέζα, προϊόντα με βάση το κρέας, χυμοί φρούτων, λάσπη, υδαρούς ασβέστη, κονιάματα, τροφοδοσία φίλτροπρεσσωτων, πηλό, ανθρακούχα, πολτοί, χρώματα, κόλλες, μελάνια, λατέξ, χρωστικές ουσίες, έλαια, απορρυπαντικά, οξέα, υπεροξειδία και άλλα.

#### **ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ:**

- Τάση τροφοδοσίας: έως 12V DC
- Ρεύμα: 80mA
- Θερμοκρασία λειτουργίας: 0 - 40 °C
- Σχετική υγρασία < 80%
- Ρυθμός ροής: 20-60 ml / min
- Περιστροφή ταχύτητα: 0,1 - 100 rpm
- Περιστροφή ταχύτητα κινητήρα: 5000rpm
- Διαστάσεις του οδηγού (Φ x Η): Διαμ. 27.6 x Ύψος 37.9 (mm)
- Διαστάσεις κεφαλιού της αντλίας (Φ x Η): Διαμ. 31.7 x Ύψος 20.1 (mm)
- Διαστάσεις του σωλήνα της αντλίας (ΕΣ. Διαμ x ΕΞ. Διαμ): 2 x 4 χιλιοστά
- Βάρος: 200g
- Κατεύθυνση ροής: Ελεγχόμενη από τροφοδοσία.



Η περισταλτική αντλία που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή.

Πηγή:<http://i.ebayimg.com/images/g/XV4AAOxy69JTDqtT/s-l400.jpg>

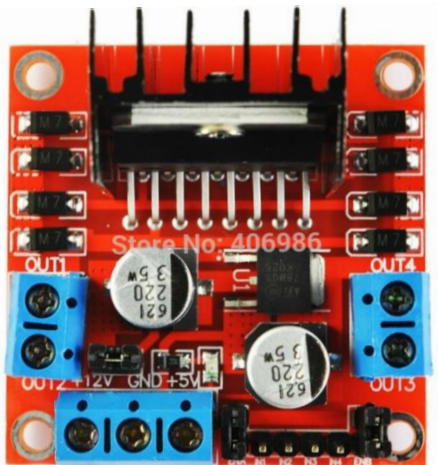
Σχήμα 5.2.2

**ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ:**

Λόγω της μεγάλης ακρίβειας δοσομέτρησης, που παρέχει αυτή η αντλία, το όλο σύστημα θα μπορούσε να λειτουργεί και με ανοικτό βρόχο, παρότι σε αυτή την υλοποίηση κρίθηκε ως καταλληλότερη η λειτουργία κλειστού βρόχου.

## 5.3 Γέφυρα τύπου-H

Προκειμένου να γίνει η οδήγηση, του κινητήρα της Αντλίας, χρησιμοποιείται το ολοκληρωμένο L298 Dual H-Bridge, που είναι μια διάταξη H-γέφυρας για έλεγχο, στέλνοντας PWM σήμα, ταχύτητας και φοράς περιστροφής σε 2 DC κινητήρες.



Η διάταξη H-γέφυρας που χρησιμοποιείται, το ολοκληρωμένο L298 Dual H-Bridge.

Πηγή: <http://i.ebayimg.com/images/g/nl0AAOSwg3FUfoju/s-l1600.jpg>

Σχήμα 5.3.1

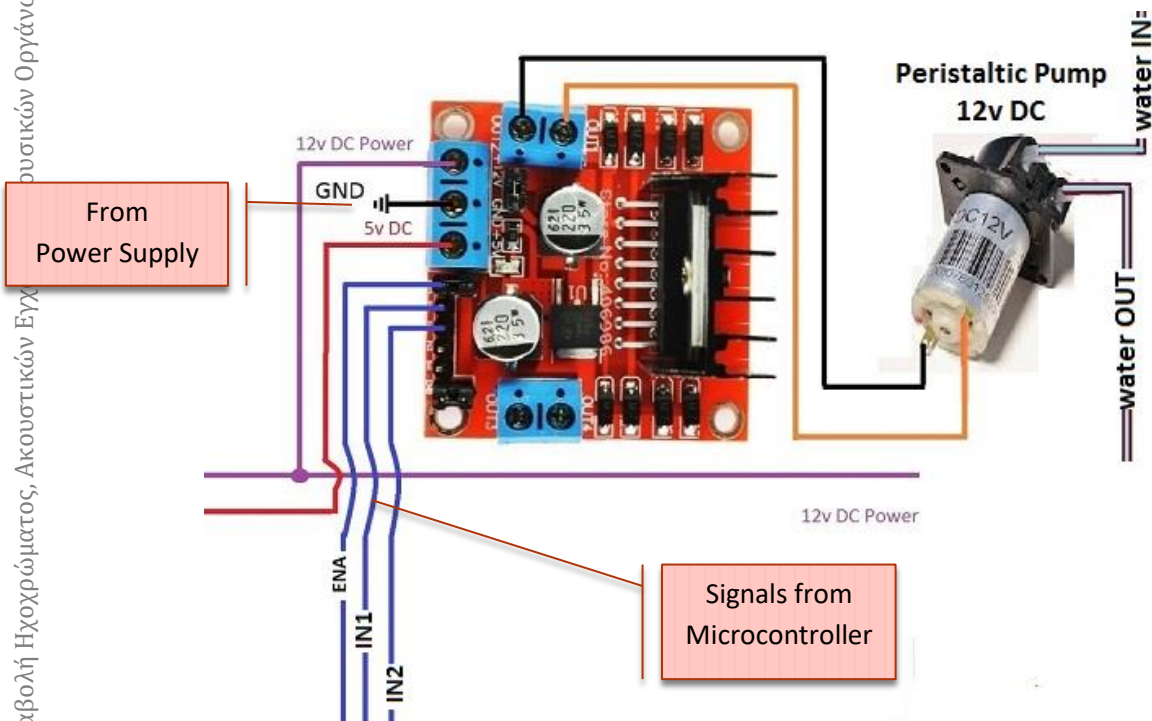
Η γέφυρα λειτουργεί μέσω 3 σημάτων (IN1, IN2 και ENA) που παρέχονται από τον μικροελεγκτή. Η ενεργοποίηση/απενεργοποίηση της γέφυρας καθώς και η φορά περιστροφής καθορίζεται από τις τιμές των IN1 και IN2, ενώ η ταχύτητα ρυθμίζεται μέσω του duty cycle ενός PWM σήματος στον ακροδέκτη ENA. Ο καθορισμός λειτουργίας του οδηγούμενου DC-κινητήρα με βάση τα σήματα ελέγχου της H-γέφυρας L298 γίνονται βάσει των συνδυασμών των τιμών που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Καθορισμός λειτουργίας του οδηγούμενου DC -κινητήρα της Αντλίας, με βάση τα σήματα ελέγχου της Η-γέφυρας L298 .

IN1	IN2	ENA	ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ
1	0	PWM (8 bit)	Ο κινητήρας περιστρέφεται δεξιά με ταχύτητα αυξανόμενη με το Duty Cycle του PWM.
0	1	PWM (8 bit)	Ο κινητήρας περιστρέφεται αριστερά με ταχύτητα αυξανόμενη με το Duty Cycle του PWM.
1	1	1	Δυναμική πέδηση του κινητήρα.
0	0	1	Δυναμική πέδηση του κινητήρα.
---	---	0	Απενεργοποίηση του κινητήρα.

Πίνακας 5.3.1

Παρακάτω απεικονίζεται το ηλεκτρικό σχέδιο διασύνδεσης της Η-Γέφυρας, της Αντλίας και του τροφοδοτικού.

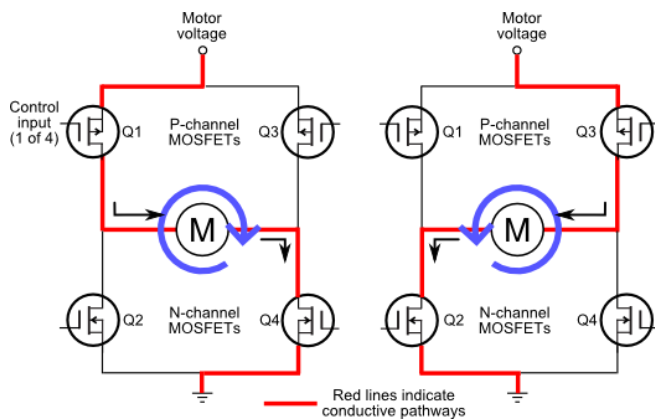


Παραστατικό σχέδιο διασύνδεσης Η-Γέφυρας και Αντλίας.

Σχήμα 5.3.2



Στο επόμενο Σχήμα απεικονίζεται η πορεία του ρεύματος, στον κινητήρα, σύμφωνα με τα σήματα της Η-Γέφυρας και η αλλαγή φοράς περιστροφής που επιτυγχάνεται.



Η πορεία του ρεύματος στον κινητήρα με τον έλεγχο από την Η-Γέφυρα.

<https://encryptedbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQb-j5Q54h8saeoihyMrSo5iv5M8rzLOJ8eIXInnyG8uL7hc-XQ>

Σχήμα 5.3.3

## ↳ Επιλογή τύπου PWM

Η οδήγηση της γέφυρας γίνεται όπως προαναφέρθηκε μέσω ενός ψηφιακού σήματος PWM, ενός αριθμού 8 bit, που παράγεται αυτοματοποιημένα δίνοντας την εντολή analogWrite() στον Μικροελεγκτή. Η επιλογή των χαρακτηριστικών του PWM έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κινητήρα της αντλίας, ο οποίος έχει ένα πολύ μεγάλο νεκρό σημείο εκκίνησης, οπότε κρίθηκε ορθό να δίνεται συνεχώς η μέγιστη τάση στον κινητήρα, δηλαδή PWM=255 όταν λειτουργεί, όπως περιγράφηκε αναλυτικά στην Ενότητα 2.6 .

## 5.4 Αισθητήρας Πίεσης.

Ο αισθητήρας πίεσης της εφαρμογής είναι G1/4" ιντσών και εύρος μέτρησης πίεσης από 0 έως 1,2 MegaPascals (MPa). Τροφοδοτείται με  $V_{in} = 5V$  και Γείωση (0V) και μετατρέπει την πίεση από το αισθητήριο σε μια τάση από 0,5V έως 4,5V DC (το 0,5V DC αντιστοιχεί σε 0 MPa και τα 4,5V DC αντιστοιχούν σε 1,2 MPa). Είναι κατάλληλος για πολλών ειδών υγρά και αέρια όπως: λάδια, καύσιμα, ντίζελ, υγραέριο, νερό κτλ.

#### ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ:

- Τάση εργασίας : 5V DC
- Τάση εξόδου : DC 0.5-4.5V
- Υλικό αισθητήρα : Κράμα χάλυβα
- Ρεύμα λειτουργίας :  $\leq 10\text{mA}$
- Εύρος πίεσης εργασίας : 0-1.2MPa
- Μέγιστη Πίεση : 2.4MPa
- Πίεση ορίου αντοχής : 3.0MPa
- Θερμοκρασία Λειτουργίας : Εύρος 0-85 °C
- Εύρος θερμοκρασίας αποθήκευσης : 0-100 °C
- Σφάλμα Μέτρησης :  $\pm 1,5 \%$  FSO
- Χρόνος απόκρισης :  $\leq 2.0\text{ms}$
- Κύκλος ζωής : 500.000

#### ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ :

Κόκκινο: + 5V

Μαύρο: - 0V (Γείωση)

Κίτρινο: Έξοδος



Πηγή:<http://i.ebayimg.com/images/g/iWkAAOSw3YNXyh4V/s-l1600.jpg>

Σχήμα 5.4.1

### 5.5 Μετατροπέας Αναλογικού σήματος σε Ψηφιακό (A/D-C Analog to Digital Converter).

Η αναλογική φύση του αισθητήρα, απαιτεί τη δυνατότητα διαχείρισης από τον μικροελεγκτή σημάτων αναλογικής φύσεως. Αυτό είναι εφικτό με μια ειδική μονάδα, που ενσωματώνεται στον μικροελεγκτή που χρησιμοποιήθηκε, την κάρτα A/D-C (Analog to Digital Converter) η οποία αναλαμβάνει την κωδικοποίηση μιας αναλογικής τάσης σε ψηφιακή μορφή, δηλαδή σε μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων που στη συνέχεια μπορεί με ευκολία να αξιοποιηθεί πχ. για επεξεργασία, αποθήκευση, αποστολή. Ο μετατροπέας A/D-C του UNO R3 που αναλαμβάνει την ψηφιακή αναπαράσταση της αναλογικής τάσης του αισθητήρα πίεσης παρέχει μετατροπές με ακρίβεια 10-Bit.

Ο αισθητήρας πίεσης που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία εξωτερικού σήματος ελέγχου, είναι ένα αναλογικό ηλεκτρονικό εξάρτημα και έτσι καθίσταται απαραίτητη η χρήση του μετατροπέα

Αναλογικού σήματος σε Ψηφιακού. Η μετατροπή αυτή δεν γίνεται ακαριαία αλλά απαιτεί κάποιο χρόνο.

Η διαδικασία της μετατροπής από τον A/D-C γίνεται αναφορικά με μια αναλογική τάση Vref (τάση αναφοράς) η οποία εφαρμόζεται στον A/D-C μετατροπέα και προσδιορίζει το εύρος τιμών αναλογικών τάσεων, τις οποίες μπορεί να διαχειριστεί ο μετατροπέας. Ο μετατροπέας του μικροελεγκτή ATMEGA328P έχει εύρος 10bit δηλαδή λαμβάνει τιμές από 0-1023. Για το σήμα χρονισμού χρησιμοποιήθηκε ο προεπιλεγμένος διαιρέτης συχνότητας (prescaler) ίσος με N=128, οπότε η συχνότητα χρονισμού του A/D-C είναι:

$$F_{adc} = \frac{F_{cl}}{N} = \frac{16\text{MHz}}{128} = 125 \text{ KHz}$$

Σχέση 5.5.1

και ο ολικός χρόνος μιας μετατροπής είναι:

$$T_{adc} = 13 \cdot \frac{1}{F_{adc}} = 13 \cdot \frac{1}{125000} = 13 \cdot 0,000008 = 0.000104 \text{ sec} = 104 \text{ μsec}$$

Σχέση 5.5.2

Τα όρια που μπορεί να δώσει ο ATMEGA328P είναι ένα εύρος μεταξύ 0 και 5 volt συνεπώς η διακριτική ικανότητα του A/D-C είναι:

$$V_o = \frac{V_{ref}}{2^{10}} = \frac{5\text{V}}{1024} = 0.00488 \text{ V}$$

Σχέση 5.5.3

## ↳ ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΟΥ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ ΠΙΕΣΗΣ ΣΕ ΓΝΩΣΤΕΣ ΜΟΝΑΔΕΣ.

Όσον αφορά τη μετατροπή των τιμών του αισθητήρα πίεσης σε γνωστές μονάδες έχουμε τα εξής: Ο κατασκευαστής μας δηλώνει ότι η Τάση εξόδου είναι από 0,5 έως 4,5V DC και το Εύρος πίεσης εργασίας είναι από 0 έως 1,2 MPa. Δηλαδή όταν "διαβάζει" πίεση 0 MPa, η Τάση εξόδου είναι DC 0,5 V ενώ όταν "διαβάζει" πίεση 1,2 MPa η Τάση εξόδου είναι DC 4,5 V. Επίσης γνωρίζουμε από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Μικροελεγκτή, ότι οι αναλογικές είσοδοι του "διαβάζουν" τάση από 0 έως 5 V DC και τα αντιστοιχούν σε ένα ακέραιο αριθμό ανάλυσης 10 bits (από 0 έως 1023). Με αυτό τα δεδομένα συμπληρώθηκε ο παρακάτω πίνακας με τις αντιστοιχίες σε Μονάδες Πίεσης Αισθητήρα, Τάση εξόδου, Πίεση σε MPa και Πίεση σε kPa. Για τον υπολογισμό τους δημιουργήθηκε συνάρτηση στο Matlab που παρατίθεται στο Παράρτημα Β'.

## Πίνακας Αντιστοιχιών Μονάδων Πίεσης.

	Τάση εξόδου Αισθητήρα	Τάση Ανάγνωσης Αναλογικής Εισόδου	Μονάδες Πίεσης Αισθητήρα. ( από A-D/C )	Πίεση σε MPa.	Πίεση σε kPa. (MPa x 1000)
Εκτός Ορίων	---	0	0		
Εύρος Μέτρησης Αισθητήρα.	0,5	0,5	101.4	0	0
	1	1	203.8	0.15	150
	2	2	408.6	0.45	450
	3	3	613.4	0.75	75
	4	4	818.2	1.05	1050
	4,5	4,5	920.6	1,2	1200
Εκτός Ορίων	---	5	1023		

Πίνακας 5.5.1

Για την εκτύπωση, στην οθόνη της εφαρμογής, της πίεσης επιλέχθηκε η μονάδα kilopascals ( kPa ) ώστε να είναι πιο εύληπτα στο χρήστη τα όρια άδειου και γεμάτου σωλήνα, καθότι αυτά είναι περίπου 16 kPa και 56 kPa αντίστοιχα, καθώς επίσης και η πίεση σε μονάδες από τον αισθητήρα.

## 5.6 Σωλήνες και Υλικά Σύνδεσης

Η μεταφορά μάζας πάνω στο καπάκι του λαούτου γίνεται, όπως προαναφέρθηκε, με απιονισμένο νερό. Το νερό αυτό αποθηκεύεται σε δύο Ελαστικούς Σωλήνες από Λατέξ με ονομαστική διάμετρο από 9mm αρχικά έως 12mm όταν πιεστεί εσωτερικά και φτάσει στο όριο αντοχής του.



Ελαστικός Σωλήνας από Λατέξ (9mm-12mm).

Πηγή:<http://why.gr/shop/educational-products/educational-products-chemistry/educational-products-chemistry-supplies/rubber-tube/>

Σχήμα 5.6.1

Οι σωλήνες που συνδέουν τις Ηλεκτροβαλβίδες με τους Ελαστικούς Σωλήνες από Λατέξ είναι από σιλικόνη με διάμετρο 4mm, είναι διάφανοι και μεγάλης αντοχής. Η διαφάνεια επιτρέπει τον οπτικό εντοπισμό φυσαλίδων αέρα, η ύπαρξη των οποίων απαιτεί άμεση εξαέρωση του υδραυλικού κυκλώματος.



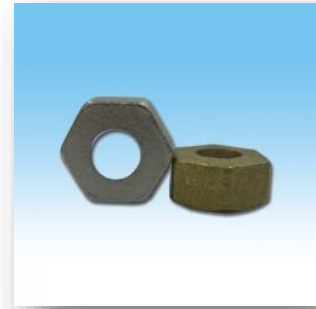
Ελαστικοί Σωλήνες από σιλικόνη.

Πηγή:[http://www.silicone-tubing.com.au/wp-content/uploads/2012/11/silicon\\_tube.jpg](http://www.silicone-tubing.com.au/wp-content/uploads/2012/11/silicon_tube.jpg)

Σχήμα 5.6.2

Η βάση όλου του υδραυλικού κυκλώματος είναι ο Συλλέκτης (Κολεκτέρ) υδροληψίας από ορείχαλκο. Εκεί είναι συνδεδεμένες οι ηλεκτροβαλβίδες, ο αισθητήρας πίεσης, η είσοδος του νερού από τη κεντρική δεξαμενή και η έξοδος του νερού προς τη κεντρική δεξαμενή για εξαέρωση και υπερχειλίση. Η σύνδεση όλων έγινε με τα κατάλληλα ορειχάλκινα εξαρτήματα σύνδεσης σωλήνων. Παρακάτω απεικονίζονται τα σημαντικότερα από αυτά.





### Ορειχάλκινα εξαρτήματα σύνδεσης σωλήνων.

Πηγή:<http://www.kotsovos.gr/index.php/main/product>

Σχήμα 5.6.3

## 5.7 Οθόνη

Η οθόνη που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή, προκειμένου να δίνει διάφορες πληροφορίες στον χρήστη, είναι τύπου υγρών κρυστάλλων με οπίσθιο φωτισμό blacklight και διαθέτει 4 γραμμές και 20 στήλες. Οι πληροφορίες που δίνονται στον χρήστη είναι: ένα μήνυμα καλωσορίσματος, η επιλεγμένη Κατάσταση Λειτουργίας (PlayMode), η δυνατότητα αλλαγής δυναμικά Κατάστασης Λειτουργίας (PlayMode), η εσωτερική φιλτραρισμένη πίεση σε kPa ενώ στη περίπτωση που γίνεται αλλαγή Κατάστασης Λειτουργίας (PlayMode) περιγράφει το τι ακριβώς κάνει κάθε στιγμή, δηλαδή ποιος σωλήνας γεμίζει, ποιος αδειάζει κ.τ.λ.



Η Οθόνη. (20x4 character lcd module)

Πηγή:<http://g02.a.alicdn.com/kf/HTB1FuesLXXXXaZxpXXq6xXFXXXo/-font-b-20x4-b-font-font-b-LCD-b-font-font-b-Modules-b-font.jpg>

Σχήμα 5.7.1

Η σύνδεση της Οθόνης γίνεται με τους ακροδέκτες του μικροελεγκτή SDA, SCL για τη παροχή δεδομένων και 5V, GROUND για τη παροχή ισχύος όπως φαίνεται παρακάτω:

**Arduino +5V --> Module VCC**

**Arduino GND --> Module GND**

**Arduino Analog 4 --> Module SDA**

**Arduino Analog 5 --> Module SCL**

Η επιλογή του οπίσθιου φωτισμού γίνεται με την προεπιλεγμένη διασύνδεση και την εντολή `blacklight()` στον κώδικα του προγράμματος.

## Display (20x4 Characters)



Παραστατικό σχέδιο διασύνδεσης της Οθόνης με τον μικροελεγκτή.

Σχήμα 5.7.2

## 5.8 Ηλεκτρομαγνητικές Βαλβίδες

Ο έλεγχος της ροής του απιονισμένου νερού στη εφαρμογή, έγινε με 3 ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες, με τάση λειτουργίας 12V. Για τον έλεγχο του νερού των σωλήνων χρησιμοποιήθηκε από μια βαλβίδα και μια ακόμη παρεμβάλλεται ανάμεσα στο κεντρικό δοχείο νερού και στο κεντρική σωλήνα προκειμένου να μειώνει τη διαφορά ανάμεσα στη πραγματική πίεση στους σωλήνες και στο σημείο που είναι ο αισθητήρας. Δυο διαφορετικοί αισθητήρες πίεσης, ένας για κάθε σωλήνα θα έλυνε αυτό το πρόβλημα αυτό αλλά θα αύξανε τη πολυπλοκότητα και το κόστος της κατασκευής.

