

Υπολογιστική μελέτη απόκρισης συντονιστών σωλήνα σε διεγερση N-παλμού από πηγή ήχου πλάσματος λέιζερ

Δημήτρης Κούγιας^{1,2,*}, Κωνσταντίνος Καλέρης^{2,3,4,**}, Νεκτάριος Α. Παπαδογιάννης^{3,4}, Γιάννης Μουρτζόπουλος²

¹Μηχανολόγος Μηχανικός, Ισιδώρου 12, 26442 Πάτρα

²Ομάδα Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής,

Εργαστήριο Ενσύρματης Τηλεπικοινωνίας & Τεχνολογίας της Πληροφορίας Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 26500 Ρίο, Πάτρα

³ Ινστιτούτο Φυσικής Πλάσματος και Λέιζερ, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, Τρία Μοναστήρια, 74100 Ρέθυμνο

⁴ Εργαστήριο Φυσικής Ακουστικής και Οπτοακουστικής, Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 74100 Ρέθυμνο

*dkougias@upnet.gr, ** kkaleris@hmu.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υπολογιστική μελέτη της ακουστικής απόκρισης των συντονιστών γεωμετρίας σωλήνα σε διεγερση πηγής ήχου πλάσματος λέιζερ (ΠΗΠΛ). Οι ΠΗΠΛ εμφανίζουν λειτουργικά πλεονεκτήματα σε σχέση με συμβατικές πηγές, τα οποία τις καθιστούν κατάλληλες για πληθώρα εφαρμογών ακουστικής τεχνολογίας, μεταξύ αυτών και η αξιολόγηση ακουστικών στοιχείων. Αρχικά προσομοιώνεται η απόκριση ενός κοινού ακουστικού συντονιστή Helmholtz σε διεγερση ακουστικού μονοπόλου εκπομπής ομοιόμορφου φάσματος και ΠΗΠΛ, προκειμένου να επιβεβαιωθεί η ορθότητα της μεθοδολογίας μοντελοποίησης πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια μελετάται η απόκριση δύο τύπων ακουστικών συντονιστών ($\lambda/2$ & $\lambda/4$). Στο πλαίσιο της μελέτης εξετάζονται οι διαφοροποιήσεις που παρουσιάζει η συμπεριφορά των δύο τύπων συντονιστή γεωμετρίας σωλήνα και πώς αυτή μεταβάλλεται με την αλλαγή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών (μήκους, ακτίνας διατομής) τους, καθώς και με την αλλαγή της θέσης και του τύπου της πηγής.

Computational study of the response of tube resonators to N-pulse stimulation from a laser plasma sound source

ABSTRACT

The purpose of this work is the computational study of the acoustic response of tube geometry resonators to laser plasma sound source (LPSS) excitation. LPSSs

show functional advantages over conventional sources, which make them suitable for a multitude of acoustic technology applications, including the evaluation of acoustic elements. First, the response of a common acoustic resonator (Helmholtz) to uniform-spectrum emission acoustic monopole excitation and LPSS, was simulated in order to confirm the correctness of the finite element modeling methodology. Then the response of two types of acoustic resonators ($\lambda/2$ & $\lambda/4$) was studied. In the context of the study, the differences in the behavior of the two types of tube geometry resonator are examined and how this varies with the change of their geometric characteristics (length, cross-section radius), as well as with the alteration of the position and type of the source.

1. Εισαγωγή

Οι συντονιστές είναι ακουστικά στοιχεία με γεωμετρία κοιλότητας που διαθέτουν ένα ή περισσότερα ανοίγματα, συντονίζονται σε ορισμένες συχνότητες και χρησιμοποιούνται για ενίσχυση ή απόσβεση συχνοτήτων. Ο πιο διαδεδομένος τύπος συντονιστή είναι ο κοινός ακουστικός συντονιστής ή συντονιστής Helmholtz ενώ αρκετά συχνά εμφανίζονται σε εφαρμογές ακουστικής και οι συντονιστές γεωμετρίας σωλήνα με ανοικτό το ένα ($\lambda/4$) ή τα δύο άκρα ($\lambda/2$). Τυπικές χρήσεις τέτοιων συντονιστών είναι τα στοιχεία απόσβεσης ήχου σε συστήματα εξαγωγής καυσαερίων μηχανών εσωτερικής καύσης [1] όπως και στα πνευστά μουσικά όργανα [2]. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι διπλός: αφενός να μελετηθεί η απόκριση των ακουστικών συντονιστών τύπου σωλήνα με χρήση πηγών ήχου πλάσματος λέιζερ (ΠΗΠΛ) και αφετέρου να διερευνηθεί η δυνατότητα αξιοποίησης αυτών των ακουστικών στοιχείων ως φίλτρων για τη φασματική διαμόρφωση της ακουστικής εκπομπής των ΠΗΠΛ.

