



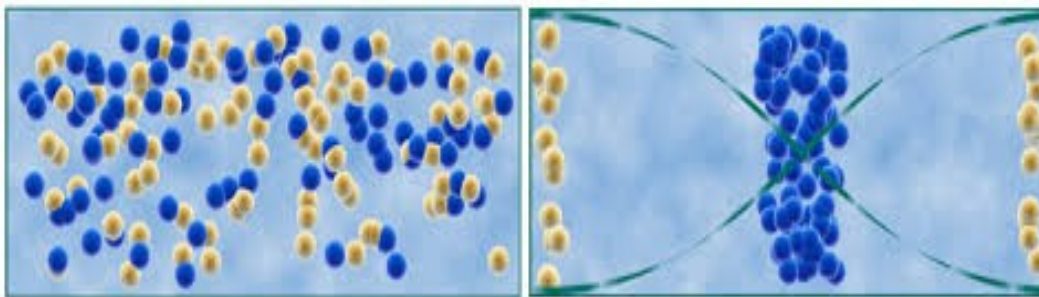
ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ: ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση κατανομής και διαχωρισμού σωματιδίων σε ακουστικό σωλήνα.



ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΧΟΡΟΖΟΓΛΟΥ ΑΜ:1411

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΚΑΝΕΛΛΟΠΟΥΛΟΣ ΑΜ:880

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ ΠΑΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ

Περίληψη- Σκοπός πτυχιακής

Η χρήση ακουστικών κυμάτων για τον έλεγχο και διαχωρισμό σωματιδίων μπορεί να βρει πολλές εφαρμογές όπως για παράδειγμα στην ιατρική (στα κύτταρα ή στο πλάσμα του αίματος), έχει πολύ μεγάλο επιστημονικό ενδιαφέρον. Αυτός ο έλεγχος και διαχωρισμός μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, δυο από αυτούς είναι η εξ' αποστάσεως δημιουργία ακουστικής δύναμης και η ακουστική ροή που προκαλεί οπισθέλκουσες κινήσεις. Οι δυο αυτές μέθοδοι σε συνδυασμό παράγουν την δύναμη ακουστοφόρησης(acoustophoretic).Δηλαδή την κίνηση των σωματιδίων προκαλούμενη από ακουστική «ακτινοβολία». Σκοπός αυτής της πτυχιακής εργασίας είναι να δείξουμε σε ποιες συχνότητες γίνεται εφικτός ο διαχωρισμός σωματιδίων σε ένα δισδιάστατο χώρο με την χρήση της ακουστικής ενέργειας. Σε ποιες συχνότητες δηλαδή θα συντονιστούν τα σωματίδια μέσα σε ένα ορισμένο χώρος (από την ακουστική ακτινοβολία),και θα δημιουργηθούν στάσιμα κύματα και πως με την δύναμη ακουστοφόρησης θα γίνει η κατανομή των σωματιδίων, τα οποία κοινούνται προς τις κοιλίες πίεσης που δημιουργούνται στο σύστημα. Αρχικά η κατανομή αυτή έγινε σε διάφορες συχνότητες καθώς και σε διαφορετικό αέριο μέσο διάδοσης (αέρας, Υδρογόνο, Ξένο). Παρουσιάζονται υπολογισμοί και συγκεκριμένες σχηματικές απεικονίσεις σε κάποιες συχνότητες συντονισμού, και δείχνονται πως κατανέμεται στο χώρο η ακουστική πίεση και πως κατανέμονται τα σωματίδια ανάλογα την συχνότητα και το μέσο διάδοσης. Επίσης εξετάζουμε τι γίνεται στην περίπτωση όταν υπάρχουν σωματίδια με διαφορετική διάμετρο (δηλαδή διαφορετικό μέγεθος) στο χώρο. Δείχνουμε ότι είναι δυνατός ο διαχωρισμός (ελαφριά από βαρέα) τα οποία και διαχωρίζονται στις κοιλίες και στους δεσμούς των στάσιμων κύματων. Αποδεικνύουμε λοιπόν ότι με την χρήση υπερήχων είναι εφικτή αυτή η κίνηση του διαχωρισμού των σωματιδίων καθώς επίσης και σε ποιες συχνότητες το φαινόμενο μεγιστοποιείτε.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον Δρ. Νεκτάριο Παπαδογιάννη , για την στήριξή τους καθ' όλη την διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας με της πολύτιμες γνώσεις που μας προσέφερε και για την αμέριστη κατανόηση που έδειξε.

