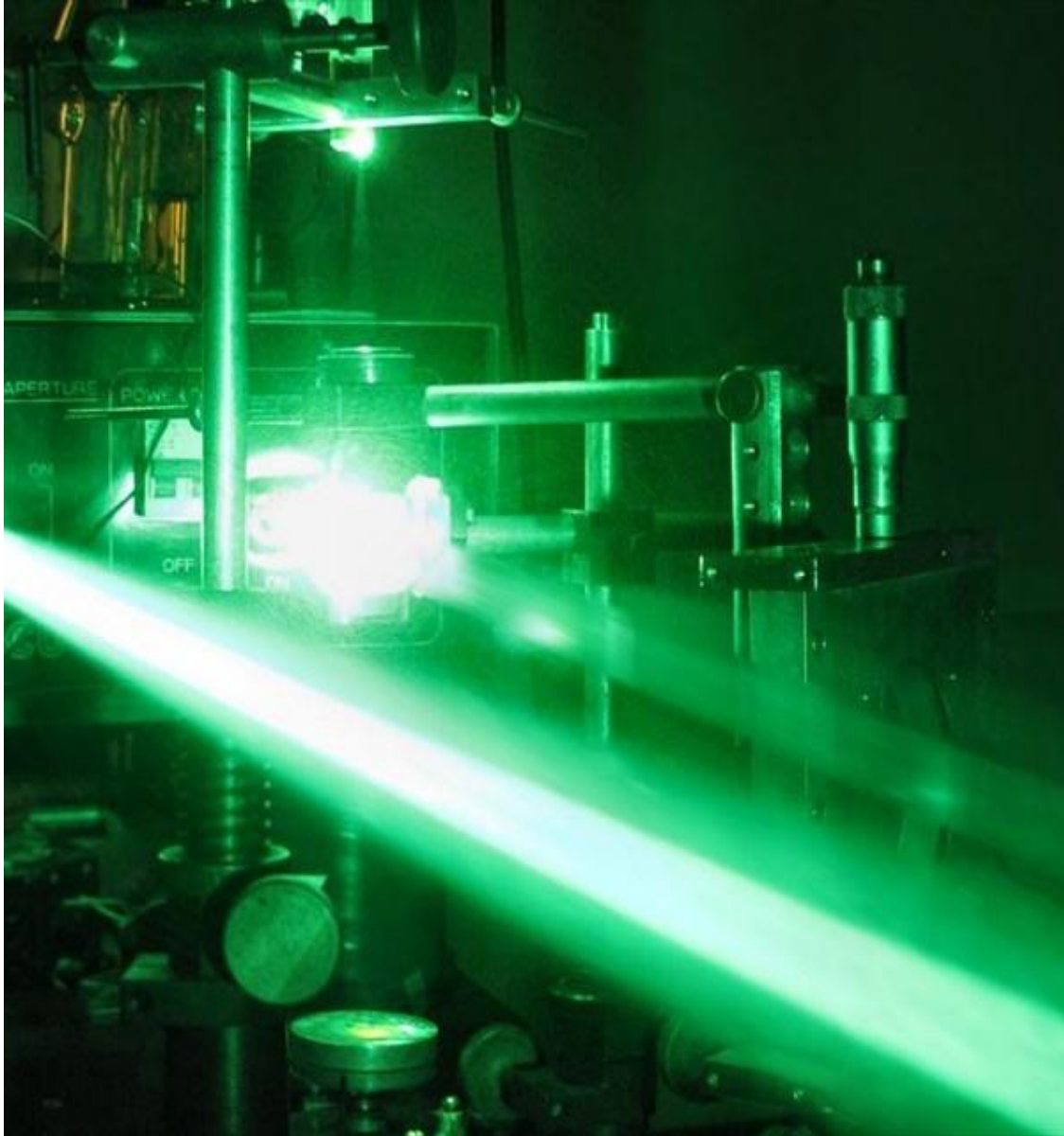


**Χαρακτηρισμός ακουστικής πηγής παραγόμενης από ηλεκτρική
εκκένωση στον αέρα μέσω υπερβραχέων παλμών λέιζερ**



ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΝΤΖΙΜΑΝΗΣ

Επιβλέποντες Καθηγητές: Δρ. Παπαδογιάννης Νεκτάριος
Δρ. Μπακαρέζος Ευθύμιος
κ. Μπρέζας Σπυρίδων

Ρέθυμνο, 2013

Ευχαριστίες

Η παρούσα πτυχιακή μελέτη εκπονήθηκε από τον φοιτητή Ντζιμάνη Δημήτρη του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης. Το εργαστηριακό κομμάτι της μελέτης πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 κάτω από την επίβλεψη των καθηγητών Δρ. Παπαδογιάννη Νεκτάριου, Δρ. Μπακαρέζου Ευθύμιου και κ. Μπρέζα Σπυρίδωνα.

Και οι τρεις καθηγητές, ο καθένας με τον δικό του τρόπο, με βοήθησαν καθ' όλη τη διάρκεια της διεκπεραίωσης της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Επίσης, καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησης μου υπήρξαν από τους πιο σημαντικούς καθηγητές μου, καθώς με δίδαξαν τόσα πολλά πράγματα και με έκαναν καλύτερο άνθρωπο. Παρ' όλα αυτά, σημαντικό παράγοντα αποτέλεσαν όλοι οι καθηγητές του ΤΕΙ Ρεθύμνου στη μάθηση μου και τους οφείλω βαθιά ευγνωμοσύνη.

Ευχαριστώ θερμά τους φίλους μου όπου με τις αμέτρητες ώρες συζητήσεων αλλά και φιλοσοφικών εξερευνήσεων με ενέπνευσαν να ασχοληθώ, μεταξύ και άλλων, με την παρούσα εργασία. Πάνω από όλα, ευχαριστώ από καρδιάς τους γονείς μου και την αδερφή μου για την συνεχή τους συμπαράσταση, αγάπη και κατανόηση που μου έδειξαν όλον αυτόν τον καιρό.

Περιεχόμενα

Περίληψη	3
1. Εισαγωγή	3
2. Στοιχεία θεωρίας	5
a. Πηγές ήχου που χρησιμοποιούνται ευρέως σε ακουστικές μετρήσεις	5
i. Πηγή ήχου από ηλεκτρική εκκένωση στον αέρα με χρήση ηλεκτροδίων	5
ii. Δωδεκαεδρικό ηχείο	6
b. Ακουστικές μετρήσεις	7
c. Η δομή του συστήματος λείζερ	8
d. Δημιουργία ηχητικών κυμάτων στον αέρα με χρήση υπερβραχέων παλμών λείζερ	9
3. Πειραματικές διατάξεις & διαδικασία μετρήσεων	13
a. Πειραματικά όργανα	13
i. Παλμική πηγή λείζερ	13
ii. Ηχόμετρο	14
iii. Μέσα αποθήκευσης και επεξεργασίας των αρχείων	15
b. Πειραματική διαδικασία	15
4. Πειραματικά αποτελέσματα & ανάλυση	17
a. Ηχητική στάθμη πίεσης για δεδομένη ενέργεια παλμών λείζερ	17
b. Ηχητική στάθμη πίεσης για δεδομένη απόσταση από την πηγή	19
c. Ανάλυση αποτελεσμάτων	21
i. Πίνακες επισκόπησης & αξιοποίησης των αποτελεσμάτων	21
ii. Τυπική απόκλιση των μετρήσεων	23
d. Παρατηρήσεις & σχολιασμός αποτελεσμάτων	27
5. Συμπεράσματα & μελλοντική εργασία	28
a. Σύγκριση ΠΠΛ με γνωστές πηγές ήχου ακουστικής χρήσης	28
b. Δυνατότητες του ΠΠΛ	30
i. Η χρήση του ΠΠΛ σε μοντέλα κλίμακας και άλλους χώρους	30
ii. Αξιοποίηση της διάρκειας του ΠΠΛ	31
iii. Υπέρηχοι και ωστικά κύματα	31
c. Σύνοψη συμπερασμάτων και τελικές παρατηρήσεις	32
Βιβλιογραφικές αναφορές	33

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο χαρακτηρισμός ακουστικής πηγής παραγόμενης από ηλεκτρική εκκένωση στον αέρα μέσω υπερβραχέων παλμών λέιζερ. Στα πλαίσια της μελέτης αναπτύχθηκε διάταξη στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, όπου και έλαβαν χώρα οι πειραματικές μετρήσεις. Στη διάταξη αυτή χρησιμοποιήθηκε παλμικό λέιζερ το οποίο παρήγαγε παλμούς διάρκειας 6 ns. Η δέσμη του λέιζερ εστιάστηκε στον αέρα με αποτέλεσμα την ηλεκτρική εκκένωση του αέρα και την παραγωγή ήχου. Ο ήχος αυτός κατεγράφη σε πολλές διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή, αλλά και σε πολλές διαφορετικές ενέργειες της δέσμης φωτός του λέιζερ για κάθε απόσταση. Η ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων ανέδειξε την ακουστική συμπεριφορά της πηγής και τη χρησιμότητά της σε ακουστικές μετρήσεις, ενώ επίσης υπάρχουν δυνατότητες για την εξέλιξη μιας τέτοιας πηγής ήχου.

Abstract

The purpose of this work is to characterize an acoustic source generated by the dielectric breakdown of air using ultrafast laser pulses. For this purpose, an appropriate experimental arrangement was developed in the Laboratory of Acoustics & Optics Technology of the Department of Music Technology & Acoustics of the T.E.I. of Crete, in which all the experimental measurements took place. In this arrangement a pulsed laser was used which delivered pulses of 6 ns duration. The laser beam was focused in the air which resulted in the dielectric breakdown of air and the generation of sound. The generated sound was recorded at various distances from the focus and for various laser energies at each distance. The analysis of the experimental results showed the acoustical behavior of the source and its usefulness in acoustical measurements, while there is also potential for the further development of such sound source.

1. Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη παλμικής πηγής λέιζερ ως προς το παραγόμενο ηχητικό φάσμα για τη μελέτη ακουστικών συστημάτων. Διάφορες μετρήσεις έλαβαν μέρος προκειμένου να υπάρξουν αποτελέσματα για διαφορετικές αποστάσεις από την πηγή καθώς επίσης και για διαφορετικές ενέργειες της δέσμης φωτός που παράγονταν από το λέιζερ.

Για την ακουστική μελέτη χώρων κατά κύριο λόγο, χρησιμοποιούνται δωδεκαεδρικά ηχεία κατά κόρον, ως σφαιρικές πηγές. Μία παλμική δέσμη σύμφωνου φωτός (λέιζερ) είναι δυνατόν να λειτουργήσει ως πηγή ήχου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της έντασης των παλμών λέιζερ, η οποία όταν ξεπερνά μία τιμή η αλληλεπίδραση των μορίων του αέρα με τους παλμούς αυτούς δημιουργεί εκκενώσεις, οι οποίες είναι ακουστές από το ανθρώπινο αυτί, αλλά δημιουργούνται και υπέρηχοι της τάξης kHz - MHz για διάρκεια παλμών λέιζερ της τάξης των μερικών nanosecond (ns), όπου $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ second}$. Ένα ακόμη μεγάλο πλεονέκτημα που έχει η συγκεκριμένη πηγή ήχου είναι το γεγονός ότι είναι σφαιρική. Οπότε είναι μία καινούρια πηγή ήχου, για τη μελέτη ακουστικών συστημάτων, και είναι αναγκαίο να γίνει ανάλυση του παραγόμενου φάσματος και να εξεταστεί η χρησιμότητα μιας τέτοιας πηγής.

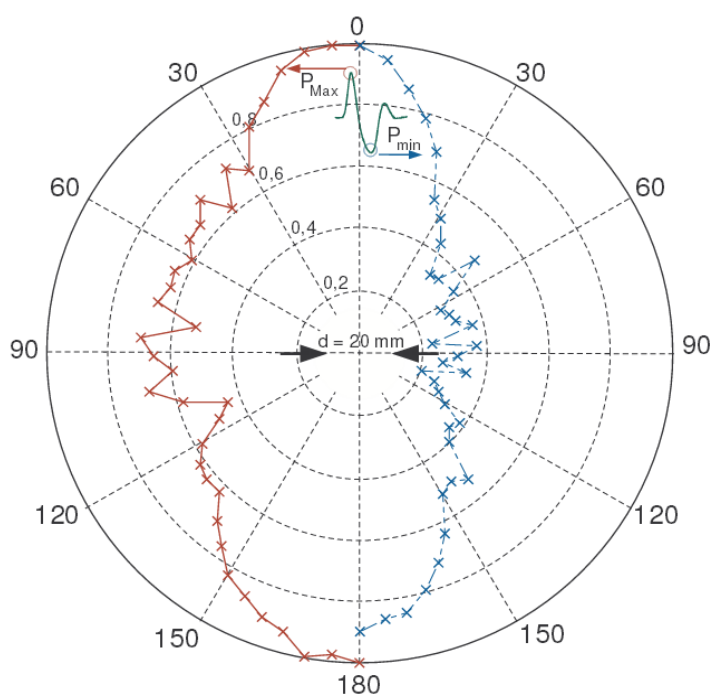
Στο επόμενο κεφάλαιο δίνονται στοιχεία θεωρίας που άπτονται της παρούσας εργασίας. Στην αρχή γίνεται συζήτηση για τις πηγές ήχου που χρησιμοποιούνται ως σήμερα στις ακουστικές μελέτες. Στη συνέχεια αναλύεται η δομή και η λειτουργία του λέιζερ, καθώς επίσης γίνεται ανάλυση του θεωρητικού υπόβαθρου προκειμένου να γίνει κατανοητή η διαδικασία που ακολουθεί το φως του λέιζερ για την παραγωγή ήχου. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των συσκευών που χρειάστηκαν για την υλοποίηση του πειράματος και της συνδεσμολογίας αυτών. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα του πειράματος και στο τελευταίο κεφάλαιο συζητούνται ως προς τη χρησιμότητα τους σε ακουστικές μελέτες, συγκρίνονται με τις πηγές που έχουν αναφερθεί στο δεύτερο κεφάλαιο και γίνονται παρατηρήσεις και συζήτηση για τη μελλοντική χρήση των αποτελεσμάτων.