Η λειτουργία των ακουστικών συντονιστών γεωμετρίας σωλήνα βασίζεται στη δημιουργία στάσιμων κυμάτων στο εσωτερικό της κοιλότητας τους, λόγω της διαφοράς της ακουστικής εμπέδησης του μέσου διάδοσης (αέρα) μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού της κοιλότητας του συντονιστή [3].

Οι συχνότητες συντονισμού για συντονιστές $\lambda/2$ δίνονται από την σχέση:

$$L_0 = n \frac{\lambda}{2} \rightarrow f = \frac{nc_0}{2L_0}, n = 1,2,3, \dots \quad (1.1)$$

όπου L_0 το μήκος του σωλήνα και C_0 η ταχύτητα του ήχου στο μέσο, και για συντονιστές $\lambda/4$ από τη σχέση:

$$L_0 = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \rightarrow f = \frac{(2n+1)c_0}{4L_0}, n = 0,1,2, \dots \quad (1.2)$$

Η δημιουργία ήχου από ΠΗΠΛ οφείλεται στην εστιασμένη εναπόθεση οπτικής ενέργειας βραχέων και υπερβραχέων παλμών λέιζερ. Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα τη ραγδαία μεταφορά κινητικής ενέργειας στα μόρια του στοχευόμενου μέσου, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κρουστικού κύματος πίεσης (shock wave). Η διάδοση του κρουστικού κύματος, το οποίο σε κάποια απόσταση από το σημείο εστίασης αποκτά χαρακτηριστικά γραμμικού ακουστικού κύματος, έχει ως αποτέλεσμα τον ορισμό πηγών ήχου σε όλο το συχνοτικό φάσμα. Η γεωμετρία των ΠΗΠΛ μπορεί να είναι είτε σημειακή / σφαιρική είτε επιμήκης / κυλινδρική, ανάλογα με την ενέργεια του παλμού λέιζερ και τον τρόπο εστίασης του. Συγκεκριμένα οι σφαιρικές ΠΗΠΛ, οι οποίες προκύπτουν από ισχυρή εστίαση παλμών λέιζερ, έχουν παντοκατευθυντική ακουστική εκπομπή σε όλο το συχνοτικό εύρος ενώ εμφανίζουν

μεγάλη επαναληψιμότητα από παλμό σε παλμό [4,5]. Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των ΠΗΠΛ είναι η άυλη υπόστασή τους, χάρη στην οποία δεν απαιτείται κάποια διάταξη για την επίτευξη διέγερσης, η οποία εν δυνάμει θα επηρέαζε την παρατηρούμενη εκπομπή των ακουστικών στοιχείων. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά των ΠΗΠΛ, σε συνδυασμό με την δυνατότητα ελέγχου της κατευθυντικότητας τους, τις καθιστούν ως μια ιδιαίτερα ενδιαφέρονσα εναλλακτική για εφαρμογές όπως οι ακουστικές μετρήσεις [6], η αναπαραγωγή σύνθετων ηχητικών σημάτων [7,8] και ο μη παρεμβατικός ακουστικός χαρακτηρισμός υλικών και δομών.

