



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ & ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ Τ.Ε.

**Δονητικός χαρακτηρισμός ακουστικών
πιεζοηλεκτρικών αισθητηρίων με τη χρήση
συμβολομετρικών απεικονιστικών τεχνικών λέιζερ**

Παναγιώτης Σωτήρης

**Επιβλέποντες: Δρ. Ιωάννης Ορφανός
Δρ. Ευθύμιος Μπακαρέζος
Δρ. Νεκτάριος Παπαδογιάννης**

Ρέθυμνο, 2017

Ευχαριστίες

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη για την ευκαιρία που μου έδωσε να πάρω την πτυχιακή μου εργασία, αλλά πολύ περισσότερο για την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και εξεζητημένο θέμα πτυχιακής όπως αυτό. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ιωάννη Ορφανό, για την απίστευτα μεγάλη βοήθεια και τον χρόνο που μου αφιέρωσε για τη διεξαγωγή ενός περίπλοκου και πρωτοφανούς πειράματος για τα μέχρι τότε δικά μου δεδομένα. Ακόμα, χρωστάω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Κωνσταντίνο Κεχράκο, για τη σημαντική του βοήθεια, καθώς μου παραχώρησε τον προσωπικό του πιεζοηλεκτρικό αισθητήριο για να το μελετήσω στα πλαίσια της πτυχιακής μου εργασίας, και ένα ευχαριστώ στον κ. Στέλιο Πιοτογιαννάκη για τη συμβολή του στο ηλεκτρονικό κομμάτι του πειράματος. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Ευθύμιο Μπακαρέζο, του οποίου η καθοδήγηση, οι συμβουλές και το συνεχές του ενδιαφέρον για την διεκπεραίωση της εργασίας, αλλά και της κατανόησης του θέματος σε βάθος από μέρους μου, είχαν καταλυτικό ρόλο στη διεκπεραίωση της εργασίας και αφύπνιση του ενδιαφέροντος μου για το συγκεκριμένο θέμα.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
Abstract	iv
1. Εισαγωγή.....	1
2. Στοιχεία θεωρίας	3
2.1 Κανονικοί τρόποι δόνησης	3
2.1.1 Ορθογώνιες μεμβράνες	4
2.1.2 Κυκλικές μεμβράνες	8
2.2 Πιεζοηλεκτρισμός και πιεζοηλεκτρικά στοιχεία	10
2.3 Οπτικές τεχνικές ολογραφικής συμβολομετρίας.....	14
2.3.1 Ολογραφία και ολογραφική συμβολομετρία	15
2.4 Χρονικά ολοκληρωμένη ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων – ESPI	19
3. Πειραματικές διατάξεις & διαδικασία μετρήσεων	23
4. Πειραματικά αποτελέσματα & ανάλυση	27
4.1 Ηχητική εκπομπή / συχνοτική απόκριση & ποιοτικά χαρακτηριστικά	27
4.2 Συμβολογράμματα κανονικών τρόπων δόνησης & ποιοτική ανάλυση	28
4.3 Ποσοτική ανάλυση & σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων	34
5. Σύνοψη – Συμπεράσματα	42
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	44

Περίληψη

Στην εργασία αυτή τροποποιήθηκε κατάλληλα σύστημα χρονικά ολοκληρωμένης ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (ESPI) του Εργαστηρίου Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης για τη μελέτη των δονητικών χαρακτηριστικών ενός εμπορικά διαθέσιμου ακουστικού πιεζοηλεκτρικού αισθητηρίου. Επιπρόσθετα έγινε προσδιορισμός της συχνотικής του απόκρισης συνέπεια διέγερσής του σε συχνότητες του ακουστου και του υπερηχητικού φάσματος. Τα αποτελέσματα με την διάταξη ESPI, η οποία επέτρεπε ελάχιστο ανιχνεύσιμο πλάτος δόνησης ~162nm, κατέδειξαν τέσσερις συνολικά κανονικούς τρόπους δόνησης. Η ποσοτική ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων έδειξε ότι αυτά είναι σε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους. Από τη συνολική πειραματική μελέτη συμπεραίνεται ότι η χρονικά ολοκληρωμένη ESPI είναι μια υψηλής ακρίβειας μη-καταστρεπτική και μη-επεμβατική μέθοδος που μπορεί να δώσει αξιόπιστη πληροφορία για τη φύση των δονήσεων ενός μακροσκοπικού αντικειμένου.

Abstract

A time-integrated electronic speckle-pattern interferometry (ESPI) system was appropriately modified and used to study the vibrational characteristics of a commercially available piezoelectric transducer. In addition, the frequency response of the transducer was experimentally determined in audible and ultrasonic frequencies. The experiments were performed in the Laboratory of Acoustical and Optical Technology of the Department of Music Technology and Acoustics Engineering of the T.E.I. of Crete. Using the modified ESPI arrangement, which allowed for the detection of vibration amplitudes as low as ~162nm, in total four normal modes were identified in the aforementioned frequency range. The experimental results of the two methods were quantitatively analyzed and were found in very good agreement. From the overall experimental study, it is concluded that time-integrated ESPI is a highly accurate non-destructive and non-contact method that can yield reliable and valuable information for the nature of the vibration of a macroscopic object.

1. Εισαγωγή

Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες είναι πραγματικά ευέλικτα και αποτελεσματικά εργαλεία μέτρησης και ανίχνευσης με πληθώρα εφαρμογών στην επιστήμη και την τεχνολογία. Αυτές περιλαμβάνουν τον ποιοτικό έλεγχο, τον έλεγχο διεργασιών, και τη μετρολογία και ανίχνευση, σε ευρύ φάσμα εφαρμογών από το πεδίο της Ιατρικής ως την αεροδιαστημική [π.χ. βλ. 1-6]. Ιδιαίτερα στη σημερινή εποχή τα συναντά κανείς σε συσκευές ευρείας και καθημερινής χρήσης, καθώς χρησιμοποιούνται ως αισθητήρια κλίσης σε καταναλωτικές ηλεκτρονικές συσκευές και ως αισθητήρια πίεσης στα σύγχρονα κινητά τηλέφωνα.

Στις εφαρμογές στα γενικότερα πεδία της Ακουστικής και της Μουσικής Τεχνολογίας η χρήση τους βασίζεται στη μετατροπή της ακουστικής πίεσης ή των μικρο-δονήσεων σε ηλεκτρικό ρεύμα (πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο), και χρησιμοποιούνται ευρύτατα, για παράδειγμα στα έγχορδα όργανα μέσω της επαφής τους με τα αντηχεία τους. Τα δονητικά χαρακτηριστικά των αισθητηρίων αυτών, και κατά συνέπεια οι αντίστοιχες συναρτήσεις μεταφοράς τους, είναι εξαιρετικά σημαντικές για την αξιόπιστη λειτουργία τους, και η βελτίωση της απόδοσής τους υπαγορεύει την ανάγκη της πειραματικής μελέτης των συντονιστικών χαρακτηριστικών τους.

Η χρήση οπτικών συμβολομετρικών και ολογραφικών απεικονιστικών τεχνικών με χρήση λέιζερ [π.χ. βλ. 7-12] για σκοπούς μελέτης δονητικής συμπεριφοράς πληθώρας αντικειμένων και συστημάτων είναι πλέον ευρέως διαδεδομένη, καθώς προσφέρει πολύ ελκυστικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων, παλαιότερων μηχανικών τεχνικών [13]: είναι μη-καταστρεπτικές και δεν απαιτούν επαφή αισθητηρίου με το υπό εξέταση αντικείμενο, προσφέρουν υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα (της τάξης των μερικών nanometer¹), προσφέρουν τη δυνατότητα της παρακολούθησης της δόνησης του αντικειμένου σε πραγματικό χρόνο (on-line), ενώ με τη χρήση παλμικών λέιζερ είναι δυνατή η μελέτη της χρονικής εξέλιξης των φαινομένων σε πολύ μικρές χρονικές κλίμακες (nanosecond έως και femtosecond²).

Στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας χρησιμοποιήθηκε σύστημα χρονικά ολοκληρωμένης ηλεκτρονικής συμβολομετρίας ψηφίδων (Electronic Speckle Pattern Interferometry – ESPI) με χρήση λέιζερ συνεχούς μήκους κύματος (Continuous Wave – CW), που έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Η διάταξη αυτή τροποποιήθηκε κατάλληλα, ώστε με μη-καταστρεπτικό τρόπο να ανιχνευτούν απεικονιστικά οι κανονικοί τρόποι δόνησης και οι αντίστοιχες συχνότητες συντονισμού ενός εμπορικά

¹ 1 nanometer (nm) = 10⁻⁹m

² 1 nanosecond (ns) = 10⁻⁹s, 1 femtosecond (fs) = 10⁻¹⁵s.

διαθέσιμου πιεζοηλεκτρικού αισθητηρίου. Η τεχνική ESPI είναι μια καλά θεμελιωμένη τεχνική ολογραφικής συμβολομετρίας (βλ. π.χ. [9-12]) με ευρύ πεδίο εφαρμογών, όπως για παράδειγμα στην Ιατρική και τη Βιολογία [14-16], στη βιομηχανία αεροσκαφών [17], στην αεροναυπηγική [10] αλλά και στη μελέτη της ατμόσφαιρας [18], στην Ακουστική [19] και ιδιαίτερα στη μελέτη και στον ποιοτικό έλεγχο τόσο ποικίλων μουσικών οργάνων [20-21] όσο και ηχείων [22-23], και στο χαρακτηρισμό και έλεγχο ηλεκτρονικών εξαρτημάτων [26] όπως πιεζοηλεκτρικά αισθητήρια και συστήματα [27-28].

Η εργασία είναι δομημένη ως ακολούθως: στο 2^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες που άπτονται του αντικειμένου της εργασίας, στο 3^ο κεφάλαιο αναλύεται οι δύο πειραματικές μέθοδοι, η πειραματική διάταξη ESPI και η διαδικασία μετρήσεων / συλλογής δεδομένων και για τις δύο πειραματικές μεθόδους, ενώ στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα, η ανάλυση και επεξεργασία τους. Στη συνέχεια γίνεται σύντομος σχολιασμός των αποτελεσμάτων και προτείνονται περαιτέρω βήματα μελέτης, και στο τέλος δίνεται η σχετική βιβλιογραφία.

2. Στοιχεία θεωρίας

Το κεφάλαιο αυτό αποσκοπεί στην παρουσίαση και επεξήγηση των βασικών εκείνων εννοιών που άπτονται του αντικειμένου της εργασίας, δηλαδή της μελέτης των δονητικών χαρακτηριστικών ενός ακουστικού πιεζοηλεκτρικού αισθητηρίου, και ειδικότερα των κανονικών τρόπων δόνησής του, με τη χρήση της τεχνικής ESPI, δηλαδή μιας οπτικής τεχνικής ανίχνευσης δονήσεων που εντάσσεται στην ευρύτερη κατηγορία τεχνικών ολογραφικής συμβολομετρίας. Έτσι λοιπόν, αρχικά παρουσιάζονται και επεξηγούνται οι κανονικοί τρόποι δόνησης τέτοιων συστημάτων, στη συνέχεια δίνονται πληροφορίες για τον πιεζοηλεκτρισμό και τα αντίστοιχα αισθητήρια, και τέλος παρουσιάζονται οι αρχές λειτουργίας οπτικών ολογραφικών τεχνικών με ιδιαίτερη έμφαση στην αναλυτική περιγραφή της τεχνικής ESPI.

2.1 Κανονικοί τρόποι δόνησης

Ένας κανονικός τρόπος δόνησης, στα Αγγλικά *normal mode*, ενός ταλαντούμενου (δονούμενου) συστήματος είναι ένα μοτίβο κίνησης, στο οποίο όλα τα μέρη του συστήματος κινούνται αρμονικά με την ίδια συχνότητα και με σταθερή σχέση φάσης. Η ελεύθερη κίνηση που περιγράφεται από τους κανονικούς τρόπους δόνησης πραγματοποιείται σε συγκεκριμένες συχνότητες, οι οποίες είναι γνωστές ως *φυσικές συχνότητες* ή *συχνότητες συντονισμού*. Ένα φυσικό αντικείμενο, όπως ένα κτίριο, μια γέφυρα ή ένα μόριο, έχει ένα σύνολο κανονικών τρόπων δόνησης και αντίστοιχες συχνότητες, που εξαρτώνται από τη δομή, τα υλικά και τις συνοριακές συνθήκες. Έτσι, ένας κανονικός τρόπος δόνησης χαρακτηρίζεται από μια συγκεκριμένη συχνότητα (*modal frequency*) και ένα δεδομένο σχήμα (*modal shape*), που για αντικείμενα όπως αυτό που μελετάται στην παρούσα πτυχιακή εργασία, αντιστοιχεί σε μια δισδιάστατη κατανομή πλάτους δόνησης.

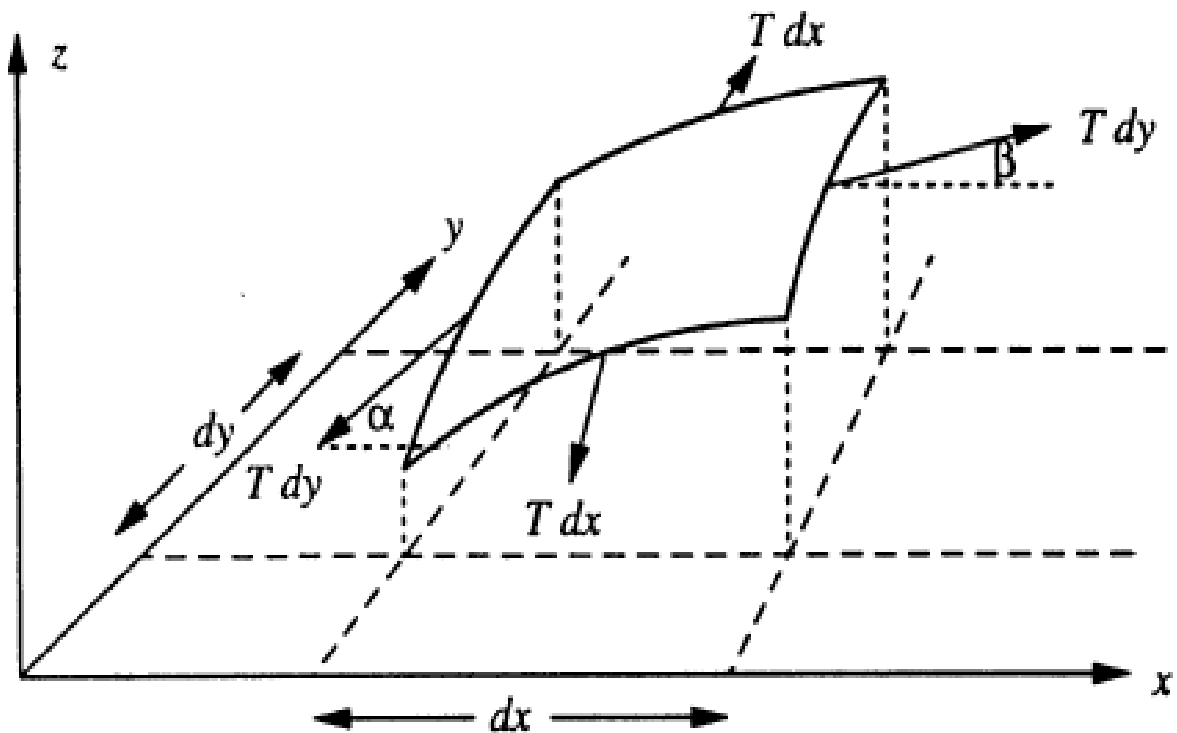
Η πιο γενική κίνηση ενός συστήματος είναι μια υπέρθεση των κανονικών τρόπων δόνησής του. Οι τρόποι δόνησης είναι *κανονικοί* με την έννοια ότι μπορούν να κινούνται ανεξάρτητα, δηλαδή ότι η διέγερση ενός τρόπου δεν θα προκαλέσει ποτέ κίνηση διαφορετικού τρόπου. Σε μαθηματικούς όρους, οι κανονικοί τρόποι δόνησης είναι *ορθογώνιοι* μεταξύ τους, που ουσιαστικά αυτό σημαίνει ότι δεν μπορεί να δημιουργηθεί ένας κανονικός τρόπος δόνησης, αλλά ούτε καν ένα μέρος αυτού, από οποιονδήποτε γραμμικό συνδυασμό άλλων κανονικών τρόπων δόνησης.

Οι κανονικοί τρόποι δόνησης δισδιάστατων αντικειμένων, όπως ορθογώνιων και κυκλικών μεμβρανών και πλακών, έχουν μελετηθεί διεξοδικά από πολύ νωρίς [π.χ. βλ. 29-33].

Παρ' όλο που πρόκειται για σχετικά απλά φυσικά συστήματα, η περιγραφή τους περιπλέκεται λόγω των διαφορετικών τρόπων στήριξης ή/και φόρτισης/διέγερσης, που αυτόματα υπαγορεύουν και διαφορετικές συνοριακές συνθήκες ή/και προσθήκη επιπλέον όρων στην μαθηματική περιγραφή. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας θα επικεντρωθούμε στην μαθηματική περιγραφή κυκλικών μεμβρανών, αρχίζοντας εισαγωγικά από την περίπτωση μιας ορθογώνιας μεμβράνης με σταθερά άκρα, που είναι μάλλον το πιο απλό δισδιάστατο σύστημα και εξυπηρετεί σκοπούς κατανόησης της κυκλικής περίπτωσης ενδιαφέροντος.

2.1.1 Ορθογώνιες μεμβράνες

Ας θεωρήσουμε μια δισδιάστατη ορθογώνια μεμβράνη διαστάσεων L_x και L_y με σταθερά άκρα, και ότι εφαρμόζεται σε αυτήν σταθερή τάση T σε όλη τη μεμβράνη. Επικεντρωνόμαστε σε ένα στοιχείο επιφανειακής πυκνότητας σ , το οποίο έχει μετατοπιστεί κατά στοιχειώδη απόσταση dz και που η επιφανειακή τάση T ενεργεί για να το επαναφέρει στην ισορροπία, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Οι δυνάμεις που δρουν στις άκρες dx έχουν μέγεθος $T dx$, και οι κάθετες συνιστώσες τους είναι $-T \sin \alpha dx$ και $-T \sin \beta dx$.



Σχήμα 1: Δυνάμεις που αναπτύσσονται σε στοιχείο ορθογώνιας μεμβράνης [34].

Για μικρά α και β ισχύουν οι προσεγγίσεις

$$\sin \alpha \approx \tan \alpha = \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_{y+dy}, \quad \sin \beta \approx \tan \beta = \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_y \quad (1)$$

Κατά συνέπεια, η δύναμη πάνω στο στοιχείο κατά την z -διεύθυνση θα είναι

$$F_y = Tdx \left[\left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_{y+dy} - \left(\frac{\partial z}{\partial y} \right)_y \right] = Tdx \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} dy \quad (2)$$

ενώ, παρομοίως, η κάθετη συνιστώσα των δυνάμεων που δρουν στα άκρα dy θα είναι

$$F_x = Tdy \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} dx \quad (3)$$

Η συνολική δύναμη κατά την z -διεύθυνση πάνω στο στοιχείο $dx dy$ είναι $F = F_x + F_y$, οπότε η εξίσωση κίνησης θα είναι

$$Tdx dy \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) = \sigma dy dx \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$$

ή, διαφορετικά

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{T}{\sigma} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) = c^2 \nabla^2 z \quad (4)$$

Αυτή είναι η κυματική εξίσωση εγκάρσιων κυμάτων με ταχύτητα $c = \sqrt{T/\sigma}$, και λύνεται εκφράζοντας την μετατόπιση $z(x, y, t)$ ως γινόμενο τριών συναρτήσεων, μια για κάθε μεταβλητή, δηλαδή: $z(x, y, t) = X(x)Y(y)\Phi(t)$. Οι δευτερες μερικές παράγωγοι είναι

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{d^2 X}{dx^2} Y \Phi, \quad \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{d^2 Y}{dy^2} X \Phi, \quad \text{και} \quad \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{d^2 \Phi}{dt^2} XY,$$

οπότε η κυματική εξίσωση, εν τέλει, γράφεται ως

$$\frac{1}{\Phi} \frac{d^2 \Phi}{dt^2} = \frac{c^2}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} + \frac{c^2}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} \quad (5)$$

Η εξίσωση (5) μπορεί να είναι αληθής μόνο όταν κάθε της μέλος είναι σταθερό, και ας το συμβολίζουμε ω^2 . Έτσι έχουμε πλέον δύο εξισώσεις, την

$$\frac{d^2\Phi}{dt^2} + \omega^2\Phi = 0 \quad (6)$$

που έχει λύσεις της μορφής $\Phi(t) = E \sin \omega t + F \cos \omega t$, και την

$$\frac{1}{X} \frac{d^2X}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} = -\frac{1}{Y} \frac{d^2Y}{dy^2}. \quad (7)$$

Πάλι, θα πρέπει κάθε μέλος της εξίσωσης (7) να είναι σταθερό, και ας το συμβολίζουμε τώρα k^2 . Έτσι έχουμε επιπλέον δύο εξισώσεις, την

$$\frac{d^2X}{dx^2} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - k^2 \right) X = 0 \quad (8)$$

με λύσεις της μορφής $X(x) = A \sin \sqrt{(\omega^2/c^2) - k^2} x + B \cos \sqrt{(\omega^2/c^2) - k^2} x$, και την

$$\frac{d^2Y}{dy^2} + k^2 Y = 0 \quad (9)$$

με λύσεις της μορφής $Y(y) = C \sin ky + D \cos ky$. Για μια ορθογώνια μεμβράνη διαστάσεων L_x και L_y με σταθερά τα τέσσερα άκρα της, οι συνοριακές συνθήκες υπαγορεύουν ότι θα πρέπει $z = 0$ όταν $x = 0$, $x = L_x$, $y = 0$, και $y = L_y$. Από την πρώτη και την τρίτη συνθήκη, εξάγεται ότι $B = D = 0$. Από τη δεύτερη συνθήκη εξάγεται ότι

$$A \sin \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k^2} L_x = 0 \Rightarrow \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - k^2} L_x = m\pi, \text{ και}$$

$$X(x) = A \sin \frac{m\pi x}{L_x},$$

όπου $m = 1, 2, \dots$. Από την τέταρτη συνθήκη εξάγεται ότι

$$C \sin kL_y = 0 \Rightarrow kL_y = n\pi, \text{ και}$$

$$Y(y) = C \sin \frac{n\pi y}{L_y},$$

όπου $n = 1, 2, \dots$. Τελικά, λοιπόν, θα έχουμε λύσεις της μορφής

$$z_{mn} = A \sin \frac{m\pi x}{L_x} \sin \frac{n\pi y}{L_y} (E \sin \omega t + F \cos \omega t)$$

$$= \sin \frac{m\pi x}{L_x} \sin \frac{n\pi y}{L_y} (M \sin \omega t + N \cos \omega t) \quad (10)$$