2. Στοιχεία θεωρίας

α. Πηγές ήχου που χρησιμοποιούνται ευρέως σε ακουστικές μετρήσεις

ι. Πηγή ήχου από ηλεκτρική εκκένωση στον αέρα με χρήση ηλεκτροδίων

Αυτή η πηγή χρησιμοποιεί σπινθήρες (sparks) μέσω ηλεκτροδίων τα οποία εφαρμόζουν διαφορά δυναμικού στον αέρα. Οι σπινθήρες παράγονται με την εφαρμογή υψηλής τάσης ανάμεσα σε ένα μικρό κενό στον αέρα, σε ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αυτό γίνεται με ηλεκτρόδια τα οποία αφού αποκτήσουν ένα φορτίο δημιουργούν έναν ηλεκτρικό σπινθήρα ανάμεσά τους. Η πηγή που παράγεται από την ηλεκτρική σπίθα είναι μία λύση για μετρήσεις σε μοντέλα κλίμακας. Υπάρχουσες μελέτες [1] δείχνουν ότι μια τέτοια πηγή ήχου έχει το πλεονέκτημα ότι είναι αρκετά μικρή (το κενό των ηλεκτροδίων είναι μικρότερο από 20 mm). Επίσης, μπορεί να έχει μεγάλη ένταση (έως 140 dB-SPL στο 1 m μακριά από την πηγή). Τέλος, η πηγή είναι παντοκατευθυντική με αρκετές απώλειες όσο μεγαλώνει η απόσταση στις 90°. Στην εικόνα 1 παρατίθεται το πολικό διάγραμμα της παραγόμενης πηγής, με τα ηλεκτρόδια να απέχουν 20 mm από το κέντρο της έκρηξης.



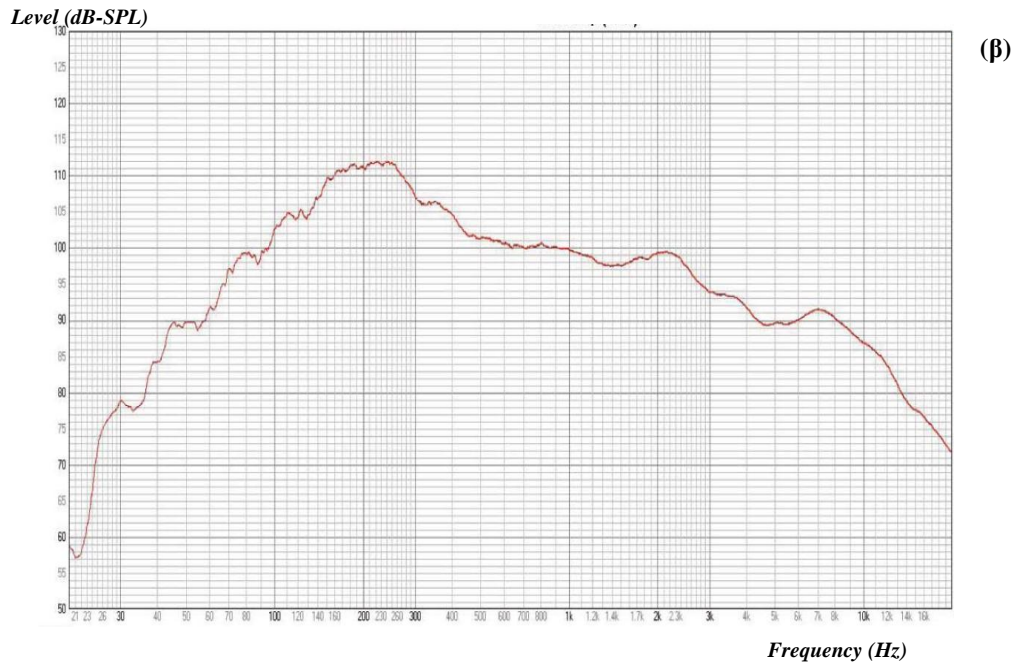
Εικόνα 1: Πολικό διάγραμμα ηλεκτρικής εκκένωσης από ηλεκτρόδια σε απόσταση 20 mm μεταξύ τους [1].

ii. Δωδεκαεδρικό ηχείο

Ως γνωστόν η συχνοτική συμπεριφορά ενός χώρου εξάγεται μέσω μίας διαδικασίας η οποία συμπεριλαμβάνει την κρουστική διέγερση του χώρου. Οι μετρήσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια μίας ακουστικής μελέτης περιλαμβάνουν ηχεία που προσομοιάζουν σφαιρική πηγή η οποία εκτός από τον όγκο που καταλαμβάνει σε ένα χώρο, αποτελείται συνήθως από δώδεκα ηχεία, αρκετά ακριβής κατασκευής, όπου όλα μαζί σχηματίζουν ένα, σχεδόν, σφαιρικό ηχείο για την όσο το δυνατό αξιόπιστη ηχητική πηγή. Παρ' όλα αυτά, ένα τέτοιο μηχανικό σύστημα έχει αρκετές αδυναμίες. Η απόδοσή του τείνει κάποια στιγμή να ελαττωθεί μετά από μία συγκεκριμένη στάθμη ηχητικής πίεσης ή ακόμη και να προκληθεί καταστροφή στο σύστημα σε ακραίες περιπτώσεις. Χρησιμοποιείται στους περισσότερους χώρους, αλλά είναι αδύνατη η χρήση του για πολύ μικρούς ή πολύ μεγάλους χώρους. Τέλος για την κρουστική διέγερση του χώρου υπήρχε μέχρι προσφάτως η αδυναμία λήψης σήματος με καλή αναλογία SNR (Signal to Noise Ratio) καθώς χρησιμοποιούνταν λευκός θόρυβος. Αυτή η τελευταία αδυναμία ενός τέτοιου μηχανικού μοντέλου έχει αντιμετωπιστεί ως τώρα με την ανάπτυξη των ψηφιακών σημάτων που παράγει μία ψευδο-τυχαία ακολουθία (όπως η Maximum Length Sequence - MLS). Στην εικόνα 2 παρατίθεται γράφημα που περιγράφει τη συχνοτική απόκριση δωδεκαεδρικού ηχείου με τη χρήση ροζ θορύβου της εταιρίας RealAcoustix, μοντέλο RealDodec 1204-A [2].



(α)



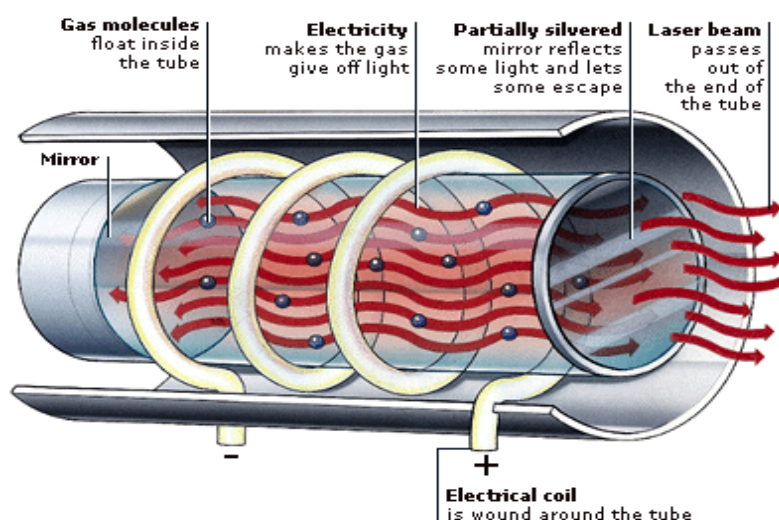
Εικόνα 2: (α) Δωδεκαεδρικό ηχείο της εταιρίας RealAcoustix, μοντέλο RealDodec μοντέλο 1204-A, και (β) Συχνοτική απόκριση του ηχείου αυτού σε ημι-λογαριθμικό άξονα [2].

b. Ακουστικές μετρήσεις

Από τις πιο σημαντικές ακουστικές παραμέτρους ο χρόνος αντήχησης είναι ίσως η πιο σημαντική. Ως χρόνος αντήχησης, RT_{60} , ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη θορύβου σε κάποιο σημείο να ελαττωθεί κατά 60 dB, μετά το μηδενισμό του εκπεμπόμενου θορύβου από την πηγή [3]. Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 3382:1997 και ISO 3382-1:2009 [4] η πηγή ήχου πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο παντοκατευθυντική γίνεται. Πρέπει να παράγει στάθμη ηχητικής πίεσης τέτοια έτσι ώστε να μπορεί να παρέχει καμπύλες πτώσης το απαραίτητα ελάχιστα εύρος δυναμικής δίχως την επιρροή του θορύβου βάθους. Τα εγχώρια εμπορικά μεγάφωνα δεν είναι αποδεκτά ως παντοκατευθυντικές πηγές ήχου.

c. Η δομή του συστήματος λέιζερ

Το λέιζερ είναι μία συσκευή η οποία ενισχύει την ένταση του φωτός μέσω μιας κβαντικής διαδικασίας γνωστή ως εξαναγκασμένη εκπομπή (stimulated emission). Η ονομασία λέιζερ είναι συντομογραφία από τον όρο ενίσχυση φωτός μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας (LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Στην εικόνα 3 δίνεται σχηματικά η δομή ενός τυπικού λέιζερ, αέριου ενεργού μέσου. Η χρησιμότητα ενός λέιζερ έγκειται σε χαρακτηριστικά, όπως η συμφωνία, το μήκος κύματος, η κατευθυντικότητα, η χρονική διάρκεια παλμών, που σχετίζονται άμεσα με το μέσο ενίσχυσης, τον τρόπο τροφοδοσίας της ενέργειας εντός του συστήματος και την οπτική κοιλότητά του για τη δημιουργία παρατεταμένης ταλάντωσης.



Εικόνα 3: Δομή ενός τυπικού λέιζερ αέριου ενεργού μέσου.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι διέγερσης ενός συστήματος λέιζερ, με τους επικρατέστερους να περιλαμβάνουν την οπτική διέγερση μέσω ειδικών λαμπτήρων (flashlamps) ή μέσω ενός άλλου λέιζερ (ή διόδων λέιζερ). Προκειμένου να αποκτηθεί φως αρκετής έντασης, για μετέπειτα χρήση, πρέπει να υπάρχει μηχανισμός ο οποίος ανατροφοδοτεί την ενέργεια εντός του συστήματος λέιζερ, καταλήγοντας στη δημιουργία του πλάτους της ταλάντωσης σε ένα συντονιζόμενο σύστημα. Ο συνηθέστερος τρόπος για την απόκτηση παρατεταμένων ταλαντώσεων είναι η

τοποθέτηση υψηλής απόδοσης καθρεπτών σε κάθε άκρη του μέσου του λέιζερ. Στο πιο απλό σύστημα και οι δύο καθρέφτες είναι επίπεδοι, ευθυγραμμισμένοι με ακρίβεια στην ίδια διεύθυνση με τον άξονα του λέιζερ. Έτσι το φως ανακλάται εμπρός και πίσω στο μέσο. Σε κάθε ανάκλαση συγκεντρώνεται μεγαλύτερη ενέργεια και ως αποτέλεσμα η ένταση του φωτός αυξάνεται. Εν τέλει προκειμένου να απελευθερωθεί μία δέσμη φωτός από το μέσο, οι καθρέφτες κατασκευάζονται έτσι ώστε ο ένας από αυτούς να έχει λιγότερη ανακλαστική ικανότητα από τον άλλο για τη διαρροή του φωτός μέσα από αυτόν.

d. Δημιουργία ηχητικών κυμάτων στον αέρα με χρήση υπερβραχέων παλμών λέιζερ

Ο αέρας είναι ένα εξαιρετικά μη αγώγιμο υλικό. Το μέσο όριο του ηλεκτρικού πεδίου για διηλεκτρική κατάρρευση του αέρα είναι $\sim 3 \times 10^6$ V/m [5]. Η πυκνότητα των ιονισμένων ηλεκτρονίων αποτελούν το μέσο έτσι ώστε ο αέρας να γίνει μερικώς αγώγιμο υλικό. Αν η εφαρμοζόμενη τάση είναι αρκετή, η διηλεκτρική εκκένωση μπορεί να γίνει ορατή μέσω ενός ηλεκτρικού σπινθήρα, γεφυρώνοντας έτσι με ένα αγώγιμο κανάλι, ολόκληρη την περιοχή όπου η ηλεκτρική τάση εφαρμόζεται.

Όταν παράγονται υπέρηχοι στον αέρα μέσω μιας εστιασμένης δέσμης φωτός μικρής διάρκειας, ένα μέρος του παλμού απορροφάται από τα μόρια του αέρα. Αυτό προκαλεί τη δημιουργία μίας μικρής περιοχής με ταχέως αυξανόμενη ενέργεια, όπου γίνονται απότομες αλλαγές στην πίεση και τη θερμοκρασία. Αυτές οι αλλαγές ακολουθούνται από επιτάχυνση των μορίων του αέρα και των ατομικών ιόντων προς το εξωτερικό της περιοχής. Αυτά έχουν ως αποτέλεσμα το σχηματισμό φούσκας από κενό αέρος. Αυτή η φούσκα συμπιέζει τον περιβάλλοντα αέρα προκαλώντας ένα ωστικό κύμα. Όταν το ωστικό κυματομέτωπο φτάσει τη μέγιστη ένταση, τότε ξεκινά να διαδίδεται με ταυτόχρονη μείωση της ενέργειας του [6].