2. Μεθοδολογία

Για την υπολογιστική μελέτη της απόκρισης των ακουστικών συντονιστών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Δεδομένης της γεωμετρικής συμμετρίας των πηγών και των μελετώμενων δομών, οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν με μοντέλα κυλινδρικής συμμετρίας δύο διαστάσεων, ώστε να περιοριστούν σημαντικά οι απαιτούμενοι υπολογιστικοί πόροι χωρίς αυτό να γίνει σε βάρος της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

Οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν στο πεδίο συχνότητας για τρεις τύπους συντονιστών:

α) Helmholtz, ο οποίος λόγω της γνωστής ακουστικής του συμπεριφοράς αξιοποιήθηκε για την επιβεβαίωση των υπολογιστικών αποτελεσμάτων

β) ακουστικός συντονιστή γεωμετρίας σωλήνα με κλειστό το ένα άκρο ($\lambda/4$) και

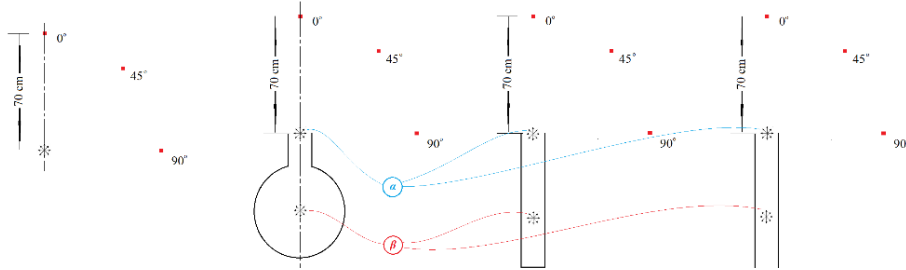
γ) ακουστικός συντονιστή γεωμετρίας σωλήνα με τα δύο άκρα ανοικτά ($\lambda/2$).

Οι προσομοιώσεις απόκρισης σε διέγερση από ΠΗΠΛ συνοδεύτηκαν από προσομοιώσεις σε διέγερση από σημειακή παντοκατευθυντική πηγή ομοιόμορφου φάσματος και πάλι για λόγους επιβεβαίωσης της ορθότητας των υπολογιστικών μοντέλων.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συντονιστών τύπου σωλήνα, καθώς και οι θέσεις πηγών και δεκτών καταγράφονται στον πίνακα και το σχήμα που ακολουθούν. Τα χαρακτηριστικά του κοινού ακουστικού συντονιστή είναι τα εξής: όγκος κοιλότητας $V_{hr} = 0.00501720862 \text{ m}^3$, επιφάνεια διατομής στομίου $S_{hr} = 0.00196349541 \text{ m}^2$, μήκος λαϊμού $l_{hr} = 0.0325 \text{ m}$, ακτίνα κοιλότητας $R_{hr} = 0.025 \text{ m}$ και η συχνότητα συντονισμού υπολογίζεται $f_0 = 124.7 \text{ Hz}$

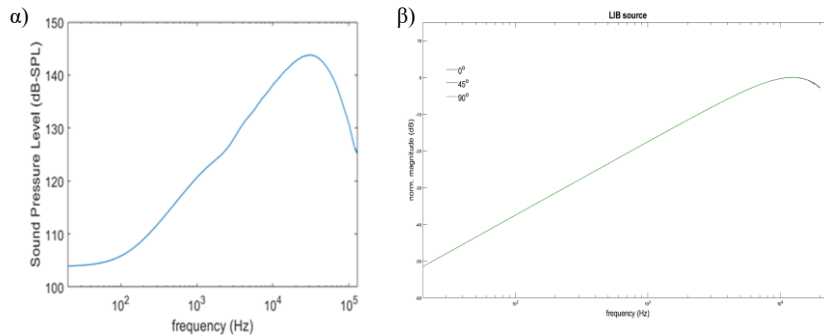
Πίνακας 2.1 - Χαρακτηριστικά ακουστικών συντονιστών τύπου σωλήνα

Συντονιστής	Μήκος	Διάμετρος	Θε.Συχν.Συντ.	Τύπος
Tube 1	560 mm	30 mm	150.44 Hz	$\lambda/4$
Tube 1 mod	560 mm	40 mm	149.75 Hz	$\lambda/4$
Tube 2	505 mm	35 mm	166.17 Hz	$\lambda/4$
Tube 4	955 mm	30 mm	88.91 Hz	$\lambda/4$
Tube 5	860 mm	32 mm	98.55 Hz	$\lambda/4$
Tube 1 open	560 mm	30 mm	296.25 Hz	$\lambda/2$