Ευχαριστούμε τον Στέλιο Πετρακη για την στήριξη του σε γνώσεις άλλα και για την πολύ χρήσιμη βοήθεια του για την εκμάθηση και υλοποίηση του προγράμματος, η οποία ήταν απαραίτητη για την τελειοποίηση του πειράματος .

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τι είναι μηχανικό κύμα.....	[5]
1.2 Κυματική εξίσωση.....	[6]
1.3 Ταχύτητα του ήχου.....	[7]
1.4 Συμβολή ηχητικών κυμάτων.....	[8]
1.5 Στάσιμα κύματα.....	[9]
1.6 Στάσιμα κύματα σε ακουστικό σωλήνα.....	[10]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΔΟΜΗΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

2.1 Ανάλυση πειράματος.....	[13]
2.2 Καταγραφή τροχιών σωματιδίων (Particle tracing).....	[19]
2.3 Ακουστοφόρηση (Acoustophoresis).....	[20]
2.4 Δομή πλέγματος (mesh).....	[22]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Τροποποίηση πειράματος.....	[24]
3.2 Αλλαγή επιτάχυνσης.....	[37]
3.3 Τροποποίηση με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο.....	[39]
3.4 Διαχωρισμός σωματιδίων.....	[42]
3.5 Διαχωρισμός σε διαφορετικό μέσο διάδοσης.....	[53]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ (εφαρμογές μεθόδου)

4.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων-συμπεράσματα εφαρμογές μεθόδου.....	[59]
---	------

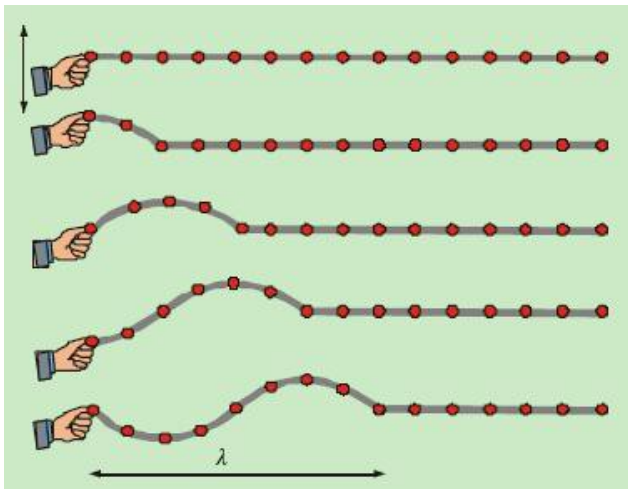
<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	[62]
----------------------------------	------

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΕΙΣΑΓΩΓΗ

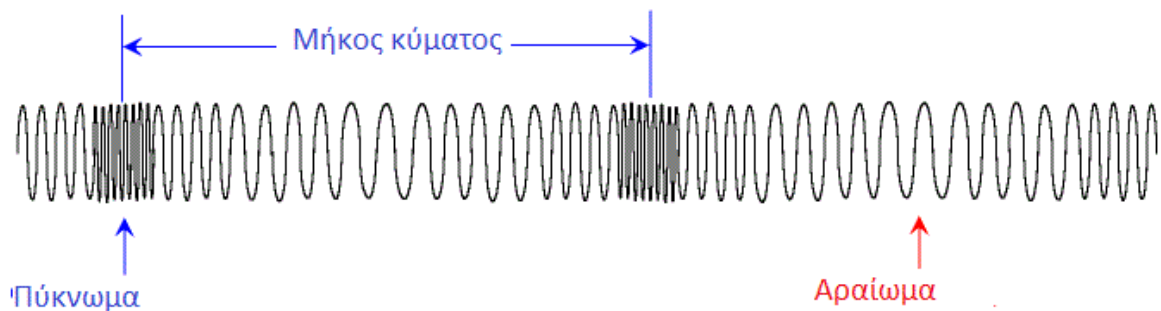
1.1 Τι είναι μηχανικό κύμα;