Για ένα μονοχρωματικό κύμα που διαδίδεται σε ένα υλικό, όπως ένα επίπεδο κύμα ή μία Gaussian ακτίνα, η τοπική ένταση, I , σχετίζεται με το πλάτος, E , του ηλεκτρικού πεδίου μέσω της σχέσης:

$$I = \frac{U_p \epsilon_0 \epsilon_r \mu_r}{2} |E|^2 = \frac{c \epsilon_0 n}{2} |E|^2 \quad 2.1$$

όπου U_p , είναι η φασική ταχύτητα, c η ταχύτητα του φωτός στο κενό, n ο δείκτης διάθλασης του μέσου στο οποίο διαδίδεται το φως, και ϵ_0 ($= 8.8 \times 10^{-12} \text{ C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$) η διηλεκτρική επιδεκτικότητα του κενού.

Η ένταση ενός παλμικού λέιζερ δίνεται από την παρακάτω έκφραση:

$$I = \frac{E}{t \cdot A} \quad 2.2$$

όπου E είναι η ενέργεια ανά παλμό λέιζερ, A η επιφάνεια εστίασης ($= \pi r^2$, όπου r η ακτίνα εστίασης), ενώ t η χρονική διάρκεια των παλμών λέιζερ.

Στην παρούσα εργασία $t = 6 \text{ ns}$, ενώ η μικρότερη ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις ήταν 7 mJ και η διάμετρος της εστιασμένης δέσμης λέιζερ ήταν $\sim 45 \mu\text{m}$. Επομένως η χαμηλότερη ένταση που χρησιμοποιήθηκε ήταν $I_{min} \sim 7.3 \times 10^{17} \text{ W/m}^2$. Με αντικατάσταση στην εξίσωση 2.1, αυτή αντιστοιχεί σε ηλεκτρικό πεδίο της τάξης των $16 \times 10^6 \text{ V/m}$, οπότε είναι αρκετή για την “κατάρρευση» του διηλεκτρικού του αέρα και την πρόκληση εκκένωσης.

Για την προσομοίωση του ωστικού κύματος που προκαλείται από τη δέσμη φωτός του λέιζερ και από την διάθλαση της που προκαλείται στην περιοχή αλληλεπίδρασης, χρησιμοποιείται ένα φαινομενολογικό μοντέλο που βασίζεται σε προηγούμενες θεωρητικές προσεγγίσεις της μοντελοποίησης εκκενώσεων από ηλεκτρικούς σπινθήρες οι οποίες προκαλούν ωστικά κύματα [7] και των προσφάτων αναδιατυπώσεων για τη συμπερίληψη των εκκενώσεων από λέιζερ [8]. Η διάδοση της πίεσης, $p^{sh}(r,t)$, του σφαιρικού ωστικού κύματος που παράγεται από γρήγορη εκκένωση στον αέρα μπορεί να προσομοιαστεί με την έκφραση:

$$p^{sh}(r,t) = p^{sh}(r) H \left(t - \int_0^r \frac{dr'}{u^{sh}(r')} \right) \exp \left[- \left(t - \int_0^r \frac{dr'}{u^{sh}(r')} \right) \left(\epsilon \int_0^r \frac{dr'}{u^{sh}(r')} \right)^{-1} \right] \quad 2.3$$

όπου r η απόσταση από την εκκένωση, t ο χρόνος στον οποίο εξελίσσεται το φαινόμενο, $p^{sh}(r)$ και $u^{sh}(r)$ η πίεση και η σωματιδιακή ταχύτητα, αντίστοιχα, στο ωστικό κυματομέτωπο και ϵ ($= 0.5$) μία σταθερά η οποία ελέγχει τη διάρκεια του παλμού πίεσης. Η πίεση και η σωματιδιακή ταχύτητα του ωστικού κυματομέτρου μπορούν να εκφραστούν από τις γνωστές φόρμουλες [9]:

$$p^{sh}(r) = \left(\frac{2}{5}\right)^2 \frac{2\zeta_0^5}{\gamma + 1} E r^{-3} \quad 2.4$$

και

$$u^{sh}(r) = \frac{2}{5} \zeta_0^{5/2} \left(\frac{E}{\rho_0}\right)^{1/2} r^{-3/2} \quad 2.5$$

όπου E η ενέργεια που απελευθερώνεται στιγμιαία στο αρχικό σημείο του ωστικού κύματος, ρ_0 η πυκνότητα του αέρα, ζ_0 (≈ 0.93) μία αδιάστατη σταθερά που περιγράφει τα χαρακτηριστικά της αυθόρμητης διάδοσης των ωστικών κυμάτων, και γ η αδιαβατική σταθερά Poisson (η οποία για τον αέρα είναι ≈ 1.41) [9].

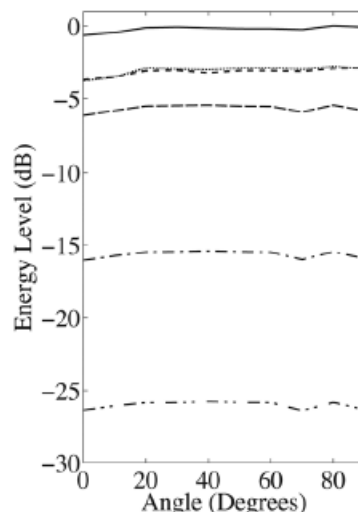
Για την εργασία σε ακουστικούς τομείς υποθέτονται ιδανικές σημειακές πηγές για τη μείωση της πολυπλοκότητας της μέτρησης. Στην πράξη η πηγή ήχου έχει πεπερασμένες διαστάσεις και συγκεκριμένη κατευθυντικότητα. Ακόμη, μία τέτοια πηγή έχει μάζα και μπορεί να δημιουργήσει ανεπιθύμητες ανακλάσεις στις μετρήσεις. Στην περίπτωση εργασίας με μοντέλα κλίμακας, τέτοια προβλήματα μπορεί να έχουν κρίσιμη σημασία λόγω του μικρού μεγέθους. Τα μοντέλα κλίμακας χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της ακουστικής συμπεριφοράς ενός χώρου. Θεωρώντας συνεχή την ταχύτητα του ήχου, ο παράγοντας της σμίκρυνσης της κλίμακας του μοντέλου είναι ισότιμος με τον παράγοντα μεγέθυνσης της κλίμακας στη συχνότητα. Έτσι τα 10 kHz σε ένα μοντέλο κλίμακας 1: 10 αναπαριστούν 1 kHz σε πλήρη κλίμακα. Η εργασία σε μοντέλα κλίμακας υποθέτουν παντοκατευθυντική πηγή ήχου η οποία είναι ευρυζωνική και αρκετά μικρή έτσι ώστε να θεωρηθεί ως σημειακή πηγή για τη μέτρηση της κρουστικής απόκρισης ενός χώρου.

Παλμοί πίεσης που προκαλούνται από λέιζερ (ΠΠΛ) έχουν χρησιμοποιηθεί για την πρόκληση κυμάτων πίεσης σε υγρά και στερεά. Ένας παλμός της δέσμης του λέιζερ εστιάζεται σε ένα σημείο στο χώρο. Εντός μερικών ns η θερμοκρασία στο σημείο αυτό αυξάνεται κατά χιλιάδες βαθμούς Κελσίου, προκαλώντας έτσι μία τοπική κατάρρευση. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί ένα σπινθήρα/έκρηξη και έναν παλμό πίεσης (ακουστικό ωστικό κύμα). Έρευνες έδειξαν ότι αυτός ο παλμός είναι καλύτερη πηγή από τους ηλεκτρικούς σπινθήρες δημιουργούμενους από ηλεκτρόδια, που χρησιμοποιούνται ως σήμερα σε μοντέλα κλίμακας για την μελέτη των ιδιοτήτων ενός αερομεταφερόμενου ωστικού κύματος [10]. Επίσης, ο ΠΠΛ δημιουργεί ένα παλμό του οποίου η διάρκεια αυξάνει όσο διαδίδεται στον αέρα.

Και οι δύο τρόποι συμβάλλουν στη δημιουργία ηχητικών παλμών από ηλεκτρικές εκρήξεις, υποδεικνύοντας ότι αυτά τα φαινόμενα είναι εγγενή στη μη

γραμμική εξάπλωση του n-ιστού κύματος και στη θερμό-ιξώδη απορρόφηση και χαλάρωση στον αέρα σε μεγάλα επίπεδα πίεσης [11]. Η μοντελοποίηση των Yuldashev et al [11] έδειξε ότι τα φαινόμενα της μη-γραμμικότητας είναι ο κύριος λόγος που παρατείνεται ο παλμός καθώς προκαλείται εξασθένηση κοντά στην πηγή. Παρόλα αυτά, τα φαινόμενα της μη-γραμμικότητας στην διάδοση του ΠΠΛ μπορούν να ελαττωθούν μειώνοντας το πλάτος του ακουστικού παλμού.

Στηριζόμενοι στις ιδιότητες που έχει ο ΠΠΛ, οι Bolaños et al [10] πρότειναν ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ήχου σε μετρήσεις ακουστικών μοντέλων κλίμακας. Επιπρόσθετα, είναι πιθανόν να προεκβληθεί δίχως την εισβολή ο ΠΠΛ εντός ενός ακουστικού μοντέλου κλίμακας μέσω ενός οπτικά διάφανου και ακουστικά διαπεραστικού υλικού, όπως το γυαλί. Επίσης οι ίδιοι, απέδειξαν και επιβεβαίωσαν ότι ο ΠΠΛ είναι μία πηγή ήχου η οποία δεν παρουσίασε ανακλάσεις κατά τη μέτρηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων με πρόγραμμα εξομοίωσης ακουστικής από υπολογιστή, συνεπώς αποδεικνύεται και η ανυπαρξία της μάζας. Η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων για χρήσεις ακουστικής αποδείχθηκε ικανοποιητική [10] καθώς βρέθηκε ότι ο ΠΠΛ παρουσιάζει παντοκατευθυντικό πολικό διάγραμμα για ολόκληρο το συχνοτικό φάσμα, και ότι για διαφορετικές γωνίες από 0 – 90° η αλλαγή της ηχητικής στάθμης κυμαίνεται στο 1 dB (βλ. εικόνα 4). Τέλος, απέδειξαν ότι η επαναληψιμότητα δεν αλλάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



Εικόνα 4: Ηχητική στάθμη ενός ΠΠΛ για διαφορετικές γωνίες [10].

3. Πειραματικές διατάξεις & διαδικασία μετρήσεων

a. Πειραματικά όργανα

Στη διάταξη που υλοποιήθηκε τα κύρια στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν είναι: Nd:YAG παλμικό λέιζερ (BrilliantB της εταιρείας Quantel), ηχώμετρο (SC-310 της εταιρείας Cesva), ένας μετρητής απόστασης, απαραίτητα οπτικά οδήγησης και διαμόρφωσης οπτικής δέσμης διατεταγμένα πάνω σε ειδική αντικραδασμική τράπεζα (όπου και υλοποιήθηκε η όλη διάταξη), και ένας μετρητής ενέργειας της. Τα αρχεία που παρήγαγε το ηχώμετρο αποθηκεύονταν σε υπολογιστή. Η έπειτα επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων έγινε στα προγράμματα Excel (της εταιρείας Microsoft), Matlab (της εταιρείας MathWorks) και τέλος στο λογισμικό του ηχομέτρου Cesva.

i. Παλμική πηγή λέιζερ

Η πηγή λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα παλμικό λέιζερ (εικόνα 5) ικανό να παράγει υπερβραχείς παλμούς χρονικής διάρκειας 6 ns, άντλησης μέσω flashlamps και της τεχνικής Q-switching [12]. Το ενεργό μέσο ήταν κρύσταλλος Nd:YAG, δηλαδή Yttrium Aluminium Garnet (YAG), στον οποίο έχουν εμβαπτιστεί ιόντα Νεοδυμίου (Nd³⁺). Αποτελείται από δύο κύριες μονάδες: την οπτική κεφαλή και την μονάδα τροφοδότησης & ελέγχου, οι οποίες είναι συνδεδεμένες μεταξύ τους. Η διαχείριση του λέιζερ γίνεται από ένα τηλεχειριστήριο και την διασύνδεσή του με τον υπολογιστή μέσω του λογισμικού RS232.



Εικόνα 5: Παλμικό λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε (BrilliantB της εταιρείας Quantel).

Το λέιζερ διαθέτει μονάδα παραγωγής δεύτερης αρμονικής και έτσι μπορεί να παράγει ακτινοβολία φωτός και σε μήκος κύματος 532 nm (η οποία και χρησιμοποιήθηκε) πέραν της θεμελιώδους του Nd:YAG μέσου (1064 nm). Ο τυπικός ρυθμός επαναληψιμότητας των παλμών (repetition rate) είναι 10Hz. Η μέγιστη ενέργεια ανά παλμό είναι 850 mJ στα 1064 nm, και 400 mJ στα 532 nm.

Μερικές από τις δυνατότητες του λέιζερ είναι ο συγχρονισμός του flashlamp με εσωτερικό ή εξωτερικό ηλεκτρικό σήμα, και η λειτουργία single shot που δίνει τη δυνατότητα εκπομπής ενός μόνο παλμού. Προσφέρει ακόμη τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου των βασικών παραμέτρων, όπως του χρονισμού της λειτουργίας του flashlamp και του Q23 switch. Επίσης διαθέτει εξωτερική μονάδα για λειτουργία σε μονό διαμήκη ρυθμό (single longitudinal mode), που ήταν και επιλεγμένη λειτουργία. Στην εικόνα 6 φαίνεται η χωρική κατανομή της δέσμης του λέιζερ, σε κοντινό και μακρινό πεδίο, για εκπομπή δέσμης 1064 nm και ρυθμό επαναληψιμότητας 10 Hz.