Σχήμα 2.1 Θέσεις πηγών & θέσεις / γωνίες δεκτών

Οι ΠΗΠΑ αποτελούν θερμικές πηγές, καθώς η διέγερση του αέρα προκύπτει από την θερμοελαστική εκτόνωσή του λόγω της γρήγορης εναπόθεσης ενέργειας από τους παλμούς λέιζερ. Παρ' όλα αυτά, εδώ για λόγους απλούστευσης της μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκε το σημειακό ακουστικό μονόπολο. Η επιλογή αυτή είναι δικαιολογημένη δεδομένων των εξαιρετικά μικρών διαστάσεων των ΠΗΠΑ σφαιρικής εκπομπής αλλά και της ακουστικής απόκρισης του σημειακού μονοπόλου, η οποία προσομοιάζει με μεγάλη ακρίβεια αυτή των ΠΗΠΑ στο εύρος του ακουστού φάσματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.2 - Φάσμα ακουστικής εκπομπής ΠΗΠΑ παραγόμενη από παλμούς λέιζερ διάρκειας 6ns, μήκους κύματος 532nm και ενέργειας 40 mJ α) πειραματική μέτρηση και β) προσομοίωση με σημειακό μονόπολο.

Η πηγή σημειακού ακουστικού μονοπόλου εισάγει έναν όρο σημειακής πηγής στο δεξιό μέλος της εξίσωσης του Helmholtz με αποτέλεσμα να προκύψει η σχέση:

$$\nabla \left(-\frac{1}{\rho} (\nabla p_t - \mathbf{q}_d) \right) - \frac{k^2 p_t}{\rho} = \frac{4\pi}{\rho} S \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) \quad (2.1)$$

όπου $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$ η Δέλτα του Dirac, η οποία τοποθετεί την σημειακή πηγή στη θέση $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0$, p_t η συνολική πίεση, k ο κυματαριθμός και \mathbf{q}_d η διπολική πηγή τομέα (dipole domain source). Το πλάτος του κύματος, συναρτήσει της I_{rms} , που εκπέμπει το μονόπολο S (SI unit: N/m²) δίνεται από την έκφραση:

$$S = e^{i\varphi} \cdot d_{src} \sqrt{2\rho c_0 I_{rms}} \quad (2.2)$$

όπου I_{rms} η ένταση αναφοράς (RMS) στον ελεύθερο χώρο, φ η φάση της πηγής και d_{src} η απόσταση από την πηγή. Η έκφραση που εισάγεται στην I_{rms} , ώστε να

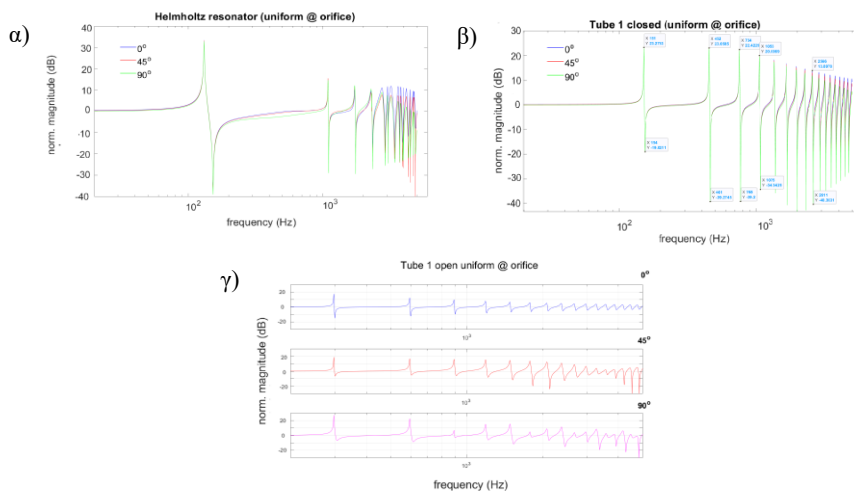
προκύπτει η διέγερση που να προσεγγίζει ΠΗΠΛ είναι ο μετασχηματισμός Fourier μιας Gaussian καμπύλης στο πεδίο του χρόνου.