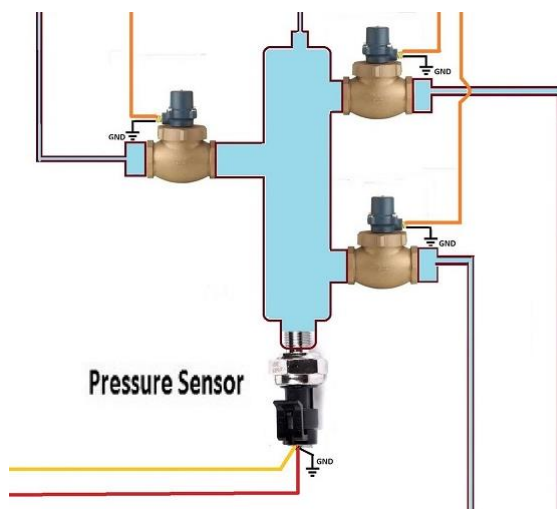


Οι ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες,  
με τάση λειτουργίας 12V, τύπου N/C.

Πηγή:<http://i.ebayimg.com/images/g/IE8OSwyZ5UmNPL/s-l1600.jpg>

Σχήμα 5.8.1

Επιλέχθηκε ο τύπος Κανονικά Κλειστή Επαφή (Normally Closed, N/C) καθώς σε κατάσταση ηρεμίας θα είναι κλειστές οπότε δεν θα έχουμε μετακίνηση υγρών οπότε και σταθερό βάρος στο καπάκι, χωρίς κατανάλωση ενέργειας.



Παραστατικό σχέδιο διασύνδεσης  
ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων,  
σωλήνων εισόδου- εξόδου νερού και  
Συλλέκτη (Κολεκτέρ) υδροληψίας.

Σχήμα 5.8.2

#### ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ:

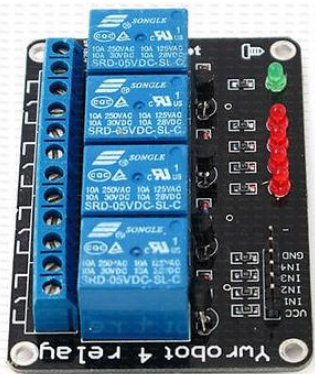
- Τάση εργασίας : DC 12V
- Είσοδος και έξοδος : προσαρμογέας για 1/2" (εξωτερική διάμετρο) σωλήνα
- Πίεση : 0,02 έως 0.8 MPa
- Μέγιστη θερμοκρασία ρευστού : 100 °C
- Τρόπος λειτουργίας : κανονικά κλειστή (Normally Closed, N/C)
- Τύπος βαλβίδας : Διάφραγμα (λειτουργεί με Servo)
- Χρήση : Νερό και υγρά χαμηλού ιξώδους
- Διαστάσεις : 78 χιλιοστά x 60 χιλιοστά (περίπου)
- Εσωτερική διάμετρος : 13,5 χιλιοστά



## 5.9 Ηλεκτρονόμοι.

Η χρήση των 3 ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων με τάση λειτουργίας 12V κατέστησε αναγκαία τη χρήση ηλεκτρονόμων για τον έλεγχο τους, αφού ο μικροελεγκτής μπορεί να παρέχει από τους ακροδέκτες του έως 5V τάση και 20mA ρεύμα. Στη παρακάτω εικόνα είναι η πλακέτα 4 ρελέ που χρησιμοποιήθηκε, η οποία μπορεί να ελέγχει διάφορες συσκευές με μεγάλη τάση (έως AC 220V) και μεγάλο ρεύμα (έως 10A AC).

Μπορεί να ελέγχεται άμεσα από μικροελεγκτή, περιέχει 4 ρελέ με πηνίο που το καθένα ελέγχει μια μεταγωγική επαφή, δηλαδή μπορεί να έχει λειτουργία Κανονικά Κλειστή και Κανονικά Ανοιχτή (NC / NO) για κάθε επαφή.



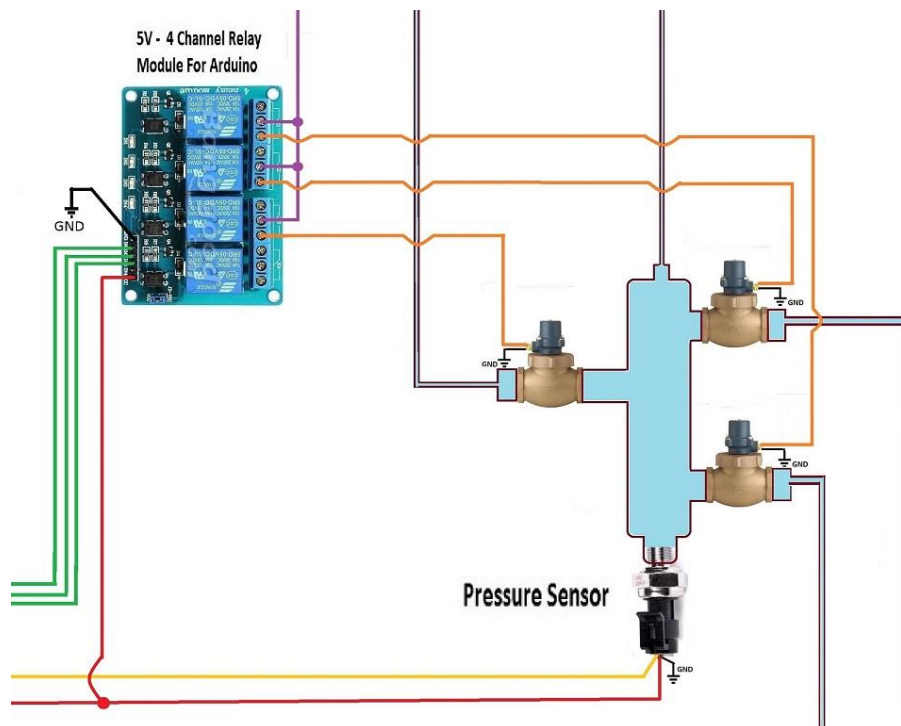
Η Πλακέτα 4 ηλεκτρονόμων που χρησιμοποιήθηκε, έως AC220V / DC30V και 10A.

Πηγή:<http://i.ebayimg.com/images/g/tvCAAOSw~oFXLGqn/s-1400.jpg>

Σχήμα 5.9.1

### ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ:

- Ονομαστική Τάση : έως AC 220V / DC 30V
- Πηνίο ισχύος : 0.1A - 0.5W
- Ονομαστικό Ρεύμα : έως 10A
- Ρεύμα Λειτουργίας : 0.1A
- Τάσης Λειτουργίας Πηνίου : 5V
- Λειτουργία Επαφής : NC / NO
- Ενεργοποίηση με LOW (ένδειξη ON), Απελευθέρωση με HIGH (ένδειξη OFF)
- Η μέγιστη ισχύς του ρελέ : DC 30V 10A , AC 250V 10A
- LED ένδειξη για την κατάσταση εξόδου ρελέ
- V<sub>cc</sub> : θετικός πόλος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
- GND : αρνητικός πόλος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας
- IN1 - IN4 : Έλεγχος των ρελέ 1 έως 4



Παραστατικό σχέδιο διασύνδεσης ηλεκτρομαγνητικών βαλβίδων και ρελέ.

Σχήμα 5.9.2

## 5.10 Τροφοδοτικό.

Τα περισσότερα εξαρτήματα του ηλεκτρικού κυκλώματος έχουν ονομαστική Τάση λειτουργίας DC 12V. Αυτή η τάση απαιτεί ως πηγή συστοιχία συσσωρευτών ή ένα τροφοδοτικό με Τάση Εξόδου DC 12V. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, καθότι η παροχή AC 230V είναι σχεδόν παντού προσβάσιμη, η λύση του τροφοδοτικού κρίθηκε η πλέον πρακτικότερη και οικονομικότερη.



Τροφοδοτικό για LED,  
με τάση εξόδου DC 12V.

Πηγή: [https://www.ledokosmos.gr/image/cac/he/data/POS/15w/945142334\\_410-800x800\\_0.jpg](https://www.ledokosmos.gr/image/cac/he/data/POS/15w/945142334_410-800x800_0.jpg)

Σχήμα 5.10.1

### ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ:

- Τροφοδοτικό για LED
- Ονομαστική Ισχύς 60W
- Μη - αδιάβροχο, IP20
- Τάση εισόδου : AC 110-260V
- Τάση εξόδου: DC 12V
- Ρεύμα εξόδου : 0 ~ 5A
- Καθαρό Βάρος : 220gr
- Διαστάσεις : 110 x 78 x 36 mm
- Προστασία από βραχυκύκλωμα
- Θερμοκρασία λειτουργίας : 0 ~ 40 ° C
- Θερμοκρασία αποθήκευσης : -20 ~ 60 ° C
- Υγρασία Περιβάλλοντος λειτουργίας : 0 ~ 95 % Μη Συμπύκνωση

## 5.11 Μικροϋλικά.

Διάφορα μικροϋλικά χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες του ηλεκτρικού κυκλώματος, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- Τα Μπουτόν επιλογής του επιθυμητού PlayMode και Επαναφοράς.



Μπουτόν Στιγμιαίας Επαφής N/O , 12 χιλιοστά, αδιάβροχο.

Πηγή:<http://i.ebayimg.com/images/g/HU5AAOSwr7ZW4V6i/s-l400.jpg>

Σχήμα 5.11.1

- Διάφορα καλώδια όπως τα παρακάτω, με ειδικούς ακροδέκτες για τη διασύνδεση Breadboard και μικροελεγκτών.



Αγωγοί σύνδεσης ακροδεκτών  
(Wire Jumper Cables).

Πηγή:<http://i.ebayimg.com/images/g/Mk0AAOSwBahU~kmf/s-l400.jpg>

Σχήμα 5.11.2

- Ένα μικρό Breadboard, 400 επαφών τύπου Universal, με κατακόρυφη σύνδεση + και - , σε κάθε πλευρά.



Mini Breadboard 400 points, Universal.

Πηγή:<http://i.ebayimg.com/images/g/ALYAAOSwdzVXjatl/s-l1600.jpg>

Σχήμα 5.11.3

## 5.12 Η Ηχητική Πλάκα του Λαούτου.

Η Ηχητική Πλάκα (Καπάκι) του Λαούτου κατασκευάστηκε από ξυλεία ερυθρελάτης, με σπλισμό επτά παράλληλων και κατάλληλα διαμορφωμένων καμαριών. Είχε τοποθετηθεί γέφυρα από έβενο, πεναριά από ασετόπαστα και είχε βερνίκι. Ήταν σε ολοκληρωμένη κατάσταση, έτοιμο για κόλλημα σε ένα κρητικό λαούτο.

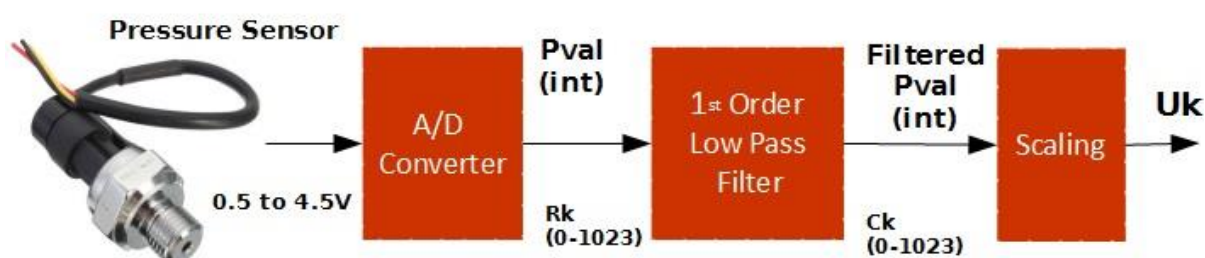


Η Ηχητική Πλάκα.