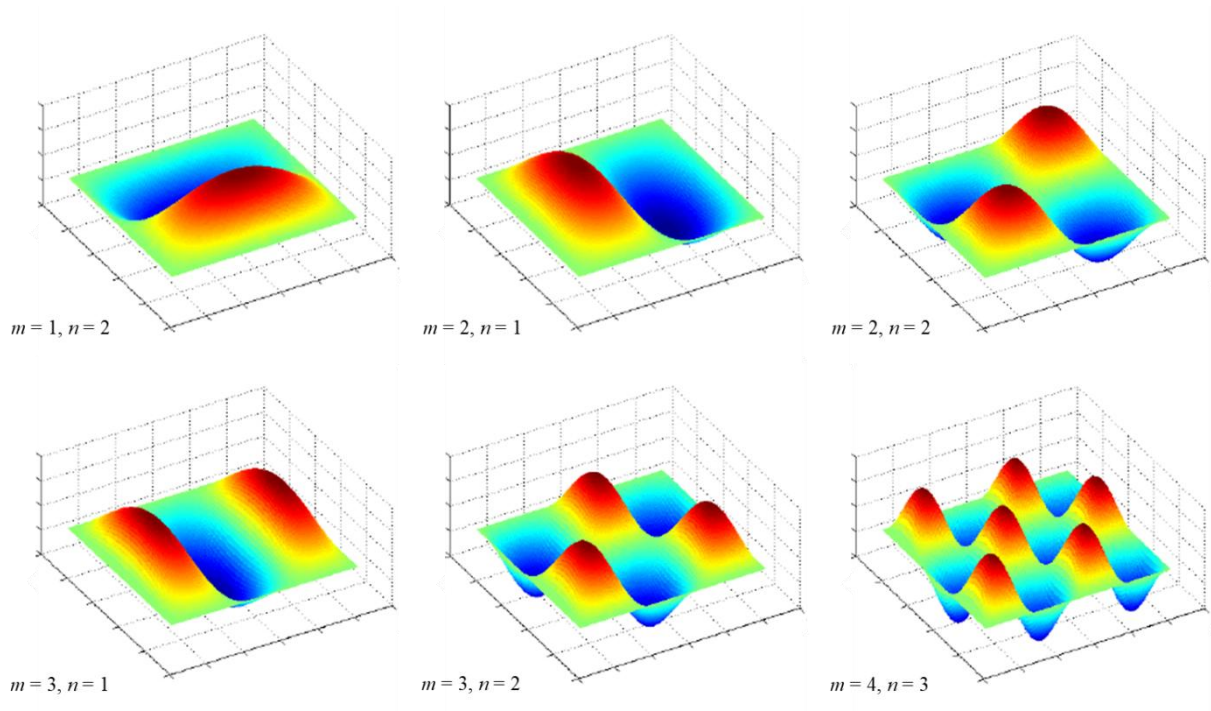
Για την εύρεση των συχνοτήτων συντονισμού λύνουμε την $\sqrt{(\omega^2/c^2) - k^2} = m\pi/L_x$ ως προς ω :

$$\omega^2 = \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 c^2 + k^2 c^2 = \left(\frac{m\pi}{L_x}\right)^2 c^2 + \left(\frac{n\pi}{L_y}\right)^2 c^2,$$

συνεπώς, τελικά έχουμε ότι οι συχνότητες συντονισμού f_{mn} δίνονται από την

$$f_{mn} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \sqrt{\frac{m^2}{L_x^2} + \frac{n^2}{L_y^2}}, \quad m, n = 1, 2, \dots \quad (11)$$

Οι εξισώσεις (10) και (11) είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες εξισώσεις μιας χορδής πακτωμένης στα άκρα της, κι έτσι μπορούμε να θεωρήσουμε τους κανονικούς τρόπους δόνησης μιας ορθογώνιας μεμβράνης ως διδιάστατους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης χορδής. Στάσιμα κύματα στην x -διεύθυνση μοιάζουν ανεξάρτητα από τα στάσιμα κύματα στην y -διεύθυνση. Για μια δεδομένη ορθογώνια μεμβράνη, η δυάδα των αριθμών (m, n) χαρακτηρίζει μονοσήμαντα τον κάθε κανονικό τρόπο δόνησης, αλλά και την αντίστοιχη συχνότητα συντονισμού. Κάποιοι από τους κανονικούς τρόπους δόνησης μιας ορθογώνιας μεμβράνης και οι αντίστοιχες τιμές των συντελεστών m και n που τους χαρακτηρίζουν φαίνονται στο σχήμα 2.



Σχήμα 2: Μερικοί κανονικοί τρόποι δόνησης ορθογώνιας μεμβράνης και οι αντίστοιχοι αριθμοί m και n (ακολουθώντας την μαθηματική περιγραφή της παραγράφου 2.1.1).

2.1.2 Κυκλικές μεμβράνες

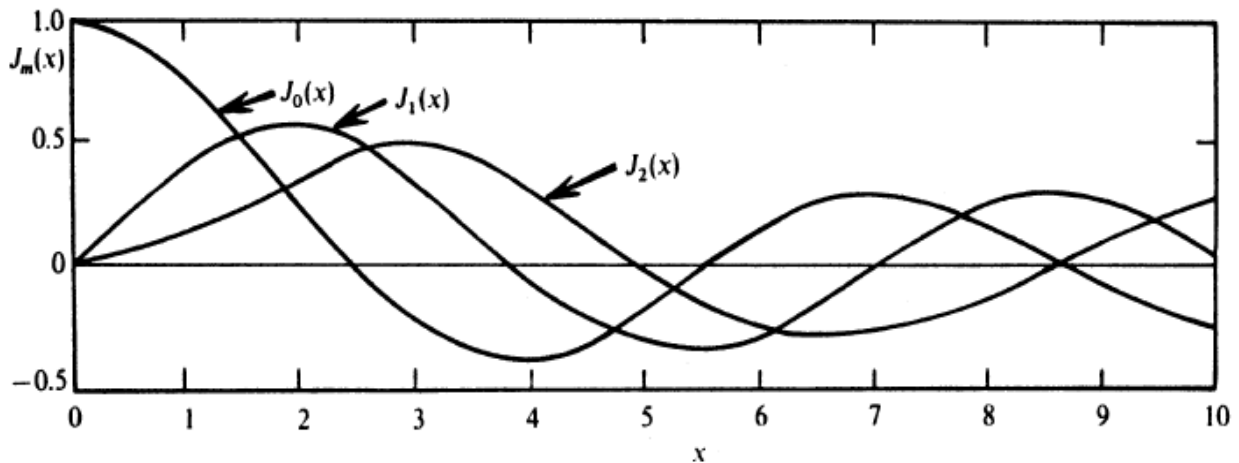
Για μια κυκλική μεμβράνη η κυματική εξίσωση (4) γράφεται σε πολικές συντεταγμένες, μέσω του μετασχηματισμού $x = r \cos \varphi$ και $y = r \sin \varphi$, ως ακολούθως:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 z}{\partial \varphi^2} \right). \quad (12)$$

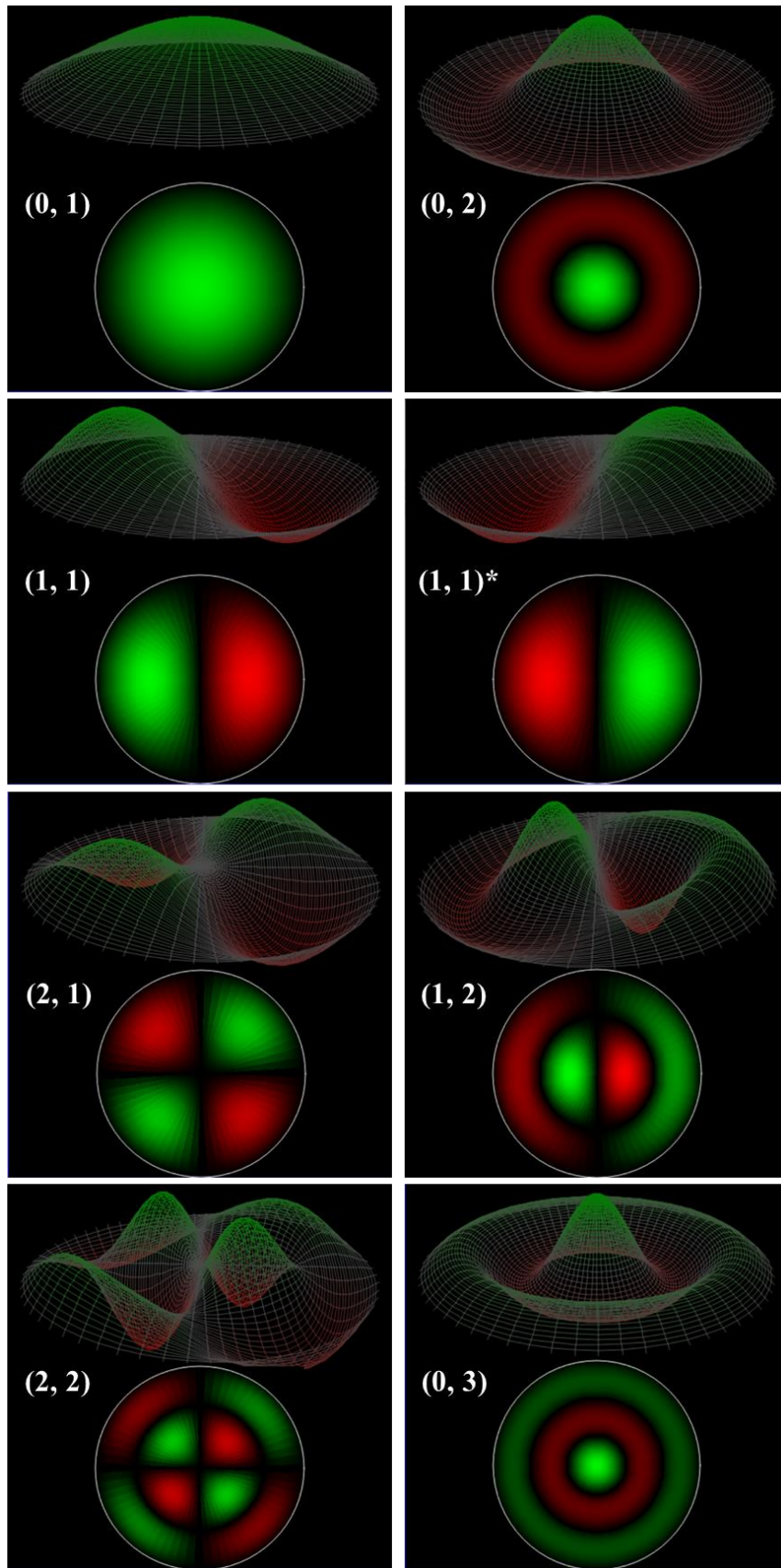
Αναζητάμε λύσεις της μορφής $z(r, \varphi, t) = R(r)\Phi(\varphi)e^{i\omega t}$, το οποίο οδηγεί στο σετ εξισώσεων:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} + m^2 \Phi &= 0, \quad \text{και} \\ \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dR}{dr} + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{m^2}{r^2} \right) R &= 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Η λύση της πρώτης εξίσωσης είναι της μορφής $\Phi(\varphi) = Ae^{\pm im\varphi}$. Η δεύτερη εξίσωση είναι μια μορφή της εξίσωσης Bessel $(d^2 y/dx^2) + (1/x)(dy/dx) + [1 - (m^2/x^2)]y = 0$, όπου $y = R$ και $x = kr = \omega r/c$. Οι λύσεις της είναι συναρτήσεις Bessel τάξης m , δηλαδή $J_0(x)$, $J_1(x)$, ..., $J_m(x)$, και κάθε μία από αυτές μηδενίζεται για αρκετές τιμές του ορίσματος x , για παράδειγμα: $J_0(x) = 0$, όταν $x = 2,405, 5,520, 8,654, \dots$, $J_1(x) = 0$ όταν $x = 0, 3,83, 7,02, \dots$. Αυτή η συμπεριφορά για τις τρεις πρώτες συναρτήσεις Bessel φαίνεται στο σχήμα 3. Το n -οστό μηδενικό της συνάρτησης $J_m(kr)$ δίνει την συχνότητα του (m, n) κανονικού τρόπου δόνησης, ο οποίος έχει m κομβικές διαμέτρους και n κομβικούς κύκλους (συμπεριλαμβανομένου αυτού στο σύνορο). Στον θεμελιώδη $(0, 1)$ τρόπο, όλη η μεμβράνη κινείται σε φάση. Ενδεικτικοί κανονικοί τρόποι δόνησης μιας ιδανικής κυκλικής μεμβράνης με τις αντίστοιχες τιμές των συντελεστών m και n που τους χαρακτηρίζουν φαίνονται στο σχήμα 4.



Σχήμα 3: Συμπεριφορά των τριών πρώτων συναρτήσεων Bessel [34].



Σχήμα 4: Μερικοί κανονικοί τρόποι δόνησης ιδανικής κυκλικής μεμβράνης σε τρισδιάστατη (πάνω σχήματα) και δισδιάστατη (κάτω σχήματα) απεικόνιση, και οι αντίστοιχες δυνάδες αριθμών (m, n) που τους χαρακτηρίζουν (ακολουθώντας την μαθηματική περιγραφή της παραγράφου 2.1.2).

Οι δώδεκα πρώτες σχετικές (δηλαδή ως πολλαπλάσια της θεμελιώδους) συχνότητες συντονισμού για μια ιδανική κυκλική μεμβράνη δίνονται στον πίνακα 1. Για την μετατροπή αυτών σε κανονικές συχνότητες απαιτείται πολλαπλασιασμός των τιμών τους με παράγοντα $(2,405/2\pi a)\sqrt{T/\sigma}$, όπου a είναι η ακτίνα της μεμβράνης.

Πίνακας 1: Οι δώδεκα πρώτες σχετικές (δηλαδή ως πολλαπλάσια της θεμελιώδους) συχνότητες συντονισμού για μια ιδανική κυκλική μεμβράνη [34].

(m, n)	f_{mn}	(m, n)	f_{mn}	(m, n)	f_{mn}
(0, 1)	1,000	(3, 1)	2,653	(0, 3)	3,600
(1, 1)	1,594	(1, 2)	2,918	(5, 1)	6,652
(2, 1)	2,136	(4, 1)	3,156	(3, 2)	4,060
(0, 2)	2,296	(2, 2)	3,501	(6, 1)	4,154

Στην πραγματικότητα οι συχνότητες συντονισμού των κυκλικών μεμβρανών μπορεί να αποκλίνουν από αυτές του πίνακα 1. Τα κύρια φαινόμενα που επηρεάζουν προς αυτή την αλλαγή είναι η φόρτιση του αέρα (air loading), η καμπτική ακαμψία (bending stiffness) και η διατμητική ακαμψία (shear stiffness). Γενικά μιλώντας, η φόρτιση του αέρα μειώνει τις συχνότητες, ενώ τα άλλα δύο φαινόμενα τείνουν να τις αυξήσουν. Στην περίπτωση των λεπτών μεμβρανών, η φόρτιση του αέρα είναι το κυρίαρχο φαινόμενο. Η επίδραση που θα έχει στις συχνότητες η φόρτιση του αέρα εξαρτάται από τις σχετικές ταχύτητες των κυμάτων στη μεμβράνη και τον αέρα, καθώς και από το αν ο αέρας είναι περιορισμένος κατά οποιοδήποτε τρόπο. Ένας περιορισμένος όγκος αέρα, όπως στην περίπτωση ενός τυμπάνου, θα αυξήσει τη συχνότητα των αξονοσυμμετρικών κανονικών τρόπων δόνησης, ιδιαίτερα του τρόπου (0, 1). Όταν όμως η μεμβράνη δονείται σε ελεύθερο αέρα, όλες οι συχνότητες μειώνονται, με τις χαμηλότερες συχνότητες να μειώνονται περισσότερο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί να παρατηρηθούν εκφυλισμένοι κανονικοί τρόποι δόνησης σε παραπλήσιες συχνότητες, που είναι οπτικά όμοιοι μεταξύ τους αλλά διαφέρουν σε φάση (π.χ. βλ. τους τρόπους (1, 1) και (1, 1)* στο σχήμα 4).

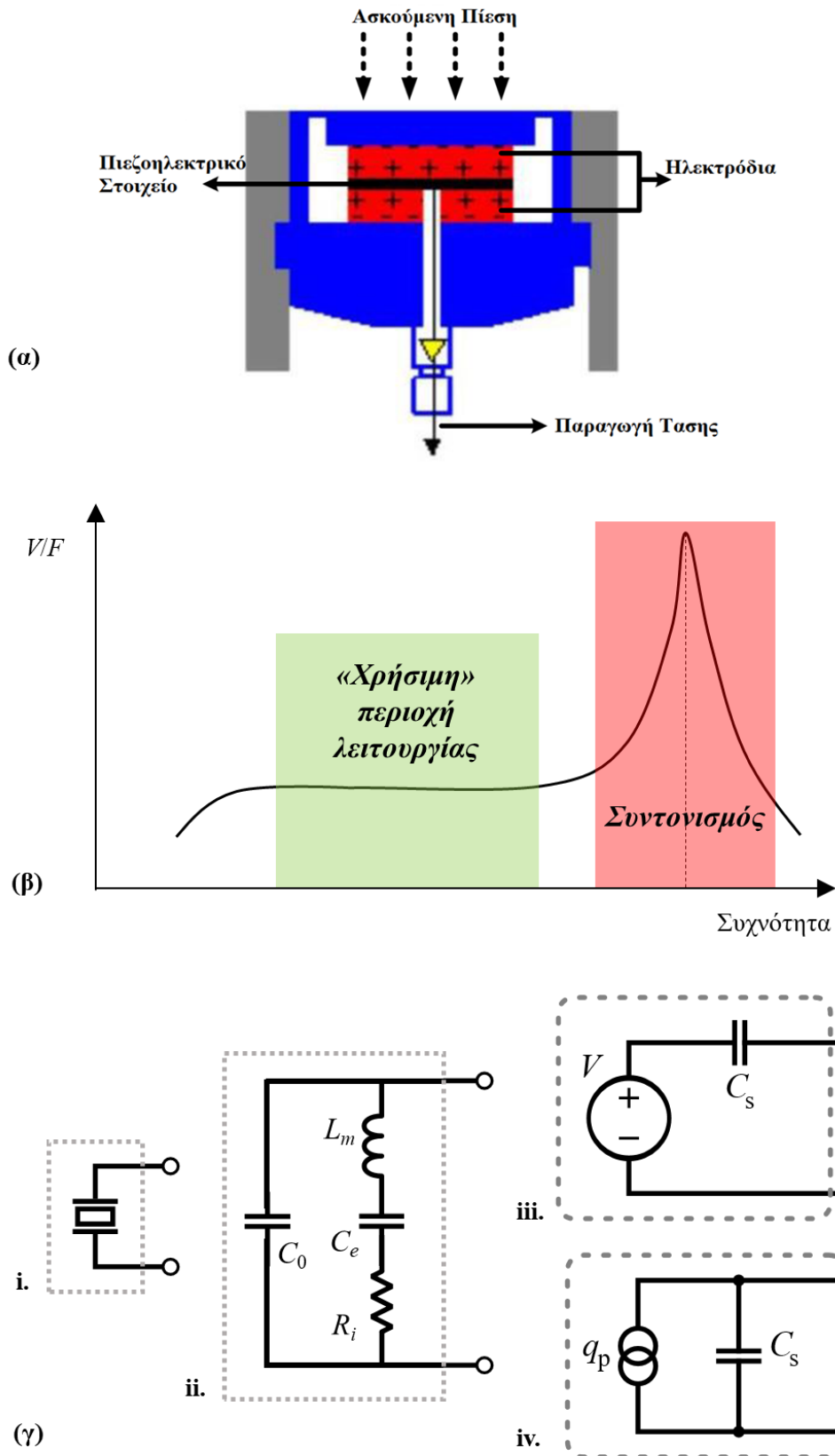
2.2 Πιεζοηλεκτρισμός και πιεζοηλεκτρικά στοιχεία

Η λέξη *πιεζοηλεκτρισμός* (piezoelectricity) συνδυάζει τις Ελληνικές λέξη *πίεση* και *ηλεκτρισμός*. Το 1880 οι Jacques και Pierre Curie ανακάλυψαν ότι η πίεση παράγει επιφανειακά ηλεκτρικά φορτία σε κρυστάλλους όπως ο χαλαζίας (quartz) και η τουρμαλίνη [35]. Στη συνέχεια το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε *πιεζοφαινόμενο* (piezoeffect), ο ηλεκτρισμός που

παράγεται από μηχανική πίεση ονομάστηκε *πιεζοηλεκτρισμός*, και τα υλικά που εμφανίζουν αυτό το φαινόμενο ονομάστηκαν *πιεζοηλεκτρικά* (*piezoelectrics*). Το 1881 ο Gabriel Lippmann προέβλεψε ότι η εφαρμογή ενός δυναμικού θα μπορούσε να δημιουργήσει μηχανική πίεση και ελαστική παραμόρφωση σε τέτοια υλικά [36], κάτι που άμεσα επιβεβαιώθηκε πειραματικά [37] και το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε τότε *ανάστροφο πιεζοφαινόμενο* (*return piezoeffect*).

Οι πρακτικές εφαρμογές του πιεζοηλεκτρικού φαινομένου άρχισαν σύντομα μετά την ανακάλυψή του. Το 1917 ο Γάλλος μαθηματικός και φυσικός Pierre Langevin πρότεινε τη χρήση πλακών χαλαζία σε συσκευή ανίχνευσης υποβρυχίων αντικειμένων [38]. Η επανάσταση στο πεδίο έφτασε με τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά, όταν οι B.M. Wool και I.P. Goldman συνέθεσαν πιεζοκεραμικό τιτανικό βάριο [39], το οποίο εμφάνιζε πιεζοηλεκτρικά χαρακτηριστικά σε πρακτικά χρήσιμη κλίμακα όταν του εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο. Έτσι, ήδη από την δεκαετία του 1950 τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και αισθητήρια μπαίνουν σε βιομηχανική παραγωγή μεγάλης κλίμακας, και στις μέρες μας το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο χρησιμοποιείται σε πολλά καθημερινά αντικείμενα, όπως σε αναπτήρες, στα κινητά τηλέφωνα, σε ηχεία, ως διεγέρτες / «ενεργοποιητές» (actuators) σε συσκευές μικρο- και νανο-μηχανικών μετατοπίσεων, και σε μετατροπείς σήματος (transducers). Η ενδεικτική κατασκευή και αρχή λειτουργίας ενός πιεζοηλεκτρικού transducer φαίνεται στο σχήμα 5.α.