Κύμα ονομάζουμε την διάδοση μιας διαταραχής σε κάποιο μέσο διάδοσης (όπως ο αέρας). Αυτή η διάδοση μεταφέρει ενέργεια και ορμή με σταθερή ταχύτητα που εξαρτάται από το μέσο. Ποιο συγκεκριμένα μια πηγή παράγει μια διαταραχή σε κάποιο μέσο στο οποίο θα ταλαντωθούν τα μόρια (του μέσου) και λόγω της σύζευξης των ταλαντωτών η διαταραχή αυτή θα μεταδοθεί. Έτσι για παράδειγμα με αυτόν τον τρόπο ο ήχος (δηλ. το ηχητικό κύμα) μεταδίδεται στον χώρο. Αν τα σωματίδια του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται κάθετα της διεύθυνσης διάδοσης του κύματος, τότε

το κύμα λέγεται εγκάρσιο. Σε αντίθετη περίπτωση που η ταλάντωση των μορίων κινείται παράλληλα με την διεύθυνση του κύματος λέγεται διαμήκης.



Σχήμα 1.1: Απεικόνιση εγκάρσιωνκυμάτων (η διαταραχή- κύμα έχει κατεύθυνση προς τα δεξιά ενώ τα σωματίδια προς τα πάνω/κάτω)



Σχημα1.2:Απεικόνιση διαμήκους κύματος (η διαταραχή μεταδίδεται από τα αριστερά στα δεξιά και τα σωματίδια το ίδιο)

Τα ηχητικά κύματα είναι, κυρίως, διαμήκη κύματα. Υπάρχει μια πηγή που παράγει το ηχητικό αυτό κύμακαι το κύμα διαδίδεται μέσω πυκνωμάτων και αραιώματων στα σωματίδια του μέσου (δηλαδήσημεία με μεγάλη πίεση και πυκνότητα -πυκνώματα- και ελάχιστη πίεση και -αραιώματα- στο μέσοδιάδοσης).

1.2 Κυματική εξίσωση

Όταν μια επίπεδη επιφάνεια παράγει κάποιο ηχητικό κύμα τότε το κύμα λέγεται επίπεδο. Σε έναν μονοδιάστατο χώρο (x , απομάκρυνση και t ο χρόνος, c η ταχύτητα του ήχου) η πίεση, P , του ηχητικού κύματος εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\frac{d^2 P}{dt^2} = \frac{c^2 d^2 P}{dx^2}$$

Ενώ για τις τρεις διαστάσεις :

$$\frac{d^2 P}{dx^2} + \frac{d^2 P}{dy^2} + \frac{d^2 P}{dz^2} = \frac{1}{c^2} \frac{d^2 P}{dt^2}$$

Η παραπάνω σχέση ονομάζεται κυματική εξίσωση και είναι μερική διαφορική εξίσωση και χρησιμοποιείται για την περιγραφή φαινομένων (όπως πίεσης) στα ηχητικά κύματα.

Το κύμα διαδίδεται με σταθερή ταχύτητα c προς όλες τις χωρικές κατευθύνσεις. Η κυματική εξίσωση έχει εφαρμογή στην εύρεση στασίμων κυμάτων κάτω από καθορισμένες συνοριακές συνθήκες.

1.3 Ταχύτητα του ήχου

Η σταθερά c όπως έχουμε αναφέρει είναι η ταχύτητα διάδοσης του ήχου. Η ταχύτητα δηλαδή με την οποία μεταδίδεται ο ήχος σε κάποιο μέσο διάδοσης. Η ταχύτητα αυτή υπολογίζεται από την μέτρηση της χρονικής διάρκειας που κάνει ένα κύμα να μεταδοθεί από την πηγή στο σημείο ανίχνευσης σε καθορισμένη απόσταση. Στα διαμήκη κύματα, η ταχύτητα του ήχου σε ρευστό μέσο διάδοσης δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$c = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (1.1)$$

Όπου B είναι το μέτρο συμπίεστότητας όγκου των ρευστών και ρ η πυκνότητα του μέσου διάδοσης. Όταν το ρευστό που διαδίδεται κάποιο διαμήκες κύμα είναι αέριο η μεταβολή της κατάστασης των αέριων είναι:

$$P V^\gamma = \text{σταθερο} (1.2)$$

Όπου γ είναι ο λόγος ειδικής θερμότητας υπό σταθερή πίεση του αερίου δια την ειδική θερμότητα υπό σταθερό όγκο και V_0 όγκος.