Σχήμα 5.12

### 5.13 Ψηφιακό Φίλτρο.

Η ανάδραση (feedback) του συστήματος γίνεται όπως έχει ήδη αναφερθεί, μέσω ενός εξωτερικού σήματος αναφοράς δηλαδή αυτό του αισθητήρα πίεσης, μέσω του A/D μετατροπέα του μικροελεγκτή. Στην πράξη όμως αυτό το σήμα παρουσιάζει θόρυβο με αποτέλεσμα τη μη ομαλή λειτουργία του συστήματος. Για τον περιορισμό του θορύβου, χρησιμοποιείται ένα χαμηλοπερατό φίλτρο πρώτης τάξης που εξομαλύνει το σήμα από τον A/D-Μετατροπέα του μικροελεγκτή (33).



Το χαμηλοπερατό φίλτρο πρώτης τάξης που εξομαλύνει το σήμα από τον Αναλογικό σε Ψηφιακό Μετατροπέα του μικροελεγκτή.

Σχήμα 5.13.1

Στην εφαρμογή μας, για τον έλεγχο της πίεσης εσωτερικά των σωλήνων, το φίλτρο θα υλοποιηθεί ψηφιακά στον κώδικα της εφαρμογής.



Η Συνάρτηση Μεταφοράς του ψηφιακού φίλτρου.

Σχήμα 5.13.2

Ως γνωστόν, η συνάρτηση μεταφοράς ενός χαμηλοπερατού φίλτρου 1ης τάξης με σταθερά χρόνου  $\tau$ , στον συνεχή χρόνο, δίνεται ως εξής:

$$G_s = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \Rightarrow (\tau s + 1)C(s) = R(s) \xrightarrow{ILT} \tau c(t) + c'(t) = r(t)$$

*ILT* = inverse Laplace Transform

Σχέση 5.13.1

Η διακριτοποίηση της συνάρτησης μεταφοράς, με μέθοδο backward difference, του φίλτρου με χρόνο δειγματοληψίας  $T$  είναι:

$$c_k = \frac{\tau}{T + \tau} c_{k-1} + \frac{T}{T + \tau} r_k \Rightarrow c_k = c_{k-1} + \frac{T}{T + \tau} (r_k - c_{k-1})$$

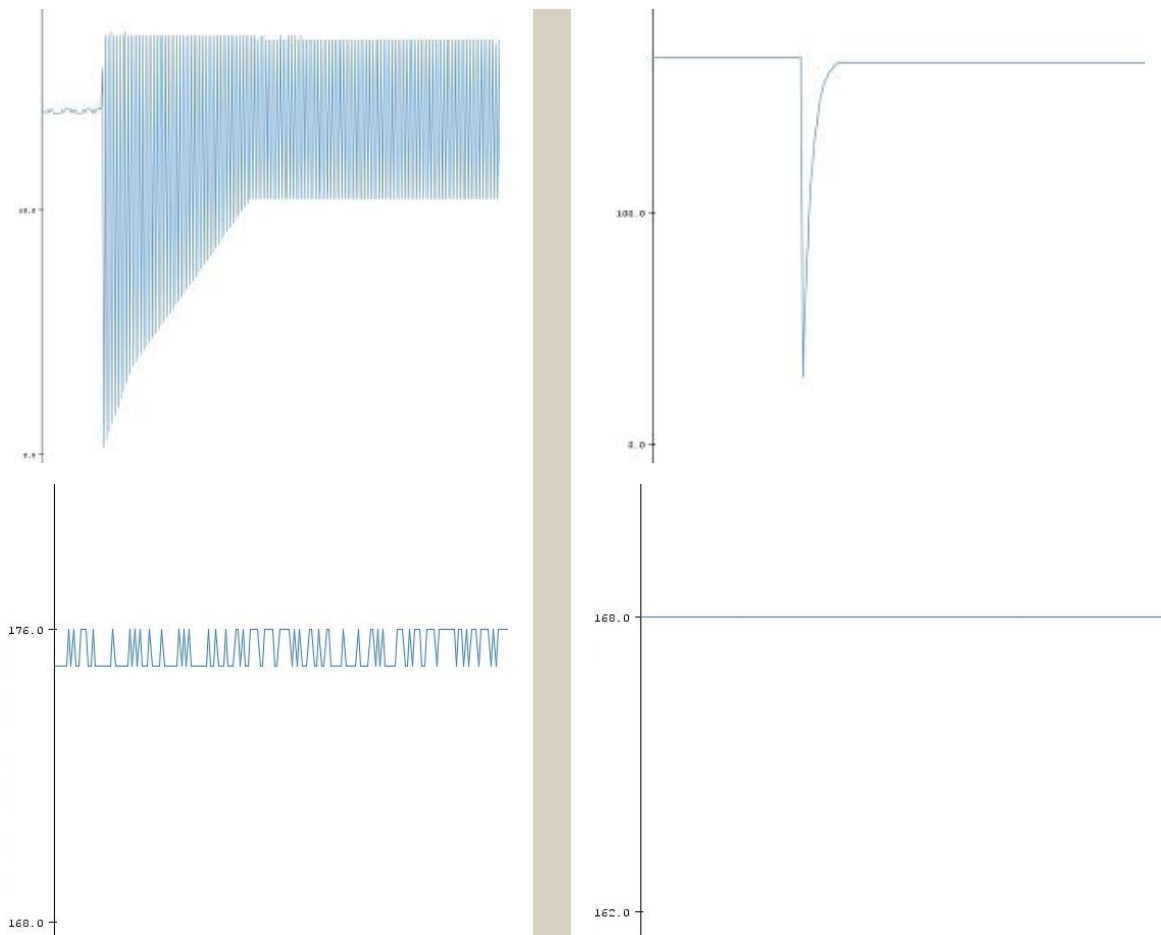
Σχέση 5.13.2

και καταλήγουμε στη σχέση που χρησιμοποιήθηκε στον κώδικα του μικροελεγκτή:

$$c_k = c_{k-1} + \alpha (r_k - c_{k-1}) \quad \text{όπου: } \alpha = \frac{T}{T + \tau}$$

Σχέση 5.13.3

Ένας γενικός κανόνας που ακολουθείται είναι ο χρόνος δειγματοληψίας  $T$  να είναι μικρότερος τουλάχιστον 5 φορές από την σταθερά χρόνου του φίλτρου  $\tau$  ( $T \leq \frac{\tau}{5}$ ).



Τιμές απευθείας από τον αισθητήρα.

Τιμές μετά της εφαρμογή του ψηφιακού Φίλτρου.

Μετρήσεις Πίεσης από τον αισθητήρα στο Κολεκτέρ και εκτύπωση στην οθόνη μέσω του Serial Plotter Arduino.

Σχήμα 5.13.3

## 5.14 Κώδικας Μικροελεγκτή

### 5.14.1 Δομή Προγράμματος.

Ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή έγινε μέσω της γλώσσας Arduino (με βάση τη Wiring) και του λογισμικού Arduino IDE που παρέχεται από την Arduino.cc για αυτό τον σκοπό. Ο κώδικας αναπτύχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να ενημερώνει τον χρήστη για τη κατάσταση του συστήματος μέσω μιας οθόνης αλλά και να δέχεται εντολές από αυτόν (HMI – Human Machine Interface) μέσω μιας σειράς από διακόπτες στιγμιαίας επαφής (buttons).

Η δομή του αποτελείται από τέσσερα μέρη: στο πρώτο μέρος καλούνται οι απαραίτητες βιβλιοθήκες και δηλώνονται οι μεταβλητές. Στο δεύτερο δηλώνονται είσοδοι και έξοδοι, ένα αρχικό μήνυμα στην οθόνη και το σύστημα αρχικοποιείται, ενώ το τρίτο είναι ο ατέρμονας βρόχος όπου καλούνται όλες οι συναρτήσεις. Τέλος βρίσκονται οι συναρτήσεις όπου στηρίζεται η λειτουργία του προγράμματος. Παρακάτω γίνεται αναφορά και μια συνοπτική περιγραφή των συναρτήσεων καθώς είναι και το βασικό μέρος του κώδικα.

- *readPressure( );*  
Γίνεται ανάγνωση της τιμής πίεσης από τον αισθητήρα, φιλτράρισμα από το ψηφιακό φίλτρο και μετατροπή σε MegaPascals και KiloPascals.
- *updatePvalArray( );*  
Ενημερώνεται ο πίνακας που αποθηκεύονται οι τελευταίες 100 τιμές της πίεσης και υπολογίζεται η μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ 2 διαδοχικών κύκλων του προγράμματος.
- *refreshPlayModeState( );*  
Ανιχνεύονται τα πατήματα των Μπουτόν και η τιμή της μεταβλητής PlayModesState μεταβάλλεται σε PlayModeEmptyEmpty, PlayModeEmptyFull, PlayModeFullEmpty και PlayModeFullFull αντίστοιχα των Μπουτόν PlayModeZero, PlayMode1, PlayMode2 και PlayMode3.
- *checkPlayModeAndState( );*  
Ελέγχει συνεχώς το επιλεγμένο PlayMode και την τρέχουσα κατάσταση του συστήματος και ενεργεί ανάλογα



- *checkPressureAndState()*;

Ελέγχει αν οι σωλήνες αδειάζουν ή γεμίζουν, στη συνέχεια όταν πλησιάζει η πίεση στο άνω ή κάτω όριο, αρχίζει να ελέγχει τη μέση τιμή της διαφοράς του πίνακα πιέσεων και γίνεται μικρότερη από ένα όριο, ένας καταμετρητής μετρά μέχρι το 100 και τότε θέτει σε κατάσταση άδειο ή γεμάτο το σύστημα.

- *refresh\_lcd()*;

Ενημερώνει την οθόνη ανάλογα την κατάσταση του συστήματος. Αν είναι σε αναμονή εμφανίζει το μήνυμα δυνατότητας επιλογής ενός από τα τέσσερα PlayModes ενώ αν βρίσκεται στη διαδικασία αδειάσματος ή γεμίσματος το μήνυμα αλλάζει και ενημερώνει για τις εργασίες που γίνονται.

Υπάρχουν και άλλες βοηθητικές συναρτήσεις, οι οποίες εκτελούν απλούστερες λειτουργίες όπως:

*startPouringOff()* > Εκκινεί την αποστράγγιση των σωλήνων.

*stopPouring()* > Σταματά την αποστράγγιση των σωλήνων.

*stopFilling()* > Σταματά την πλήρωση των σωλήνων.

*startFullEmpty()* > Εκκινεί τη διαδικασία εργασιών και ρυθμίσεων για το PlayMode1.

*startEmptyFull()* > Εκκινεί τη διαδικασία εργασιών και ρυθμίσεων για το PlayMode2.

*startFullFull()* > Εκκινεί τη διαδικασία εργασιών και ρυθμίσεων για το PlayMode3.