Κοινό χαρακτηριστικό της συχνοτικής απόκρισης των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε κάποιο εξωτερικό ερέθισμα ή της οδήγησής τους με κάποια εφαρμοζόμενη τάση, είναι η ύπαρξη μιας (τουλάχιστον) χαρακτηριστικής συχνότητας συντονισμού (π.χ. βλ. σχήμα 5.β). Η ηλεκτρομηχανική συμπεριφορά ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που διεγείρεται μέσω μιας εφαρμοζόμενης δύναμης, πίεσης ή τάσης, μπορεί να μοντελοποιηθεί και να αντιμετωπιστεί μέσω ενός ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος. Το πιο βασικό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα για ένα κεραμικό πιεζοηλεκτρικό στοιχείο κοντά στην συχνότητα συντονισμού είναι το μοντέλο Van Dyke (σχήμα 5.γ.ii), που συχνά χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση των ηλεκτρομηχανικών συντονιστικών χαρακτηριστικών κρυσταλλικών ταλαντωτών [40]. Το μοντέλο Van Dyke είναι ουσιαστικά ένα *RLC* κύκλωμα παράλληλα συνδεδεμένο με έναν πυκνωτή (C_0) που αντιπροσωπεύει την ηλεκτροστατική χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Στο *RLC* κύκλωμα η αυτεπαγωγή (L_m) αντιστοιχεί στην αδράνεια («σεισμική μάζα») του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, η αντίσταση (R_i) στην αντίσταση διαρροής / απόσβεση, και ο πυκνωτής (C_e) στις μηχανικές ελαστικές ιδιότητές του. Ειδικότερα όταν χρησιμοποιούνται ως αισθητήρια που λειτουργούν στην «χρήσιμη περιοχή», τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία αντιμετωπίζονται ως μια πηγή τάσης V σε σειρά με την συνολική χωρητικότητά τους, C_s (σχήμα 5.γ.iii) είτε ως μια πηγή φορτίου q_p παράλληλα με αυτήν (σχήμα 5.γ.iv).



Σχήμα 5: (α) ενδεικτική κατασκευή και αρχή λειτουργίας ενός πιεζοηλεκτρικού transducer, (β) τυπική συχνοτική απόκριση πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (τάση εξόδου V / εφαρμοζόμενη δύναμη F vs. συχνότητα), και (γ) κυκλωματικό σύμβολο πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (i), το μοντέλο ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος Van Dyke (ii), και ισοδύναμα κυκλώματα πιεζοηλεκτρικών αισθητηρίων που λειτουργούν στην «χρήσιμη περιοχή» (iii – iv).

Ανάλογα με το σχεδιασμό ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί «τρόποι» για τη φόρτιση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου: διαμήκης, εγκάρσιος και διάτμησης. Η ανίχνευση μεταβολών πίεσης με τη μορφή ήχου είναι η πιο κοινή εφαρμογή ανίχνευσης, για παράδειγμα τα πιεζοηλεκτρικά μικρόφωνα για ακουστικές κιθάρες ή ακουστικά βιολιά κ.ο.κ. Ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας που συνδέεται με το σώμα ενός οργάνου είναι γνωστός ως μικρόφωνο επαφής. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται επίσης για ήχο υψηλής συχνότητας σε υπερηχητικούς transducers, για ιατρική απεικόνιση αλλά και για βιομηχανικές, μη-καταστρεπτικές εφαρμογές. Σε πολλές περιπτώσεις ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως αισθητήρας όσο και ως διεγέρτης, με τις περισσότερες πιεζοηλεκτρικές συσκευές να έχουν αυτήν την «διττή» δυνατότητα είτε χρησιμοποιείται είτε όχι. Οι υπερηχητικοί transducers, για παράδειγμα, μπορούν να εισάγουν κύματα υπερήχων στο σώμα, να λάβουν το επιστρεφόμενο κύμα και να το μετατρέψουν σε ηλεκτρικό σήμα (τάση). Οι περισσότεροι ιατρικοί μετατροπείς υπερήχων είναι πιεζοηλεκτρικοί.

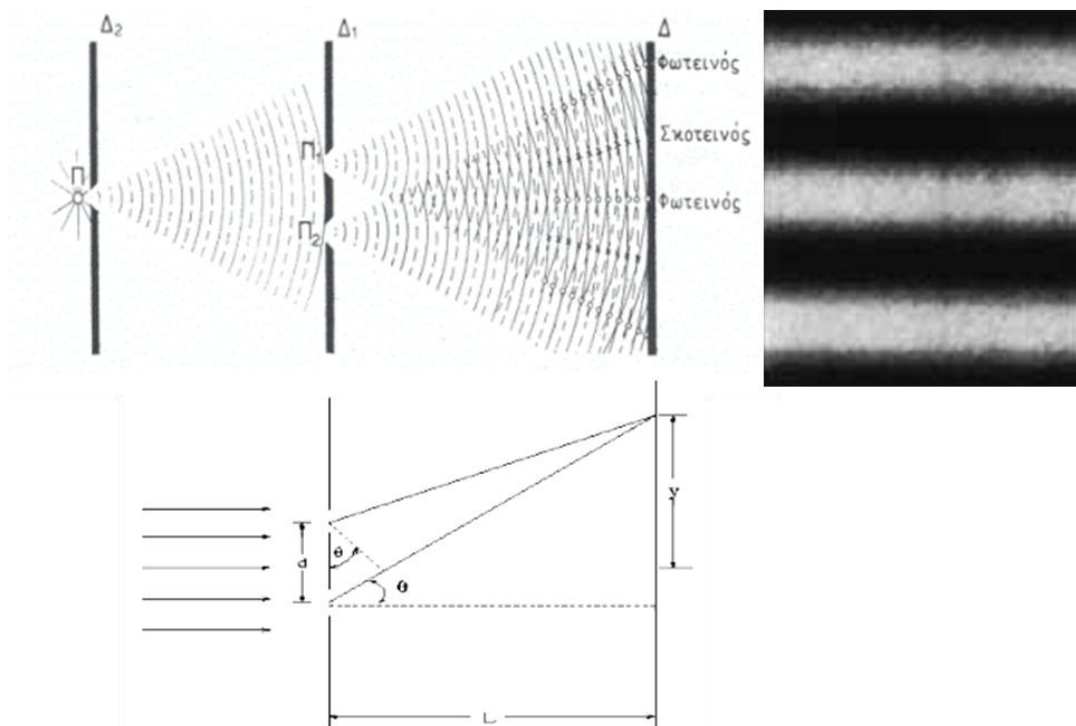
Δεδομένου ότι τα πολύ υψηλά ηλεκτρικά πεδία αντιστοιχούν σε ελάχιστες αλλαγές στο πλάτος του κρυστάλλου, το πλάτος αυτό μπορεί να αλλάξει με ακρίβεια έως και λίγα nm, καθιστώντας τους πιεζοηλεκτρικούς κρυστάλλους το πιο σημαντικό εργαλείο για την τοποθέτηση / μετατόπιση αντικειμένων με πολύ υψηλή ακρίβεια. Ως «ενεργοποιητές» χρησιμεύουν επίσης σε μεγάφωνα, όπου η τάση μετατρέπεται σε μηχανική κίνηση διαφράγματος, σε πιεζοηλεκτρικούς κινητήρες, όπου εφαρμόζοντας μια δύναμη κατεύθυνσης σε έναν άξονα προκαλείται η περιστροφή του. Επίσης, τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ευθυγράμμιση των κατόπτρων συσκευών λέιζερ. Με τον ακριβή έλεγχο της απόστασης μεταξύ των κατόπτρων, μπορούν να διατηρούνται με ακρίβεια και σταθερότητα οι οπτικές συνθήκες μέσα στην κοιλότητα ενός λέιζερ για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους. Ακόμα, τα μικροσκόπια ατομικής δύναμης (atomic force microscopes) και πολλά από τα μικροσκόπια της κατηγορίας μικροσκοπίων σάρωσης με ακίδα (scanning probe microscopes) χρησιμοποιούν ανάστροφη πιεζοηλεκτρικότητα για να διατηρούν την ακίδα ανίχνευσης πολύ κοντά στο δείγμα [41].

Μια πρόσφατη εφαρμογή πιεζοηλεκτρικών πηγών υπερήχων είναι η πιεζοηλεκτρική χειρουργική (πιεζοχειρουργική), η οποία είναι μια ελάχιστα επεμβατική τεχνική που αποσκοπεί στην αποκοπή ενός ιστού/στόχου με ελάχιστη βλάβη στους γειτονικούς ιστούς [42]. Πολύ πρόσφατα, επίσης, επιδείχθηκε ότι η απόδοση ενός υβριδικού φωτοβολταϊκού στοιχείου μπορεί να αυξηθεί με συνδυασμό του με πιεζοηλεκτρικά υλικά [43].

2.3 Οπτικές τεχνικές ολογραφικής συμβολομετρίας

Για την κατανόηση της λειτουργίας, των χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων της τεχνικής ESPI που εφαρμόστηκε στην παρούσα εργασία, δηλαδή μιας χρονικά ολοκληρωμένης τεχνικής οπτικής ολογραφικής συμβολομετρίας με χρήση λέιζερ, σκόπιμο κρίνεται να γίνει πρώτα μια μικρή επισκόπηση του, θεμελιώδους σημασίας γι' αυτές τις τεχνικές, φαινομένου της συμβολής φωτός.

Ένα από τα χαρακτηριστικά των κυμάτων φωτός είναι το γεγονός ότι υπό ορισμένες συνθήκες μπορούν να συμβάλουν, καταστρεπτικά ή ενισχυτικά ανάλογα τη φάση τους. Το πείραμα των δύο σχισμών του Thomas Young [44] συνέβαλε αποφασιστικά στην αποδοχή της θεωρίας της κυματικής φύσης του φωτός. Ας δούμε περιληπτικά το πείραμα του Young με τη βοήθεια του σχήματος 6: μονοχρωματική ακτινοβολία μήκους κύματος λ πέφτει στο διάφραγμα Δ_2 και η μικρή σχισμή γίνεται δευτερογενής πηγή κυμάτων. Το μέτωπο του κύματος της πηγής Π φτάνει συγχρόνως στις σχισμές Π_1 και Π_2 του διαφράγματος Δ_1 , οπότε αυτές γίνονται με τη σειρά τους νέες πηγές με ίδια συχνότητα και βρίσκονται σε φάση. Συνεπώς οι πηγές Π_1 και Π_2 είναι σύμφωνες και τα φωτεινά τους κύματα που φτάνουν στην οθόνη Δ συμβάλουν και δίνουν στατική συμβολή, δημιουργούν δηλαδή περιοχές ενισχυτικής (φωτεινοί κροσσοί) ή καταστρεπτικής (σκοτεινοί κροσσοί) συμβολής σε σταθερές θέσεις.



Σχήμα 6: Το πείραμα των δύο σχισμών του Thomas Young: σχηματική του αναπαράσταση (επάνω αριστερά), κροσσοί συμβολής (επάνω δεξιά) και οι αποστάσεις της μαθηματικής περιγραφής της παραγράφου 2.3 (κάτω).

Οι Π_1 και Π_2 απέχουν μεταξύ τους απόσταση d , και από την οθόνη Δ απόσταση L . Αν $d \ll L$ τότε η διαφορά δρόμου $r_1 - r_2$ που διάνυσαν οι δύο ακτίνες είναι

$$r_1 - r_2 \approx d \sin \theta \quad (14)$$

όπου θ η γωνία μεταξύ της ακτίνας και μίας νοητής ευθείας κάθετη στην οθόνη και τις σχισμές. Έτσι, η συνθήκη για ενισχυτική συμβολή στην οθόνη είναι [45]

$$d \sin \theta = m\lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

ενώ η συνθήκη για καταστρεπτική συμβολή είναι [45]

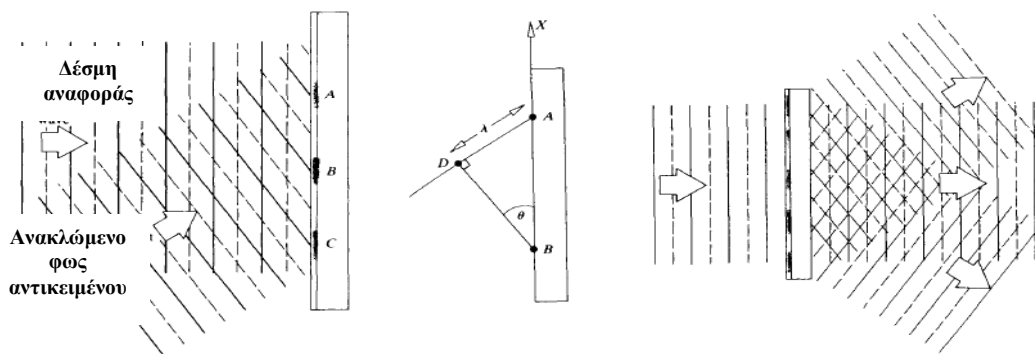
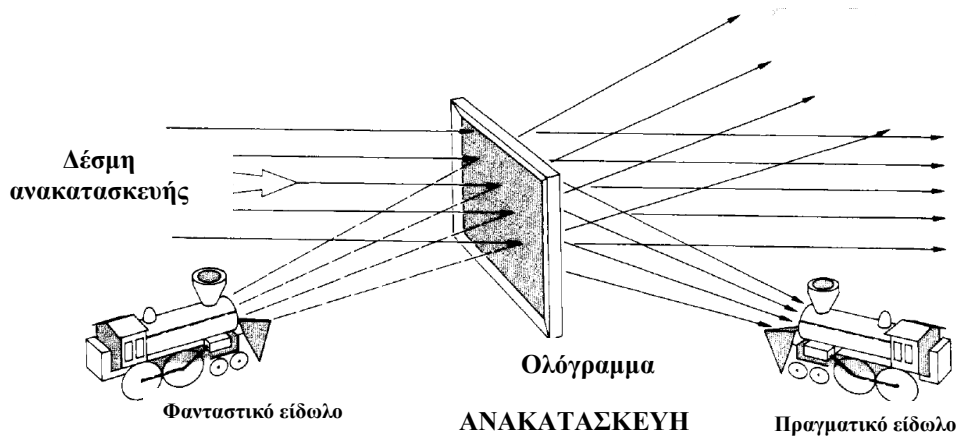
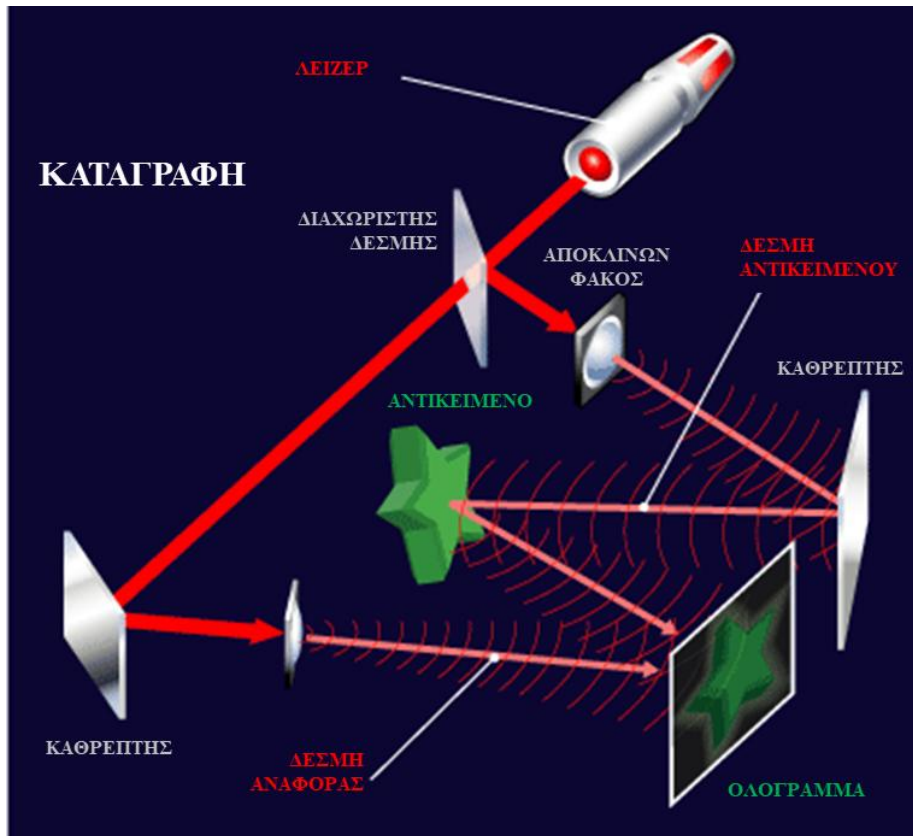
$$d \sin \theta = m + 1/2 \lambda, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (16)$$

Βασικό είναι να καταλάβουμε ότι ουσιαστικά η διαφορά δρόμου αντιστοιχεί με διαφορά φάσης.

2.3.1 Ολογραφία και ολογραφική συμβολομετρία

Μια εικόνα από τον Πύργο του Άιφελ και ένας παίχτης ενός τηλεοπτικού παιχνιδιού, μέσα από τα μάτια ενός παρατηρητή μοιράζονται τον αυστηρό περιορισμό της απλής χαρτογραφικής απεικόνισης. Με άλλα λόγια, όταν η εικόνα μιας σκηνής αναπαράγεται κανονικά, με όποια παραδοσιακά μέσα, αυτό που τελικά βλέπουμε δεν είναι μια ακριβής αναπαραγωγή του φωτεινού πεδίου που μόλις κατακλυζόταν το αντικείμενο, αλλά μάλλον μια σημείο προς σημείο καταγραφή της φωτεινής έντασης. Μια απλή φωτογραφία φέρει πληροφορίες σχετικά με την φωτεινή ένταση, αλλά τίποτα για τη φάση του φωτεινού κύματος που εκπέμπεται από το αντικείμενο. Αν τόσο το πλάτος αλλά και η φάση του αρχικού φωτεινού κύματος μπορούσαν να ανακατασκευαστούν με κάποιο τρόπο, το προκύπτον φωτεινό πεδίο θα ήταν πανομοιότυπο από το πρωτότυπο. Αυτό σημαίνει ότι τότε θα βλέπαμε την αναμορφωμένη εικόνα σε τέλεια τρισδιάστατη μορφή, ακριβώς σαν να υπήρχε το αντικείμενο μπροστά από εμάς.

Η τεχνική που επιτρέπει τη λήψη φωτογραφιών τριών διαστάσεων, δηλαδή καταγραφή τόσο του πλάτους όσο και της φάσης του ηλεκτρικού πεδίου από ένα αντικείμενο, ονομάζεται *ολογραφία (holography)*. Η λέξη προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις *όλος* και *γραφή*, και εφευρέθηκε από τον Dennis Gabor το 1948 [46]. Η ολογραφία αρχικά προτάθηκε ως τρόπος βελτίωσης της διακριτικής ικανότητας των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων, αλλά μόνο μετά την εφεύρεση του λέιζερ φάνηκε η πρακτική της αξία και οι δυνατότητές της. Για την ταυτόχρονη καταγραφή της φωτεινής έντασης και της φάσης, η τεχνική της ολογραφίας προϋποθέτει χρήση δύο σύμφωνων δεσμών φωτός, όπως αυτές που μπορεί να προέρχονται από ένα λέιζερ. Η αρχή λειτουργίας της ολογραφίας απεικονίζεται στο σχήμα 7.



Σχήμα 7: Η αρχή λειτουργίας της ολογραφίας: καταγραφή (επάνω) [47] και ανακατασκευή (μέση) [48] ενός ολογράμματος. Το κάτω μέρος [48] εξυπηρετεί τους σκοπούς της μαθηματικής περιγραφής της παραγράφου 2.3.1.

Το ένα μέρος από μια δέσμη λέιζερ (δέσμη αναφοράς) οδηγείται απ' ευθείας πάνω σε καταγραφικό (π.χ. μια φωτογραφική πλάκα), ενώ το άλλο μέρος (δέσμη αντικειμένου) φωτίζει το αντικείμενο που είναι προς ολογράφηση. Το ανακλώμενο από το αντικείμενο φως πέφτει επίσης πάνω στην φωτογραφική πλάκα, και εκεί οι δύο δέσμες συμβάλλουν δημιουργώντας χαρακτηριστικό διάγραμμα συμβολής που αποτελείται από κροσσούς συμβολής, οι οποίοι περιέχουν ένα πλήρες «αρχείο» του αρχικού αντικειμένου, αφού τυχόν μεταβολές του αντικειμένου (π.χ. λόγω κίνησης ή ανομοιομορφιών) αντιστοιχούν σε διαφορές δρόμου άρα σε διαφορές φάσης στην δέσμη αντικειμένου. Σε αντίθεση, λοιπόν, με την απλή φωτογραφία, καταγράφεται με αυτόν τον τρόπο η συνολική πληροφορία για το αντικείμενο. Η ανακατασκευή ενέχει τον φωτισμό της φωτογραφικής πλάκας, αφού φωτιστεί με τη δέσμη ανακατασκευής, πανομοιότυπη με τη δέσμη αναφοράς. Τότε το αρχικό αντικείμενο ανακατασκευάζεται πλήρως (σε ένταση και φάση) λόγω περίθλασης της δέσμης ανακατασκευής από το καταγεγραμμένο στην φωτογραφική πλάκα διάγραμμα συμβολής. Λόγω του ότι ανακατασκευάζεται τόσο η φάση όσο και η ένταση, το είδωλο εμφανίζεται τρισδιάστατο. Ένας παρατηρητής μετακινώντας το σημείο παρατήρησής του, θα δει το αντικείμενο να περιστρέφεται, ακριβώς όπως εάν ήταν ακόμα εκεί. Η γεωμετρία αυτή εισήχθηκε πρώτη φορά από τους Emmett Leith και Juris Upatnieks [48] στις αρχές της δεκαετίας του 1960 και αποτέλεσε σταθμό στην εξέλιξη της ολογραφίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι το 1971 απονεμήθηκε το βραβείο Nobel Φυσικής στον Dennis Gabor για την εργασία του στην ολογραφία.