Το μέτρο συμπιεστότητας όγκου δύνεται από την σχέση:

$$B = -V \frac{dP}{dV} \quad (1.3)$$

Λογαριθμίζοντας την σχέση 1.2 έχουμε:

$$\ln P + \gamma \ln V = \text{σταθερο} (1.4)$$

Με διαφορίση της 1.4 έχουμε:

$$\frac{dP}{P} + \gamma \frac{dV}{V} = 0 (1.5)$$

Κάνοντας αντικατάσταση της σχέσης 1.3 στην 1.5 προκύπτει:

$$-\frac{dP}{dV} V = \gamma P = B (1.6)$$

Επίσης ισχύει:

$$P = \rho \frac{RT}{MB} (1.7)$$

Όπου R σταθερά των αερίων (για ιδανικά αέρια $R=8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) και MB είναι το μοριακό βάρος του αερίου και T η απόλυτη θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin.

Από την 1.1, 1.6 και 1.7 προκύπτει:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{MB}} (1.8)$$

Για θερμοκρασία 00C (273 K) η ταχύτητα του ήχου στον ατμοσφαιρικό αέρα είναι $c=331 \text{ m/s}$

Όπως παρατηρείται από την σχέση 1.8 η ταχύτητα του ήχου εξαρτάται άμεσα από το μοριακό βάρος του μέσου διάδοσης . Δηλαδή από την μάζα των μορίων του αερίου που καταλαμβάνει τον υπό μελέτη χώρο. Όταν αλλάζει δηλαδή το μέσο διάδοσης, άρα και οι μάζες των μορίων του μέσου, αυτόματα μεταβάλλεται και η ταχύτητα του ήχου. Έτσι έχουμε $c=331\text{m/s}$ στον αέρα, $c=1270\text{m/s}$ στο Υδρογόνο, $c=319\text{m/s}$ στο Αργό, $c=1007\text{m/s}$ στο Ήλιο, $c=178\text{m/s}$ στο Ξένο.

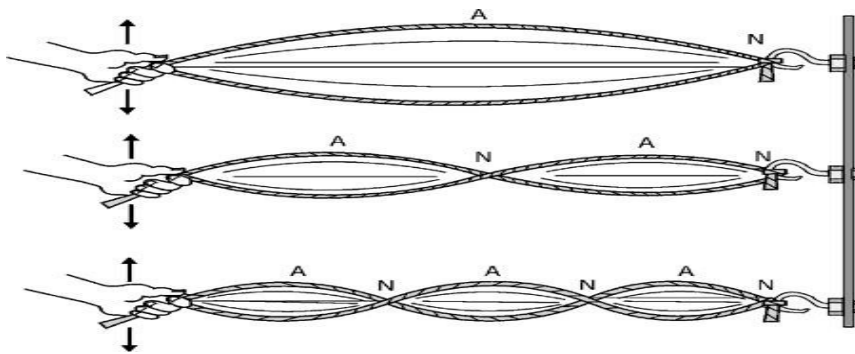
Άρα σε έναν χώρο όταν βρίσκονται δυο αέρια που έχουν διαφορετική μοριακή μάζα θα μπορούσαμε να εξετάζουμε τις συνθήκες που μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός αυτών των αέριων μέσω ακουστικού πεδίου ηχητικών κυμάτων.

1.4 Συμβολή ηχητικών κυμάτων

Όταν σε να χώρο εκτός από το ηχητικό κύμα το οποίο προέρχεται από την πηγή υπάρχουν και αλλά κύματα (που ενδέχεται να προέρχονται και από ανακλάσεις του αρχικού κύματος) τότε εμφανίζεται το φαινόμενο της συμβολής. Συμβολή είναι λοιπόν η «ένωση» δυο κυμάτων σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου κάθε χρονική στιγμή. Συμβάλουν τα δυο αυτά κύματα μεταξύ τους και είτε υπάρχει ενισχυτική συμβολή (αυξάνεται η πίεση σε εκείνο το σημείο) είτε ακυρωτική συμβολή (μειώνεται η πίεση έως και μηδενίζεται). Αυτό εξαρτάται από την φάση και την σχετική ένταση των δυο κυμάτων. Ανάλογα από τις διαστάσεις του χώρου αλλά και την συχνότητα του συνολικού κύματος μπορούν να δημιουργηθούν στάσιμα κύματα στα σημεία του χώρου.