Εικόνα 6: Χωρική κατανομή της δέσμης του BrilliantB λέιζερ σε μακρινό πεδίο (αριστερά) και κοντινό πεδίο (δεξιά) στα 1064 nm και ρυθμό επαναληψιμότητας 10 Hz [12].

ii. Ηχώμετρο

Το ηχώμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο SC-310 της εταιρίας Cesva (εικόνα 7). Το ηχώμετρο έχει χρόνο ολοκλήρωσης από 0.125 sec και μέγιστη ανάλυση 1/3 οκτάβα (όπου και οι δύο παράμετροι χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις).



Εικόνα 7: Ηχόμετρο που χρησιμοποιήθηκε (SC310 της εταιρείας Cesva.

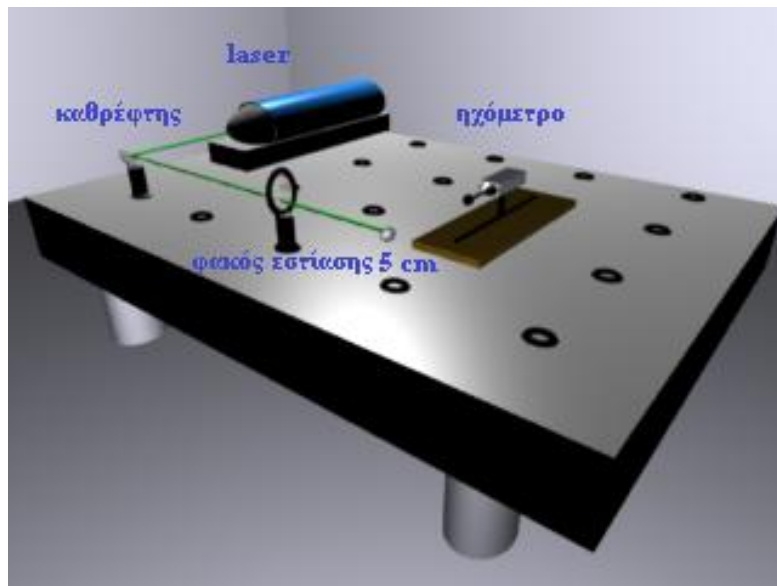
iii. Μέσα αποθήκευσης και επεξεργασίας των αρχείων

Χρησιμοποιήθηκε υπολογιστής όπου είχε εγκατεστημένο το λογισμικό της εταιρείας Cesva, για την ανάλυση και αποθήκευση των δεδομένων του ηχομέτρου. Το πρόγραμμα αυτό παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής των πειραματικών αρχείων σε μορφή Excel (της εταιρείας Microsoft). Μετά την εξαγωγή αυτών, επεξεργάστηκαν με το λογισμικό Matlab (της εταιρείας MathWorks) όπου έγιναν οι διορθώσεις θορύβου βάθους και οι υπολογισμός της τυπικής απόκλισης για κάθε αρχείο δεδομένων.

b. Πειραματική διαδικασία

Σκοπός ήταν η μελέτη του παραγόμενου ηχητικού φάσματος προκαλούμενο από την ηλεκτρική διέγερση των μορίων του αέρα μέσω της εστίασης της δέσμης φωτός του λέιζερ στον αέρα. Χρησιμοποιήθηκε το λέιζερ το οποίο εκπέμπει ακτινοβολία με μήκος κύματος 532 nm. Ο ρυθμός επαναληψιμότητας που ορίστηκε ήταν 2 Hz. Χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος καθρέπτης για την οδήγηση της δέσμης σε φακό εστίασης, εστιακής απόστασης 5 cm. Η δέσμη σε αυτή την απόσταση είχε διάμετρο ~ 45 μm. Στο σημείο αυτό δημιουργούνται η εκκένωση, όπου και παράγονταν ο μελετώμενος ήχος. Από το σημείο αυτό τοποθετούνταν με ακρίβεια (με χρήση οργάνου τοποθέτησης) το ηχόμετρο στις αποστάσεις των 9, 14, 19, 24, 29, 34, 39, 44, 49 και 54 cm, οι οποίες ήταν και οι θέσεις καταγραφής του εκπεμπόμενου ήχου που χρησιμοποιήθηκαν. Για κάθε θέση καταγραφής, καταγράφονταν ηχητικά δείγματα για διαφορετικές ενέργειες παλμών του λέιζερ, και συγκεκριμένα για 7, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 70 και 80 mJ. Τέλος, πριν από κάθε μέτρηση πραγματοποιούνταν μέτρηση του θορύβου βάθους προκειμένου να γίνει κατά το δυνατόν αξιόπιστη αξιολόγηση

των αποτελεσμάτων, καθώς είναι γνωστό [3] ότι για να θεωρείται μια τέτοιου είδους μέτρηση αξιόπιστη θα πρέπει να διαφέρει από αυτή του θορύβου βάθους κατά τουλάχιστον 3 dB. Στην εικόνα 8 δίνεται σχηματικά η υλοποιηθείσα διάταξη, φωτογραφία της οποίας φαίνεται στην εικόνα 9.



Εικόνα 8: Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε.



Εικόνα 9: Φωτογραφία της πειραματικής διάταξης που υλοποιήθηκε. Η εκκένωση φαίνεται (έντονο πράσινο χρώμα) σε απόσταση 5 cm μπροστά από τον φακό εστίασης.

4. Πειραματικά αποτελέσματα & ανάλυση

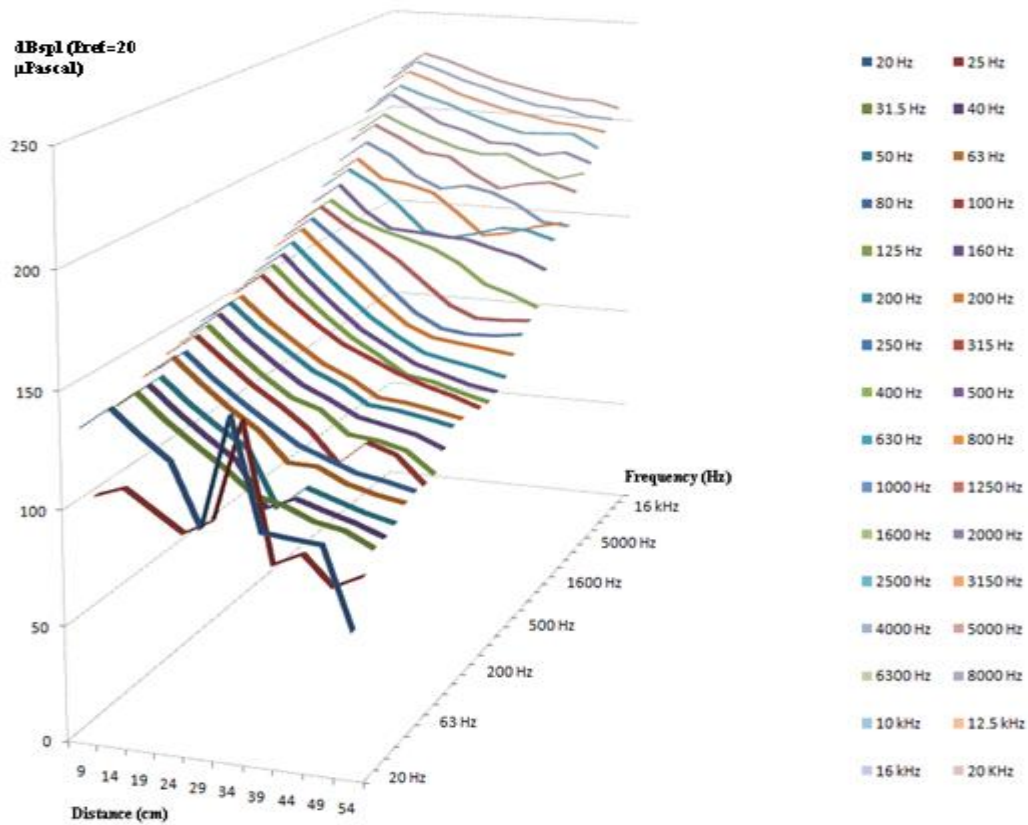
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται, με όσο το δυνατό συνοπτικό και περιεκτικό τρόπο, τυπικά αποτελέσματα των πειραματικών μετρήσεων, και σχολιάζονται μέσω ανάλυσής τους. Υπάρχουν δύο «οπτικές γωνίες» υπό τις οποίες μπορεί κανείς να αναλύσει τα αποτελέσματα των μετρήσεων: (i) είτε ως προς μία συγκεκριμένη ενέργεια αναλύοντας την ηχητική στάθμη πίεσης ανά συχνότητα και σε κάθε απόσταση μέτρησης, (ii) είτε ως προς μία συγκεκριμένη απόσταση αναλύοντας την ηχητική στάθμη πίεσης ανά συχνότητα και σε κάθε μετρούμενη ενέργεια. Καταγράφηκαν μετρήσεις για αποστάσεις από την πηγή από 9 cm έως και 54 cm, και για ενέργειες παλμών λέιζερ από 7 mJ έως και 80 mJ, όπως αναλυτικά αναφέρονται στο κεφάλαιο 3.

Αξίζει να αναφερθεί ότι υπήρξαν περιπτώσεις όπου οι μετρούμενες στάθμες ηχητικής πίεσης δεν ξεπερνούσαν κατά, τουλάχιστον, 3 dB τις αντίστοιχες στάθμες θορύβου βάρους, κατά συνέπεια δεν κρίνονται απόλυτα αξιόπιστες. Για το λόγο αυτό παρατίθενται δύο πίνακες οι οποίοι και αναδεικνύουν τις περιπτώσεις αυτές.

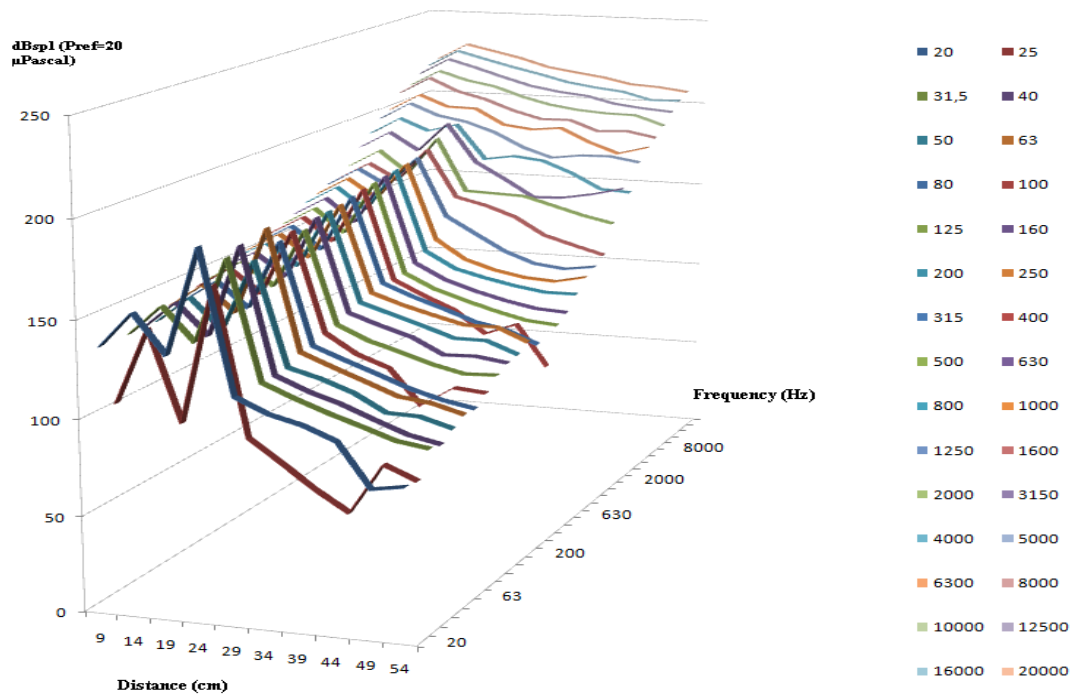
Υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων για να είναι πιο φανερή η συχνοτική απόκριση των μετρήσεων. Η τυπική απόκλιση των μετρήσεων παρατίθεται σε γραφικές εικόνες στο τέλος υπό τις «οπτικές γωνίες» που προαναφέρθηκαν.

a. Ηχητική στάθμη πίεσης για δεδομένη ενέργεια παλμών λέιζερ

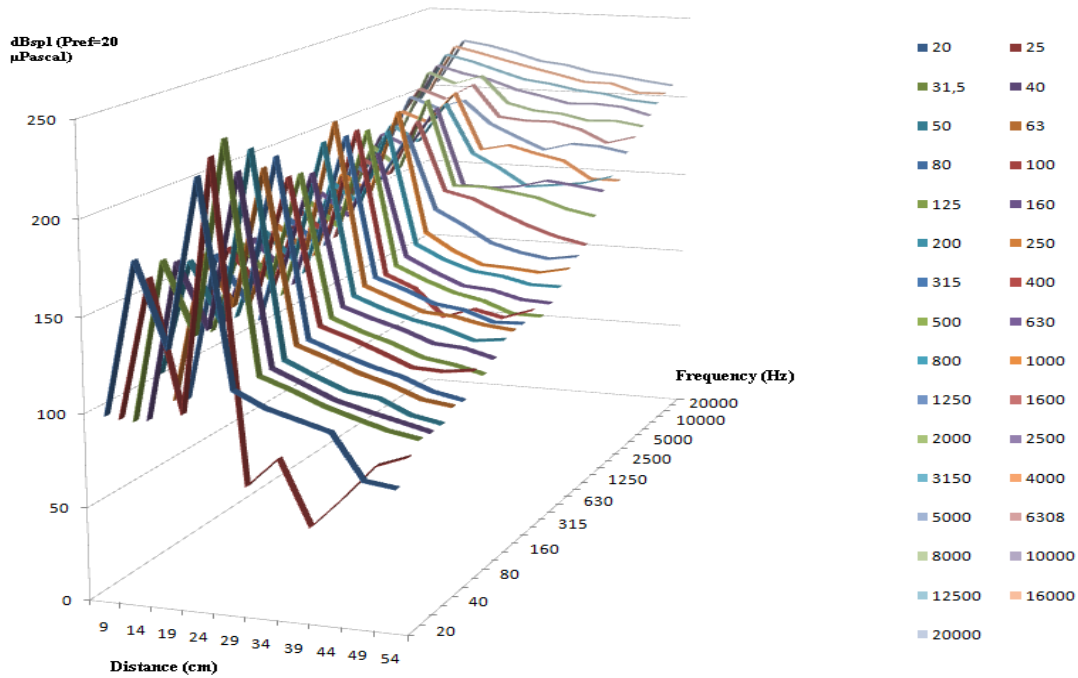
Στις εικόνες 10 έως και 12 δίνονται τυπικά αποτελέσματα για δεδομένη ενέργεια παλμών λέιζερ σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή, και συγκεκριμένα για ενέργειες 50 mJ, 60 mJ, και 70 mJ, αντίστοιχα. Η ηχητική στάθμη πίεσης παρουσιάζεται για διακριτές τιμές συχνοτήτων μέσα στο συχνοτικό φάσμα από 20 Hz έως 20 kHz. Αξίζει να σημειωθεί ότι μερικές φορές, και για λόγους καθαρά εξοικονόμησης χώρου, δεν εμφανίζονται όλες οι τιμές, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει το σκοπό της παρουσίασης των δεδομένων.