Για μια απλή μαθηματική περιγραφή των παραπάνω, ας θεωρήσουμε την γεωμετρία του κάτω μέρους στο σχήμα 7. Και τα δύο κύματα φωτός που προσπίπτουν στο καταγραφικό (π.χ. μια φωτογραφική πλάκα) υπό γωνία θ (δέσμη αναφοράς και ανακλώμενο φως αντικειμένου) έχουν τοπικά μέγιστα στα σημεία A , B και C , όπου και θα δημιουργηθούν μέγιστα συμβολής. Καθώς αυτά τα κύματα ταξιδεύουν προς τα δεξιά θα παραμείνουν σε φάση στα σημεία αυτά, και τα μέγιστα συμβολής θα παραμείνουν στα σημεία αυτά. Ενδιάμεσα από αυτά τα σημεία θα υπάρχουν ελάχιστα συμβολής. Η σχετική φάση φ των δύο κυμάτων φωτός, που αλλάζει κατά μήκος της φωτογραφικής πλάκας, μπορεί να γραφτεί ως συνάρτηση του x . Καθώς το φ αλλάζει κατά 2π όταν το x διατρέξει την απόσταση \overline{AB} , θα έχουμε $\varphi/2\pi = x/\overline{AB}$. Επειδή $\sin \theta = \lambda/\overline{AB}$, η φάση γενικά μπορεί να εκφραστεί ως

$$\varphi(x) = (2\pi x \sin \theta)/\lambda \quad (17)$$

Αν τα δύο κύματα φωτός έχουν ίδιο πλάτος ηλεκτρικού πεδίου E_0 τότε για το συνιστάμενο

ηλεκτρικό πεδίο θα ισχύει

$$E = 2E_0 \cos \frac{1}{2} \varphi \sin(\omega t - kx - \frac{1}{2} \varphi) \quad (18)$$

ενώ η χωρική κατανομή της έντασης, που είναι ανάλογη του τετραγώνου του ηλεκτρικού πεδίου, θα είναι της μορφής

$$I(x) = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 (2E_0 \cos \frac{1}{2} \varphi)^2 = 2c \varepsilon_0 E_0^2 + 2c \varepsilon_0 E_0^2 \cos \varphi \quad (19)$$

δηλαδή θα είναι διαμορφωμένη με ένα συνημίτονο. Όταν εμφανιστεί η φωτογραφική πλάκα το αποτέλεσμα θα είναι ένα συνημιτονοειδές φράγμα περίθλασης. Όταν αυτό το απλό ολόγραμμα φωτιστεί με δέσμη πανομοιότυπη με την αρχική δέσμη αναφοράς θα προκύψουν τρεις δέσμες (δεξιά στο κάτω μέρος του σχήματος 7): μια μηδενικής τάξης και δύο πρώτης τάξης. Μια από τις δέσμες πρώτης τάξης θα ταξιδέψει στην διεύθυνση του αρχικού αντικειμένου και θα αντιστοιχεί στο κυματομέτωπο του ανακατασκευασμένου αντικειμένου.

Κατά κοινή ομολογία η πιο σημαντική εφαρμογή της ολογραφίας είναι στην *ολογραφική συμβολομετρία*. Ενώ οι πρώτες παρατηρήσεις φαινομένων που θα μπορούσαν να αποδοθούν στην ολογραφική συμβολομετρία έγιναν από τον Juris Upratnieks το 1963 [49] τα βασικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας δεν είχαν γίνει κατανοητά μέχρι την μελέτη των Robert L. Powell και Karl A. Stetson το 1965 [50-51]. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την συμβολομετρική ανάλυση στατικών και δυναμικών αλλαγών μιας οπτικά ανώμαλης επιφάνειας. Το μεγάλο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι ότι άρει τον βασικό περιορισμό της κλασσικής συμβολομετρίας, δηλαδή ότι η υπό μελέτη επιφάνεια πρέπει να είναι οπτικά ομαλή.

Στην ολογραφική συμβολομετρία δύο ή περισσότερα οπτικά πεδία συγκρίνονται συμβολομετρικά, και τουλάχιστον ένα από αυτά θα πρέπει να καταγραφεί ολογραφικά και να ανακατασκευαστεί. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αλληλεπίδραση της δέσμης ανακατασκευής με το καταγεγραμμένο ολόγραμμα έχει ως αποτέλεσμα την ανακατασκευή του αντικειμένου όταν αυτό πλέον έχει αφαιρεθεί από τη θέση που είχε κατά την καταγραφή του ολογράμματος. Αν όμως το αντικείμενο παραμείνει στη θέση του, τότε το κύμα που ανακατασκευάζεται από το ολόγραμμα και κύμα που προέρχεται από το αντικείμενο θα ταξιδεύουν ταυτόχρονα πίσω από το ολόγραμμα. Καθώς αυτά είναι σύμφωνα συμβάλλουν μεταξύ τους, και το παρατηρούμενο σχήμα συμβολής τους θα αντικατοπτρίζει τυχόν αλλαγές του αντικειμένου που έχουν συμβεί στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την δημιουργία του ολογράμματος μέχρι την παρατήρηση του σχήματος συμβολής. Αν για οποιοδήποτε λόγο σε αυτό το χρονικό διάστημα αλλάξει η κατάσταση του αντικειμένου (π.χ. μετατόπιση, παραμόρφωση κτλ.) τότε το

παρατηρούμενο σχήμα συμβολής θα αλλάξει. Αυτή η μέθοδος ολογραφικής συμβολομετρίας ονομάζεται *συμβολομετρία πραγματικού χρόνου (real-time interferometry)*. Μια άλλη παραλλαγή έχει να κάνει με την χρονικά διαδοχική καταγραφή δύο (ή περισσότερων) ολογραμμάτων του ίδιου αντικειμένου σε διαφορετικές του καταστάσεις. Όταν αυτά τα ολογράμματα ανακατασκευάζονται ταυτόχρονα, τα ανακατασκευασμένα κύματα που αντικατοπτρίζουν πιστά αντίγραφα της κατάστασης του αντικειμένου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές (καταστάσεις) συμβάλλουν μεταξύ τους. Αυτή είναι η μέθοδος της *διπλής έκθεσης* (κατά περίπτωση και *πολλαπλής έκθεσης*). Μια ακραία, αλλά και άκρως χρήσιμη, περίπτωση πολλαπλής έκθεσης είναι η *χρονικά ολοκληρωμένη τεχνική*, όπου δημιουργείται το ολόγραμμα ενός αντικειμένου που η κατάστασή του μεταβάλλεται χρονικά (κίνηση λόγω δόνησης / ταλάντωσης, συνεχούς μετατόπισης κτλ). Έτσι στο ολόγραμμα καταγράφονται κύματα από το αντικείμενο σε πολλές ενδιάμεσες καταστάσεις, και τα ανακατασκευασμένα κύματα από ένα τέτοιο ολόγραμμα δημιουργούν ένα σχήμα συμβολής που αντικατοπτρίζει τον τρόπο που διάφορα σημεία του αντικειμένου άλλαξαν θέση κατά την κίνησή του.

Στην τελευταία περίπτωση εντάσσεται και η τεχνική της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, και αναλύεται ακολούθως.

2.4 Χρονικά ολοκληρωμένη ηλεκτρονική συμβολομετρία ψηφίδων – ESPI

Πέρα από την επαναστατική αλλαγή που έφερε η χρήση λέιζερ στις διάφορες ολογραφικές και συμβολομετρικές τεχνικές, το επόμενο ορόσημο στην εξέλιξη αυτών των τεχνικών ήταν η χρήση ηλεκτρονικού καταγραφικού μέσου, το οποίο χρονολογείται από το 1970 [52-54]. Αυτό οδήγησε στην ραγδαία ανάπτυξη των τεχνικών ολογραφικής συμβολομετρίας και, σε συνδυασμό με τη μετέπειτα χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, οδήγησε στην ευρύτατη διάδοση εφαρμογών τους. Ιδιαίτερη θέση στην πληθώρα αυτών των ηλεκτρονικών οπτικών τεχνικών κατέχει η κατηγορία των τεχνικών συμβολομετρίας ψηφίδων (ESPI), όπου το ένα από τα δύο συμβάλλοντα πεδία είναι ένα πεδίο ψηφίδων (*speckle*). Με την έννοια «ψηφίδα» νοείται η κοκκιδωτή και τυχαία φύση του φωτός που ανακλάται από μια οπτικά ανώμαλη επιφάνεια.

Η τεχνική ESPI χρονολογείται σχεδόν ταυτόχρονα με την εισαγωγή ηλεκτρονικού μέσου καταγραφής [55-57], και σύντομα ακολούθησε σημαντική ερευνητική εργασία τόσο σε θεωρητικό όσο σε πειραματικό επίπεδο [π.χ. 58-60], με την τεχνική να γνωρίζει ιδιαίτερη άνθιση μετά την εισαγωγή της πειραματικής τεχνικής της ελεγχόμενης μετατόπισης φάσης (*phase shifting*) και της ψηφιακής ανάλυσης κροσσών με ηλεκτρονικό υπολογιστή [61]. Αν και

η ESPI είναι στενά συνδεδεμένη με την ολογραφική συμβολομετρία, δεν απαιτεί την καταγραφή ολογράμματος, οπότε απλουστεύεται η πειραματική διαδικασία. Η χρήση κάμερας, ως ψηφιακό πλέον καταγραφικό, στην τεχνική ESPI δίνει το πλεονέκτημα της καταγραφής και ταυτόχρονης απεικόνισης των κροσσών σε πραγματικό χρόνο. Από την άλλη μεριά, οι κροσσοί που καταγράφονται με την ESPI είναι σε γενικές γραμμές λιγότερο ευκρινείς σε σχέση με την ολογραφική συμβολομετρία.

Η βασική διάταξη ESPI περιλαμβάνει την καταγραφή δύο δεσμών laser από μια CCD κάμερα, από τις οποίες η μια προέρχεται από ανάκλαση στην υπό εξέταση δονούμενη επιφάνεια (δέσμη αντικειμένου) και η άλλη είναι αδιατάρακτο κομμάτι της αρχικής δέσμης laser που οδηγείται απ' ευθείας στην CCD κάμερα (δέσμη αναφοράς). Η τεχνική βασίζεται στην διαδικασία αφαίρεσης ή πρόσθεσης διαδοχικών εικόνων που καταγράφονται καθώς το αντικείμενο μετατοπίζεται. Για την μελέτη περιοδικών, αρμονικών παραμορφώσεων χρησιμοποιείται πιο συχνά η χρονικά ολοκληρωμένη ESPI, όπου τα δεδομένα λαμβάνονται υπό μορφή τηλεοπτικών καρτέ με μεγάλους χρόνους έκθεσης σε σχέση με την περίοδο της κίνησης. Η τεχνική ESPI και οι διάφορες παραλλαγές της, η μαθηματική τους περιγραφή, και οι εφαρμογές τους έχουν παρουσιαστεί σε πολλά βιβλία και άρθρα [π.χ. βλ. 8-12, 19-22, 55-62]. Με βάση αυτά, εδώ θα παρουσιαστεί με απλό και περιεκτικό τρόπο η μαθηματική θεώρηση της τεχνικής ESPI που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή, που βασίζεται στην αφαίρεση διαδοχικών εικόνων.

Θεωρούμε την επιφάνεια ενός δονούμενου αντικειμένου και ότι η εγκάρσια (κάθετα στην επιφάνεια) μετατόπιση S για κάθε σημείο της επιφάνειας (επίπεδο xy) και για κάθε χρονική στιγμή, t , είναι της μορφής:

$$S(x, y, t) = A(x, y) \cos[\omega t + \varphi_0(x, y)] \quad (20)$$

περιέχοντας, δηλαδή, έναν αρμονικό όρο (συνημίτονο), όπου $A(x, y)$ είναι η επιφανειακή κατανομή του πλάτους δόνησης με κυκλική συχνότητα ω , ενώ $\varphi_0(x, y)$ είναι η κατανομή της φάσης δόνησης πάνω στην επιφάνεια. Η κάμερα που χρησιμοποιείται ως καταγραφικό μέσο ανιχνεύει για συγκεκριμένο χρόνο τ (χρόνος έκθεσης). Στην κάμερα φτάνουν φωτεινές κατανομές έντασης I_A και I_B των οπτικών δεσμών λέιζερ αντικειμένου και αναφοράς αντίστοιχα. Έτσι μέσα στον χρόνο έκθεσης η κάμερα καταγράφει συνολική κατανομή φωτεινής έντασης:

$$I_1 = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \left\{ I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \cdot \cos \left[\varphi + \frac{2\pi}{\lambda} (1 + \cos \theta) A \cos(\omega t + \varphi_0) \right] \right\} dt \quad (21)$$

όπου, φ είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των δύο παραπάνω δεσμών, λ είναι το μήκος κύματος της πηγής λέιζερ, και θ είναι η γωνία μεταξύ της διεύθυνσης φωτισμού του αντικειμένου και της διεύθυνσης παρατήρησης. Καθώς στην περίπτωση μας $\theta \cong 0^\circ$, αν θέσουμε $\Gamma = 4\pi/\lambda$ και $\tau = 2m\pi/\omega$ (m είναι ακέραιος), από την χρονική ολοκλήρωση της εξίσωσης (21) προκύπτει:

$$I_1 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} |(\cos \varphi) J_0(\Gamma A)| \quad (22)$$

όπου J_0 είναι η συνάρτηση Bessel μηδενικής τάξης πρώτου είδους. Στην εξίσωση (22) δεν περιέχεται η φάση της δόνησης φ_0 καθώς έχει εξαλειφθεί λόγω της χρονικής ολοκλήρωσης. Το αντικείμενο συνεχίζει να δονείται, και υποθέτουμε ότι το πλάτος δόνησης αλλάζει από A σε $A + \Delta A$, λόγω π.χ. αστάθμητων παραγόντων, και ότι αυτή η αλλαγή (ΔA) είναι μικρή. Στο χρονικό σημείο αυτό η κάμερα καταγράφει μια δεύτερη εικόνα, της οποίας η κατανομή φωτεινής έντασης μπορεί παρομοίως να εκφραστεί ως:

$$I_2 = I_A + I_B + 2\sqrt{I_A I_B} \left| (\cos \varphi) \left[1 - \frac{1}{4} \Gamma^2 (\Delta A)^2 \right] J_0(\Gamma A) \right| \quad (23)$$

Οι δύο αυτές χρονικά διαδοχικές εικόνες, I_1 και I_2 , αφαιρούνται μέσω κατάλληλου λογισμικού, και το τελικό αποτέλεσμα εκφράζεται ως:

$$I = I_1 - I_2 = \frac{\sqrt{I_A I_B}}{2} |(\cos \varphi) \Gamma^2 (\Delta A)^2 J_0(\Gamma A)| \quad (24)$$

Από την εξίσωση (24) είναι προφανές ότι το χρονικά ολοκληρωμένο συμβολόγραμμα, I , είναι διαμορφωμένο από τη συνάρτηση Bessel $|J_0(\Gamma A)|$, της οποίας το όρισμα περιέχει το πλάτος δόνησης A . Όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. παράγραφο 2.1.2 και σχήμα 3) για κάποιες συγκεκριμένες τιμές του ορίσματος (εδώ ΓA) η συνάρτηση Bessel $|J_0(\Gamma A)|$ μηδενίζεται ενώ για κάποιες άλλες συγκεκριμένες τιμές του ορίσματος η συνάρτηση Bessel $|J_0(\Gamma A)|$ λαμβάνει μέγιστες τιμές, εμφανίζει δηλαδή τοπικά μέγιστα τα οποία είναι ολοένα μειούμενα. Αυτά τα μηδενικά και τοπικά μέγιστα της $|J_0(\Gamma A)|$ μεταφράζονται σε εναλλασσόμενους σκοτεινούς και φωτεινούς κροσσούς, αντίστοιχα, του συμβολογράμματος I . Οι φωτεινοί κροσσοί έχουν ολοένα μειούμενη φωτεινότητα, με τον φωτεινότερο (μέγιστη φωτεινότητα) κροσσο να αντιστοιχεί σε δεσμό ($A = 0$), και είναι ουσιαστικά ισοϋψείς καμπύλες ίδιου πλάτους δόνησης. Γνωρίζοντας το μήκος κύματος της πηγής λέιζερ, από ένα τέτοιο συμβολόγραμμα είναι δυνατή η άμεση εξαγωγή τιμών του πλάτους δόνησης σε οποιοδήποτε σημείο της απεικονιζόμενης επιφάνειας

[π.χ. βλ. 20].

Από τα παραπάνω διαφαίνεται το κύριο μειονέκτημα της τεχνικής ESPI, που είναι ο περιορισμός στη διακριτική ικανότητα που επιβάλλει το γεγονός ότι δεν μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια μετατόπιση που αντιστοιχεί σε λιγότερο από ένα κροσσό. Επιπλέον, υπάρχουν άλλοι δύο περιορισμοί που αφορούν στη μέγιστη δυνατή ανιχνεύσιμη μετατόπιση και τον προσδιορισμό της φάσης της δόνησης, που μπορεί όμως να αρθούν με κατάλληλες τροποποιήσεις της διάταξης [π.χ. βλ. 19, 63-66].

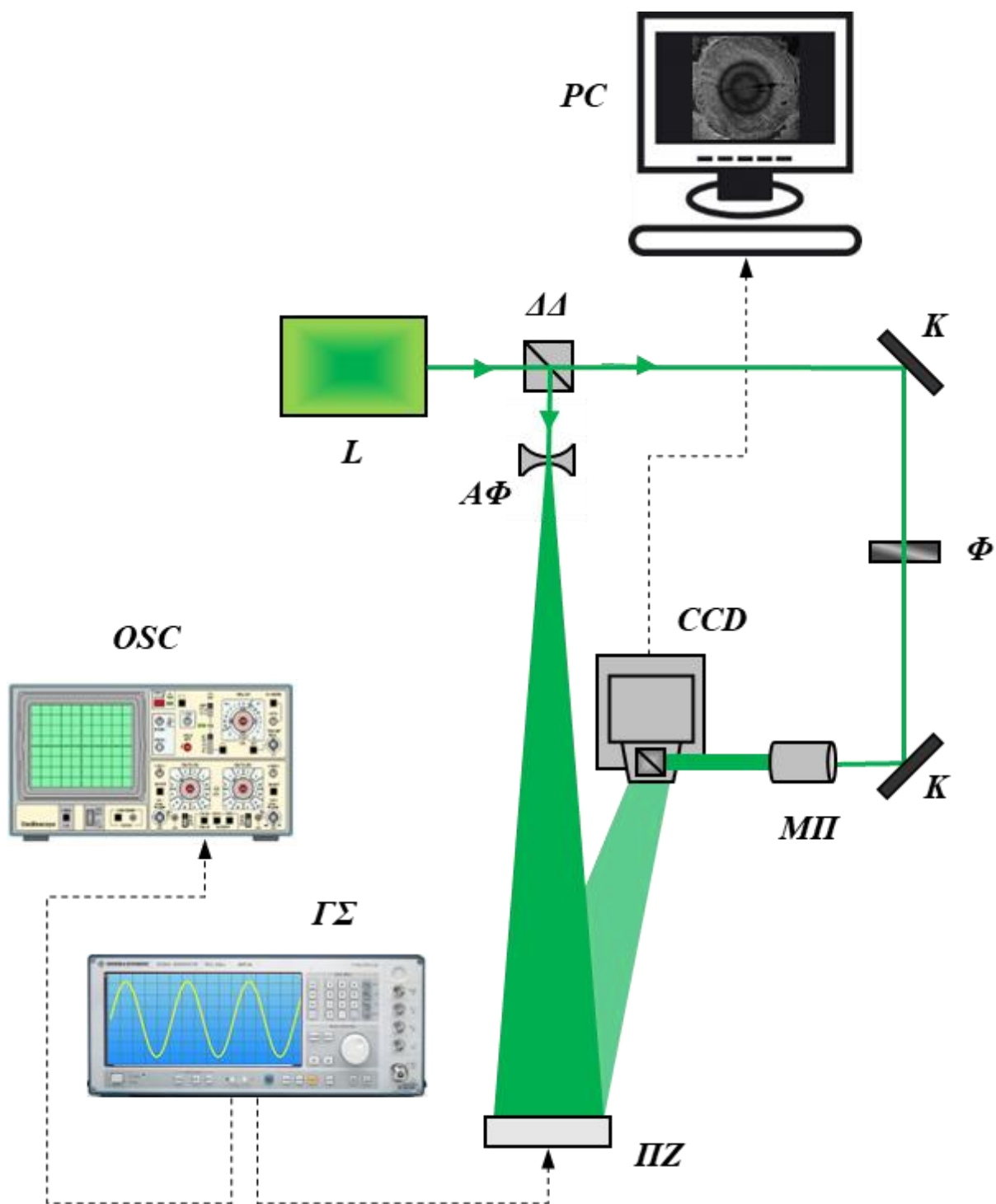
Συγκεκριμένα, λόγω της διαμόρφωσης του συμβολογράμματος με τη συνάρτηση Bessel, δεν μπορούν να μετρηθούν πολύ μεγάλες μετατοπίσεις, αφού σε τέτοια περίπτωση η χωρική πυκνότητα των κροσσών θα είναι τόσο μεγάλη ώστε να καθίστανται πλέον μη ορατοί. Όμως μπορεί να εφαρμοστεί τεχνική στροβοσκοπικού φωτισμού ώστε να καταγραφεί συμβολόγραμμα με φωτεινούς κροσσούς ίδιας φωτεινότητας. Συνήθως για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται συσκευή διαμόρφωσης οπτικής δέσμης (optical chopper), η οποία πρόκειται ουσιαστικά για μοτέρ που περιστρέφει κυκλικό δίσκο με ισοκατανεμημένες οπές. Καθώς αυτός περιστρέφεται, μια δέσμη λέιζερ που περνάει διαμέσου των οπών διαμορφώνεται με περιοδικό τρόπο. Αυτοί οι παλμοί συγχρονίζονται με τη δόνηση του αντικειμένου με τέτοιο τρόπο ώστε να γίνονται πολλαπλές καταγραφές σε δύο παρεμφερή τμήματα του κύκλου της δόνησης. Λόγω της χρονικά βραχείας έκθεσης του αντικειμένου στον φωτεινό παλμό το αντικείμενο «παγώνει» σε αυτές τις δύο θέσεις της δόνησής του. Ως αποτέλεσμα θα εμφανίζεται συμβολόγραμμα με φωτεινούς κροσσούς ίδιας φωτεινότητας.

Ο άλλος βασικός περιορισμός της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI είναι ότι χάνεται η πληροφορία για τη φάση της δόνησης. Σε περιπτώσεις χαρακτηριστικών περιπτώσεων δονήσεων, όπως για παράδειγμα για τους κανονικούς τρόπους ταλάντωσης μιας τετράγωνης πλάκας, μπορεί κανείς να συνάγει τις περιοχές \pm φάσης. Όταν όμως, η κατανομή πλάτους είναι περίπλοκη, όπως για παράδειγμα σε κώνους ηχείων, τότε είναι σχεδόν αδύνατη η εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων για τη φάση. Με το συνδυασμό της ESPI με τη λεγόμενη αρχή της διαμόρφωσης φάσης αυτός ο περιορισμός μπορεί να αρθεί και να ανακτηθεί η πληροφορία της φάσης. Στη γενικευμένη της μορφή η διαμόρφωση φάσης μπορεί να είναι ένα ιδιαίτερα περίπλοκο αντικείμενο. Μπορεί όμως, κανείς να πάρει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα εφαρμόζοντας την απλούστερη μορφή της, την ημιτονοειδή διαμόρφωση φάσης. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί στην ESPI με την ανάκλαση είτε της δέσμης αναφοράς είτε της δέσμης αντικειμένου από έναν δονούμενο καθρέπτη.