$$I_{rms} = \omega^2 \left(e^{-\frac{\omega^2}{\sigma_\omega^2}} \right)^2 \text{ [W/m}^2\text{]} \tag{2.3}$$

3. Αποτελέσματα

Αφού πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική προσομοίωση για σημειακό ακουστικό μονόπολο ομοιόμορφου φάσματος απουσία συντονιστή, ώστε να βεβαιωθεί η ομοιόμορφη εκπομπή σε όλες τις συχνότητες και κατευθύνσεις, ακολούθησαν προσομοιώσεις για όλους τους συντονιστές στις διάφορες θέσεις πηγών (βλ. Σχ. 2.1). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την εγκυρότητα της μεθόδου προσομοίωσης καθώς οι υπολογισμένες θεμελιώδεις συχνότητες συντονισμού στον κοινό συντονιστή και οι θεμελιώδεις και ανώτερες αρμονικές συχνότητες συντονισμού στους συντονιστές γεωμετρίας σωλήνα συμπίπτουν με τις θεωρητικές.

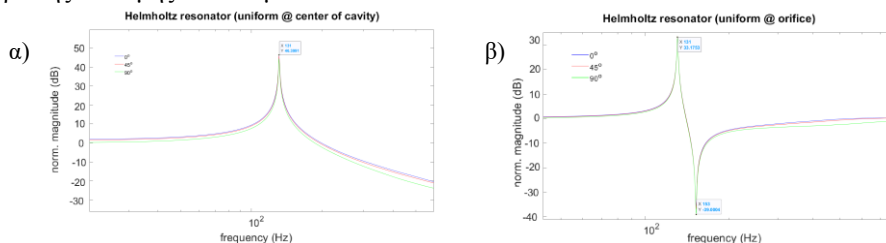
Όπως αναμενόταν, στους συντονιστές $\lambda/4$ (για θέση πηγής στο κέντρο της διατομής του στομίου) εμφανίζονται έντονες ενισχύσεις στη θεμελιώδη συχνότητα και τις περιττές αρμονικές, αλλά και έντονες ακυρώσεις σε γειτονικές συχνότητες των ενισχύσεων (anti-resonance). Οι συντονιστές $\lambda/2$ παρουσιάζουν ενισχύσεις στη θεμελιώδη συχνότητα συντονισμού και όλες τις αρμονικές, χωρίς όμως να εμφανίζουν έντονες ακυρώσεις.



Σχήμα 3.3 - Ακουστική απόκριση συντονιστή α) Helmholtz, β) $\lambda/4$ & γ) $\lambda/2$ σε σημειακό μονόπολο ομοιόμορφου φάσματος για διάφορες θέσεις μέτρησης.

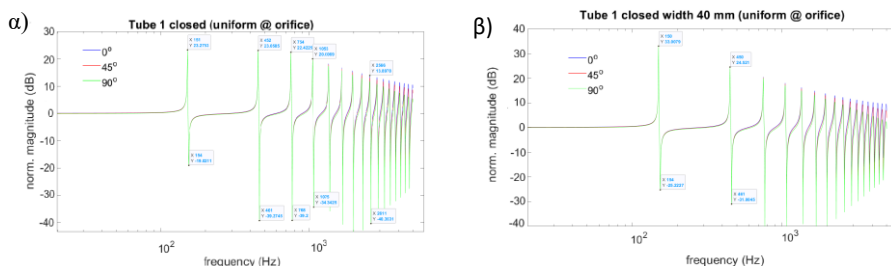
Ένα επιπλέον στοιχείο που προκύπτει από τις προσομοιώσεις είναι πως η θέση της πηγής στο εσωτερικό των κοιλοτήτων ευνοεί τις ενισχύσεις γύρω από τις συχνότητες συντονισμού και οδηγεί σε εξάλειψη των ακυρώσεων, όπως φαίνεται στο

βαθμό και με το μοτίβο που αυτό πραγματοποιείται όταν η πηγές τοποθετηθούν στο κέντρο της διατομής του στομίου.