1.5 Στάσιμα κύματα

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει όταν η πηγή εκπέμπει ένα επίπεδο κύμα και αυτό ανακλαστεί σε κάποια επιφάνεια με κατεύθυνση προς την αντίθετη από το αρχικό, τότε υπάρχουν οι συνθήκες για να δημιουργηθούν στάσιμα κύματα στον χώρο. Ο αριθμός των δεσμών των στάσιμων κυμάτων που θα δημιουργηθούν σε ένα χώρο εξαρτάται άμεσα από την συχνότητα του κύματος και από την γεωμετρία του χώρου. Τα σχήματα που λαμβάνουν τα δημιουργούμενα στάσιμα κύματα ονομάζονται κανονικοί τρόποι ταλάντωσης (normal modes) και οι αντίστοιχες συχνότητες που αυτά λαμβάνουν χώρα ονομάζονται κανονικές συχνότητες συντονισμού (normal frequencies).



Σχήμα 1.3: Δημιουργία στάσιμων κυμάτων σε χορδή για τα modes, $n=1, n=2$ και $n=3$. Δημιουργούνται κοιλίες (A-Antinodes) και δεσμοί (N-Nodes) ανάλογα με την συχνότητα διέγερσης της χορδής.

Σε έναν μονοδιάστατο χώρο η μετατόπιση του κύματος y_1 είναι:

$$y_1(x, t) = y_{01} \sin(\omega t - kx) \quad (1.9)$$

Όπου y_{01} το πλάτος του κύματος, ω η γωνιακή ταχύτητα $\omega = 2\pi f$ (rad/s), x το σημείο

μετατόπισης (m), t ο χρόνος (s) και k ο κυματάριθμος (1/m), $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ όπου λ το

μήκος κύματος. Το μείον πριν το k στην εξίσωση δηλώνει την κατεύθυνση του κύματος, (εδώ μείον σημαίνει από αριστερά προς στα δεξιά).

$$y_2(x, t) = y_{02} \sin(\omega t + kx) \quad (1.10)$$

Η εξίσωση για το y_2 είναι ένα άλλο κύμα που μπορεί να προέρχεται και από την ανάκλαση του y_{01} έχει σίγουρα αντίθετη φορά από το πρώτο (+ μπροστά από το k).

Αφού έχουν αντίθετη κατεύθυνση τα δυο αυτά κύματα σε κάποια σημεία του χώρου θα ενωθούν και θα υπάρξει το φαινόμενο της συμβολής. Αν υποθέσουμε ότι πρόκειται για ένα κύμα και την ανάκλαση του (y_{02}) με αντίθετη κατεύθυνση από το αρχικό. Θεωρούμε ότι από την ανάκλαση δεν υπήρχαν απώλειες πλάτους και έτσι ισχύει $y_{01} = y_{02}$. Τότε από την άθροιση των κυμάτων έχουμε:

$$y_R = 2 y_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \omega t \quad (1.11)$$

y_R λοιπόν είναι ημονοδιάστατη εξίσωση του στάσιμου κύματος που έχει την ίδια συχνότητα με την αρχική αλλά διαφορετικό πλάτος. Το νέο πλάτος του στάσιμου

κύματος είναι: $A = 2y_0 \cos \frac{2\pi x}{\lambda}$.

1.6 Στάσιμα κύματα σε ακουστικό σωλήνα

Ένας πολύ ενδιαφέρον τρόπος παράγωγης στάσιμων κυμάτων είναι αυτός που λαμβάνει χώρα στους ακουστικούς σωλήνες. Τα τοιχώματα λειτουργούν ως κυματοδηγοί οδηγώντας το ηχητικό κύμα (που παράγεται από μια πηγή στην μια πλευρά του σωλήνα) στην άλλη πλευρά. Εκεί το κύμα θα ανακλασθεί με μια κλειστή επιφάνεια (κλειστός-κλειστός σωλήνας) είτε με την αέρινη στιβάδα που έχει οδηγεί σε χώρο με διαφορετική ακουστική εμπέδηση (κλειστός-ανοιχτός σωλήνας). Το ανακλώμενο κύμα θα συμβάλει με το αρχικό δημιουργώντας έτσι στάσιμο κύμα.