Εικόνα 10: Ηχητική στάθμη πίεσης παραγόμενη από παλμούς λέιζερ ενέργειας 50 mJ, ανά απόσταση και για διακριτές συχνότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).



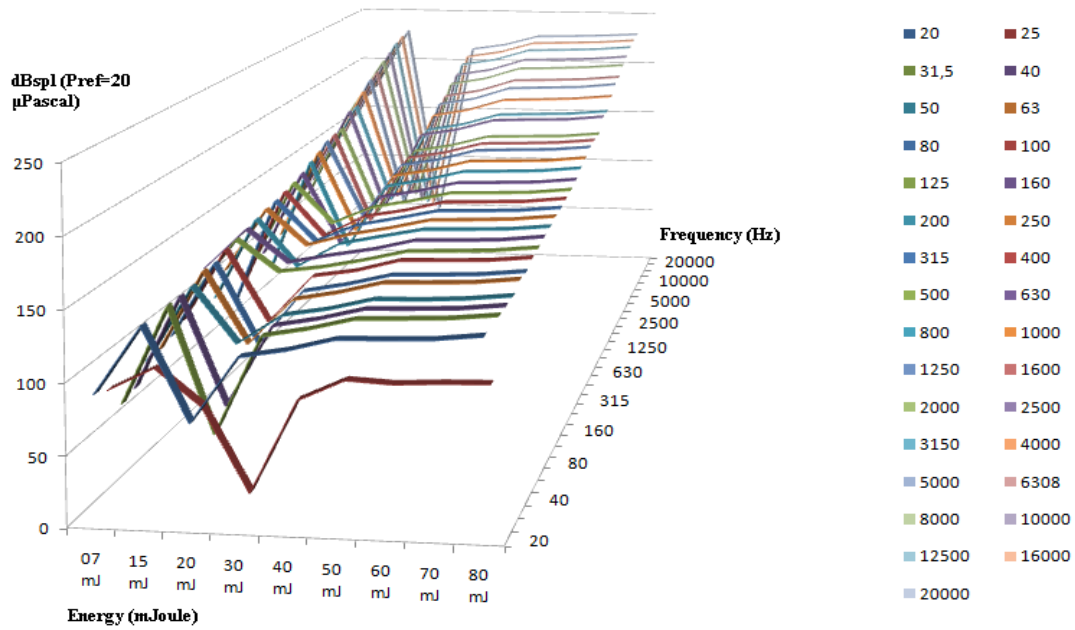
Εικόνα 11: Ηχητική στάθμη πίεσης παραγόμενη από παλμούς λέιζερ ενέργειας 60 mJ, ανά απόσταση και για διακριτές συχνότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).



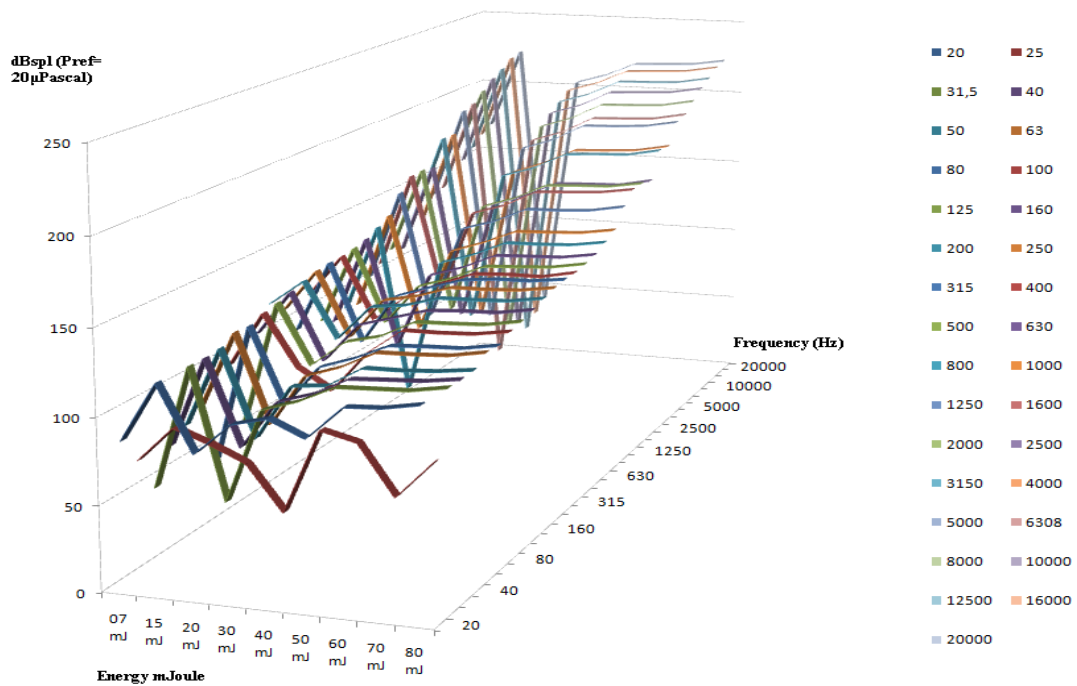
Εικόνα 12: Ηχητική στάθμη πίεσης παραγόμενη από παλμούς λέιζερ ενέργειας 70 mJ, ανά απόσταση και για διακριτές συχνότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).

b. Ηχητική στάθμη πίεσης για δεδομένη απόσταση από την πηγή

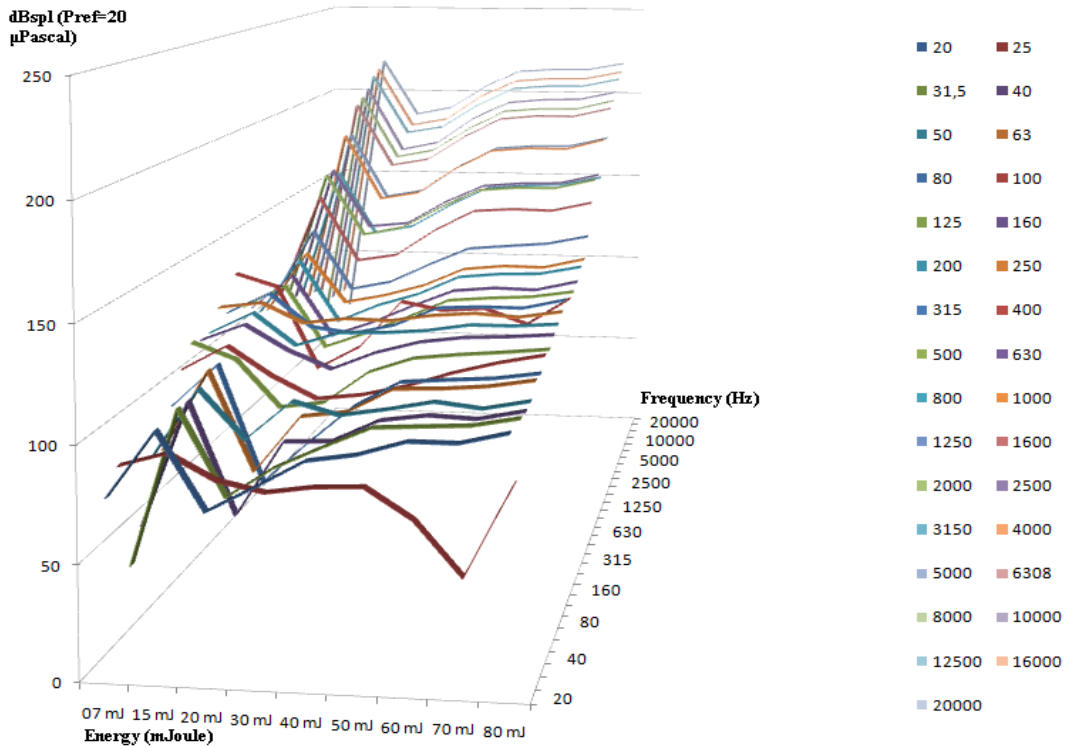
Στις εικόνες 13 έως και 15 δίνονται τυπικά αποτελέσματα για απόσταση από την πηγή σε συνάρτηση με την ενέργεια των παλμών λέιζερ, και συγκεκριμένα για αποστάσεις 19 cm, 29 cm, και 39 cm, αντίστοιχα. Η ηχητική στάθμη πίεσης παρουσιάζεται για διακριτές τιμές συχνοτήτων μέσα στο συχνοτικό φάσμα από 20 Hz έως 20 kHz. Αξίζει να σημειωθεί ότι μερικές φορές, και για λόγους καθαρά εξοικονόμησης χώρου, δεν εμφανίζονται όλες οι τιμές, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει το σκοπό της παρουσίασης των δεδομένων.



Εικόνα 13: Ηχητική στάθμη πίεσης σε απόσταση 19 cm από την πηγή, ανά ενέργεια παλμών λέιζερ και για διακριτές συχνότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).



Εικόνα 14: Ηχητική στάθμη πίεσης σε απόσταση 29 cm από την πηγή, ανά ενέργεια παλμών λέιζερ και για διακριτές συχνότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).



Εικόνα 15: Ηχητική στάθμη πίεσης σε απόσταση 39 cm από την πηγή, ανά ενέργεια παλμών λέιζερ και για διακριτές συχνότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).

c. Ανάλυση αποτελεσμάτων

i. Πίνακες επισκόπησης & αξιοποίησης των αποτελεσμάτων

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται πίνακες επισκόπησης και αξιοποίησης των αποτελεσμάτων, ώστε να είναι ξεκάθαρος ο βαθμός εγκυρότητάς τους σύμφωνα με προαναφερθέντα στοιχεία προηγούμενων κεφαλαίων. Έχει ακολουθηθεί η ίδια συλλογιστική με την παρουσίαση των τυπικών αποτελεσμάτων που προηγήθηκε, δηλαδή στον πίνακα 1 παρουσιάζονται στοιχεία ανά ενέργεια παλμών λέιζερ σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή, ενώ στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα στοιχεία ανά απόσταση από την πηγή σε συνάρτηση με την ενέργεια των παλμών λέιζερ. Η χρωματική κλίμακα που ακολουθήθηκε έχει ως εξής: με κόκκινο χρώμα είναι περιοχές όπου ο θόρυβος βάθους ήταν τόσο μεγάλος ώστε δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες οι μετρήσεις. Με γαλάζιο χρώμα είναι περιοχές αξιόπιστων μετρήσεων (θόρυβος βάθους τουλάχιστον 3 dB μικρότερος από την παραγόμενη

ηχητική στάθμη) και αναφέρεται από ποια συχνότητα και πάνω μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες οι μετρήσεις αυτές. Τέλος, με πράσινο χρώμα είναι περιοχές πλήρως αξιόπιστων μετρήσεων, δηλαδή για οποιαδήποτε συχνότητα (όπως υποδηλώνει και η ένδειξη “whole”).

Παρατηρείται ότι είναι λίγες οι περιπτώσεις όπου τα πειραματικά αποτελέσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα. Η συγκεκριμένη παρατήρηση άλλωστε εμπεριέχεται στους πίνακες 1 και 2, καθώς στην τελευταία γραμμή υπάρχει η ένδειξη «ΟΛΙΚΑ», το οποίο σημαίνει, συγκεντρωτικά πλέον, από ποια συχνότητα και πάνω τα αποτελέσματα θεωρούνται αξιόπιστα, ανεξάρτητα από την ενέργεια των παλμών ή την απόσταση από την πηγή, αντίστοιχα.