Σχήμα 3.4- Απόκριση συντονιστή Helmholtz γύρω από την Κ.Σ.Σ. όταν σημειακή πηγή ομοιόμορφου φάσματος τοποθετείται α) στο κέντρο της κοιλότητας & β) στο κέντρο της διατομής του στομίου.

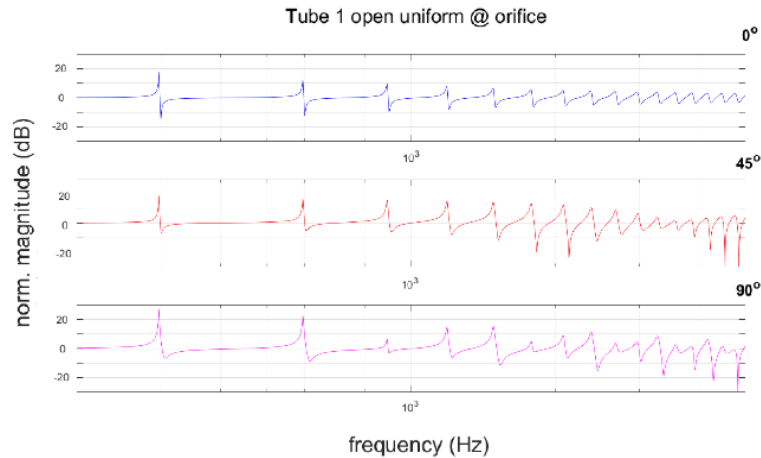
Μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της ακουστικής απόκρισης κοινών συντονιστών με συντονιστές τύπου σωλήνα επιβεβαιώνει μια σημαντική διαφορά ανάμεσα στις δύο γεωμετρίες. Την επίδραση της διατομής του στομίου στην τιμή των συχνοτήτων συντονισμού. Ενώ στην περίπτωση του συντονιστή Helmholtz η ακτίνα του στομίου παίζει σημαντικό ρόλο στην Κ.Σ.Σ., στους συντονιστές τύπου σωλήνα η αλλαγή διατομής παίζει πολύ μικρότερο ρόλο στον προσδιορισμό των συχνοτήτων συντονισμού. Συγκεκριμένα, η επίδραση της διατομής στους συντονιστές σωλήνα περιγράφεται από την λεγόμενη διόρθωση των άκρων και, όπως φάνηκε από υπολογιστικές προσομοιώσεις σωλήνων ίδιου μήκους και διαφορετικής διατομής, η απόκλιση είναι αμελητέα (η Κ.Σ.Σ. για συντονιστή $\lambda/4$ με διατομή 30 mm υπολογίζεται στα 151 Hz, ενώ για $\lambda/4$ με διατομή 40 mm στα 150 Hz). Παρ’ όλα αυτά, η διατομή των συντονιστών τύπου σωλήνα παίζει σημαντικό ρόλο στο εύρος των ενισχύσεων / ακυρώσεων, καθώς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.6 αυτό αυξάνεται σημαντικά (~5-10 dB) και στις ενισχύσεις και στις ακυρώσεις, αυξάνοντας τη διατομή.



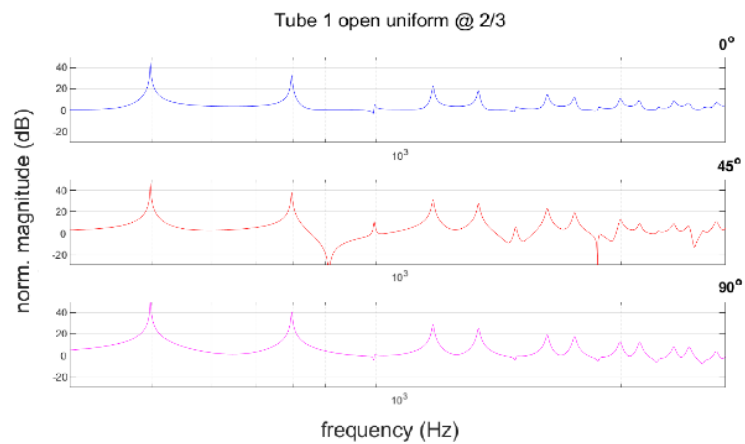
Σχήμα 3.6 – Ακουστική απόκριση συντονιστών $\lambda/4$ μήκους 560 mm διατομής α) 30 mm & β) 40 mm.