Ποιο συγκεκριμένα στην περίπτωση του κλειστού ανοιχτού σωλήνα υπάρχει δεσμός μετατόπισης στην κλειστή πλευρά του σωλήνα ενώ κοιλία στο ανοιχτό. Όταν φτάσει το κύμα στην επιφάνεια του σωλήνα το κύμα ανακλάται πίσω από τα σωματίδια του αέρα (προφανώς κάποια ενέργεια του κύματος διαχέεται στον εξωτερικό χώρο μέσω ταλάντωση των σωματιδίων). Με αυτήν την ανάκλαση συμβάλει με το αρχικό κύμα και δημιουργείται στάσιμο κύμα. Για τον κλειστό-κλειστό σωλήνα Ησχέση που σχετίζει την συχνότητα συντονισμού με το μήκος του σωλήνα είναι:

$$f_n = \frac{cn}{4L}, n=1,3,5,7 \dots (1.12)$$

n : είναι ο αριθμός των αρμονικών. Δηλώνει επίσης και τον αριθμό δεσμών που υπάρχουν. Για την περίπτωση κλειστού-ανοιχτού σωλήνα είναι ίσο με περιττούς αριθμούς 1,3,5,7. c : ταχύτητα του ήχου στο αέρα (m/s), L : μήκος του σωλήνα (m).

Κατά παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και στην περίπτωση όταν και τα δυο άκρα του σωλήνα είναι κλειστά (κλειστός - κλειστός). Υπάρχει δηλαδή μια επιφάνεια η οποία ανακλάται το κύμα και επιστρέφει πίσω όπου συμβάλει με το αρχικό και δημιουργείται στάσιμο κύμα. Προφανώς αφού και τα δυο άκρα είναι κλειστά θα

υπάρχουν δεσμοί μετατόπισης στα δυο άκρα. Η σχέση υπολογισμού της συχνότητας συντονισμού του σωλήνα είναι :

$$f_n = \frac{cn}{2L}, n=1,2,3,4,5 \dots \quad (1.13)$$

Όπως βλέπουμε και στις σχέσεις 1.12 και 1.13, το μήκος του σωλήνα L είναι αντίστροφος ανάλογο με την συχνότητα συντονισμού f_n . αυτό σημαίνει ότι όσο πιο μεγάλη είναι η συχνότητα τόσο πιο μικρό πρέπει να είναι το μήκος του σωλήνα για να υπάρχει συντονισμός. Αν δηλαδή η συχνότητα συντονισμού είναι την περιοχή των υπερήχων ($>20000Hz$) τότε το μήκος του σωλήνα θα πρέπει να είναι κάποια χιλιοστά. Για παράδειγμα αν σε κλειστό σωλήνα έχουμε συχνότητα συντονισμού $f=50000Hz$ και το αέριο μέσο μέσα στον σωλήνα είναι αέρας τότε το μήκος του σωλήνα θα πρέπει να είναι για $n=1$ και $c=343$ m/σίσο με $L=0.00343m$. Για τον 5^ο αρμονικό σε μήκος σωλήνα είναι $L=0.00145m$ και η συχνότητα συντονισμού θα είναι $f_5=59.1379Hz$. Έτσι, έναν σωλήνα με μήκος περίπου $0.00145m$ κλειστό και στα δυο άκρα θα χρησιμοποιήσουμε στην προσομοίωση του διαχωρισμού αλλά και της κατανομής των σωματιδίων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΔΟΜΗΣΗ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

2.1 Ανάλυση πειράματος

Για την προσομοίωση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε η εκπαιδευτική έκδοση του προγράμματος comsol που δίνεται για αρχική αξιολόγηση δωρεάν. Πρόκειται για ένα

λογισμικό περιβάλλον που περιέχει (προσομοιώνει) αληθινά φυσικά πειράματα. Δηλαδή έχει ιδομές στις οποίες ορίζουμε τα χαρακτηριστικά του υλικού καθώς και την γεωμετρία του, επίσης μαθηματικές και φυσικές δομές, οι οποίες λειτουργούν αναλόγως στο υλικό.