Απόσταση/ Ενέργεια	9 cm	14 cm	19 cm	24 cm	29 cm	34 cm	39 cm	44 cm	49 cm	54 cm
07 mJ		2000 HZ								
15 mJ	500 HZ									
20 mJ		2000 HZ				XP1250 HZ				
30 mJ	31.5 HZ			ΧΡΗΣΗ ΑΠΟ 1000 HZ						
40 mJ	31.5 HZ					800 HZ				
50 mJ	31.5 HZ					500 HZ				
60 mJ	31.5 HZ					500 HZ				
70 mJ	500 HZ	whole			500 HZ					
80 mJ	whole				500 HZ					
ΟΛΙΚΑ		2000 HZ				2000 HZ				

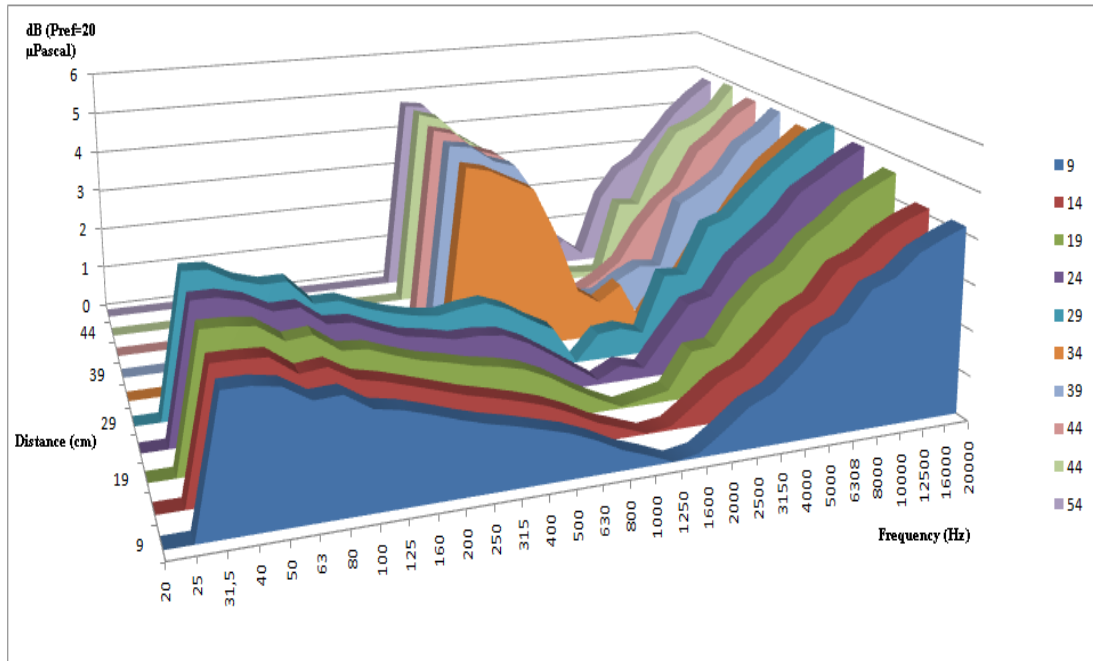
Πίνακας 1: Πίνακας επισκόπησης και αξιοποίησης των αποτελεσμάτων με τα στοιχεία να παρουσιάζονται ανά ενέργεια παλμών λέιζερ σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή. Η χρωματική κλίμακα και τα εμφανιζόμενα σχόλια εξηγούνται αναλυτικά στο κείμενο (παράγραφος 4.3.1).

Energy/ Distance	07 mJ	15 mJ	20 mJ	30 mJ	40 mJ	50 mJ	60 mJ	70 mJ	80 mJ
09 cm		500 HZ		31.5 HZ				500 HZ	whole
14 cm	2000 HZ	500 HZ	2000 HZ	31.5 HZ				whole	
19 cm	2000 HZ	500 HZ	2000 HZ	31.5 HZ				whole	
24 cm	2000 HZ	500 HZ	2000 HZ	1000 HZ	31.5 HZ			whole	
29 cm	2000 HZ	500 HZ		1000 HZ	31.5 HZ			500 HZ	
34 cm	2000 HZ	500 HZ	1250 HZ	1000 HZ	800 HZ	500 HZ			
39 cm	2000 HZ	500 HZ	1250 HZ	1000 HZ	800 HZ	500 HZ			
44 cm	2000 HZ	500 HZ	1250 HZ	1000 HZ	800 HZ	500 HZ			
49 cm	22000 Hz	500 HZ	1250 HZ	1000 HZ	800 HZ	500 HZ			
54 cm	2000 HZ	500 HZ	1250 HZ	1000 HZ	800 HZ	500 HZ			
ΟΛΙΚΑ		500 HZ		1000 HZ	800 HZ	500 HZ			

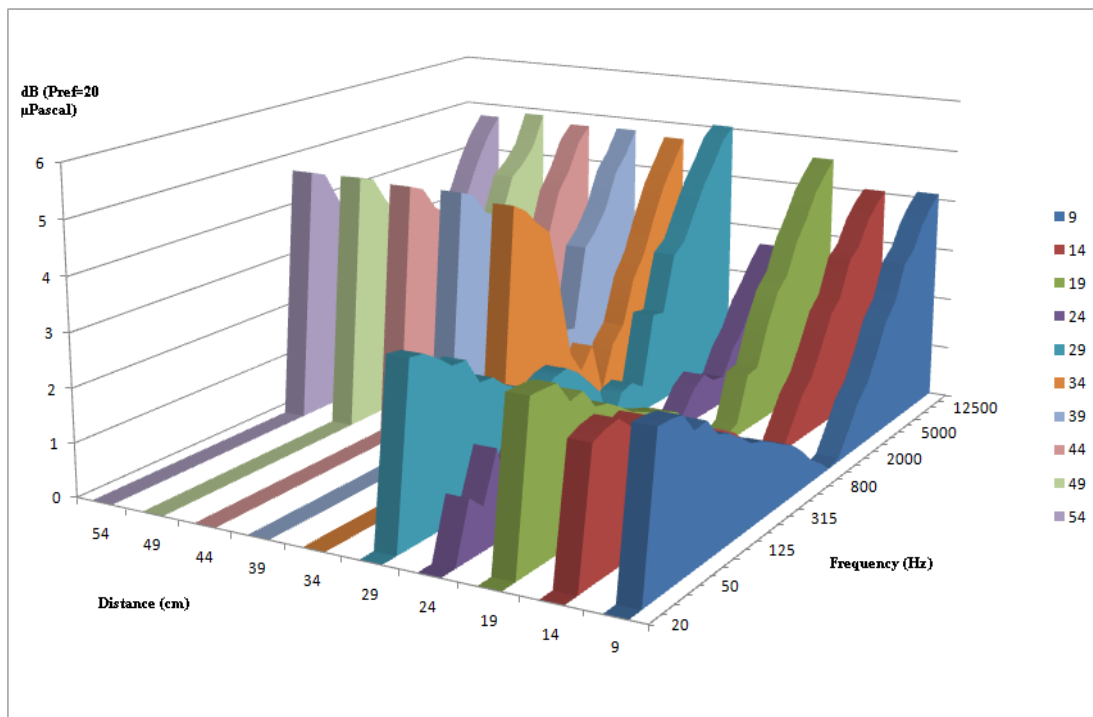
Πίνακας 2: Πίνακας επισκόπησης και αξιοποίησης των αποτελεσμάτων με τα στοιχεία να παρουσιάζονται ανά απόσταση από την πηγή σε συνάρτηση με την ενέργεια των παλμών λέιζερ. Η χρωματική κλίμακα και τα εμφανιζόμενα σχόλια εξηγούνται αναλυτικά στο κείμενο (παράγραφος 4.3.1).

ii. Τυπική απόκλιση των μετρήσεων

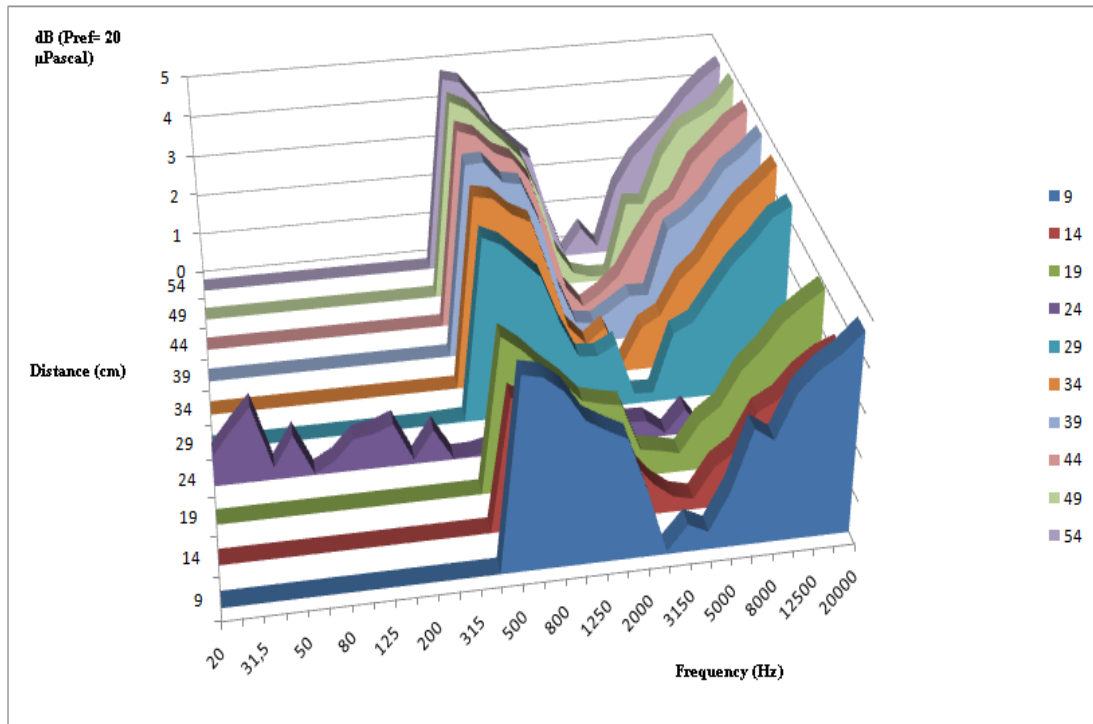
Προκειμένου να αξιολογηθεί η συχνοτική απόκριση των εκκενώσεων του ΠΠΛ, υπολογίστηκε η τυπική απόκλιση όλων των μετρήσεων. Έχει ακολουθηθεί η ίδια συλλογιστική με την παρουσίαση των τυπικών αποτελεσμάτων (παράγραφος 4.2) και κατά αντιστοιχία με αυτά: στις εικόνες 16 έως και 18 δίνονται τυπικά αποτελέσματα για δεδομένη ενέργεια παλμών λέιζερ σε συνάρτηση με την απόσταση από την πηγή, και συγκεκριμένα για ενέργειες 50 mJ, 60 mJ, και 70 mJ, αντίστοιχα, ενώ στις εικόνες 19 έως και 21 δίνονται τυπικά αποτελέσματα για απόσταση από την πηγή σε συνάρτηση με την ενέργεια των παλμών λέιζερ, και συγκεκριμένα για αποστάσεις 19 cm, 29 cm, και 39 cm, αντίστοιχα. Κατά τα άλλα ισχύουν τα ίδια με τα αναφερθέντα στην παράγραφο 4.2, ενώ και πάλι σε κάποιες περιπτώσεις απουσιάζουν τιμές διότι δεν ικανοποιείται η συνθήκη όπου η στάθμη ηχητικής πίεσης του παλμού θα πρέπει να ξεπερνά τουλάχιστον κατά 3 dB τη στάθμη ηχητικής πίεσης του θορύβου βάθους.



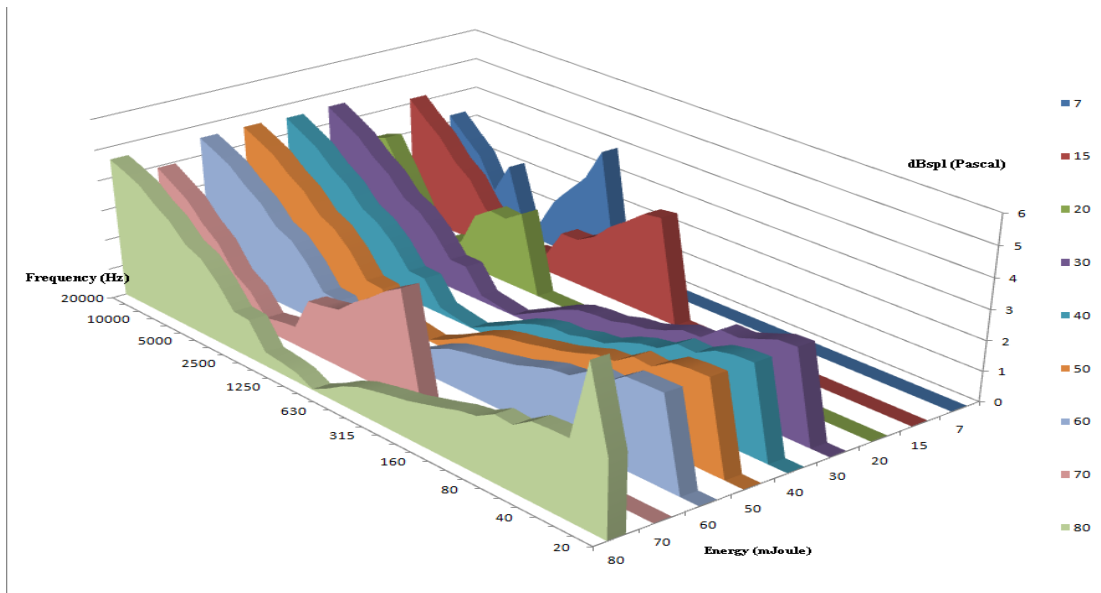
Εικόνα 16: Τυπική απόκλιση ηχητικής στάθμης παραγόμενη από παλμούς λέιζερ ενέργειας 50 mJ, ανά απόσταση και για διακριτές συχρότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).