## 5.14.2 Περιγραφή Λειτουργίας.

Όταν το σύστημα αρχικοποιείται εμφανίζονται μια σειρά από πληροφορίες όπως ένα μήνυμα καλωσορίσματος, η προεπιλεγμένη Κατάσταση Λειτουργίας (PlayMode), η οποία είναι η πρώτη, δηλαδή το PlayModeZero, στη συνέχεια το σύστημα αδειάζει τους σωλήνες καταγράφοντας συνεχώς, στην οθόνη, την εσωτερική φιλτραρισμένη πίεση σε kPa.



1



2



3



4

### HMI – Human Machine Interface

Το μήνυμα καλωσορίσματος.

Σχήμα 5.14.1

Τελικό στάδιο της αρχικοποίησης είναι η αναμονή στη κατάσταση PlayModeZero και η ενημέρωση για τη δυνατότητα αλλαγής Κατάστασης Λειτουργίας (PlayMode) πατώντας ένα από τα 4 μπουτόνς.



### HMI – Human Machine Interface

Όταν το σύστημα έχει αρχικοποιηθεί (βρίσκεται στην κατάσταση PlayModeZero) και περιμένει την επιλογή του επιθυμητού PlayMode από τον χρήστη.

Σχήμα 5.14.2

Αν οποιαδήποτε στιγμή πατηθεί ένα από τα 4 μπουτόνς επιλογής PlayMode, το σύστημα αδειάζει υποχρεωτικά (εκτός κι αν είναι ήδη άδειο), ενημερώνοντας για το ποιους σωλήνες αδειάζει εκείνη τη στιγμή και το επιθυμητό νέο PlayMode.

Στη συνέχεια γεμίζει αυτούς που αντιστοιχούν στο νέο PlayMode ενημερώνοντας παράλληλα για το ποιους σωλήνες γεμίζει και την εσωτερική πίεση σε kPa. Τέλος μπαίνει σε αναμονή ξανά για επιλογή νεότερου PlayMode. Όταν το σύστημα βρίσκεται σε αναμονή εμφανίζεται ένα μήνυμα που περιλαμβάνει τη δυνατότητα αλλαγής Κατάστασης Λειτουργίας (PlayMode) πατώντας ένα από τα 4 μπουτόνς στις δύο πάνω γραμμές της οθόνης.

Στις δύο κάτω γραμμές καταγράφεται το PlayMode που είναι σε χρήση και μια σύντομη περιγραφή του, π.χ. στο Σχήμα 5.14.2 είναι σε χρήση το PlayModeZero στο οποίο είναι όλοι οι σωλήνες άδειοι.

Στο Σχήμα 5.14.3 καταγράφονται οι ενδείξεις της οθόνης κατά τη μετάβαση από PlayMode1 στο PlayMode2. Αρχικά αδειάζει όλο το σύστημα και στη συνέχεια γεμίζει μόνο τον κάτω σωλήνα. Τέλος το σύστημα μπαίνει ξανά σε αναμονή, περιμένοντας νέα επιλογή επιθυμητού PlayMode.



#### HMI – Human Machine Interface

Κατά την μετάβαση από PlayMode1 στο PlayMode2.

Σχήμα 5.14.3

Αν πατηθεί το Μπουτόν Επαναφοράς DASC (κίτρινο) το σύστημα αδειάζει και επανέρχεται στη κατάσταση PlayModeZero ενώ αν πατηθεί το Μπουτόν Επαναφοράς Μικροελεγκτή (κόκκινο) τότε επανεκκινεί ο μικροελεγκτής και το σύστημα αρχικοποιείται ξανά.

Η υλοποίηση της συστήματος αυτοματισμού ονομάστηκε **"The D.A.S.C."** από το ακρωνύμιο της αγγλικής ονομασίας της κατασκευής που είναι: Dynamic Acoustic Sound Changer.

Ο κώδικας προγραμματισμού καταγράφεται λεπτομερώς στο Παράρτημα Α'.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δυνατότητες, Αξιοποίηση και Προοπτική της Δυναμικής Μεταβολής του Ηχοχρώματος.

Είναι γνωστή, ήδη για σχεδόν έναν αιώνα, η χρήση ηλεκτρικών κυκλωμάτων για την ενίσχυση του ήχου ακουστικών μουσικών οργάνων από τις κιθάρες Rickenbacker το 1931. Αργότερα εκτός από ενίσχυση έγινε προσπάθεια για μεταβολή του ήχου και του ηχοχρώματος, εμπορικά τουλάχιστον κυρίως της κιθάρας, φτάνοντας στη γέννηση της σημερινής ηλεκτρικής κιθάρας από μασίφ ξύλο χωρίς αντηχείο, από τον Les Paul και τον Επαμεινώνδα Σταθόπουλο (εταιρία Epihone Guitar) στα μέσα του 1940. Στη συνέχεια με τα πρώτα αναλογικά ηλεκτρονικά και μέχρι τη σύγχρονη εποχή των υπολογιστών έχουν αναπτυχθεί πλήθος ηλεκτρικών-ηλεκτρονικών εφαρμογών για την μετατροπή του ήχου, στατικά ή δυναμικά, που παράγουν τα μουσικά όργανα, ακουστικά και μη. Ο ήχος όμως πάντα επεξεργάζεται δευτερογενώς μετά την παραγωγή του από το όργανο, αφού παραληφθεί από μαγνήτες, πιεζοηλεκτρικά ή μικρόφωνα καθώς ο ήχος που παράγει το εκάστοτε ακουστικό όργανο πρωτογενώς παραμένει αμετάβλητος, αν δεν αλλάξουν οι συνθήκες περιβάλλοντος όπως π.χ. θερμοκρασία ή υγρασία.

Στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η σύνδεση δυο διαφορετικών επιστημονικών κλάδων, της Μουσικής Ακουστικής και των Συστημάτων Αυτομάτου Ελέγχου, με έναν τρόπο που δεν έχει συμβεί στο παρελθόν. Η καινοτομία που εισάγεται ως ιδέα είναι η υλοποίηση ενός μηχανισμού, ο οποίος, θα μεταβάλει δυναμικά τον ήχο ενός ακουστικού έγχορδου μουσικού οργάνου με όρους μηχανικής φυσικής, μεταβολή μάζας και ιδιοσυχνοτήτων συντονισμού. Αυτό σημαίνει ότι το ηχοχρώμα του ακουστικού οργάνου θα μεταβάλλεται άμεσα, με δυνατότητα επαναφοράς όταν το απαιτεί ο οργανοπαίκτης αλλά το πιο σημαντικό είναι ότι θα μεταβάλλεται πρωτογενώς και αυτό θα είναι αντιληπτό από το αισθητήριο όργανο του οργανοπαίκτη και των ακροατών, χωρίς την παρεμβολή ηλεκτρικών - ηλεκτρονικών διατάξεων και ηχείων. Αυτή η αλλαγή θα γίνεται εντελώς "ακουστικά" υπό την επίδραση της μεταβολής της μάζας ή της κατανομής αυτής στο καπάκι και τη μεταφορά του ήχου μέσω μηχανικών κυμάτων στον αέρα.

Στην εργασία αυτή αποδείχθηκε ότι η αλλαγή και η επαναφορά της τιμής της μάζας ενός καπακιού, μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα με μη καταστρεπτικές τεχνικές, επηρέασε τον τρόπο ταλάντωσης του καπακιού οπότε και τον παραγόμενο ήχο (π.χ. από PlayModeZero σε PlayMode1). Επίσης αποδείχθηκε ότι μεταβάλλοντας την κατανομή της μάζας του καπακιού, διατηρώντας την τιμή της σταθερή, υπήρξε αλλαγή στον τρόπο ταλάντωσης του καπακιού οπότε και στον παραγόμενο ήχο (π.χ. από PlayMode1 σε PlayMode2) όπως περιγράφεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4. Οι μεταβολές αυτές, οι οποίες είναι, από PlayMode σε PlayMode, η ελάχιστη τιμή μέσου όρου 5.8889Hz ενώ η μέγιστη 8.7778Hz, μπορεί να γίνει άμεσα αντιληπτή από τον ακροατή, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις η μεταφορά συχνότητας είναι πάνω από 3Hz, ενώ η μέγιστη μεταφορά που καταμετρήθηκε σε όλες τις περιπτώσεις είναι 25Hz Ως αποτέλεσμα αυτών των αποδείξεων διαφαίνεται η προοπτική εφαρμογής αυτής της ιδέας και της πρακτικής της υλοποίησης σε ερευνητικό επίπεδο αλλά και εμπορικό.

Σε ερευνητικό επίπεδο θα ήταν εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στα εργαστηριακά μαθήματα κάθε συναφούς Α.Ε.Ι. όπως τα τμήματα Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Τεχνολογίας

Ήχου και Μουσικών Οργάνων, Τμήμα Λαϊκής και Παραδοσιακής Μουσικής του Τεχνολογικού τομέα και τα τμήματα Μουσικών Σπουδών του Πανεπιστημιακού τομέα. Ως εκπαιδευτικό εργαλείο μπορεί να αξιοποιηθεί σε Ωδεία ή και στα Μουσικά Σχολεία της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης. Ως εργαλείο έρευνας μπορεί να αξιοποιηθεί από εταιρίες κατασκευής μουσικών οργάνων κατά τη φάση σχεδιασμού ενός συμβατικού ακουστικού οργάνου. Με τον ίδιο τρόπο, σε ατομική κλίμακα, ένας οργανοποιός θα μπορεί να μελετά τον ήχο και τις μεταβολές του αλλάζοντας την μάζα ενός καπακιού δυναμικά, εκτιμώντας έτσι τη ιδανική τελική μορφή της συμβατικής κατασκευής του, (π.χ. όταν δοκιμάζει ένα νέο υλικό για τα καπάκια) χωρίς να χρειαστεί να κατασκευάσει μερικές δεκάδες όργανα αποκτώντας τη εμπειρία που απαιτείται με τις παραδοσιακές μεθόδους.

Αυτή η ιδέα θα μπορούσε να αξιοποιηθεί εμπορικά και να δημιουργηθεί μια νέα κατηγορία ακουστικών οργάνων τα οποία θα έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλουν το ηχόχρωμά τους σκοπεύοντας σε δύο στόχους. Ο πρώτος αφορά τη μεταβολή του ήχου, με μια προσέγγιση τύπου "Μηχανικού Αντισταθμιστή - Mechanical Equaliser", ο οποίος θα προσπαθεί να ικανοποιήσει τις διαφορετικές ηχητικά αισθητικές προσεγγίσεις από ένα και μόνο ακουστικό όργανο του οργανοπαίκτη. Ο ηχολήπτης επίσης, σε μια επαγγελματική παρουσία όπως σε μουσικές σκηνές και κονσέρτα, θα μπορεί να τροποποιήσει το εκπεμπόμενο φάσμα ώστε να ξεπεραστούν προβλήματα αρμονικών συχνοτήτων, βόμβων και συντονισμών λόγω των ιδιαιτεροτήτων οργάνων, ηχοσυστημάτων και ακουστικής συγκεκριμένων χώρων. Ένα τέτοιο δυναμικό ακουστικό όργανο θα αρέσει, αλλάζοντας το, σε περισσότερους ανθρώπους από ένα στατικό ακουστικό και θα μπορεί να βρεθεί μια ρύθμιση ικανοποιητική σε κάθε χώρο είτε είναι μια συναυλία είτε μια ηχογράφιση στο στούντιο.