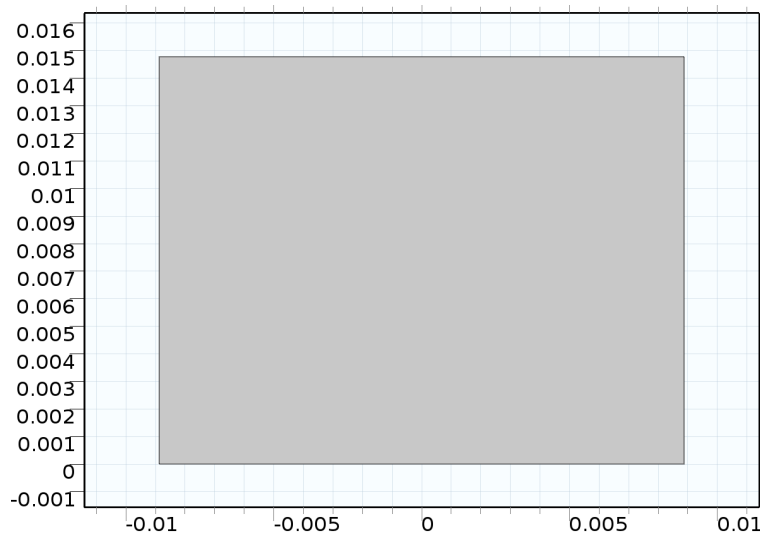
Συγκεκριμένα με το που δημιουργείται ένα το πείραμα το πρώτο πράγμα που δηλώνεις είναι την χωρική διάσταση του χώρου και την φυσική με τις οποίες θέλεις να ασχοληθείς. Στο πείραμα επιλέξαμε 2D χωρική διάσταση κι οι φυσικές εξισώσεις που θέλουμε να υπάρχουν μέσα στον γεωμετρικό χώρο είναι «pressureacoustic» και «particletracing forfluid flow» όπου το πρώτο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μεταβολής της ακουστικής πίεσης στον δεδομένο χώρο (γεωμετρικό) ενώ το δεύτερο χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κίνησης των σωματιδίων σε ένα ρευστό η οποία (η κίνηση) μπορεί να πραγματοποιηθεί με προσομοίωση δυνάμεων, όπως πχ βαρυτική, ακουστοφόρεσης και ηλεκτρομαγνητική δύναμη. Κάτι ακόμα που είναι απαραίτητο πριν ξεκινήσει το πείραμα είναι η επιλογή της μελέτης. Κάθε φυσική εξίσωση που έχουμε επιλέξει παραπάνω θα πρέπει να ορίζεται ή να εξαρτάται από μια επιμέρους μελέτη. Επειδή μας ενδιαφέρει η συχνότητα στην οποία γίνεται και πόσο χρόνο χρειάζεται για να γίνει μια κατανομή σωματιδίων επιλέγουμε να λύσουμε το πρόβλημα στο frequency domain με χρόνο εξάρτηση «time dependent». Αφού έχουμε επιλέξει και τις κατάλληλες συνθήκες ξεκινάει η υλοποίηση του πειράματος. Αρχικά το πρώτο πράγμα που ορίζουμε είναι οι παράμετροι δηλαδή οι μεταβλητές που θα χρειαστούν και θα εισαχθούν στις φυσικές εξισώσεις. Ορίζουμε λοιπόν στην επιλογή «parameters» τις μεταβλητές που θέλουμε, όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Name	Expression	Value	Description
f_0	58[kHz]	58000Hz	Συχνότητα συντονισμού
c_0	343[m/s]	343.00m/s	Ταχύτητα του ήχου
$Lambda$	c_0/f_0	0.0059139 m	Μήκος κύματος
d_p	$Lambda/10$	$5.9138 \times 10^{-4}m$	Διάμετρος σωματιδίου
rho_p	500[kg/m ³]	500.00 kg/m ³	Πυκνότητα σωματιδίου
α_0	$1.5 \times 10^6[m/s^2]$	$1.5000 \times 10^6m/s^2$	Normal acceleration of transducer

Πινάκας 1.1: Οι τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν.

Όπου, f_0 είναι η συχνότητα που δονούμε το αέριο (στην οποία θα γίνει η κατανομή σωματιδίων) την βάζουμε ίση με 58KHz και είναι μια καλή συχνότητα γιατί συντονίζει καλά το σύστημα όπως έχουμε προϋπολογίσει. c_0 είναι η ταχύτητα του ήχου. λ είναι το μήκος κύματος. d_p ορίζεται η διάμετρος του σωματιδίου και είναι δέκα φορές μικρότερη από το μήκος κύματος, αυτό γίνεται καθαρά για επηρεασμού των σωματιδίων από την δύναμη ακουστοφόρησης (να υπάρχει βαθμίδα ακουστικής πίεσης). ρ_p είναι η πυκνότητα σωματιδίων και α_0 η επιτάχυνση των σωματιδίων του μέσου. Αφού ορίσουμε τις μεταβλητές επόμενο στάδιο είναι η προσομοίωση του χώρου.