3. Πειραματικές διατάξεις & διαδικασία μετρήσεων

Οι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν είχαν ως στόχο τον δονητικό χαρακτηρισμό ενός ακουστικού πιεζοηλεκτρικού αισθητηρίου. Επιλέχθηκε ένα εμπορικά διαθέσιμο τέτοιο αισθητήριο (Schaller 723 Oyster), το οποίο χρησιμοποιείται ευρύτατα σήμερα από ερασιτέχνες και επαγγελματίες μουσικούς, προσαρμοζόμενο στην επιφάνεια εγχόρδων μουσικών οργάνων. Το πρώτο βήμα της πειραματικής μελέτης αποσκοπούσε στον προσδιορισμό της συχνοτικής του απόκρισης συνέπεια διέγερσής του σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Για το σκοπό αυτό οδηγήθηκε το αισθητήριο από την έξοδο μιας γεννήτριας συχνοτήτων σε λειτουργία σάρωσης συχνοτήτων (sweep tone) από 1000Hz έως 50000Hz σε χρονική διάρκεια 10sec, το οποίο ήταν και το μέγιστο χρονικό διάστημα παραγωγής του sweep tone που επέτρεπε η γεννήτρια συχνοτήτων. Η έξοδος της γεννήτριας συχνοτήτων παρακολουθούταν ταυτόχρονα με παλμογράφο, για να ελέγχεται ακριβώς η τιμή της τάσης του σήματος που οδηγούσε το αισθητήριο. Το ηχητικό φάσμα εκπομπής του αισθητηρίου καταγραφόταν με ειδικό μικρόφωνο και λογισμικό (Avisoft SASLab), κατάλληλο για υπέρηχους (συχνότητες μεγαλύτερες από ~20000Hz). Το καταγεγραμμένο ηχητικό υλικό επεξεργάστηκε κατάλληλα με ειδικό λογισμικό (Praat), και μετά από «γρήγορο» μετασχηματισμό Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) και αποθορυβοποίηση εξάχθηκε η συχνοτική απόκριση του αισθητηρίου (FFT power – dB vs. Συχνότητα – Hz).

Το δεύτερο βήμα της πειραματικής μελέτης αφορούσε στην καταγραφή των κανονικών τρόπων δόνησης με την τεχνική ESPI και τον συνεπαγόμενο προσδιορισμό των αντίστοιχων συχνοτήτων συντονισμού. Εξετάστηκε με συστηματικό τρόπο όλη η περιοχή συχνοτήτων στην οποία διεγέρθηκε το αισθητήριο (1000Hz έως 50000Hz). Χρησιμοποιήθηκε το σύστημα ESPI που έχει αναπτυχθεί από στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης έγιναν οι απαραίτητες τροποποιήσεις σε αυτήν, οι οποίες είχαν να κάνουν κυρίως με την κατασκευή ειδικής βάσης για το αισθητήριο, τον προσδιορισμό της κατάλληλης τοποθέτησής του εντός του χωρικού εύρους λειτουργίας του συστήματος, την επιλογή και χρήση κατάλληλων οπτικών διαμόρφωσης οπτικής δέσμης φωτισμού του αισθητηρίου, και τον καθορισμό των βέλτιστων συνθηκών φωτισμού του. Η πειραματική διάταξη ESPI που χρησιμοποιήθηκε, έπειτα από τις κατάλληλες τροποποιήσεις για τις ανάγκες των πειραμάτων, φαίνεται στο σχήμα 8.

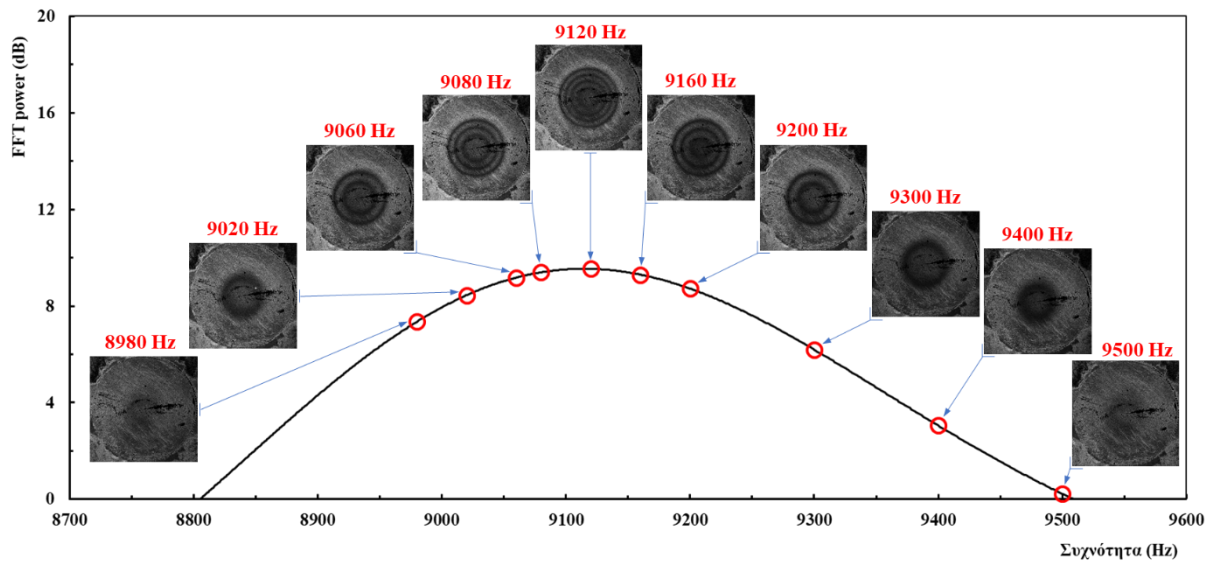


Σχήμα 8: Σχηματική απεικόνιση της τροποποιημένης πειραματικής διάταξης ESPI: L – πηγή λέιζερ, $\Delta\Delta$ – διαχωριστής δέσμης, K – κάτοπτρα, $A\Phi$ – αποκλίνων φακός, Φ – φίλτρο μεταβλητής διαπερατότητας, $ΜΠ$ – μεγεθυντής/παραλληλοποιητής δέσμης, CCD – κάμερα καταγραφής, PC – σύστημα επεξεργασίας και αποθήκευσης εικόνας, $\Pi Ζ$ – υπό μελέτη πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, $\Gamma Σ$ – γεννήτρια συχνοτήτων, και OSC – παλμογράφος.

Η διάταξη είναι υλοποιημένη πάνω σε ειδική μεταλλική πλάκα που εδράζεται, με τη σειρά της, σε σταθερή επιφάνεια με τη χρήση ειδικών αντικραδασμικών στηριγμάτων (sorbothane), για την ελαχιστοποίηση ανεπιθύμητων κραδασμών. Μία CW πηγή λέιζερ στερεάς κατάστασης διοδικής άντλησης ενεργού υλικού Nd:YAG, παρείχε σύμφωνη δέσμη φωτός με μήκος κύματος $\lambda = 532\text{nm}$, μέγιστης μέσης ισχύος 150mW. Η δέσμη που εξέρχεται από το λέιζερ διαχωρίζεται σε δύο δέσμες από έναν κυβικό διαχωριστή δέσμης (λόγος διαχωρισμού 80:20): η ισχυρότερη από αυτές (δέσμη αντικειμένου) δρομολογείται σε έναν αποκλίνοντα φακό ώστε να φωτίσει όλη την επιφάνεια του αισθητηρίου που εξετάζεται με ομοιόμορφο τρόπο. Το σκεδαζόμενο φως από το πιεζοηλεκτρικό αισθητήριο καταγράφεται από μια CCD κάμερα, με μέγεθος αισθητήρα 1392×1040 pixels, μέγεθος pixel $6,45 \times 6,45\mu\text{m}$, και μέγιστο ρυθμό καταγραφής 15 frames/sec. Επίσης, διαθέτει κατάλληλο φακό συλλογής φωτός, ενώ η σύνδεσή της με H/Y γίνεται μέσω καλωδίου firewire. Παράλληλα, η ασθενέστερη δέσμη χρησιμοποιείται ως δέσμη αναφοράς και οδηγείται μέσω κατόπτρων στον αισθητήρα της CCD κάμερας. Καθώς η δέσμη αναφοράς έρχεται κάθετη στην κάμερα, είχε τοποθετηθεί στο εσωτερικό της ειδικός διαχωριστής δέσμης, ώστε οι δύο δέσμες (αντικειμένου και αναφοράς) να προσπίπτουν συγγραμμικά πάνω στον αισθητήρα. Στη διαδρομή της δέσμης αναφοράς παρεμβάλλεται φίλτρο μεταβλητής διαπερατότητας, ώστε να δίνεται η δυνατότητα ρύθμισης του λόγου των εντάσεων των δύο δεσμών για τη βελτιστοποίηση της ευκρίνειας απεικόνισης. Επίσης, στην ίδια διαδρομή παρεμβάλλεται στη συνέχεια μεγεθυντής και παραλληλοποιητής δέσμης (μεγέθυνση $\times 20$), ώστε να φωτίζεται ομοιόμορφα ο αισθητήρας της CCD κάμερας.

Η διαδικασία των μετρήσεων με την τροποποιημένη διάταξη ESPI είχε ως εξής: αρχικά έγιναν διερευνητικές μετρήσεις σε όλο το φάσμα συχνοτήτων διέγερσης από 1000Hz έως 50000Hz με σταθερά μεταβαλλόμενο τρόπο για να εντοπιστούν ποιοι κανονικοί τρόποι δόνησης είναι δυνατόν να καταγραφούν χωρίς να οδηγηθεί το αισθητήριο πέρα από το όριο καταστροφής του. Στη συνέχεια, και σε συνδυασμό με την ποιοτική αποτίμηση και ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων συχνοτικής απόκρισης, επικεντρώθηκε η μελέτη γύρω από τις τέσσερις συχνότητες συντονισμού που εντοπίστηκαν με την μέθοδο ESPI, συγκεκριμένα στα 9120Hz, 18500Hz, 19600Hz (στα όρια του ακουστού φάσματος), και 31650Hz (υπερηχητική συχνότητα). Γύρω από αυτές τις συχνότητες καταγράφηκαν συμβολογράμματα λίγο πριν από την συχνότητα (αμυδρής έστω) εμφάνισης ενός κανονικού τρόπου δόνησης έως λίγο μετά από τη συχνότητα που αυτός εξαφανίζεται. Ακολουθήθηκε μικρό βήμα συχνότητας σε σχέση με το εύρος του κάθε συντονισμού (κατά περίπτωση από 20Hz έως 100Hz) και επιλέχθηκε σταθερή τάση οδήγησης του αισθητηρίου σε όλο το εύρος των συχνοτήτων (2V), ώστε να είναι κατά το δυνατόν άμεση η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους. Για την καλύτερη κατανόηση της

διαδικασίας αυτής στο σχήμα 9 απεικονίζεται γράφημα που περιέχει τμήμα της συχνοτικής απόκρισης του αισθητηρίου γύρω από τη συχνότητα συντονισμού των 9120Hz και ενδεικτικές συχνότητες καταγραφής συμβολογραμμάτων καθώς και τα συμβολογράμματα αυτά.



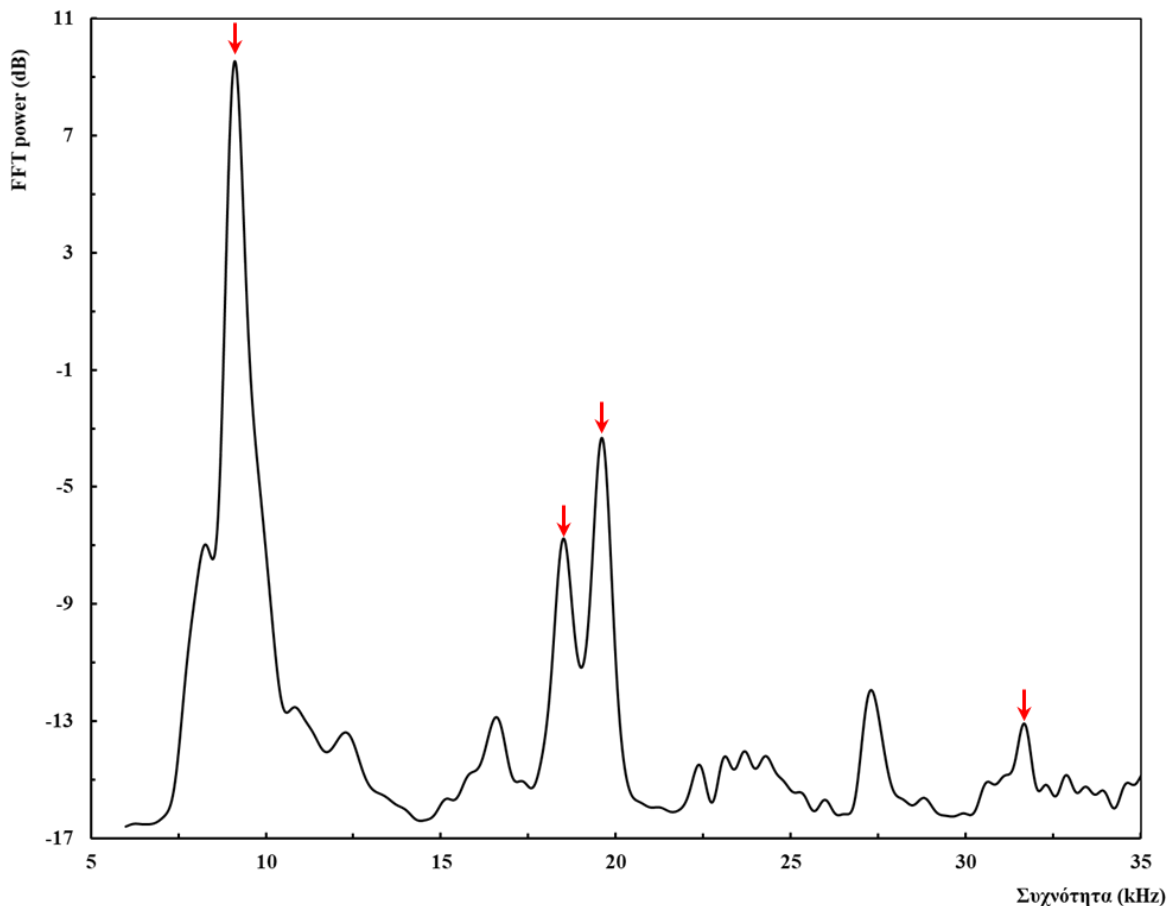
Σχήμα 9: Τμήμα της συχνοτικής απόκρισης του αισθητηρίου (μαύρη συνεχής γραμμή) γύρω από τη συχνότητα συντονισμού των περίπου 9120Hz και ενδεικτικές συχνότητες καταγραφής συμβολογραμμάτων (κόκκινοι κύκλοι) καθώς και τα συμβολογράμματα αυτά.

4. Πειραματικά αποτελέσματα & ανάλυση

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αρχικά τυπικά αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων και των δύο μεθόδων που ακολουθήθηκαν, στη συνέχεια γίνεται ανάλυσή τους και συγκρίνονται, ποιοτικά και ποσοτικά, τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών μεθόδων που ακολουθήθηκαν, για τον δονητικό χαρακτήρισμό του πιεζοηλεκτρικού αισθητηρίου που χρησιμοποιήθηκε.

4.1 Ηχητική εκπομπή / συχνοτική απόκριση & ποιοτικά χαρακτηριστικά

Η τυπική συχνοτική απόκριση του αισθητηρίου που εξήχθηκε από το καταγεγραμμένο ηχητικό φάσμα εκπομπής δίνεται στο σχήμα 10.

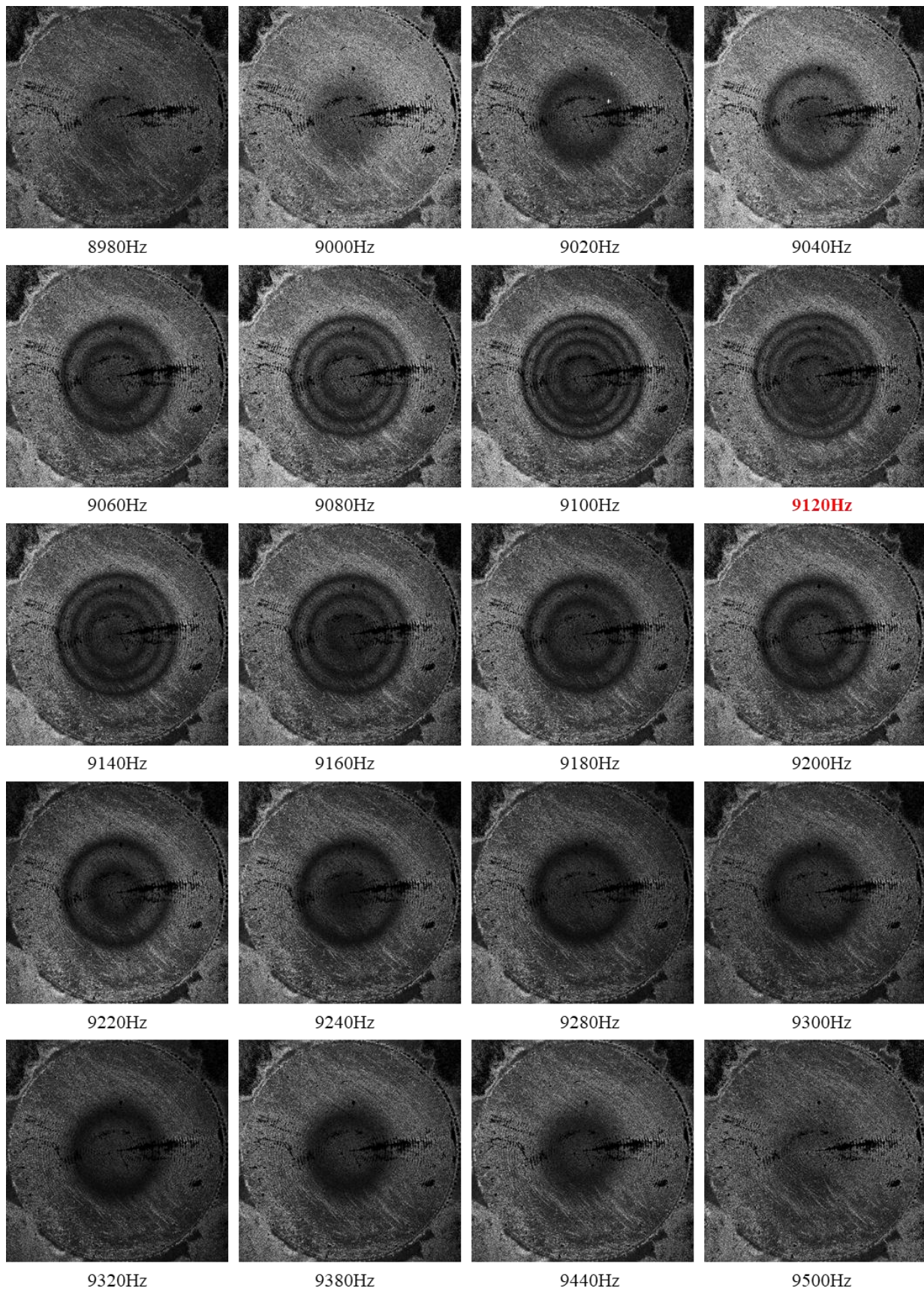


Σχήμα 10: Τυπική συχνοτική απόκριση του αισθητηρίου που εξήχθηκε από το καταγεγραμμένο ηχητικό φάσμα εκπομπής. Με κόκκινα βέλη σημειώνονται οι κεντρικές συχνότητες των εμφανών χαρακτηριστικών περιοχών συχνοτήτων απόκρισης για τις οποίες ήταν δυνατή η καταγραφή συμβολογραμμάτων ESPI.

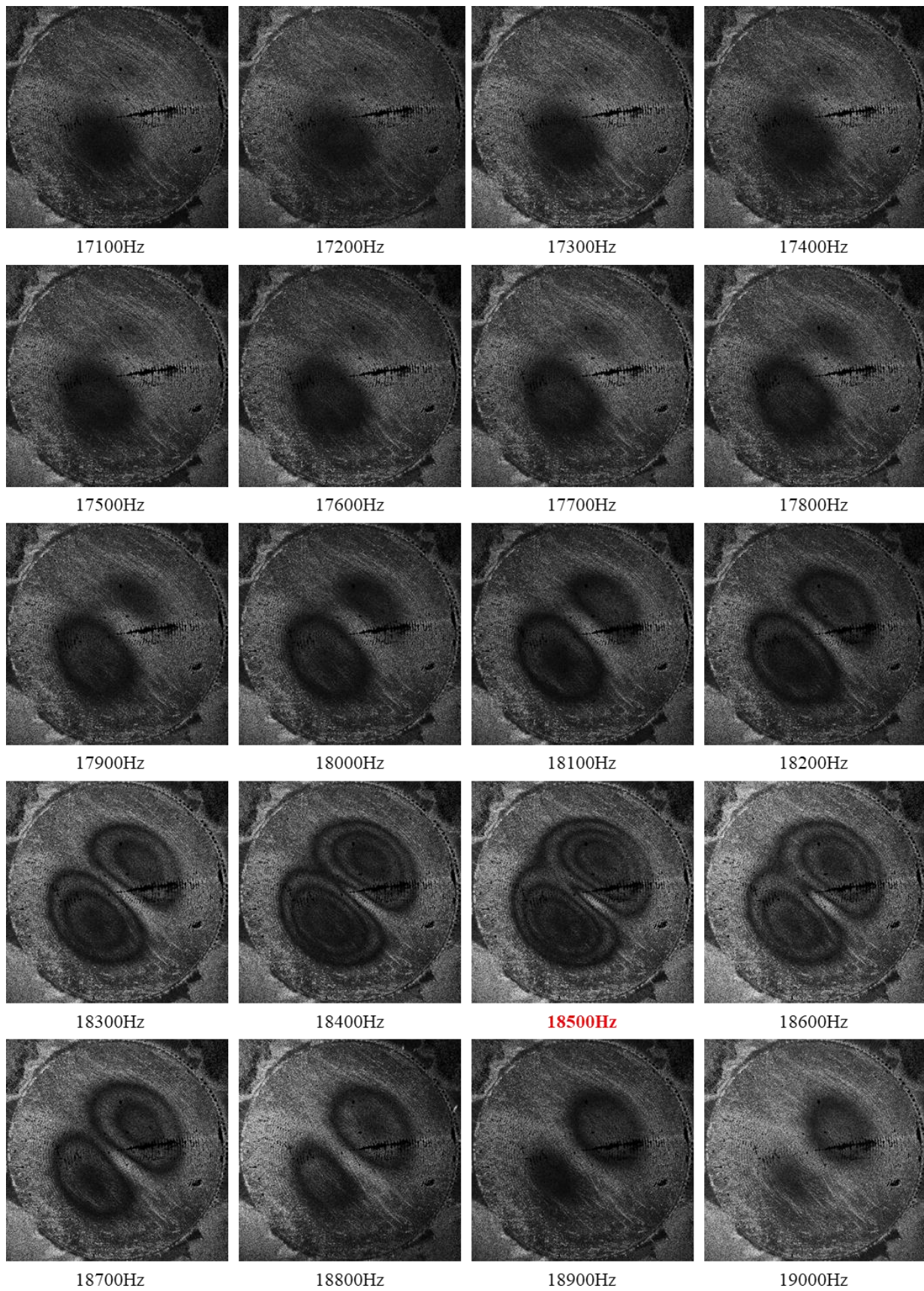
Αξίζει να σημειωθεί ότι για συχνότητες μικρότερες των ~5000Hz και μεγαλύτερες των ~35000Hz δεν εντοπίστηκαν ευκρινώς συχνοτικές περιοχές στις οποίες το αισθητήριο να ανταποκρίνεται. Στο σχήμα 10 σημειώνονται με κόκκινα βέλη οι κορυφές των τεσσάρων συνολικά χαρακτηριστικών περιοχών συχνοτήτων απόκρισης, συγκεκριμένα περίπου γύρω από τις συχνότητες 9120Hz, 18500Hz, 19600Hz, και 31650Hz, στις οποίες επικεντρώθηκε η παρούσα μελέτη καθώς σε αυτές παρατηρήθηκαν συντονισμοί με τη μέθοδο ESPI. Οι τρεις πρώτες είναι στο ανθρώπινο ακουστό φάσμα και η επόμενη στην περιοχή των υπερήχων. Οι παρατηρούμενοι συντονισμοί είναι ευδιάκριτοι και το εύρος τους στενό και καλά καθορισμένο. Οι υπόλοιπες συχνοτικές κορυφές που παρατηρούνται δεν αξιολογούνται, καθώς σε αυτές δεν παρατηρήθηκαν συντονισμοί με τη μέθοδο ESPI, ενώ οι περισσότερες από αυτές ούτε είναι ευδιάκριτες ούτε καλά καθορισμένες, και είναι μέσα στα όρια τόσο του πειραματικού σφάλματος όσο και της ακρίβειας της διαδικασίας αποθορυβοποίησης του FFT που περιγράφηκε. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η συχνοτική περιοχή μεταξύ των 17000Hz και των 21000Hz: παρατηρούνται δύο έντονες συχνοτικές κορυφές σε κοντινές συχνότητες (18500Hz και 19600Hz), γεγονός που υποδηλώνει την ύπαρξη ενός διπλά εκφυλισμένου κανονικού τρόπου δόνησης, όπως είχε εξηγηθεί και στην παράγραφο 2.1.2.