Τέλος, παρατηρείται πως τα μοτίβα της απόκρισης των ακουστικών στοιχείων μεταβάλλονται και με τη γωνία τοποθέτησης του δέκτη μέτρησης. Αυτό φαίνεται πολύ καθαρά στα σχήματα 3.8 & 3.9 τα οποία αφορούν σε συντονιστές $\lambda/2$ με την πηγή σε δύο θέσεις. Κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και στους συντονιστές $\lambda/4$, στους οποίους (βλ. Σχήμα 3.6) η διαφοροποίηση εντοπίζεται στις υψηλότερες συχνότητες, όπου η ενισχύσεις στη γωνία 0° έχουν μεγαλύτερο εύρος με την γωνία 45° να

ακολουθεί και το μικρότερο εύρος ενίσχυσης να παρατηρείται στις 90° . Το ακριβώς αντίθετο παρατηρείται για το εύρος των ακυρώσεων σε ότι αφορά τους $\lambda/4$ συντονιστές, στις υψηλότερες συχνότητες.



Σχήμα 3.8 – Ακουστική απόκριση συντονιστή $\lambda/2$ με την πηγή στο κέντρο του στομίου



Σχήμα 3.9 – Ακουστική απόκριση συντονιστή $\lambda/2$ με την πηγή στα $2/3$ του μήκους του σωλήνα

Αντίστοιχα αποτελέσματα προκύπτουν από τις προσομοιώσεις με ακουστική διέγερση ΠΗΠΛ, με τη διαφορά ότι το ακουστικό φάσμα αποκτά προφίλ υπερπαρατού φίλτρου $1^{η}$ τάξης, λόγω της χαρακτηριστικής απόκρισης των ΠΗΠΛ.

4. Συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδεικνύουν την καταλληλότητα των ΠΗΠΛ για τη μελέτη συστημάτων ακουστικών συντονιστών με διέγερση εσωτερικά της δομής, η οποία μπορεί να προκύψει εύκολα από την αντιστροφή του

φασματικού προφίλ του N-παλμού. Αντίστοιχα, αποδεικνύεται ότι οι συντονιστές Helmholtz και τύπου σωλήνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά ως ακουστικά φίλτρα για τη διαμόρφωση του φάσματος των ΠΗΠΛ.

5. Αναφορές

- [1] Sohn, C. H. & Park, J. H. “A comparative study on acoustic damping induced by half-wave, quarter-wave, and Helmholtz resonators” *Aerospace Science and Technology* 15, Issue 8, 606-614 (2011)
- [2] Polychronopoulos, S. et al, “Physical Modeling of the Ancient Greek Wind Musical Instrument Aulos: A Double-Reed Exciter Linked to an Acoustic Resonator” *IEEE Access* 9, 98150-98160 (2021)
- [3] Field, C. D. & Fricke,” Theory and applications of quarter-wave resonators: A prelude to their use for attenuating noise entering buildings through ventilation openings”, *F. R. Applied Acoustics* 53, 117-132 (1998)
- [4] Kaleris, K. et al, “Laser-plasma sound sources in atmospheric air: A systematic experimental study”, *JSV*. 570, 118000 (2023)
- [5] Oksanen, M. & Hietanen, “Photoacoustic breakdown sound source in air” *Ultrasonics* 32, 327–331 (1994)
- [6] Kaleris, K. et al, “Acoustic metamaterials characterization via laser plasma sound sources” *Nat. Commun. Mater.*, in print (2024)
- [7] Kaleris, K. et al, “Laser-sound: optoacoustic transduction from digital audio streams” *Sci. Rep.* 11, 476 (2021)
- [8] Kaleris, K. et al, “Laser-sound reproduction by pulse amplitude modulation audio streams”, *Sci. Rep.*, *Sci Rep* 14, 12102 (2024)