Ο δεύτερος στόχος είναι η αντίστροφη λειτουργία της εφαρμογής, δηλαδή θα μπορεί να επαναφέρει το αρχικό ηχόχρωμα σε ένα ακουστικό έγχορδο μουσικό όργανο το οποίο έχει επηρεαστεί λόγω υγρασίας ή θερμοκρασίας. Αυτές οι παράμετροι μπορούν να διερευνηθούν, όσον αφορά την επίδρασή τους, να γίνει μία μοντελοποίηση η οποία να αντιστοιχεί με μια βάση δεδομένων, ότι κάθε αλλαγή της θερμοκρασίας ή υγρασίας θα επιφέρει τόση αύξηση ή μείωση της ιδιοσυχνότητας και κατ' επέκταση του ηχοχρώματος του μουσικού οργάνου. Με αυτόν τον τρόπο με διέγερση π.χ. μιας ελεύθερης χορδής και ανάγνωση του παραγόμενου φάσματος από τον αυτοματισμό, το σύστημα θα μπορεί να αυτορυθμίζεται για την επαναφορά στο αρχικό ηχόχρωμα ή ακόμα και σε κάποιες Προρυθμίσεις (Presets) που θα έχουν αποθηκευτεί στη μνήμη του και έχουν κριθεί ως πρότυπες.

Προτάσεις για μελλοντικές εργασίες είναι η διερεύνηση της επίδρασης της μεταβολής σε ενδιάμεσες τιμές της μάζας, όχι μόνο γεμάτος ή άδειος σωλήνας, αξιοποιώντας την σχεδόν αναλογική πλήρωση των σωλήνων από την υφιστάμενη υλοποίηση και η μελέτη της επίδραση σε μια ευρύτερη κατανομή της μεταφερόμενης μάζας σε όλη την επιφάνεια του καπακιού και όχι μόνο στα καμάρια. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με κυψελίδες αντί για σωλήνες δίνοντας τη δυνατότητα να μεταφερθεί μάζα σημειακά έχοντας μεγαλύτερο έλεγχο της κατανομής. Επίσης χρήση καπακιών από διαφορετικά ξύλα, εκτός από ερυθρελάτη όπως το συγκεκριμένο, και διαφορετικό σπλισμό κρίνεται χρήσιμο να μελετηθούν στο μέλλον όπως και διαφορετικοί τρόποι μεταφοράς μάζας όπως π.χ. μετακίνηση βαριδίων σε ράγες.

Άλλη προσέγγιση που αξίζει να μελετηθεί είναι η δυναμική μεταβολή της ελαστικότητας ή της πυκνότητας του ξύλου του καπακιού με χρήση προηγμένων μεταυλικών και νανοτεχνολογίας. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον όμως θα έχει η μελέτη στο μέλλον ενός ολοκληρωμένου οργάνου στο οποίο

θα έχει προσαρμοστεί ένας τέτοιος μηχανισμός. Σε ένα τέτοιο όργανο μόνο, θα έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα για το πλαίσιο μεταβολών ήχου που πραγματεύεται αυτή η εργασία. Είναι προφανές ότι θα πρέπει να γίνει χρήση πιο εξειδικευμένων και συμπαγέστερων υλικών ώστε να βελτιωθεί η απόδοση και η αξιοπιστία αλλά να μειωθεί ο όγκος και να χωρέσει στο αντηχείο ενός λαούτο, κιθάρας ακόμα και βιολιού.

## 7. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

---

Οι κώδικες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν.

### *Παράρτημα Α', Κώδικας Arduino.*

```
/* UNO version, author "Nikos Aggelou Fanourakis" , YWROBOT Compatible with the Arduino IDE 1.0,  
Library version:1.1 */
```

```
#include <Wire.h>
```

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
```

```
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4); // set the LCD address to 0x27 for the display
```

```
#define Btn_PlayModeZero 7
```

```
#define Btn_PlayMode1 6
```

```
#define Btn_PlayMode2 5
```

```
#define Btn_PlayMode3 4
```

```
#define Btn_Reset 3
```

```
#define ENA 11 // Enable pwm Pump pin
```

```
#define IN1 13 // Defining Pump Direction
```

```
#define IN2 12 // Defining Pump Direction
```

```
#define T 0.05 // Sampling time
```

```
#define t 0.2 // Time constant of 1st order filter
```

```
#define a T/(T+t)
```

```
#define Empty_Pval 113 // 16 Pressure_Value_in_kPa
```

```
#define Full_Pval 143 // 58 Pressure_Value_in_kPa
```

```
int Pval = 0; //pressure sensor Value
```

```
int Filtered_Pval_Current = 0; //Current filtered pressure Value
```

```

int Filtered_Pval_Last = 0; //Last filtered pressure Value
float Pressure_Value_in_MPa = 0; //
float Pressure_Value_in_kPa =0;

const int PvalArraySize = 100; //
int PvalArray[PvalArraySize];
float PvalDiff;
int PvalDiffCounter = 0;
byte SpeedPump = 255; //pwm pump
int displayLcdCounter = 10;

enum Common_Tube_State {
    EMPTY, //
    POURING_OFF, //
    FILLING_EMPTY_FULL, //
    FILLING_FULL_EMPTY, //
    FILLING_FULL_FULL, //
    EMPTY_FULL,
    FULL_EMPTY,
    FULL_FULL//
};

enum Common_Tube_State ComTubeState;

enum PlayModes {
    PlayModeEmptyEmpty, //All tubes EMPTY =00=
    PlayModeEmptyFull, // Upper Tube EMPTY - Lower Tube FULL =01=
    PlayModeFullEmpty, // Upper Tube FULL - Lower Tube EMPTY =10=
    PlayModeFullFull, // All tubes FULL =11=
};
    
```



```

enum PlayModes PlayModesState;

void setup()
{
pinMode (Btn_PlayModeZero, INPUT);
pinMode (Btn_PlayMode1, INPUT);
pinMode (Btn_PlayMode2, INPUT);
pinMode (Btn_PlayMode3, INPUT);
pinMode (Btn_Reset, INPUT);
pinMode(A0,INPUT);
pinMode(A1,OUTPUT);
pinMode(A2,OUTPUT);
pinMode(A3,OUTPUT);
pinMode(ENA,OUTPUT);
pinMode(IN1,OUTPUT);
pinMode(IN2,OUTPUT);

digitalWrite(A1,HIGH ); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed) Low for Open Valve (Normally
Closed)
digitalWrite(A2,HIGH); // Closed at the beginning
digitalWrite(A3,HIGH);

lcd.init(); // initialize the lcd
lcd.backlight();

lcd.clear(); lcd.setCursor(3,0); lcd.print("TEI of Crete !");
    lcd.setCursor(0,1);lcd.print("Nikos A. Fanourakis");
    lcd.setCursor(3,2);lcd.print("MSc Supervisor: ");
    lcd.setCursor(0,3);lcd.print("Prof N.Papadogiannis");

```

```

delay(500);
lcd.clear(); lcd.setCursor(6,0); lcd.print("M.Sc. ");
    lcd.setCursor(0,2); lcd.print("in Advansed Systems");
delay(300);
lcd.clear(); lcd.setCursor(0,1); lcd.print("of Production");
    lcd.setCursor(4,2); lcd.print("Automation");
    lcd.setCursor(5,3); lcd.print("and Robotics !");
delay(300);
lcd.clear();
lcd.setCursor(1,0); lcd.print("Welcome to the DASC");
lcd.setCursor(0,2); lcd.print("__Dynamic Acoustic__ ");
lcd.setCursor(0,3); lcd.print("___Sound Changer___");
delay(300);

//TODO add initialization logic here

ComTubeState = EMPTY;
startPouringOff();
}

void loop() {
    readPressure();
    updatePvalArray();
    refreshPlayModeState();
    checkPlayModeAndState();
    checkPressureAndState();
    refresh_lcd();

    delay(20);
}

```

```

// reading Pressure, filtering and convert to KiloPascal and MegaPascal
void readPressure() {
    Pval=analogRead(A0); //pressure sensor Value (Output Voltage: 0.5-4.5V DC)

    //Low Pass Filter
    Filtered_Pval_Current = Filtered_Pval_Last + a*(Pval-Filtered_Pval_Last); //1st Order filter (Low
    Pass)
    Pressure_Value_in_MPa = (Filtered_Pval_Current-102)*(1.2/(921-102)); //convert RAW units
    from A/D-C to MPa
    Pressure_Value_in_kPa = Pressure_Value_in_MPa*1000; //convert MPa to kPa
    Filtered_Pval_Last = Filtered_Pval_Current; // update Pval (replace Last with Current
    for this Loop)
}

//check Pressure, defference of Pressure and State to stop filling up and pouring off
//when PvalDiff is lower or higher of 0.00001 adds one to PvalDiffCounter, when this is >100 stops
the pump
void checkPressureAndState() {
    if(isFilling()) {
        if(PvalDiff < 0.00001 && Filtered_Pval_Current > (Full_Pval-3)) {
            PvalDiffCounter++;
            if(PvalDiffCounter > 100) {
                PvalDiffCounter = 0;
                stopFilling();
            }
        }
    }
    else {
        PvalDiffCounter = 0;
    }

    if(Filtered_Pval_Current >= Full_Pval) {

```

```

//ensure that tubes won't break
PvalDiffCounter = 0;
stopFilling();
}
}
else if(ComTubeState == POURING_OFF) {
    if(PvalDiff < 0.00001 && PvalDiff > -0.00001 && Filtered_Pval_Current < (Empty_Pval+1)) {
        PvalDiffCounter++;
        if(PvalDiffCounter > 100) { //200 sto ver1
            PvalDiffCounter = 0;
            stopPouring();
        }
    }
} else {
    PvalDiffCounter = 0;
}
}
}

```

//check selected PlayMode and current State and do what it needs

```

void checkPlayModeAndState() {
    if(PlayModesState == PlayModeEmptyEmpty) {
        if(isFilling() || isFull()) {
            startPouringOff();
        }
        //else do nothing
    }
    else if(PlayModesState == PlayModeEmptyFull) {
        if(ComTubeState == FILLING_EMPTY_FULL ||

```

```

    ComTubeState == EMPTY_FULL ||
    ComTubeState == POURING_OFF) {
    //do nothing
} else if( ComTubeState == EMPTY) {
    startEmptyFull();
} else {
    startPouringOff();
}
}
else if(PlayModesState == PlayModeFullEmpty) {
    if(ComTubeState == FILLING_FULL_EMPTY ||
    ComTubeState == FULL_EMPTY ||
    ComTubeState == POURING_OFF) {
    //do nothing
} else if( ComTubeState == EMPTY) {
    startFullEmpty();
} else {
    startPouringOff();
}
}
else if(PlayModesState == PlayModeFullFull) {
    if(ComTubeState == FILLING_FULL_FULL ||
    ComTubeState == FULL_FULL ||
    ComTubeState == POURING_OFF) {
    //do nothing
} else if( ComTubeState == EMPTY) {
    startFullFull();
} else {
    startPouringOff();
}
}

```

```

    }
  }
}

void stopPouring() {
  Serial.println("stopPouring");
  digitalWrite(A3,HIGH); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)
  delay(50);
  digitalWrite(IN1,LOW);
  digitalWrite(IN2,LOW);
  analogWrite(ENA,0);
  delay(100);
  digitalWrite(A1,HIGH); //Low for Open Valve (Normally Closed)
  digitalWrite(A2,HIGH); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)
  ComTubeState = EMPTY;
}

```