4.2 Συμβολογράμματα κανονικών τρόπων δόνησης & ποιοτική ανάλυση

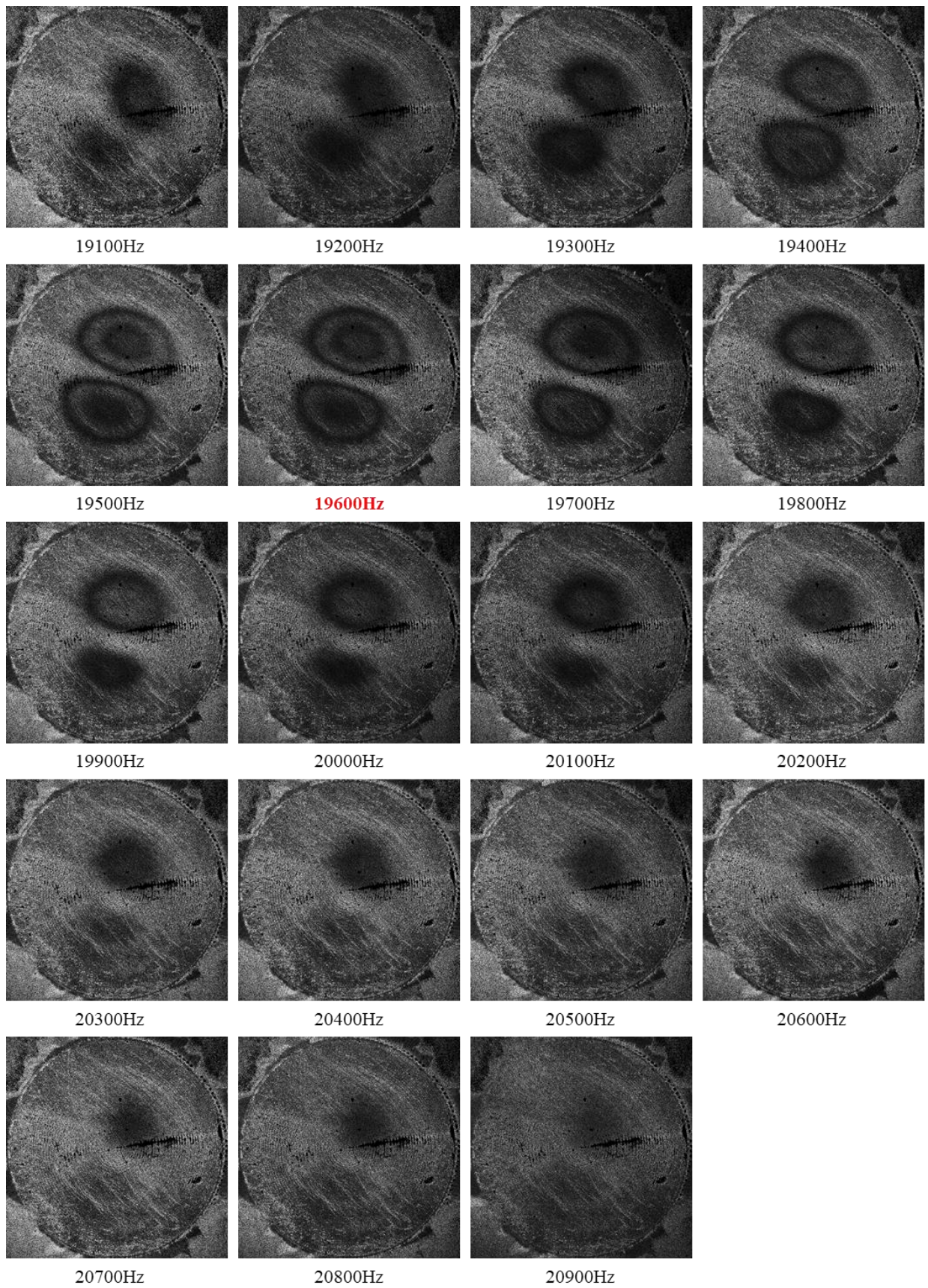
Στα σχήματα 11 έως και 14 παρουσιάζονται ενδεικτικά συμβολογράμματα για τις τέσσερις φασματικές περιοχές που αναφέρθηκαν παραπάνω, δηλαδή για την περιοχή γύρω από την συχνότητα των 9120Hz, η οποία είναι και η εντονότερη από όλες, την περιοχή μεταξύ των 17000Hz και των 21000Hz, όπου η εμφάνιση δύο αρκετά έντονων συχνοτικών κορυφών σε κοντινές συχνότητες (18500Hz και 19600Hz) υποδηλώνει την ύπαρξη ενός διπλά εκφυλισμένου κανονικού τρόπου δόνησης, και την περιοχή γύρω από τη συχνότητα των 31650Hz που βρίσκεται μέσα στην περιοχή του υπερηχητικού φάσματος. Σε κάθε περίπτωση σχήματα 11 έως και 14 περιλαμβάνονται τα συμβολογράμματα στην αρχή (αμυδρή εμφάνιση) και στο τέλος (εξαφάνιση) κάθε κανονικού τρόπου δόνησης, και αναγράφονται οι συχνότητες στις οποίες αυτά αντιστοιχούν.



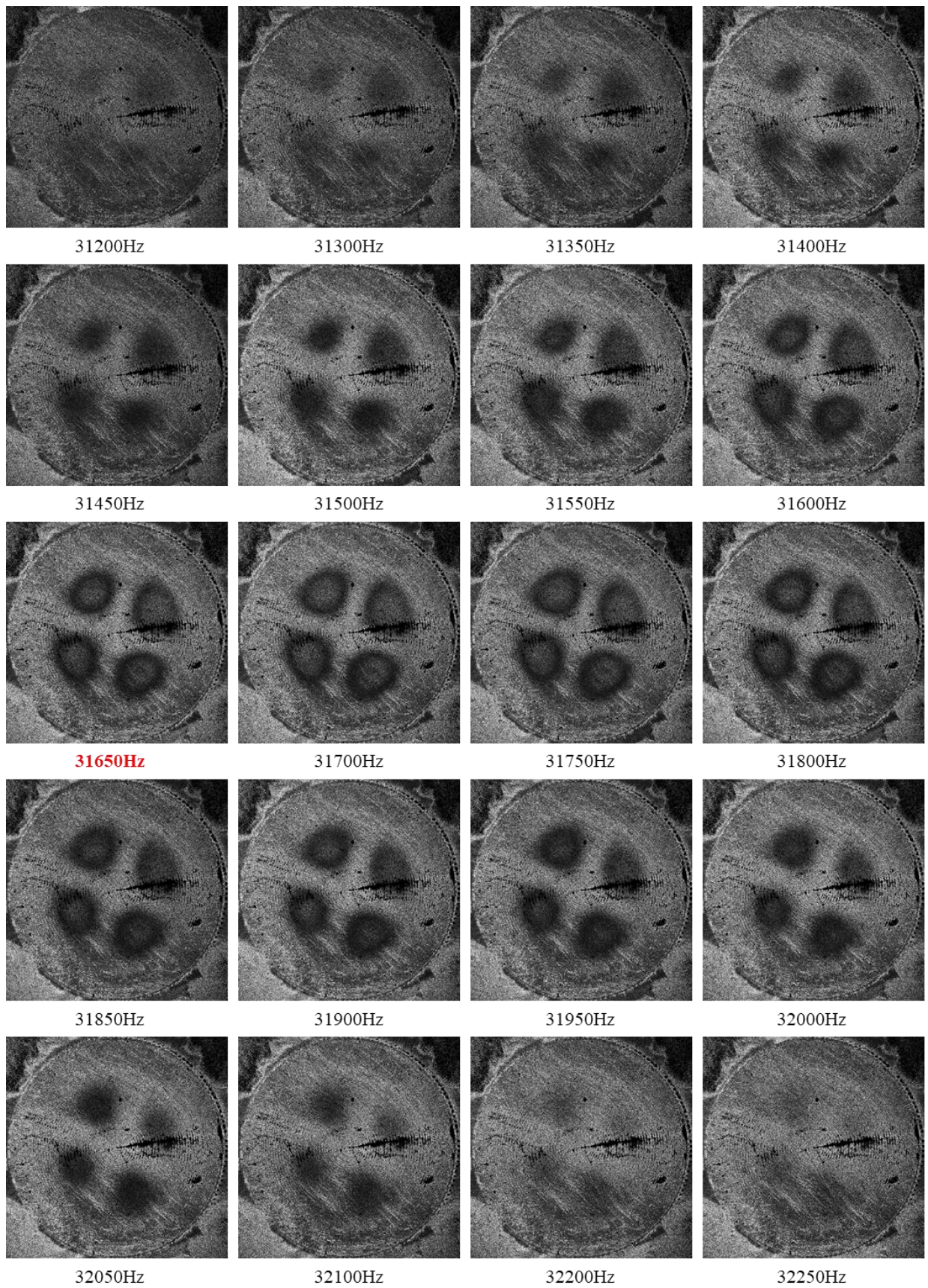
Σχήμα 11: Ενδεικτικά συμβολογράμματα ESPI και οι αντίστοιχες συχνότητες τους για τον κανονικό τρόπο δόνησης (0, 1) με συχνότητα συντονισμού 9120Hz (κόκκινα έντονα γράμματα).



Σχήμα 12: Ενδεικτικά συμβολογράμματα ESPI και οι αντίστοιχες συχνότητές τους για τον διπλά εκφυλισμένο κανονικό τρόπο δόνησης (1, 1) με συχνότητα συντονισμού 18500Hz (κόκκινα έντονα γράμματα).



Σχήμα 13: Ενδεικτικά συμβολογράμματα ESPI και οι αντίστοιχες συχνότητές τους για τον διπλά εκφυλισμένο κανονικό τρόπο δόνησης (1, 1) με συχνότητα συντονισμού 19600Hz (κόκκινα έντονα γράμματα).



Σχήμα 14: Ενδεικτικά συμβολογράμματα ESPI και οι αντίστοιχες συχνότητες τους για τον κανονικό τρόπο δόνησης (2, 1) με συχνότητα συντονισμού 31650Hz (κόκκινα έντονα γράμματα).

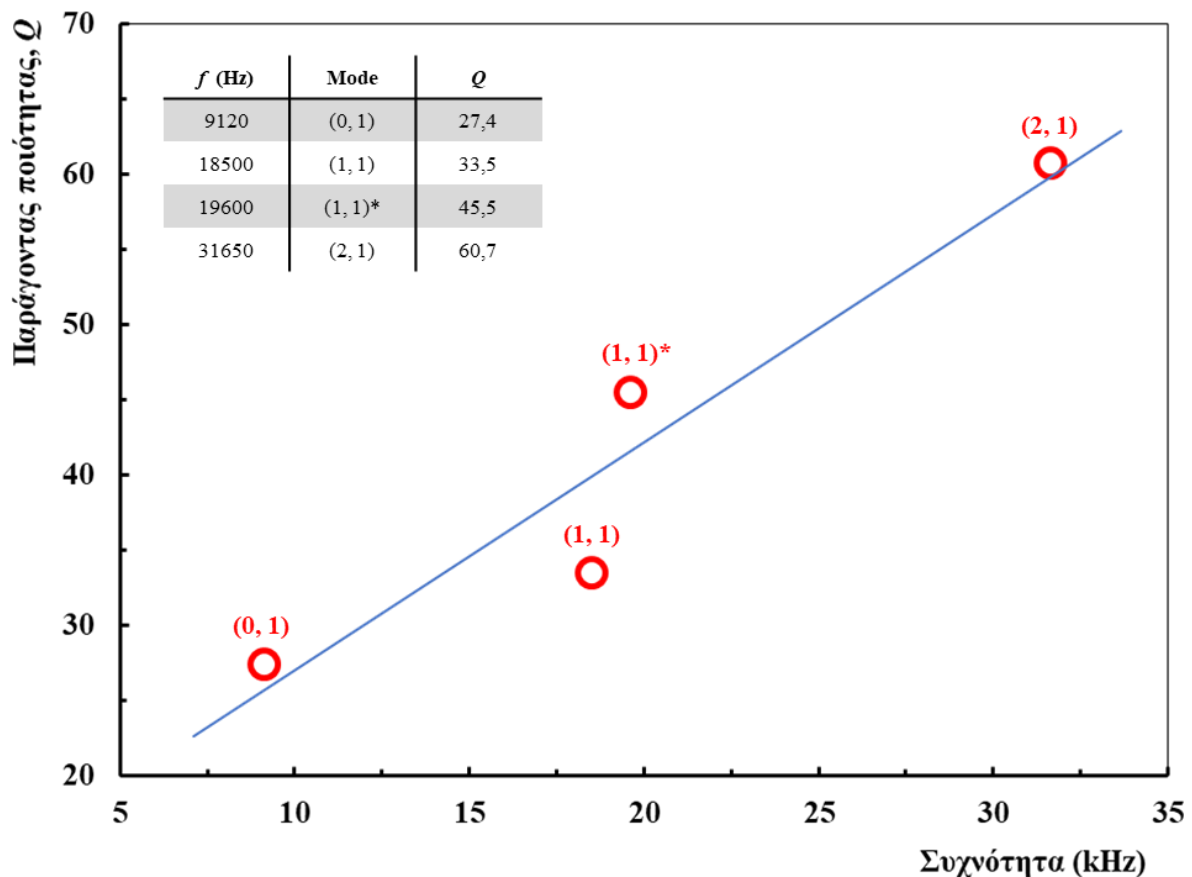
Για έναν αρχικό σχολιασμό των αποτελεσμάτων αυτών, στα πλαίσια μιας ποιοτικής, παρά ποσοτικής, ανάλυσης των αποτελεσμάτων, μπορούν να ειπωθούν τα εξής:

- ✓ Υπάρχει απόλυτη ταύτιση των συχνοτήτων συντονισμού όπως αυτές εξάγονται από τα αποτελέσματα της συχνοτικής απόκρισης και της ESPI.
- ✓ Όπως είχε διαφανεί από τα αποτελέσματα της συχνοτικής απόκρισης, επιβεβαιώνεται τώρα από τα αποτελέσματα της τεχνικής ESPI, ότι οι συχνότητες των 18500Hz και 19600Hz αντιστοιχούν σε έναν διπλά εκφυλισμένο κανονικό τρόπο δόνησης: τα συμβολογράμματα δείχνουν και στις δύο περιπτώσεις δύο συμμετρικές περιοχές («λοβούς») δόνησης του αισθητηρίου.
- ✓ Με βάση την μαθηματική περιγραφή της παραγράφου 2.1.2, μπορούν να ταυτοποιηθούν οι παρατηρούμενοι κανονικοί τρόποι δόνησης ως εξής: ο πρώτος (συχνότητα 9120Hz) ως ο τρόπος (0, 1), ο δεύτερος, διπλά εκφυλισμένος (συχνότητες 18500Hz και 19600Hz), ως ο τρόπος (1, 1), και ο τρίτος (συχνότητα 31650Hz) ως ο τρόπος (2, 1). Για να εξυπηρετήσουμε την μονοσήμαντη αναφορά στον καθένα από τους δύο εκφυλισμένους τρόπους, θα χρησιμοποιηθεί εφεξής ο συμβολισμός (1, 1) για τον τρόπο με χαρακτηριστική συχνότητα 18500Hz και ο συμβολισμός (1, 1)* για τον τρόπο με χαρακτηριστική συχνότητα 19600Hz.
- ✓ Σε απόλυτη συμφωνία με τα αποτελέσματα της συχνοτικής απόκρισης, τα αποτελέσματα της ESPI δείχνουν ότι ο τρόπος (0, 1) είναι ο πιο έντονος από όλους και ο (2, 1) ο πιο ασθενής, εμφανίζουν, δηλαδή, το μεγαλύτερο και το μικρότερο πλάτος δόνησης, αντίστοιχα: όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 2.4 (μαθηματική περιγραφή της τεχνικής ESPI), οι φωτεινοί κροσσοί είναι ισοϋψείς καμπύλες ίδιου πλάτους δόνησης. Κατά συνέπεια, όσο περισσότεροι τέτοιοι κροσσοί εμφανίζονται, τόσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος δόνησης. Πράγματι, στο συμβολόγραμμα της συχνότητας συντονισμού του τρόπου (0, 1) παρατηρούνται πέντε συνολικά φωτεινοί κροσσοί (ο πρώτος και φωτεινότερος αντιστοιχεί σε μηδενικό πλάτος δόνησης), ενώ στο αντίστοιχο συμβολόγραμμα του (2, 1) παρατηρούνται δύο συνολικά φωτεινοί κροσσοί.
- ✓ Σε συμφωνία, πάλι, με την συχνοτική απόκριση, στην ESPI οι τρόποι (1, 1) και (1, 1)* εμφανίζονται με ενδιάμεσο πλάτος δόνησης. Όμως, ενώ από το γράφημα της συχνοτικής απόκρισης (σχήμα 10) ο τρόπος (1, 1)* φαίνεται πιο έντονος από τον (1, 1), τα αποτελέσματα της ESPI υποδεικνύουν τα ανάποδο: ο (1, 1) έχει μεγαλύτερο πλάτος δόνησης (τέσσερις φωτεινοί κροσσοί) και ο (1, 1)* μικρότερο πλάτος δόνησης (τρεις φωτεινοί κροσσοί).

4.3 Ποσοτική ανάλυση & σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων

Στις προηγούμενες δύο παραγράφους παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των δύο πειραματικών μεθόδων που ακολουθήθηκαν, σχολιάστηκαν τα ποιοτικά τους χαρακτηριστικά, και έγινε μια ποιοτική ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Τώρα θα γίνει μια ποσοτική ανάλυσή τους και σύγκριση μέσω αυτής.

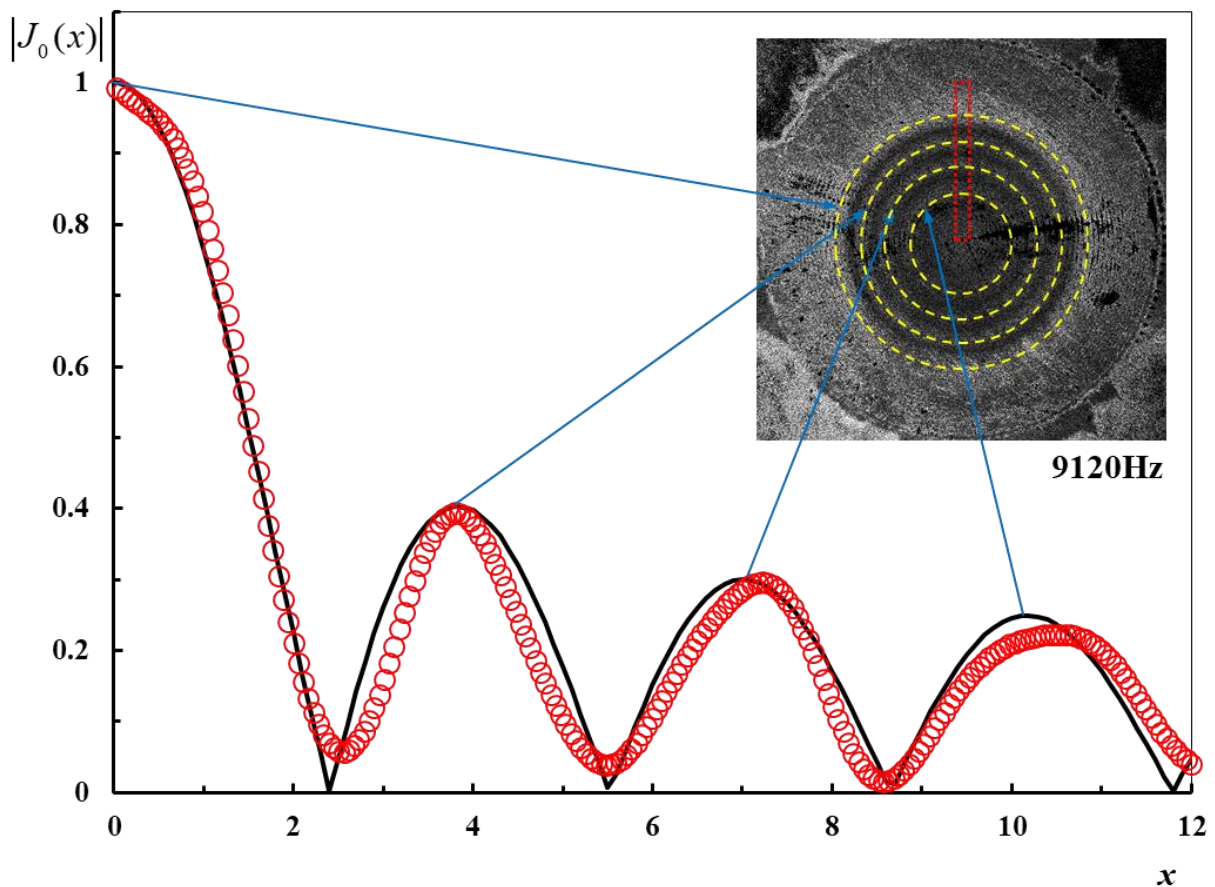
Ο παράγοντας ποιότητας Q ενός συντονισμού χρησιμοποιήθηκε αρχικά για την περιγραφή της ποιότητας ηλεκτρικών κυκλωμάτων, ως ένδειξη της ικανότητας του συστήματος να παράγει μεγάλη έξοδο στη συχνότητα συντονισμού. Στη Μουσική Ακουστική [34], και ειδικότερα στις περιπτώσεις διαγραμμάτων συχνοτικής απόκρισης, ο παράγοντας Q είναι άμεσα συνδεδεμένος με την ποιότητα και το εύρος του συντονισμού, καθώς υπολογίζεται ως ο λόγος της συχνότητας συντονισμού, f_0 , προς το συχνοτικό εύρος στο σημείο -3dB . Στο σχήμα 15 δίνονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού του παράγοντα Q για τις τέσσερις συχνότητες συντονισμού στις οποίες επικεντρώθηκε η μελέτη με την μέθοδο ESPI. Σε ένθετο πίνακα υπάρχουν οι σχετικές τιμές, ενώ η μπλε γραμμή είναι βοηθητική στον αναγνώστη.