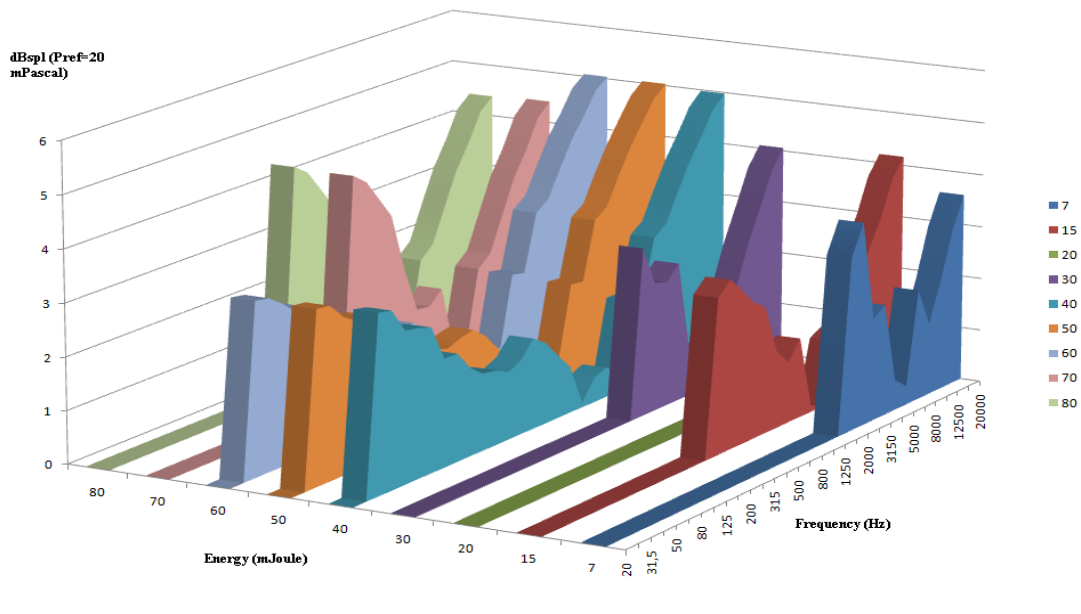
Εικόνα 17: Τυπική απόκλιση ηχητικής στάθμης παραγόμενη από παλμούς λέιζερ ενέργειας 60 mJ, ανά απόσταση και για διακριτές συχρότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).



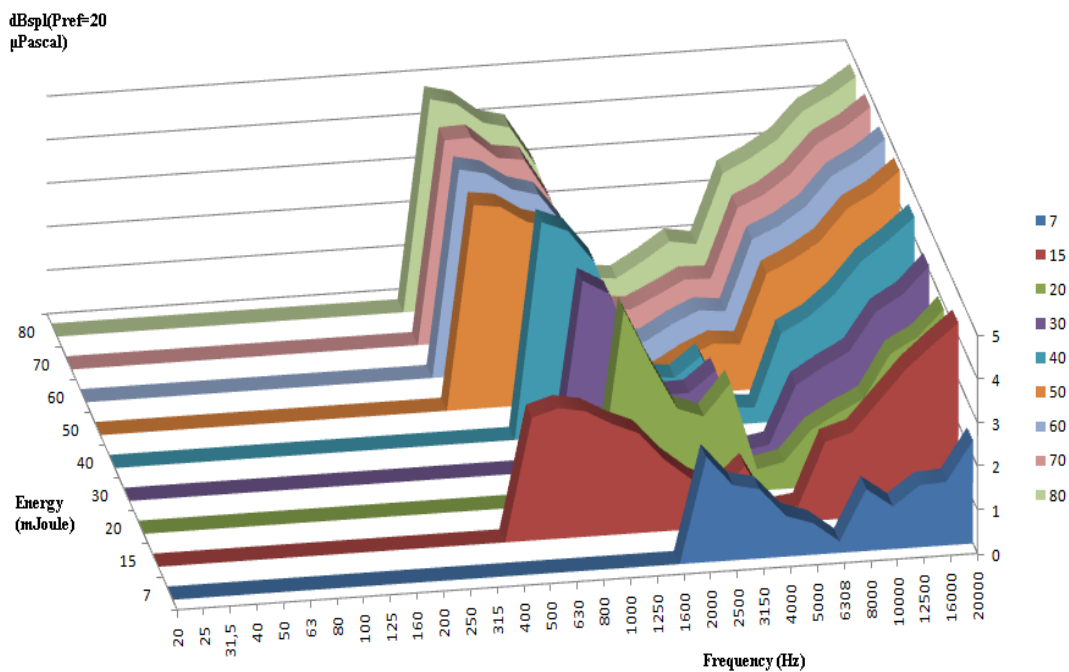
Εικόνα 18: Τυπική απόκλιση ηχητικής στάθμης παραγόμενη από παλμούς λέιζερ ενέργειας 70 mJ, ανά απόσταση και για διακριτές συχνότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).



Εικόνα 19: Τυπική απόκλιση ηχητικής στάθμης σε απόσταση 19 cm από την πηγή, ανά ενέργεια παλμών λέιζερ και για διακριτές συχνότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).



Εικόνα 20: Τυπική απόκλιση ηχητικής στάθμης πίεσης σε απόσταση 29 cm από την πηγή, ανά ενέργεια παλμών λέιζερ και για διακριτές συχνότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).



Εικόνα 19: Τυπική απόκλιση ηχητικής στάθμης πίεσης σε απόσταση 39 cm από την πηγή, ανά ενέργεια παλμών λέιζερ και για διακριτές συχνότητες (με αντιστοιχία χρωματικής κλίμακας).

d. Παρατηρήσεις & σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στη συνέχεια παρατίθενται οι κυριότερες παρατηρήσεις και σχόλια πάνω στο σύνολο των αποτελεσμάτων της εργασίας αυτής.

Όσο αφορά στα αποτελέσματα σε σχέση με την ενέργεια των παλμών λέιζερ, παρατηρείται ότι όσο πιο μικρή η ενέργεια του παλμού, τόσο μεγαλύτερες οι διακυμάνσεις της στάθμης ηχητικής πίεσης. Πιο συγκεκριμένα, στα 7 mJ οι διακυμάνσεις της στάθμης ηχητικής πίεσης είναι τόσο μεγάλες, αλλά και πολλές, όπου καθίσταται αδύνατη η χρήση για ακουστικές μετρήσεις. Στα 15, 20, 60, 70 και 80 mJ παρατηρείται απότομη αύξηση της στάθμης ηχητικής πίεσης στα 14 cm και στα 24 cm από την πηγή, ενώ αντίστοιχα εμφανίζεται πτώση στα 9 cm και στα 19 cm. Οι καμπύλες δείχνουν να ομαλοποιούνται από τα 29 cm και πάνω. Οι αυξομειώσεις είναι της τάξης των 20 – 100 dB-SPL.

Στα 30, 40 και 50 mJ παρατηρείται ότι υπάρχουν οι αυξομειώσεις της στάθμης ηχητικής πίεσης στα 9 και 14 cm αλλά πιο μικρής τάξης, και σε μεγαλύτερες αποστάσεις η στάθμη μειώνεται ομαλά.

Όσο αφορά στα αποτελέσματα σε σχέση με την απόσταση από την πηγή, παρατηρείται ότι υπάρχει μία εκθετική αύξηση της στάθμης ηχητικής πίεσης όσο ανεβαίνουμε συχνοτικά. Παρατηρείται ότι σε κάθε απόσταση υπάρχει απότομη αύξηση της στάθμης ηχητικής πίεσης σε ολόκληρο το συχνοτικό περιεχόμενο όταν η ενέργεια των παλμών λέιζερ είναι 15 mJ. Επίσης υπάρχει μία αντίστοιχη πτώση στα 20 mJ, και εν τέλει υπάρχει ομαλοποίηση της καμπύλης στα 30 mJ, από όπου εμφανίζει γραμμική αύξηση έως τα 80 mJ σε κάθε γράφημα. Οι απότομες αλλαγές της στάθμης ηχητικής πίεσης είναι πιο έντονες όσο ανεβαίνουμε συχνοτικά, είτε έχουμε αύξηση είτε πτώση. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνει η απόσταση από την πηγή, οι διακυμάνσεις της στάθμης ηχητικής πίεσης μειώνονται και δεν υπάρχουν έντονες αλλαγές.

Τέλος, όσον αφορά τα αποτελέσματα της τυπικής απόκλισης, η πιο αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι πως σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη απόκλιση είναι 5 dB-SPL. Αυτό σημαίνει πως η διακύμανση των τιμών είναι πολύ μικρή και συνεπώς η εκκένωση του αέρα από τους παλμούς λέιζερ παρέχει μία πολύ αξιόπιστη πηγή ήχου. Μπορεί, επίσης, να ειπωθεί πως οι τιμές έχουν «επίκεντρο» τα 2000 με 5000 Hz και ότι όσο απομακρυνόμαστε από αυτό το «επίκεντρο» τόσο αυξάνεται η διαφορά των τιμών με εκθετικό τρόπο φτάνοντας στο μέγιστο της διαφοράς.

5. Συμπεράσματα & μελλοντική εργασία

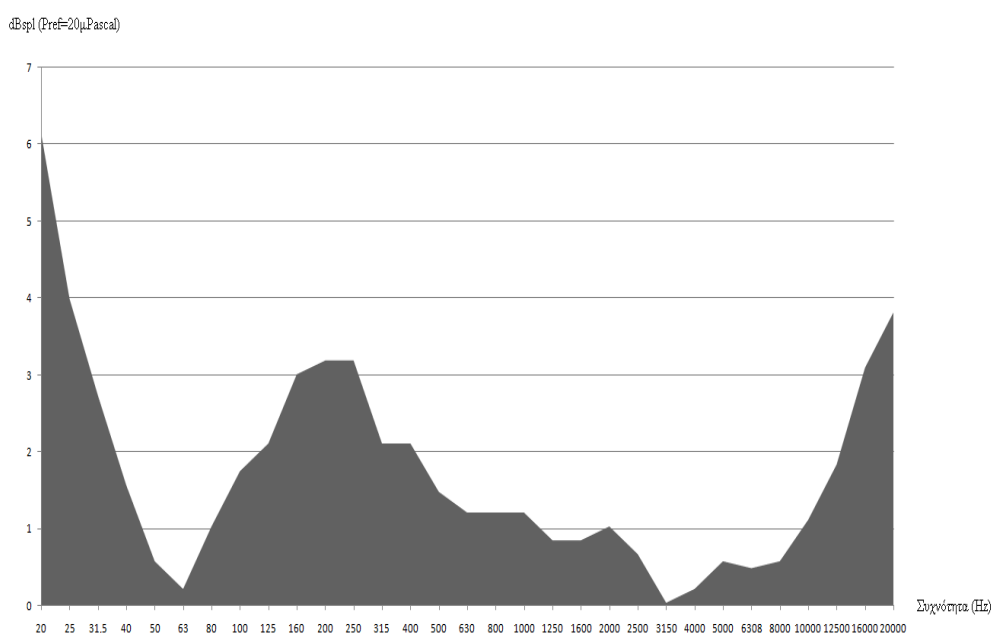
Συνοψίζοντας, στην εργασία αυτή μελετήθηκε πηγή ήχου παραγόμενη από εκκενώσεις του ΠΠΛ ως προς τη χρηστικότητα της σε ακουστικές μετρήσεις. Για το σκοπό αυτό υλοποιήθηκε διάταξη στο Εργαστήριο Ακουστικής & Οπτικής Τεχνολογίας του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Τ.Ε.Ι. Κρήτης, όπου και έλαβαν χώρα οι πειραματικές μετρήσεις για τον προσδιορισμό του συχνοτικού περιεχομένου της πηγής, τόσο σε συνάρτηση με την ενέργεια των παλμών λέιζερ όσο και με την απόσταση από την πηγή. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι πρόκειται για μία πηγή η οποία έχει ελάχιστες διακυμάνσεις, όσον αφορά τη στάθμη ηχητικής πίεσης, και ότι οι διαφορές στις τιμές ακολουθούν μία συγκεκριμένη πορεία σε κάθε περίπτωση. Επομένως, η μελέτη αυτή ανέδειξε τη χρησιμότητά της σε ακουστικές μετρήσεις, ενώ επίσης υπάρχουν δυνατότητες για την εξέλιξη μιας τέτοιας πηγής ήχου.

a. Σύγκριση ΠΠΛ με γνωστές πηγές ήχου ακουστικής χρήσης

Όσον αφορά τα αποτελέσματα των μετρήσεων, γίνεται σύγκριση της συχνοτικής απόκρισης δωδεκάεδρου ηχείου και της εκκένωσης με τη χρήση ηλεκτροδίων που δείχθηκε στο κεφάλαιο 2 με αυτή του ΠΠΛ.

Για την άμεση σύγκριση της αναπτυχθείσας πηγής με δωδεκαεδρικό ηχείο εξήχθηκε η τυπική απόκλιση του τελευταίου με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία [2] και παρουσιάζεται στην εικόνα 20. Παρατηρείται ότι οι διακυμάνσεις είναι περίπου στο ίδιο επίπεδο με αυτές του ΠΠΛ καθώς η μέγιστη διαφορά των τιμών είναι 6dB. Ωστόσο αξίζει να γίνει περαιτέρω σχολιασμός για την διευκρίνηση των πλεονεκτημάτων του λέιζερ σε σύγκριση πάντα με το δωδεκάεδρο ηχείο. Πρώτα απ' όλα ο ΠΠΛ είναι μία απόλυτα σφαιρική πηγή. Αυτό σημαίνει ότι, δεν υπάρχει καμία ανάκλαση, περίθλαση, διάθλαση ή απορρόφηση από πλευράς της πηγής σε αντίθεση με το δωδεκάεδρο ηχείο, όπου οι επιφάνειες στις οποίες είναι εγκατεστημένες τα ηχεία παρουσιάζουν όλα τα προηγούμενα φαινόμενα. Συνεπώς, μιλάμε για μία πηγή ήχου η οποία θα έχει πολύ πιο ακριβή αποτελέσματα σε ακουστικές μετρήσεις από οποιοδήποτε άλλη. Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που παρουσιάζει ο ΠΠΛ είναι ότι ο ήχος που μπορεί να παράγει είναι ο πιο ισχυρός που μπορεί να δημιουργηθεί

σύμφωνα με τα σημερινά τεχνολογικά δεδομένα. Σκεπτόμενοι το γεγονός ότι ήδη από τα 7 mJ η ανώτερη στάθμη ηχητικής πίεσης ήταν στα 172 dB-SPL, ενώ η ανώτερη τιμή που κατεγράφη ήταν τα 228 dB-SPL, είναι κατανοητό ότι μπορούν να υπάρξουν πολύ μεγαλύτερες τιμές ηχητικής πίεσης. Αντίθετα ένα δωδεκάεδρο ηχείο ίσως να λειτουργούσε ως τα 120 dB-SPL ομαλά, αλλά σε μεγαλύτερες στάθμες θα επέρχονταν μηχανική καταστροφή. Οπότε, μπορούμε να πούμε ότι θεωρητικά ο ΠΠΛ μπορεί να καλύψει το μέγιστο χώρο για ακουστικές μετρήσεις από οποιαδήποτε άλλη πηγή, ελεγχόμενη από τον άνθρωπο.