```

void stopFilling(){
  Serial.println("stopFilling");
  digitalWrite(A3,HIGH); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)
  delay(50);
  digitalWrite(IN1,LOW);
  digitalWrite(IN2,LOW);
  analogWrite(ENA,0);
  delay(100);
  digitalWrite(A1,HIGH); //Low for Open Valve (Normally Closed)
  digitalWrite(A2,HIGH); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)

  setFullStateAccordingToPlayMode();
}

```

```

}

void startFullEmpty(){
  Serial.println("startFullEmpty");
  digitalWrite(IN1,LOW);
  digitalWrite(IN2,HIGH);
  analogWrite(ENA,SpeedPump);
  delay(50);
  digitalWrite(A3,LOW); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)
  delay(200);
  digitalWrite(A1,LOW ); //Low for Open Valve (Normally Closed)
  digitalWrite(A2,HIGH); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)

  ComTubeState = FILLING_FULL_EMPTY;
}

void startEmptyFull(){
  Serial.println("startEmptyFull");
  digitalWrite(IN1,LOW);
  digitalWrite(IN2,HIGH);
  analogWrite(ENA,SpeedPump);
  delay(50);
  digitalWrite(A3,LOW); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)
  delay(200);
  digitalWrite(A1,HIGH); //Low for Open Valve (Normally Closed)
  digitalWrite(A2,LOW); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)

  ComTubeState = FILLING_EMPTY_FULL;
}

```

```

void startFullFull(){
    Serial.println("startFullFull");
    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,HIGH);
    analogWrite(ENA,SpeedPump);
    delay(50);
    digitalWrite(A3,LOW); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)
    delay(200);
    digitalWrite(A1,LOW ); //Low for Open Valve (Normally Closed)
    digitalWrite(A2,LOW); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)

    ComTubeState = FILLING_FULL_FULL;
}
    
```

```

void startPouringOff(){
    Serial.println("startPouringOff");
    digitalWrite(IN1,HIGH);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    analogWrite(ENA,SpeedPump);
    delay(50);
    digitalWrite(A3,LOW); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)
    delay(200);
    digitalWrite(A1,LOW ); //Low for Open Valve (Normally Closed)
    digitalWrite(A2,LOW); //HIGH for Closed Valve (Normally Closed)

    ComTubeState = POURING_OFF;
}
    
```



```

void refreshPlayModeState() {
    if(digitalRead(Btn_PlayModeZero) == 1 || digitalRead(Btn_Reset) == 1 ) {
        PlayModesState = PlayModeEmptyEmpty;
    }
    else if(digitalRead(Btn_PlayMode1) == 1) {
        PlayModesState = PlayModeEmptyFull;
    }
    else if(digitalRead(Btn_PlayMode2) == 1) {
        PlayModesState = PlayModeFullEmpty;
    }
    else if(digitalRead(Btn_PlayMode3) == 1) {
        PlayModesState = PlayModeFullFull;
    }
}

bool isFilling() {

    if(ComTubeState == FILLING_EMPTY_FULL ||
        ComTubeState == FILLING_FULL_EMPTY ||
        ComTubeState == FILLING_FULL_FULL )
    {
        return true;
    }

    return false;
}

bool isFull() {

```

```

if(ComTubeState == EMPTY_FULL ||
   ComTubeState == FULL_EMPTY ||
   ComTubeState == FULL_FULL )
{
    return true;
}

return false;
}

void setFullStateAccordingToPlayMode() {
    if(PlayModesState == PlayModeEmptyFull) {
        ComTubeState = EMPTY_FULL;
    }
    else if(PlayModesState == PlayModeFullEmpty) {
        ComTubeState = FULL_EMPTY;
    }
    else if(PlayModesState == PlayModeFullFull) {
        ComTubeState = FULL_FULL;
    }
}

void refresh_lcd()
{
    displayLcdCounter++;

    if(displayLcdCounter > 20){
        displayLcdCounter = 0;
    }
}

```

```

if(isFilling() || ComTubeState == POURING_OFF) {
    lcd.setCursor(0,0); lcd.print(" Wait! Now is ... ");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print(cumTubeStateToStr());
    lcd.setCursor(0,2); lcd.print("Pressure = "); lcd.print(Pressure_Value_in_kPa); lcd.setCursor(16,2);
    lcd.print(" kPa");
    //lcd.setCursor(17,2); lcd.print(Filtered_Pval_Current);
    lcd.setCursor(0,3); lcd.print("Selected PlayMode ="); lcd.print(PlayModesState);
} else {
    lcd.setCursor(0,0); lcd.print("___Choose PlayMode___");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Press Button 0 to 3 ");
    lcd.setCursor(0,2); lcd.print("_____Now in use_____");
    lcd.setCursor(0,3); lcd.print(cumPlayModeToStr());
}
}
}

void updatePvalArray(){

int PvalArrayCopy[PvalArraySize];
memcpy(PvalArrayCopy, PvalArray, sizeof(PvalArrayCopy));

for (int i=0; i<PvalArraySize; i++)
{
    if(i==0) {
        PvalArray[0] = Filtered_Pval_Current;
    } else {
        PvalArray[i] = PvalArrayCopy[i-1];
    }
}
}

```

```

//check median diff
PvalDiff = 0;
for (int i=0; i<PvalArraySize-1; i++)
{
    PvalDiff += (PvalArray[i] - PvalArray[i+1])/(i+1);
}
}

```

```

const char * cumTubeStateToStr() {
    if(ComTubeState == POURING_OFF) {
        return "Pouring off >All ";
    } else if(ComTubeState == FILLING_EMPTY_FULL) {
        return "Filling Up >Bottom ";
    } else if(ComTubeState == FILLING_FULL_EMPTY) {
        return "Filling Up >Top ";
    } else if(ComTubeState == FILLING_FULL_FULL) {
        return "Filling Up >All ";
    }

    return "";
}

```

```

const char * cumPlayModeToStr() {
    if(PlayModesState == PlayModeEmptyEmpty) {
        return "PlayMode0 All-Empty ";
    } else if(PlayModesState == PlayModeFullEmpty) {
        return "PlayMode2 Full-Empty";
    } else if(PlayModesState == PlayModeFullFull) {

```

```
return "PlayMode3 All-Full ";  
} else if(PlayModesState == PlayModeEmptyFull) {  
    return "PlayMode1 Empty-Full";  
}  
  
return "";  
}
```

## Παράρτημα Β', Κώδικας MatLab.

%% Function1, calculating Pressure in RAW unis from ADC, MPa and kPa

```
A=[0 0.5 1 2 3 4 4.5 5] % Voltage in Analog Input
B=(A*1024/5)-1 % Pressure in RAW unis from ADC
C=(A-0.5)*(1.2/(4)) % Pressure in MPa
D=C*1000 % Pressure in kPa
```

%%Function2, calculating mean value of differences between PlayModes in Hertz

```
ZERO = [131 230 314 404 537 585 855 1096 1210] % frequencies of the 8 modes for PlayModeZero
ONE = [125 238 309 396 542 583 845 1081 1201] % frequencies of the 8 modes for PlayMode1
TWO = [129 228 310 397 544 560 854 1084 1198] % frequencies of the 8 modes for PlayMode2
THREE =[125 240 309 394 544 577 858 1083 1227] % frequencies of the 8 modes for PlayMode3
```

```
ZEMON = abs(ZERO-ONE) % the absolute value of each element in array ZERO MINUS ONE
ZEMTW = abs(ZERO-TWO) % the absolute value of each element in array ZERO MINUS TWO
ZEMTH = abs(ZERO-THREE)%the absolute value of each element in array ZERO MINUS THREE
```

```
ONMTW = abs(ONE-TWO) % the absolute value of each element in array ONE MINUS TWO
ONMTH = abs(ONE-THREE)% the absolute value of each element in array ONE MINUS THREE
TWMTH = abs(TWO-THREE)% the absolute value of each element in array TWO MINUS THREE
```

```
MZEMON = mean (ZEMON) % the average or mean value of array ZERO MINUS ONE
MZEMTW = mean (ZEMTW) % the average or mean value of array ZERO MINUS ONE
MZEMTH = mean (ZEMTH) % the average or mean value of array ZERO MINUS ONE
```