Σχήμα 15: Γράφημα υπολογισμού του παράγοντα Q (κόκκινοι κύκλοι) για τις συχνότητες συντονισμού των τρόπων (0, 1), (1, 1), (1, 1)*, και (2, 1). Στον ένθετο πίνακα δίνονται οι σχετικές τιμές, η μπλε γραμμή είναι βοηθητική στον αναγνώστη.

Με τα ποσοτικά αυτά αποτελέσματα ενισχύεται η αρχική ποιοτική παρατήρηση ότι οι συγκεκριμένοι συντονισμοί είναι ευδιάκριτοι καθώς εμφανίζουν ικανοποιητικά υψηλό παράγοντα Q . Η συμπεριφορά που καταγράφεται είναι ότι όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο οι συντονισμοί γίνονται στενότεροι, με τον συντονισμό (0, 1) να είναι ο πιο εκτεταμένος από όλους με αρκετή, μάλιστα, διαφορά από τους υπόλοιπους. Αν και η συμπεριφορά τέτοιων πιεζοηλεκτρικών αισθητηρίων ποικίλλει ανάλογα το υλικό που χρησιμοποιείται, τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, τον τρόπο στήριξης κτλ., μια τέτοια συμπεριφορά δεν είναι ασυνήθιστη σε εμπορικά διαθέσιμα αισθητήρια [π.χ. βλ. 67-68]. Τέλος, σημειώνεται ότι η εξαγόμενη τιμή $Q = 60,7$ για τον τρόπο (2, 1) είναι μια πολύ καλή προσέγγιση διότι τα σημεία στα -3dB εκατέρωθεν της συχνότητας συντονισμού είναι οριακά εντός του υπόβαθρου θορύβου.

Για την ανάλυση της συμπεριφοράς της φωτεινότητας των κροσσών, επιλέχθηκε αντιπροσωπευτικά το συμβολόγραμμα στην συχνότητα συντονισμού των 9120Hz. Με ειδικό λογισμικό (ImageJ) έγινε ακτινική τομή και καταγράφηκε η διαμόρφωση της φωτεινότητας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής φαίνονται στο γράφημα του σχήματος 16.



Σχήμα 16: Αποτέλεσμα ακτινικής τομής του συμβολογράμματος για τη συχνότητα συντονισμού των 9120Hz (κόκκινοι κύκλοι) κανονικοποιημένο ως προς το μέγιστο, και συμπεριφορά της συνάρτησης Bessel $|J_0(x)|$ (μαύρη συνεχής γραμμή). Σε ένθετο υπάρχει το συμβολόγραμμα, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή η περιοχή της τομής, ενώ οι κίτρινες διακεκομμένες γραμμές είναι οδηγοί για τον αναγνώστη των θέσεων των φωτεινών κροσσών.

Το γράφημα περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της ακτινικής τομής κανονικοποιημένα ως προς το μέγιστο (κόκκινοι κύκλοι), μαζί με τη συμπεριφορά συνάρτησης Bessel $|J_0(x)|$ (μαύρη συνεχής γραμμή). Σε ένθετο υπάρχει το συμβολόγραμμα, με κόκκινη διακεκομμένη γραμμή φαίνεται η περιοχή της τομής, ενώ οι κίτρινες διακεκομμένες γραμμές είναι οδηγοί για τον αναγνώστη των θέσεων των φωτεινών κροσσών. Τέλος, τα μπλε βέλη δείχνουν την αντιστοιχία των τοπικών μέγιστων της συνάρτησης Bessel $|J_0(x)|$ (και των αποτελεσμάτων της ακτινικής τομής) με τον κάθε φωτεινό κροσσό του συμβολογράμματος. Από την ανάλυση αυτή είναι προφανής η διαμόρφωση της φωτεινότητας των κροσσών από την $|J_0(x)|$. Τυχόν ελάχιστες αποκλίσεις, τόσο στο χωρικό εύρος όσο στις θέσεις των τοπικών μεγίστων, αποδίδονται στην ποιότητα της εικόνας συμβολογράμματος, απόρροια της ακρίβειας ρύθμισης των σχετικών εντάσεων των δύο δεσμών (αναφοράς και αντικειμένου).

Με βάση την μαθηματική περιγραφή της παραγράφου 2.4 και τα καταγεγραμμένα συμβολογράμματα, υπολογίστηκαν τα μέγιστα πλάτη δόνησης της επιφάνειας του πιεζοηλεκτρικού αισθητηρίου για όλες τις συχνότητες καταγραφής συμβολογραμμάτων στο εύρος 5000Hz – 35000Hz. Η συνάρτηση Bessel $|J_0(x)|$ έχει τοπικά μέγιστα για τιμές του ορίσματος, $x = 0, \sim 3,830, \sim 7,015, \sim 10,175, \sim 13,325, \dots$. Στην περίπτωση της ESPI το όρισμα της Bessel είναι ΓA , όπου $\Gamma = 4\pi/\lambda$ ($\lambda = 532\text{nm}$ το μήκος κύματος του λέιζερ στην διάταξη) και A το πλάτος δόνησης. Έτσι για τους πέντε πρώτους φωτεινούς κροσσούς των συμβολογραμμάτων, που αντιστοιχούν στα πέντε πρώτα τοπικά μέγιστα της Bessel, υπολογίζονται τα πλάτη δόνησης (A_1, A_2, A_3, A_4 , και A_5 , αντίστοιχα) ως ακολούθως:

$$1^{\text{ος}} \text{ φωτεινός κροσσός: } \Gamma A_1 = \frac{4\pi}{\lambda} A_1 = 0 \Rightarrow A_1 = 0\text{nm}$$

$$2^{\text{ος}} \text{ φωτεινός κροσσός: } \Gamma A_2 = \frac{4\pi}{\lambda} A_2 \approx 3,830 \Rightarrow A_2 \approx \frac{3,830 \cdot 532\text{nm}}{4\pi} \Rightarrow A_2 \approx 162\text{nm}$$

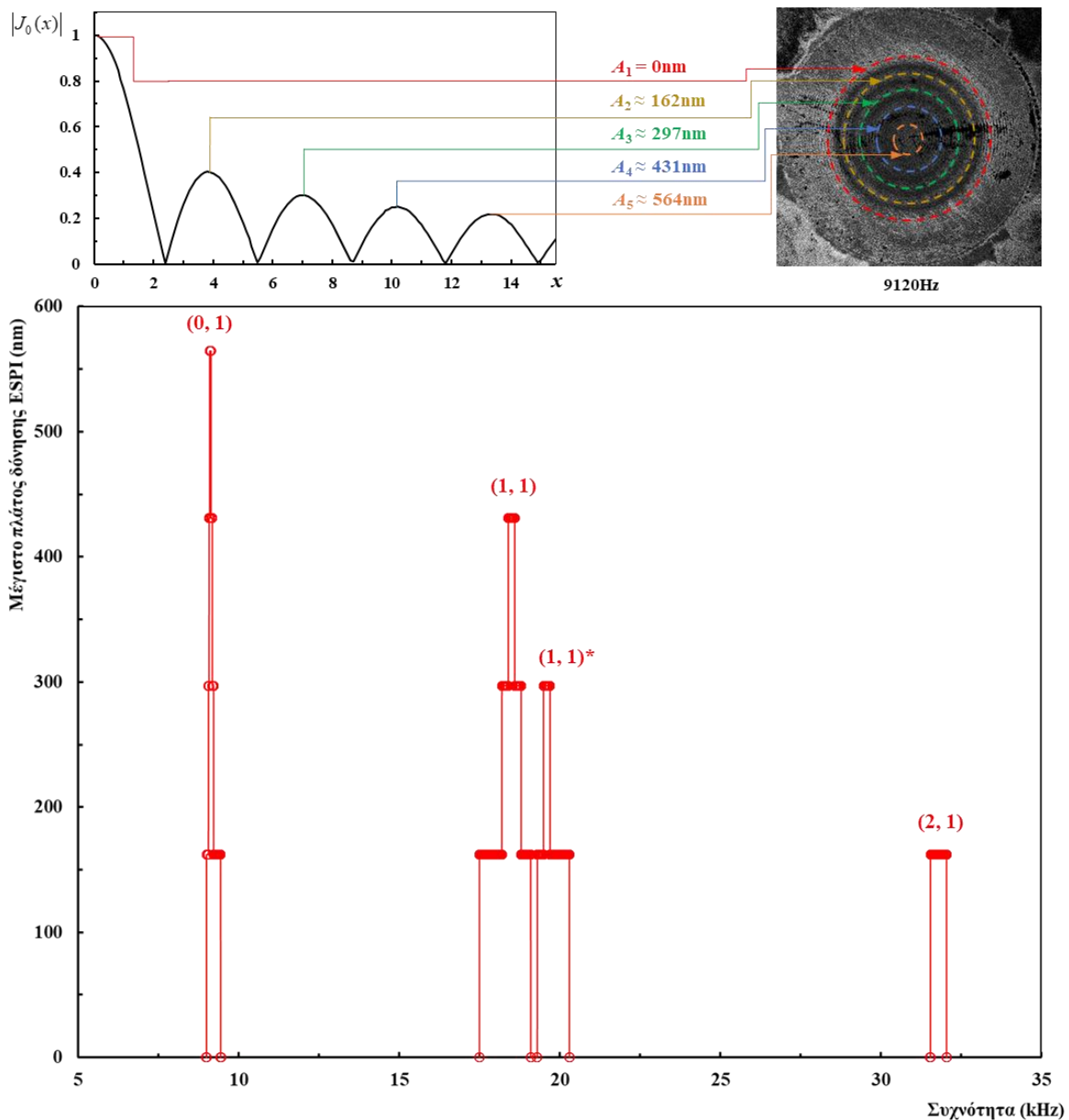
$$3^{\text{ος}} \text{ φωτεινός κροσσός: } \Gamma A_3 = \frac{4\pi}{\lambda} A_3 \approx 7,015 \Rightarrow A_3 \approx \frac{7,015 \cdot 532\text{nm}}{4\pi} \Rightarrow A_3 \approx 297\text{nm}$$

$$4^{\text{ος}} \text{ φωτεινός κροσσός: } \Gamma A_4 = \frac{4\pi}{\lambda} A_4 \approx 10,175 \Rightarrow A_4 \approx \frac{10,175 \cdot 532\text{nm}}{4\pi} \Rightarrow A_4 \approx 431\text{nm}$$

$$5^{\text{ος}} \text{ φωτεινός κροσσός: } \Gamma A_5 = \frac{4\pi}{\lambda} A_5 \approx 13,325 \Rightarrow A_5 \approx \frac{13,325 \cdot 532\text{nm}}{4\pi} \Rightarrow A_5 \approx 564\text{nm}$$

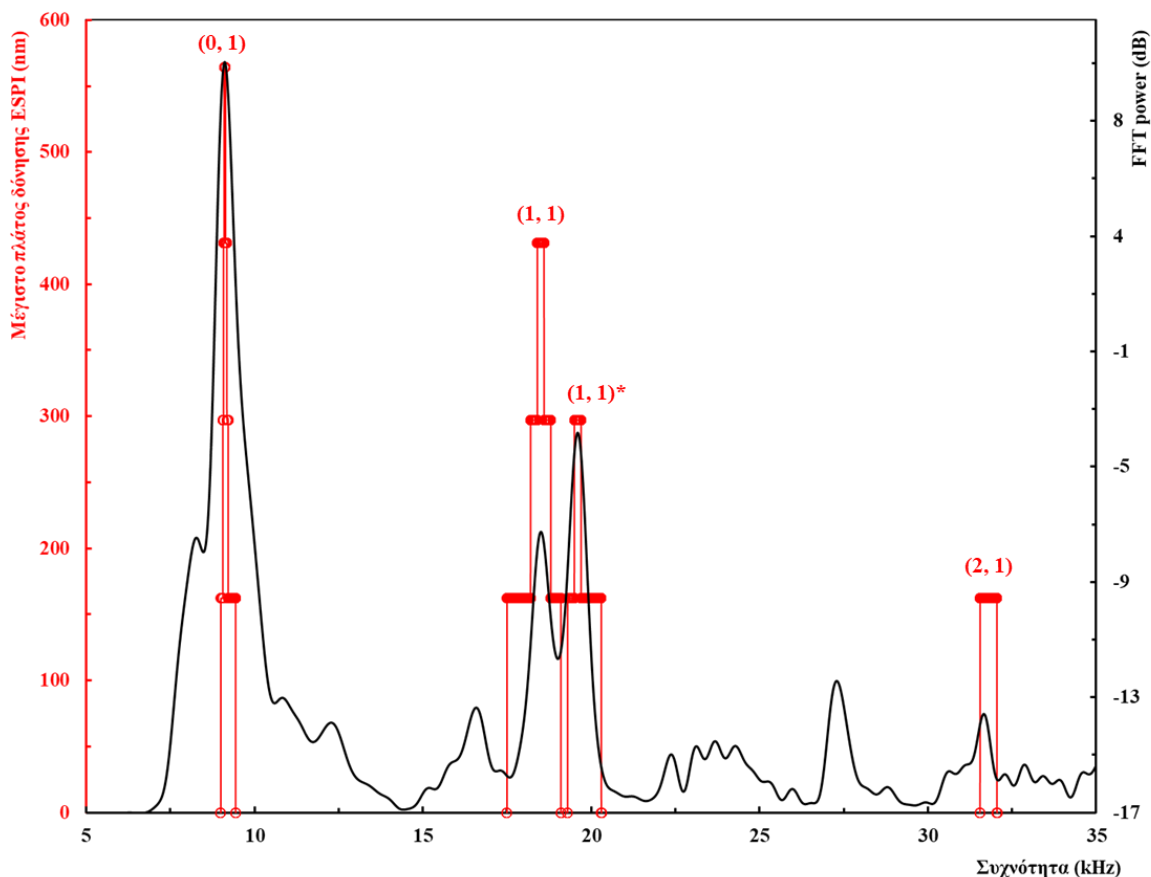
Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι το ελάχιστο ανιχνεύσιμο πλάτος δόνησης με την συγκεκριμένη διάταξη ESPI είναι $\sim 162\text{nm}$, δηλαδή περίπου $\lambda/3$. Τα αποτελέσματα της παραπάνω ανάλυσης απεικονίζονται σε γράφημα στο σχήμα 17 με κόκκινους κύκλους (η

κόκκινη συνεχής γραμμή είναι βοηθητική στον αναγνώστη). Στο πάνω μέρος δίνεται ενδεικτικό παράδειγμα της εξαγωγής του μέγιστου πλάτους δόνησης του τρόπου (0, 1) στη συχνότητα συντονισμού 9120Hz. Στα αριστερά υπάρχει η γραφική παράσταση της συνάρτησης Bessel $|J_0(x)|$ και στα δεξιά το συμβολόγραμμα. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι οδηγοί για τον αναγνώστη των θέσεων των φωτεινών κροσσών και η επιλεγμένη χρωματική κλίμακα εξυπηρετεί την ταύτιση με τα αντίστοιχα τοπικά μέγιστα της συνάρτησης Bessel.



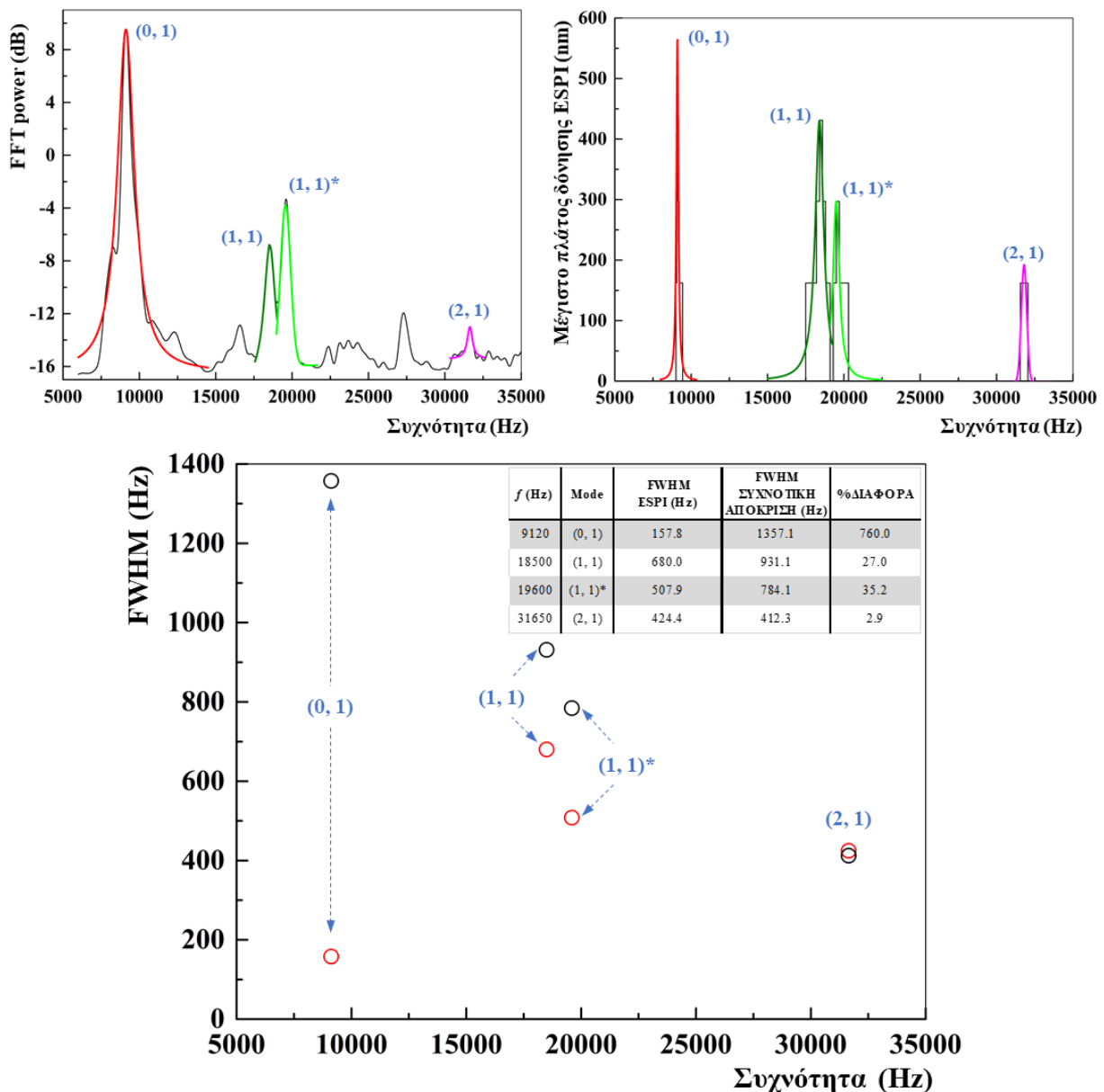
Σχήμα 17: Γράφημα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης (κάτω) για την εξαγωγή του μέγιστου πλάτους δόνησης από τα συμβολογράμματα ESPI (κόκκινοι κύκλοι), και ενδεικτικό παράδειγμα (πάνω) για τον τρόπο (0, 1) και στη συχνότητα 9120Hz. Στα αριστερά υπάρχει η γραφική παράσταση της συνάρτησης Bessel $|J_0(x)|$ και στα δεξιά το συμβολόγραμμα. Οι διακεκομμένες γραμμές είναι οδηγοί για τον αναγνώστη των θέσεων των φωτεινών κροσσών και η επιλεγμένη χρωματική κλίμακα εξυπηρετεί την ταύτιση με τα αντίστοιχα τοπικά μέγιστα της Bessel.

Έχοντας ολοκληρώσει την ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων των δύο πειραματικών μεθόδων, είναι δυνατή η περαιτέρω σύγκρισή τους με ποσοτικά κριτήρια, πλέον της αρχικής ποιοτικής σύγκρισης που έχει ήδη γίνει. Αυτό εξυπηρετεί το γράφημα του σχήματος 18 όπου απεικονίζεται η συχνοτική απόκριση του αισθητηρίου μαζί με τα εξαγόμενα πλάτη των κανονικών τρόπων δόνησης από τα συμβολογράμματα ESPI. Η απόλυτη ταύτιση των συχνοτήτων συντονισμού είναι προφανής. Επιβεβαιώνονται επίσης οι ποιοτικές παρατηρήσεις σχετικά με τις σχετικές εντάσεις των κανονικών τρόπων δόνησης. Τα πιεζοηλεκτρικά αισθητήρια δεν έχουν σταθερή απόκριση σε τόσο ευρύ φάσμα συχνοτήτων όπως αυτό που μελετήθηκε εδώ (ακουστές έως υπερηχητικές συχνότητες) [π.χ. βλ. 67-68]. Σε αυτό αποδίδεται, κατά κύριο λόγο, η παρατηρούμενη ασυμφωνία μεταξύ των μεθόδων ως προς την σχετική ένταση των τρόπων (1, 1) και (1, 1)*, ενώ, δευτερευόντως, θα μπορούσε να αποδοθεί και σε παράγοντες που επηρεάζουν την ακρίβεια της διαδικασίας εξαγωγής της συχνοτικής απόκρισης (π.χ. αποθρομβοποίηση).



Σχήμα 18: Η συχνοτική απόκριση του πιεζοηλεκτρικού αισθητηρίου (μαύρη γραμμή – κατακόρυφος άξονας δεξιά) και τα εξαγόμενα μέγιστα πλάτη δόνησης από τα συμβολογράμματα ESPI (κόκκινοι κύκλοι – κατακόρυφος άξονας αριστερά). Η κόκκινη συνεχής γραμμή είναι βοηθητική στον αναγνώστη. Η επιλογή των μεγίστων των κατακόρυφων αξόνων έγινε ώστε να συμπίπτουν οι δύο κορυφές για τον τρόπο (0, 1) για καλύτερη εξυπηρέτηση του σχολιασμού των αποτελεσμάτων.