Εικόνα 20: Τυπική απόκλιση τιμών ηχητικής στάθμης πίεσης για δωδεκαεδρικό ηχείο όπως αυτή εξήχθη από τα διαθέσιμα στοιχεία [2].

Όσον αφορά την εκκένωση με τη χρήση ηλεκτροδίων, και με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία [1], φαίνεται ότι υπάρχει σαφές πλεονέκτημα του ΠΠΛ καθώς η συμπεριφορά του τελευταίου παραμένει σταθερή σε διαφορετικές γωνίες σε αντίθεση με την πρώτη. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι σε πολύ μικρή απόσταση η συμπεριφορά του ήχου στα 5 mm απόστασης των ηλεκτροδίων υπάρχει μία αρκετά καλύτερη απόκριση ωστόσο και πάλι παραμένει ελαττωματικός σε σχέση με τον ΠΠΛ.

b. Δυνατότητες του ΠΠΛ

Η έρευνα αυτή δίνει δυνατότητες για περαιτέρω ανάπτυξη και εξέλιξη της χρηστικότητας των εκκενώσεων που παράγει ο ΠΠΛ. Περιγράφονται παρακάτω σκέψεις του γράφοντος σχετικά με τις διάφορες δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει ο ΠΠΛ.

i. Η χρήση του ΠΠΛ σε μοντέλα κλίμακας και άλλους χώρους

Όταν γίνεται μία ακουστική μελέτη για ένα χώρο ο οποίος πρόκειται να σχεδιαστεί, αρχικά δημιουργείται ένα μοντέλο το οποίο έχει παρεμφερή υλικά με το πραγματικό. Σε αυτό το μοντέλο πραγματοποιείται η ακουστική μελέτη έτσι ώστε να υπάρχει μία καλή ένδειξη για τη συμπεριφορά του πραγματικού χώρου, προλαμβάνοντας κάθε λογής προβλήματα που μπορεί να υπάρχουν. Αυτά τα μοντέλα (γνωστά ως μοντέλα κλίμακας) δημιουργούνται έτσι ώστε να έχουν τις ίδιες αναλογίες αλλά να είναι σαφώς μικρότερα. Έτσι αν θέλουμε να δούμε την ακουστική συμπεριφορά του πραγματικού χώρου στα 100 Hz, αρκεί να μελετηθεί το μοντέλο στη συχνότητα η οποία είναι πολλαπλασιασμένη τόσες φορές όσες είναι ελαχιστοποιημένο το μοντέλο. Για παράδειγμα αν το μοντέλο είναι υπό-δεκαπλάσιο, τότε η μελέτη του πραγματικού χώρου στα 100 Hz θα αντιστοιχεί στα 1000 Hz στο μοντέλο κλίμακας. Ο ΠΠΛ μας έδειξε ότι έχει μία πολύ σταθερή συμπεριφορά από τα 1000 Hz και έπειτα. Πιο συγκεκριμένα παρατηρώντας τους αντίστοιχους πίνακες στο κεφάλαιο 4, βλέπουμε ότι από τα 14 cm, θέτοντας την ενέργεια του ΠΠΛ από 30 mJ και πάνω μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις μετρήσεις από τα 1000 Hz και πάνω. Συνεπώς, η χρηστικότητα της πηγής αυτής είναι πολύ καλή για μοντέλα κλίμακας.

Ένα ακόμη πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι πως με τη χρήση κατάλληλων οπτικών μέσων μπορεί να γίνει η εκκένωση του αέρα σε μεγαλύτερες αποστάσεις των 5 cm (όπως έγινε στην παρούσα εργασία). Αυτό σημαίνει πως χώροι με δύσκολη έως αδύνατη πρόσβαση από τον άνθρωπο δεν αποτελούν πρόβλημα για την ακουστική μελέτη τους καθώς η εστίαση της δέσμης φωτός θα μπορούσε να γίνει ακόμη και σε πολλά μέτρα μακριά από το λέιζερ με κατάλληλες διατάξεις.

ii. Αξιοποίηση της διάρκειας του ΠΠΛ

Η εκκένωση από τον ΠΠΛ έχει διάρκεια της τάξης του 6 ns. Αυτό σημαίνει πως ο ήχος που παράγεται μπορεί να ληφθεί ως Dirac συνάρτηση η οποία χρησιμεύει στην εξαγωγή κρουστικής απόκρισης των χώρων. Σε συνδυασμό με το ηχητικό φάσμα που έχει ο ίδιος ο ΠΠΛ θα δημιουργούνται ένας ήχος σύμφωνα με την τεχνική της προσθετικής σύνθεσης, σύμφωνα με τη θεωρία σύνθεσης ήχου. Συνεπώς, με κατάλληλο προγραμματισμό συσκευών οι οποίες θα έχουν έλεγχο του ΠΠΛ μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως ένα ψηφιακό σήμα. Επίσης, προσθέτοντας τον παράγοντα της μεταβλητότητας της διεύθυνσης της παραγωγής ήχου, μιλάμε για μία εντελώς καινούρια παράμετρο όπου η πηγή ήχου μεταβάλλει συνεχώς τη θέση της σε ένα χώρο.

iii. Υπέρηχοι και ωστικά κύματα

Ο ΠΠΛ εκτός από το ανθρωπίνως ακουστό φάσμα μπορεί να παράγει και υπερήχους της τάξης MHz, αναλόγως και με τη διάρκεια του χρησιμοποιούμενου παλμού λέιζερ. Επίσης, η ενέργεια που μπορεί να έχει ο ΠΠΛ έχει τεράστιο εύρος και μπορούν να γίνουν πολλών ειδών μελέτες και σε άλλα επίπεδα της ακουστικής, όπως στη μελέτη ωστικών κυμάτων.

Οι υπέρηχοι είναι ηχητικά κύματα που έχουν μεγάλη συχνότητα και δεν είναι ακουστά από τον άνθρωπο. Ωστόσο, τον έχουν βοηθήσει μέχρι σήμερα σε πολλές εφαρμογές του. Μία από αυτές είναι στην εύρεση ανωμαλιών σε μεταλλικά αντικείμενα που είναι πολύ μικρά. Ακόμη, με την εφαρμογή υπερήχων σε ραντάρ για τη μέτρηση αποστάσεων αλλά και την ανίχνευση αντικειμένων στο νερό. Έπειτα, οι υπέρηχοι έχουν αποδειχτεί χρήσιμοι σε διεργασίες μεγάλης κλίμακας όπως η γαλακτοματοποίηση, η ομογενοποίηση, η εκχύλιση, η κρυσταλλοποίηση, η αφυδάτωση και άλλες. Τέλος, στον τελευταίο αιώνα οι υπέρηχοι έχουν βοηθήσει πολύ με τις πολλαπλές εφαρμογές στην ιατρική. Είναι δυνατόν να γίνουν διαγνώσεις όγκων ή γενικότερα ανωμαλιών σε κάθε μέρος του ανθρώπινου σώματος, η διάγνωση εγκυμοσύνης καθώς επίσης υπάρχουν εφαρμογές για αντιμετώπιση παθήσεων όπως η πέτρα στα νεφρά.

Όσον αφορά τα ωστικά κύματα, αυτά είναι κύματα μοναδιαίου παλμού τα οποία έχουν ιδιαίτερη συμπεριφορά. Κάθε φορά που γίνεται μία έκρηξη δημιουργείται

ωστικό κύμα. Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η ακουστική συμπεριφορά της έκρηξης που δημιουργεί ο ΠΠΛ. Ένα τέτοιο ωστικό κύμα, λοιπόν, θα μπορούσε να έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Αρχικά, στην ιατρική ήδη τα ωστικά κύματα έχουν πολλές εφαρμογές. Ιδιαίτερα σε μυο-σκελετικές παθήσεις έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα ελπιδοφόρα. Δεύτερον, τα ωστικά κύματα υπό μορφή εκρηκτικών χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση του εδάφους για έρευνες και μελέτες ή εκσκαφές για την εξόρυξη μετάλλων κλπ. Γενικότερα το πεδίο αυτό είναι αρκετά ευρύ και επεκτείνεται σε πολλές πλευρές.

c. Σύνοψη συμπερασμάτων και τελικές παρατηρήσεις

Κατά την άποψη του γράφοντα υπάρχουν γενικότερα πάρα πολλές ιδέες για το πώς μπορεί να αξιοποιηθεί μία πηγή ήχου, όπως ο ΠΠΛ, και η περαιτέρω μελέτη αυτής της πηγής έχει να προσφέρει πολλά πράγματα και σε πολλούς τομείς όπως αναφέρθηκαν προηγουμένως, αλλά πιθανών και σε ακόμη περισσότερους. Ως πηγή ήχου είναι πολύ καινούρια και οι περισσότερες δυνατότητές της, όπως είναι φυσικό, δεν είναι προς το παρόν φανερές.

Αξίζει στο σημείο αυτό να συνοψισθούν οι κύριες αδυναμίες και περιορισμοί της παρούσας μελέτης. Κατά πρώτον, υπήρξαν μερικές αδυναμίες ως προς τη μελέτη του ηχητικού φάσματος που παρήγαγε ο ΠΠΛ. Ο χώρος στον οποίο έγινε η όλη μελέτη ήταν περιορισμένος και έτσι υπήρχαν ανακλάσεις. Συνεπώς, στις χαμηλές συχνότητες δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί τη στάθμη ηχητικής πίεσης εντελώς αξιόπιστα. Επίσης, υπήρχαν συσκευές στο χώρο αναγκαίες οι οποίες παρήγαγαν θόρυβο ο οποίος ήταν αρκετά υψηλός. Ως αποτέλεσμα σε πολλές μετρήσεις, η στάθμη του θορύβου βάθους ήταν μεγαλύτερος από τα -3dB της ηχητικής στάθμης των μετρήσεων και δεν μπορούσαμε να έχουμε τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, οι μετρήσεις είχαν, εν γένει, ικανή ακρίβεια όσον αφορά τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και τη μεθοδολογία η οποία ήταν πολύ συγκεκριμένη. Ο γράφοντας θεωρεί ότι η εργασία αυτή αποτελεί ένα μικρό λίθο για την εξέλιξη της πηγής ήχου από την παλμική πηγή λέιζερ, και ότι στο θα υπάρξουν μεγάλες δυνατότητες για την εξέλιξη αυτής της πηγής.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] C. Ayrault, P. Béquin, and S. Baudin, *Characteristics of a spark discharge as an adjustable acoustic source for scale model measurements*, Proceedings of the Acoustics 2012 Conference, pp. 3549-3553, Nantes, France (23-27 April 2012).
- [2] Real Acoustix / RealDodec 1204-A Frequency Response and SPL Charts (<http://www.realacoustix.com/RealDodec.html>).
- [3] Δημήτρης Σκαρλάτος, *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, Τρίτη Έκδοση, Πάτρα (2008).
- [4] ISO 3382:1997, *Acoustics-Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, and ISO 3382-1:2009, *Acoustics-Measurement of room acoustic parameters-Part 1: Performance spaces* (<http://www.iso.org>)
- [5] C.D. Hodgman, and L.A. Norbert, *Handbook of Chemistry and Physics*, 10th Edition, Chemical Rubber Publishing Co, Cleveland (1999-2000).
- [6] Σ. Μπρέζας, Α. Κάππης, Ι. Ορφανός, Ε. Μπακαρέζος, Μ. Ταταράκης, και Ν. Α. Παπαδογιάννης, *Δημιουργία και μελέτη υπέρηχων στον ατμοσφαιρικό αέρα με τη χρήση υπερβραχέων παλμών laser*, Ακουστική 2010, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα, 4-6 Οκτωβρίου 2010, Πρακτικά σσ. 536-542, Ed.: Ε.Μ.Π., 2010.
- [7] V.V. Krylov, *On the theory of surface acoustic wave generation by electric spark discharge*, J. Phys. D: Appl. Phys. **21**, 155 (1992).
- [8] V.B. Georgiev, V.V. Krylov, Q. Qin, and K. Attenborough, *Generation of flexural waves in plates by laser-initiated airborne shock waves*, Journal of Sound and Vibration **330**, 217 (2011).
- [9] Y.B. Zel'dovich, and Y.P. Raiser, *Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena 1 and 2*, Academic Press, New York (1967).
- [10] J.G. Bolaños, V. Pulkki, P. Karppinen, and E. Hæggström, *An optoacoustic point source for acoustic scale model measurements*, J. Acoust. Soc. Am. **133**, EL221 (2013).
- [11] P. V. Yuldashev, M. V. Averiyarov, V. A. Khokhlova, S. Ollivier, and Ph. Blanc-Benon, *Nonlinear spherically divergent shock waves propagating in a relaxing medium*, Acoust. Phys. **54**, 32 (2008).
- [12] BrilliantB Instruction Manual, QUANTEL.