```
MONMTW = mean (ONMTW) % the average or mean value of array ONE MINUS TWO
MONMTH = mean (ONMTH) % the average or mean value of array ONE MINUS THREE
MTWMTH = mean (TWMTH) % the average or mean value of array TWO MINUS THREE
```

## 8. Βιβλιογραφία και Παραπομπές.

1. **Π.Ν. Παρασκευόπουλος.** *Εισαγωγή στον Αυτόματο Έλεγχο, Τόμος Α: Θεωρία*, σελ. 525,. Αθήνα : Εκδόσεις Π.Ν. Παρασκευόπουλου., 2001. 1.
2. **Όμηρος, Μετάφραση: ΙΑΚΩΒΟΥ ΠΟΛΥΛΑ.** *Ηλιάδα, ΡΑΨΩΔΙΑ Σ΄* , στίχοι : 412-422. σσ. ΡΑΨΩΔΙΑ Σ΄ , στίχοι : 412-422.
3. —. *Ηλιάδα, ΡΑΨΩΔΙΑ Σ΄* , στίχοι:368-372.
4. —. *Ηλιάδα, ΡΑΨΩΔΙΑ Σ΄* , στίχοι : 468-473.
5. **wikipedia.** Τάλως\_(μυθολογία). [Ηλεκτρονικό] [https://el.wikipedia.org/wiki/Τάλως\\_\(μυθολογία\)](https://el.wikipedia.org/wiki/Τάλως_(μυθολογία)).
6. **Neil, Philip.** *Μύθοι από όλο τον κόσμο. Απόδοση: Μαριάννα Τζιαντζή, Διασκευασμένος Αφρικανικός μύθος.* LONDON : Εκδόσεις Ερευνητές, 1995.
7. **Κοτσανάς, Κώστας.** Μουσείο Αρχαίας Ελληνικής Τεχνολογίας Κώστα Κοτσανά. [Ηλεκτρονικό] <http://kotsanas.com/index.php>. 4.
8. **el.wikipedia.** Μηχανισμός\_των\_Αντικυθήρων. [Ηλεκτρονικό] [https://el.wikipedia.org/wiki/Μηχανισμός\\_των\\_Αντικυθήρων](https://el.wikipedia.org/wiki/Μηχανισμός_των_Αντικυθήρων).
9. *Ο αστρονομικός μηχανισμός των Αντικυθήρων.* **Πουρνάρα, Μαργαρίτα.** Εφημερίδα ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ, Ένθετο Τέχνες και Γράμματα, σελ. 1, Κυριακή 16 Ιουλίου 2006.
10. **en.wikipedia.** Centrifugal\_governor. [Ηλεκτρονικό] [https://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal\\_governor](https://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_governor).
11. **el.wikipedia.** Ακουστική. [Ηλεκτρονικό] <https://el.wikipedia.org/wiki/Ακουστική..>
12. **el.wikipedia.** Μουσική\_ακουστική. [Ηλεκτρονικό] [https://el.wikipedia.org/wiki/Μουσική\\_ακουστική](https://el.wikipedia.org/wiki/Μουσική_ακουστική).
13. **Νίκος Πάντσος.** Pedia.gr. *ΗΧΟΣ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ.* [Ηλεκτρονικό] <http://www.pedia.gr/corner/acousticsg.html>.
14. *Μίλησε» η λύρα του Ερμή.* **Ειρήνη, Βενιού.** Αθήνα : Το Βήμα, 12 02 12/02/2012.
15. */Πυθαγόρας.* **el.wikipedia.** [Ηλεκτρονικό] <https://el.wikipedia.org/wiki/Πυθαγόρας>.
16. **Huffman, Carl.** *Archytas of Tarentum. Pythagorean, philosopher and mathematician king.* Cambridge : s.n., (2005) .
17. **Πλάτων.** *Πολιτεία (ή Περί δικαίου) . 380π.Χ.*
18. **Pollio, Marcus Vitruvius.** *De architectura, English: On architecture, published as Ten Books on Architecture.* Probably written between 30 and 15 BC.
19. **Αριστοτέλης.** *"Αναλυτικά Ύστερα" ( Posterior Analytics) βιβ. ΙΙ, κεφ ΙV από το βιβλίο"Όργανον".*
20. **Mersenne, Marin.** *Traité de l'harmonie universelle.* 1627.

21. Σπετσιώτης, Π. Καμπύλης & Ι. *Το εργαστήρι της μουσικής*. Αθήνα : fagottobooks.
22. Σφακιωτάκης, Μ. *Σημειώσεις, Διαλέξεις Θεωρίας Σ.Α.Ε.* . Ηράκλειο : s.n., Ιανουάριος 2014 .
23. —. *Σημειώσεις, Δυναμική και Έλεγχος, Διαλέξεις*. 2014.
24. Κ., Ogata. *Modern Control Engineering (5th Ed)*. s.l. : Prentice Hall, 2009.
25. Μ., Wolfke. "Über die Möglichkeit der optischen Abbildung vom Molekulargittern", (Google translation - "About the possibility of optical imaging of molecular lattices"). *Physikische Zeitschrift*, 21, 495-7. 1920.
26. Χατζηνικολάου Αντώνιος, Αποστολάκος Ιωάννης, Εοιβλέπων Καθηγητής: Δρ Κιαγιάς Χαράλαμπος. *ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΙΔΙΟΜΟΡΦΩΝ ΜΕΓΑΦΩΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΕΣΡΙ (ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΣΥΜΒΟΛΟΜΕΤΡΙΑΣ ΨΗΦΙΔΩΝ) Πτυχιακή Εργασία*. ΡΕΘΥΜΝΟ : s.n., 2007.
27. Μαρία, Ποιμενίδου. *ΤΡΟΠΟΙ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΕΓΧΟΡΔΩΝ ΜΟΥΣΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ ΜΕΣΩ ΜΗ ΚΑΤΑΣΤΡΕΠΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ*. Ρέθυμνο : ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : Δρ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ ΠΑΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ, 2007.
28. J.N. Butters, J.A. Leendertz. Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology. February 1971, Volume 3, Issue 1, Pages 26-30.
29. Efthimios Bakarezos, Vasilios Vathis , Spyros Brezas , Yannis Orphanos , Nektarios A. Papadogiannis. Acoustics of the Chelys – An ancient Greek tortoise-shell lyre. *Elsevier , Applied Acoustics*. Applied Acoustics 73 (2012) 478–483.
30. Chladni, Ernst Florens Friedrich. *Die Akustik*. s.l. : Leipzig, 1802.
31. fren Gorrostieta-Hurtado, Jesus-Carlos Pedraza-Ortega, Juan-Manuel Ramos-Arreguin, Artemio Sotomayor-Olmedo and Joaquín Perez-Meneses\*. Vibration analysis in the design and construction of an acoustic guitar, Academic Journals Full Length Research Paper. *International Journal of Physical Sciences*. Available online at <http://www.academicjournals.org/IJPS>, DOI: 10.5897/IJPS11.1603, ISSN 1992 - 1950 ©2012,, 23 March, 2012, Τόμ. Vol. 7, pp. 1986 - 1997, (13).
32. Thomas D. Rossing, Editor. *The Science of String Instruments*. Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA) : Stanford University.
33. Σφακιωτάκης, Μ. *Σημειώσεις , Ψηφιακή Υλοποίηση PID Ελεγκτών*. Ηράκλειο : s.n., 2014.
34. Runnemalm A., Molin N-E. and Jansson E. On operating deflection shapes of the violin including in-plane motions. Τόμ. J. Acoust. Soc. Am., 107, 3452-3459 (2000).
35. Jansson E., Molin N-E. and Saldner H.O. On eigenmodes of the violin – Electronic holography and admittance measurements. Τόμ. J. Acoust. Soc. Am., 95, 1100-1105 (1994).
36. T.D., Fletcher N.H. and Rossing. *The physics of musical instruments*. (Springer-Verlag, New York, . s.l. : Springer-Verlag, New York,, 1999.
37. T.D., Cohen D. and Rossing. "The acoustics of mandolins". *Acoust. Sci. & Tech.*, 24, 1-6 (2003).



38. K.A., Powel R.L. and Stetson. "Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction". *J.Opt. Soc. Am.*, 55, 1593-1598 (1965).
39. N-E., Molin. "Applications of whole field interferometry in mechanics and acoustics". *Optics and Lasers in Engineering*, 31, 93-111 (1999).
40. Ed., Rastogi P.K. *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*. s.l. : John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2001.
41. C., Jones R. and Wykes. *Holographic and speckle interferometry*. s.l. : Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
42. Lökberg, O. The ultimate holographic tool for vibration analysis. *J. Acoust. Soc. Am.* 75, 1783-1791, 1984.
43. F., Anogianakis. *Greek folklore musical instruments*. s.l. : (Melissa, Athens, 1991).
44. C-C, Huang C-H. and Ma. Experimental and numerical investigations of resonant vibration characteristics for piezoceramic plates. *J. Acoust. Soc. Am.*, 109, 2780-2788 (2001).
45. Forest Product Laboratory, Wood Handbook. *Wood as an engineering material*. s.l. : Technical report FPL-GTR-113. (1999).
46. Maas M, McIntosh-Snyder J. *String instruments of ancient Greece*. . s.l. : New Haven & London: Yale University Press; 1989. p. 79–112.
47. ML., West. *Ancient Greek music*. s.l. : Oxford: Clarendon Press; 1992. p. 50–7.
48. NH., Fletcher. The didjeridu (didgeridoo). *Acoust Aust* 1996;24:11–5.
49. Pan J, Li X, Tian J, Lin T. Short sound decay of ancient Chinese music bells. *J Acoust Soc Am* 2002;112:3042–5.
50. M., Jing. A theoretical study of the vibration and acoustics of ancient Chinese bells. . *J Acoust Soc Am* 2003;114:1622–8.
51. Yoo J, Rossing TD. Geometrical effects on the tuning of Chinese and Korean stone chimes. *J Acoust Soc Am* 2006;120:EL78–83.
52. McNeil LE, Mitran S. Vibrational frequencies and tuning of the African mbira. *J Acoust Soc Am* 2008;123:1169–78.
53. H., Roberts. Reconstructing the Greek tortoise-shell lyre. *World Archaeol* 1981;12:303–12.
54. TJ., Mathiesen. *Apollo's lyre: Greek music and music theory in antiquity and the middle ages*. s.l. : Lincoln NE: University of Nebraska Press; 2000. p. 237–48 .
55. J., Solomon. Towards a history of Tonoι. . *J Musicol* 1984;3:242–51.
56. S., Novack. The significance of the phrygian mode in the history of tonality. *Misc Music (Adel)* 1977;9:82–177.
57. P., Newell. Recording studio design. . *Oxford: Focal Press; 2008. p. 139.*

58. Rastogi PK, editor. *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*. s.l. : Chichester: John Wiley & Sons Ltd.; 2001. p. 229–33.
59. Jones R, Wykes C. *Holographic and speckle interferometry*. . s.l. : Cambridge: Cambridge University Press; 1989. p. 165–96.
60. Huang C-H, Ma C-C. *Experimental and numerical investigations of resonant vibration characteristics for piezoceramic plates*. . s.l. : J Acoust Soc Am 2001;109:2780–8.
61. Wada H, Ando M, Takeuchi M, Sugawara H, Koike T, Kobayashi T, et al. Vibration measurement of the tympanic membrane of guinea pig temporal bones using time-averaged speckle pattern interferometry. . *J Acoust Soc Am* 2002;111:2189–99.
62. HV., Helmholtz. *On the sensations of tone*. . s.l. : New York: Dover Publications; 1954. p. 374–87.
63. Fletcher NH, Rossing TD. *The physics of musical instruments*. . s.l. : New York: Springer; 1998. p. 40–6.
64. G., Caldersmith. Designing a guitar family. *Appl Acoust* 1995;46:3–17.
65. Rossing TD, Moore FR, Wheeler PA. *The science of sound*. . s.l. : San Francisco: Addison Wesley; 2002. p. 373–97.
66. Mitchell TC, editor. *Music and civilization* . s.l. : The British Museum yearbook, vol.4. London: The British Museum; 1980. p. 43–58.
67. Rossing TD, editor. *The science of string instruments*. s.l. : New York: Springer; 2010. p. 19.
68. *Vibration Analysis of the Top Plates of Trantitional Greek String Musical Instruments*. M. Bakarezos, S. Gymnopoulos, S. Brezas, Y. Orfanos, E. Maravelakis, C.I. Papadopoulos, M. Tatarakis, A. Antoniadis and N.A. Papadogiannis. s.l. : The Thirteenth International Congress of Sound and Vibration, Vienna Austria, 2006, .
69. *Σύνδεση των ακουστικών χαρακτηριστικών της κατασκευαστικής δομής της Κρητικής λύρας με την ποιότητα του εκπεμπόμενου ήχου*. Χαρτοφύλακας, Λ., Μπακαρέζος, Μ., Ορφανός, Ι. και Παπαδογιάννης, Ν. Α. s.l. : Πανελλήνιο Συνέδριο, ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ 2008, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης, Ξάνθη, Ελλάδα, 29/09/2008 έως 1/10/2008, Εκδ.: Ν. Μπάρκας, σελ.182-191.
70. Σπυρίδης, Χ. *Φυσική και Μουσική Ακουστική*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Grapholine. : s.n., (2005).
71. Χαρτοφύλακας, Λ. *Ακουστική και ηχητική ανάλυση των οργάνων της οικογένειας του μπουζουκιού*. s.l. : Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία.
72. Βάθης, Β. *Ανακατασκευή, ακουστική μελέτη και εκτέλεση αρχαίας ελληνικής λύρας (χέλυσ)*. Ρέθυμνο : Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι Κρήτης, Τμήμα Ακουστικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, (2007).
73. Παπαδιαμάντης, Α. *Ανάπτυξη & κατασκευή συμβολομέτρου προβολής αμφιστροειδών κροσσών, για την παράκαμψη των οπτικών στοιχείων του οφθαλμού*. Ηράκλειο : Μεταπτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Κρήτης, 2007.

74. Πατσάς, Α. *Ανάπτυξη τροποποιημένων τεχνικών ολογραφικής συμβολομετρίας ESPI για την μελέτη κανονικών τρόπων ταλάντωσης επιφανειών*. Ρέθυμνο : Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, (2009).

75. Χαρτοφύλακας, Λ. *Διερεύνηση του ρόλου των δονητικών χαρακτηριστικών του αντηχείου έγχορδων παραδοσιακών μουσικών οργάνων και συγκεκριμένα κρητικής λύρας, στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του φυσικά εκπεμπόμενου ήχου*. Ρέθυμνο : Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Τμήμα Ακουστικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, (2007).

76. Backus, J. *The acoustical foundations of music*. s.l. : W.W. Norton & Co, New York, 1977.