Μια πολύ σημαντική διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων είναι ως προς το παρατηρούμενο συχνοτικό εύρος του τρόπου (0, 1). Ενώ, κατά καλή προσέγγιση, τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων συμφωνούν ως προς το συχνοτικό εύρος των υπολοίπων τρόπων, στα αποτελέσματα της ESPI ο τρόπος (0, 1) εμφανίζεται κατά πολύ στενότερος απ' ότι στα αποτελέσματα της συχνοτικής απόκρισης. Για την ποσοτική σύγκριση των παραπάνω έγινε περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 19. Η επεξεργασία αυτή είχε ως ακολούθως:



Σχήμα 19: Εξαγωγή του FWHM συχνοτικού εύρους των κανονικών τρόπων δόνησης από τα δεδομένα της συχνοτικής απόκρισης (πάνω αριστερά) και της ESPI (πάνω δεξιά). Τα αποτελέσματα φαίνονται στο κάτω γράφημα, ενώ στον ένθετο πίνακα δίνονται οι σχετικές τιμές.

Στα αποτελέσματα της συχνοτικής απόκρισης (dB vs. Hz) η ποιότητα και το εύρος των συντονισμών ποσοτικοποιήθηκαν εφαρμόζοντας τη δόκιμη διαδικασία εξαγωγής του παράγοντα Q . Στα αποτελέσματα εξαγωγής μέγιστου πλάτους δόνησης από την ESPI δεν είναι δόκιμη η διαδικασία αυτή. Έτσι επιλέχθηκε να εφαρμοστεί η δόκιμη διαδικασία εξαγωγής του πλήρους εύρους στο σημείο του μισού μεγίστου (Full Width at Half-Maximum – FWHM) των συντονισμών και στις δύο πειραματικές περιπτώσεις. Το FWHM είναι αντιπροσωπευτική ποσότητα του συχνοτικού εύρους: όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο μεγαλύτερο το συχνοτικό εύρος, ενώ το αντίστροφο συμβαίνει με τον παράγοντα Q . Η εξαγωγή τιμών FWHM έγινε με προσαρμογή στα δεδομένα (fitting) συνάρτησης της μορφής της κατανομής Lorentz και με χρήση ειδικού λογισμικού.

Στο πάνω μέρος του σχήματος 19 φαίνονται αυτά τα fittings στα αποτελέσματα της συχνοτικής απόκρισης (αριστερά) και της ESPI (δεξιά). Οι εξαγόμενες τιμές του FWHM και για τις δύο περιπτώσεις απεικονίζονται γραφικά (FWHM vs. Hz) στο κάτω μέρος του σχήματος 19, όπου σε ένθετο πίνακα δίνονται οι σχετικές τιμές και η ποσοστιαία (%) διαφορά τους. Για τον τρόπο (2, 1) οι δύο πειραματικές τεχνικές δείχνουν ουσιαστικά το ίδιο συχνοτικό εύρος (2,9% διαφορά). Η κάπως μεγαλύτερη διαφορά ως προς το συχνοτικό εύρος των τρόπων (1, 1) και (1, 1)*, 27,0% και 35,2%, αντίστοιχα, αποδίδεται στο γεγονός ότι αυτοί εμφανίζονται επικαλυπτόμενοι στα αποτελέσματα συχνοτικής απόκρισης. Τέλος, η τεράστια διαφορά (760%!) για τον τρόπο (0, 1) αποδίδεται στην επιλογή της τάσης οδήγησης του αισθητηρίου (2V) σε συνδυασμό με το ότι αυτό δεν έχει σταθερή απόκριση σε τόσο ευρύ φάσμα συχνοτήτων: θα μπορούσε, για παράδειγμα, να είχε επιλεγεί μεγαλύτερη τάση οδήγησης, και τότε είναι προφανές από τα αποτελέσματα ότι θα ήταν δυνατή η παρατήρηση συμβολογραμμάτων του τρόπου (0, 1) σε μεγαλύτερο εύρος συχνοτήτων. Όμως λόγω της έντονης απόκρισης στα 9120Hz θα υπήρχε τότε κίνδυνος καταστροφής του αισθητηρίου. Σημειώνεται ότι επιλέχθηκε σταθερή τάση οδήγησης του αισθητηρίου σε όλο το εύρος των συχνοτήτων (2V), ώστε να είναι κατά το δυνατόν άμεση η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ τους. Επιπρόσθετα, εκτιμάται ότι η αύξηση της τάσης οδήγησης θα είχε ως αποτέλεσμα την δόνηση του αισθητηρίου σε τέτοιο πλάτος που η καταγραφή ευδιάκριτων φωτεινών κροσσών γύρω από τα 9120Hz θα ήταν αδύνατη λόγω της μεγάλης χωρικής τους πυκνότητας (βλ. παράγραφο 2.4).

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό αξίζει να σχολιαστεί περαιτέρω το γεγονός ότι στο γράφημα συχνοτικής απόκρισης / ηχητικής εκπομπής υπήρχαν κάποιες συχνοτικές κορυφές ενδιάμεσα από αυτές που μελετήθηκαν (ιδιαίτερα στα 27290Hz) στις οποίες όμως δεν

παρατηρήθηκαν συντονισμοί με τη μέθοδο ESPI. Έχουν ήδη αναφερθεί λόγοι για τους οποίους αυτές δεν αξιολογήθηκαν, όμως τώρα μπορούν να αναφερθούν επιπρόσθετα τα εξής: θα μπορούσε να πει κανείς ότι υπάρχει ίσως η πιθανότητα να μην παρατηρήθηκαν συντονισμοί σε αυτές τις συχνοτικές περιοχές με την ESPI λόγω της σταθερής τιμής της τάσης διέγερσης που επιλέχθηκε, όπως έχει εξηγηθεί. Δηλαδή, για μεγαλύτερες τιμές τάσης διέγερσης θα μπορούσαν ίσως να παρατηρηθούν και σε κάποιες από αυτές τρόποι συντονισμού με την ESPI. Όμως όπως φαίνεται στον πίνακα 1 οι τρεις πρώτες συχνότητες συντονισμού μιας κυκλικής μεμβράνης είναι αυτές που αντιστοιχούν στους τρόπους (0, 1), (1, 1) και (2, 1), ακριβώς δηλαδή αυτοί που ανιχνεύθηκαν με την ESPI. Αυτό ισχυροποιεί την μη αξιολόγηση άλλων ενδιάμεσων συχνοτικών περιοχών και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων της ESPI.

5. Σύνοψη – Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή είχε ως αντικείμενο τον πειραματικό δονητικό χαρακτηρισμό ενός ακουστικού πιεζοηλεκτρικού αισθητηρίου. Επιλέχθηκε ένα εμπορικά διαθέσιμο αισθητήριο και το πρώτο βήμα της πειραματικής μελέτης αφορούσε στον προσδιορισμό της συχνοτικής του απόκρισης συνέπεια διέγερσής του σε συχνότητες από 1000Hz έως 50000Hz. Στο δεύτερο βήμα τροποποιήθηκε κατάλληλα σύστημα χρονικά ολοκληρωμένης ESPI του Εργαστηρίου Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μηχανικών Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, ώστε να ανιχνευτούν απεικονιστικά οι κανονικοί τρόποι δόνησης του αισθητηρίου και να καταγραφούν συμβολογράμματα αυτών.

Για συχνότητες μικρότερες των ~5000Hz και μεγαλύτερες των ~35000Hz δεν εντοπίστηκαν ευκρινώς συχνοτικές περιοχές στις οποίες το αισθητήριο να ανταποκρίνεται, ενώ τα αποτελέσματα της χρονικά ολοκληρωμένης ESPI κατέδειξαν τέσσερις συνολικά κανονικούς τρόπους δόνησης με συχνότητες συντονισμού 9120Hz, 18500Hz, 19600Hz, και 31650Hz. Οι τρεις πρώτες είναι στο ανθρώπινο ακουστό φάσμα και η επόμενη στην περιοχή των υπερήχων. Στα αποτελέσματα της συχνοτικής απόκρισης οι παρατηρούμενοι συντονισμοί ήταν ευδιάκριτοι και το εύρος τους στενό και καλά καθορισμένο.

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι οι συχνότητες των 18500Hz και 19600Hz αντιστοιχούν σε έναν διπλά εκφυλισμένο κανονικό τρόπο δόνησης. Οι παρατηρούμενοι κανονικοί τρόποι δόνησης ταυτοποιήθηκαν ως ο τρόπος (0, 1) με συχνότητα συντονισμού 9120Hz, ο τρόπος (1, 1) διπλά εκφυλισμένος (συχνότητες συντονισμού 18500Hz και 19600Hz), και ο τρόπος (2, 1) με συχνότητα συντονισμού 31650Hz. Για την μονοσήμαντη αναφορά στον καθένα από τους δύο εκφυλισμένους τρόπους χρησιμοποιήθηκε ο συμβολισμός (1, 1) για τον τρόπο με χαρακτηριστική συχνότητα 18500Hz και ο συμβολισμός (1, 1)* για τον τρόπο με χαρακτηριστική συχνότητα 19600Hz. Για κάθε ένα κανονικό τρόπο δόνησης εξήχθησαν τα πλάτη δόνησης στην συχνότητα συντονισμού. Η συγκεκριμένη διάταξη ESPI είχε υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα στην διεύθυνση κάθετα στην επιφάνεια του αντικειμένου επιτρέποντας ελάχιστο ανιχνεύσιμο πλάτος δόνησης ~162nm. Για να γίνει ευκολότερα αυτό αντιληπτό πόσο μικρό είναι αυτό σημειώνεται ότι το μέσο μέγεθος μιας ανθρώπινης τρίχας είναι ~75μm [69] ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$), είναι δηλαδή ~450 φορές μεγαλύτερη!

Η ποσοτική ανάλυση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων (εξαγωγή παράγοντα Q συχνοτικής απόκρισης/εκπομπής, εξαγωγή πλατών δόνησης από συμβολογράμματα ESPI, εξαγωγή FWHM πλατών συντονισμών) έδειξε ότι αυτά είναι σε πολύ καλή συμφωνία μεταξύ

τους. Οι όποιες διαφορές (π.χ. σχετικά πλάτη κορυφών του διπλά εκφυλισμένου τρόπου (1, 1), αποκλίσεις FWHM πλατών συντονισμών) εξηγήθηκαν στα πλαίσια του τρόπου εφαρμογής και την ακρίβεια των μεθόδων. Από τη συνολική πειραματική μελέτη συμπεραίνεται ότι η χρονικά ολοκληρωμένη ESPI είναι μια υψηλής ακρίβειας μέθοδος που μπορεί να δώσει αξιόπιστη πληροφορία για τη φύση των δονήσεων ενός μακροσκοπικού αντικειμένου. Παρέχει τα πλεονεκτήματα της σε πραγματικό χρόνο (on-line) ανίχνευσης ενώ είναι μη-καταστρεπτική και μη-επεμβατική καθώς δεν χρειάζεται κάποιο αισθητήριο να έρθει σε επαφή με το υπό μελέτη αντικείμενο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, κατά την άποψη του γράφοντα, θα ήταν η τροποποίηση της υπάρχουσας διάταξης για να αρθούν οι περιορισμοί που αφορούν στη μέγιστη δυνατή ανιχνεύσιμη μετατόπιση και τον προσδιορισμό της φάσης της δόνησης [π.χ. βλ. 19, 63-66] ώστε με ταυτόχρονη μείωση του μεγέθους της να αποτελέσει ένα τελικό εμπορεύσιμο προϊόν υψηλής τεχνολογίας.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] J.F. Tressler, S.A. Robert, and E. Newnham, *Piezoelectric sensors and sensor materials*, J. Electroceram. **2**, 257 (1998).
- [2] Z. Sun, B. Rocha, K-T. Wu, and N. Mrad, *A methodological review of piezoelectric-based acoustic wave generation and detection techniques for structural health monitoring*, Int. J. Aerosp. Eng. **2013**, 928627 (2013).
- [3] X. Jiang, K. Kim, S. Zhang, J. Johnson, and G. Salazar, *High-temperature piezoelectric sensing*, Sensors **14**, 144 (2014).
- [4] W.H. Duan, Q. Wang, and S.T. Quek, *Applications of piezoelectric materials in structural health. Monitoring and repair: selected research examples*, Materials **3**, 5169 (2010).
- [5] S. Tadigadapa and K. Mateti, *Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives*, Meas. Sci. Technol. **20**, 092001 (2009).
- [6] C.Y.K. Chee, L. Tong, and G.P. Steven, *A review on the modelling of piezoelectric sensors and actuators incorporated in intelligent structures*, J. Intell. Mater. Syst. Struct. **9**, 3 (1998).
- [7] G.L. Cloud, *Optical methods of engineering analysis*, Cambridge University Press, Cambridge (1995).
- [8] P. Hariharan, *Optical holography: principles, techniques, and applications*, Cambridge University Press, Cambridge (1996).
- [9] P.K. Rastogi (Ed.), *Digital speckle pattern interferometry and related techniques*, Wiley, New York (2001).
- [10] R. Jones and C. Wykes, *Holographic and speckle interferometry: a discussion of the theory, practice, and application of the techniques*, Cambridge University Press, Cambridge (1989).
- [11] U. Schnars and W. Jueptner, *Digital holography: digital hologram recording, numerical reconstruction, and related techniques*, Springer, Berlin (2005).
- [12] L. Yang, X. Xie, L. Zhu, S. Wu, and Y. Wang, *Review of electronic speckle pattern interferometry (ESPI) for three dimensional displacement measurement*, Chin. J. Mech. Eng. **27**, 1 (2014).
- [13] B.E.A. Saleh and M.C. Teich, *Fundamentals of Photonics*, 2nd Edition, Wiley Interscience (2007).
- [14] J. Løkberg, K. Høgmoen, and M. Hoijs, *Vibration measurement on the human ear drum*

- in vivo*, Appl. Opt. **18**, 763 (1979).
- [15] P. Neiswander and G.A. Slettemoen, *Electronic speckle pattern interferometric measurements of the basilar membrane in the inner ear*, Appl. Opt. **20**, 4271 (1981).
- [16] H. Wada, M. Ando, M. Takeuchi, H. Sugawara, and T. Koike, *Vibration measurement of the tympanic membrane of guinea pig temporal bones using time-averaged speckle pattern interferometry*, J. Acoust. Soc. Am. **111**, 2189 (2002).
- [17] F. Jin and F.P. Chiang, *ESPI and digital speckle correlation applied to inspection of crevice corrosion on aging aircraft*, Res. Nondestruct. Eval. **10**, 63 (1998).
- [18] J.P. Fugal, R.A. Shaw, E.W. Saw, and A.V. Sergeev, *Airborne digital holographic system for cloud particle measurements*, Appl. Opt. **43**, 5987 (2004).
- [19] N-E. Molin, *Applications of whole field interferometry in mechanics and acoustics*, Opt. Lasers Eng. **31**, 93 (1999).
- [20] E. Bakarezos, V. Vathis, S. Brezas, Y. Orphanos, and N.A. Papadogiannis, *Acoustics of the Chelys – An ancient Greek tortoise-shell lyre*, Appl. Acoust. **73**, 478 (2012).
- [21] F. Pinard, B. Laine, and H. Vach, *Musical quality assessment of clarinet reeds using optical holography*, J. Acoust. Soc. Am. **113**, 1736 (2003).
- [22] S. Ellingsrud and O.J. Lokberg, *Full field amplitude and phase measurement of loudspeakers by using TV-holography and digital image processing*, J. Sound Vib. **168**, 193 (1993).
- [23] P. Perz, *Holographic visualization of vibration distribution on a loudspeaker membrane in the growth and decay of the excitation signal*, J. Sound Vib. **197**, 589 (1996).
- [24] F. Chen, W.D. Luo, M. Dale, A. Petniunas, P. Harwood, and G.M. Brown, *High-speed ESPI and related techniques: overview and its application in the automotive industry*, Opt. Lasers Eng. **40**, 459 (2003).
- [25] D.I. Farranta, J.N. Petzing, and J.R. Tyrer, *Geometrically qualified ESPI vibration analysis of an engine*, Opt. Lasers Eng. **41**, 659 (2004).
- [26] K. Genovesea, L. Lamberti, and C. Pappalettere, *A comprehensive ESPI based system for combined measurement of shape and deformation of electronic components*, Opt. Lasers Eng. **42**, 543 (2004).
- [27] M. Olfatnia, V.R. Singh, T. Xu, J.M. Miao, and L.S. Ong, *Analysis of the vibration modes of piezoelectric circular microdiaphragms*, J. Micromech. Microeng. **20**, 085013 (2010).
- [28] C-C. Maa, H-Y. Lin, Y-C. Lin, and Y-H. Huang, *Experimental and numerical investigations on resonant characteristics of a single-layer piezoceramic plate and a cross-ply piezolaminated composite plate*, J. Acoust. Soc. Am. **119**, 1476 (2006).

- [29] M.D. Waller, *Vibrations of free circular plates. Part 1: Normal modes*, Proc. Phys. Soc. **50**, 70 (1938).
- [30] M.D. Waller, *Vibrations of free circular plates. Part 2: Compounded normal modes*, Proc. Phys. Soc. **50**, 77 (1938).
- [31] M.D. Waller, *Vibrations of free circular plates. Part 3: A study of Chladni's original figures*, Proc. Phys. Soc. **50**, 83 (1938).
- [32] M.D. Waller, *Vibrations of free rectangular plates*, Proc. Phys. Soc. **B62**, 277 (1949).
- [33] M.D. Waller, *Vibrations of free elliptical plates*, Proc. Phys. Soc. **B63**, 451 (1950).
- [34] N.H. Fletcher and T.D. Rossing, *The physics of musical instruments*, Springer, New York (1998).
- [35] J. Curie, P. Curie, *Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées*, Compt. Rend. **91**, 294 (1880).
- [36] G. Lippmann, *Principe de la conversation de l'électricité*, Ann. de Chim. et de Phys. **24**, 145 (1881).
- [37] J. Curie, P. Curie, *Contractions et dilatations produits par des tensions électriques dans les cristaux hémihédres à faces inclinées*, Compt. Rend. **93**, 1137 (1881).
- [38] P. Langevin, *Précédé et appareil d'émission et de réception des ondes élastiques sous-marines à l'aide des propriétés piézoélectriques du quartz*, Fr. Pat., 1918, No 505703.
- [39] B. Wool, I. Goldman, *Dielectric permeability titanium barium depending on intensity in a variation field*, Rep. Acad. Sci. USSR **49**, 179 (1945).
- [40] A.S. Sedra and K.C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 5th edition, Oxford University Press, Oxford (2003).
- [41] R. Le Letty, F. Barillot, N. Lhermet, F. Claeysen, M. Yorck, and J. Gavira Izquierdo, *The scanning mechanism for ROSETTA/MIDAS: from an engineering model to the flight model*, in *Proceedings of the 9th European Space Mechanisms and Tribology Symposium* (R.A. Harris Ed.), ESA SP-480, pp. 75-81, ESA Publications Division, Noordwijk, Netherlands (2001).
- [42] M. Labanca, F. Azzola, R. Vinci, and L.F. Rodella, *Piezoelectric surgery: twenty years of use*, Br. J. Oral Maxillofac. Surg. **46**, 265 (2008).
- [43] S. Shoaee, J. Briscoe, J.R. Durrant, and S. Dunn, *Acoustic enhancement of polymer/ZnO nanorod photovoltaic device performance*, Adv. Mater. **26**, 263 (2014).
- [44] T. Young, *The Bakerian Lecture: On the theory of light and colours*, Phil. Trans. R. Soc. Lond. **92**, 12 (1802).
- [45] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*, 7th Edition, Cambridge University Press,

- Cambridge (1999).
- [46] D. Gabor, *A new microscopic principle*, Nature **161**, 777 (1948).
 - [47] <http://how-does-things-work.blogspot.gr/2010/02/working-of-hologram.html>
 - [48] E. Hecht, *Optics*, 4th Edition, Addison-Wesley, New York (2001).
 - [49] K. Haines, *Emmett Leith: Misconceptions and realities*, J. Holography Speckle **3**, 35 (2006).
 - [50] R.L. Powell and K.A. Stetson, *Interferometric vibration analysis by wavefront reconstruction*, J. Opt. Soc. Amer. **55**, 1593 (1965).
 - [51] K.A. Stetson and R.L. Powell, *Interferometric hologram evaluation of real-time vibration analysis of diffuse objects*, J. Opt. Soc. Amer. **55**, 1694 (1965).
 - [52] E.R. Robertson and J.M. Harvey (Eds.), *The engineering uses of holography in Proceedings of the Symposium*, University of Strathclyde, Cambridge University Press, Cambridge (1970).
 - [53] A. Macovski, S.D. Ramsey, and L.F. Schaefer, *Time-lapse interferometry and contouring using television systems*, Appl. Opt. **10**, 2722 (1971).
 - [54] J.N. Butters and J.A. Leendertz, *Holographic and video techniques applied to engineering measurement*, J. Meas. Control **4**, 349 (1971).
 - [55] J.A. Leendertz, *Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect*, J. Phys. E: Scientific Instruments **3**, 214 (1970).
 - [56] J.N. Butters, *Speckle pattern interferometry using video techniques*, Opt. Eng. **10**, 100105 (1971).
 - [57] J.N. Butters and J.A. Leendertz, *Speckle pattern and holographic techniques in engineering metrology*, Opt. Laser Technol. **3**, 26 (1971).
 - [58] K. Biedermann and L. Ek, *A recording and display system for hologram interferometry with low resolution imaging devices*, J. Phys. E: Scientific Instruments **8**, 571 (1975).
 - [59] O.J. Løkberg and K. Høgmoen, *Vibration phase mapping using electronic speckle pattern interferometry*, Appl. Opt. **15**, 2701 (1976).
 - [60] K. Høgmoen and O.J. Løkberg, *Detection and measurement of small vibrations using electronic speckle pattern interferometry*, Appl. Opt. **16**, 1869 (1977).
 - [61] P. Meinlschmidt, K.D. Hinsch and R.S. Sirohi (Eds.), *Selected papers on electronic speckle pattern interferometry*, SPIE MS132, SPIE, Bellingham (1996).
 - [62] C-H. Huang and C-C. Ma, *Experimental and numerical investigations of resonant vibration characteristics for piezoceramic plates*, J. Acoust. Soc. Amer. **109**, 2780 (2001).

- [63] H.M. Pedersen, O.J. Løkberg and B.M. Førre, *Holographic vibration measurement using a TV speckle interferometer with silicon target vidicon*, Opt. Commun. **12**, 421 (1974).
- [64] O.J. Løkberg, *ESPI – The ultimate holographic tool for vibration analysis?*, J. Acoust. Soc. Amer. **75**, 1783 (1984).
- [65] C.C. Aleksoff, *Temporally modulated holography*, Appl. Opt. **15**, 1329 (1971).
- [66] O.J. Løkberg and K. Høgmoen, *Use of modulated reference wave in electronic speckle pattern interferometry*, J. Phys. E **9**, 847 (1976).
- [67] <http://www.murata.com/en-us/products/sound/>
- [68] <http://www.sonitron.be/site/index.php>
- [69] G.T. Smith, *Industrial metrology: surfaces and roundness*, p. 253, Springer-Verlag, London (2002).