Γεωμετρικά προσομοιώνουμε ένα οποιονδήποτε σχήμα θέλουμε δυο διαστάσεων όπου εκεί μέσα, θα υλοποιηθεί το πείραμα. Έτσι κατασκευάσαμε ένα τετράγωνο με διαστάσεις 0.02m πλάτος και 0.0145m μήκος. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα καθώς και οι διαστάσεις του.



Σχημα1.1: οι διαστάσεις και το σχήμα του γεωμετρικού χώρου.

Το επόμενο στάδιο είναι η εισαγωγή των υλικών. Πρέπει δηλαδή να δηλώσουμε από τι υλικό είναι φτιαγμένο το γεωμετρικό σκεύος ή τι έχει στο εσωτερικό του μέσο. Δυστυχώς δεν μπορεί το πρόγραμμα (η έκδοση που είχαμε) να δεχθεί εισαγωγικές πληροφορίες με δύο διαφορετικά υλικά όπως για παράδειγμα να

ορίζουμε ότι η περίμετρος του δισδιάστατου δοχείου (boxboundary) είναι πλαστικό και το εσωτερικό του είναι αέρας. Στην επιλογή υλικό λοιπόν πρέπει να επιλεγεί ο χώρος στον οποίο να ορίζουμε το μέσο που τον διαπερνά. Ορίσαμε λοιπόν το εσωτερικό του τετραγώνου και επιλέξαμε αέρα. Αέρας θα είναι λοιπόν το μέσο που γεμίζει τον χώρο.

Στον παρακάτω πίνακα είναι οι μεταβλητές που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα για να εισαγωγή στον χώρο του ατμοσφαιρικού αέρα

Name	Value	Unit
Dynamic viscosity	eta(T[1/K])[Pas]	Pa s
Density	rho(pA[1/Pa],T[1/K])[kg/m ³]	Kg/m ³
Speed of sound	cs(T[1/K])[m/s]	m/s

Πίνακας 1.2: Ορίσματα μεταβλητών για ταχύτητα ήχου, πυκνότητα και δυναμική ποσότητα για εσωτερική τριβή σε ρευστό.

Στη συνέχεια πρέπει να επιλέξουμε την κατάλληλη φυσική για τον συγκεκριμένο πάντα χώρο. Όπως έχουμε κάνει ήδη και επιλέξαμε την «pressureacoustics» και το «particletracing». Το πρόγραμμα αποθηκεύει την αρχική σου επιλογή και υπάρχει η δυνατότητα να προσθέσεις εκ νέου νέα φυσικά μοντέλα. Για τις ανάγκες του πειράματος αυτές οι δυο φαίνεται να αρκούν. Με το που επιλέγουμε κάποια φυσική συνάρτηση το πρόγραμμα είναι προγραμματισμένο να εμφανίζει δυο ή τρεις υποσυναρτήσεις αλλιώς δομές (κόμβους). Στην «pressureacoustics» εμφανίζει τρεις: Αρχικά την «soundhardboundary» στην οποία πρέπει να ορίσουμε το σύνορο που θέλουμε να επηρεάζει η ακουστική πίεση και από εκεί και πέρα δεν λειτουργεί. Επιλέγουμε λοιπόν την πάνω πλευρά του τετραγώνου.



Σημα1.2: επιλογή της πάνω πλευράς για όριο.

Έπειτα πάμε να ορίσουμε τις αρχικές συνθήκες (initialvalues). Με την συνάρτηση αυτή ορίζουμε αρχικές τιμές για την πίεση του ήχου και την παράγωγό της. Ορίζουμε και τα δυο να έχουν αρχικές τιμές ίσες με το μηδέν.

Description	Value
Pressure	0
Pressure, first time derivative	0

Πινάκας 1.3: αρχικές τιμές για την πίεση και την παράγωγο της ως προς τον χρόνο.

Έπειτα ορίζουμε το «Pressureacoustics». Είναι άλλη μια συνάρτηση, η τρίτη σε σειρά που εμφανίζει το πρόγραμμα. Εδώ προσθέτονται οι εξισώσεις για ακουστική μοντελοποίηση στο πεδίο της συχνότητας. Υπάρχουν ρυθμίσεις που καθορίζουν τις ιδιότητες του μοντέλου και υπάρχει η δυνατότητα να ορίσεις ορίσματα εισόδου όπως θερμοκρασία και πίεση.

Εισάγαμε θερμοκρασίαπειράματος $T=293,15$ K (δηλαδή θερμοκρασία 10°C) και πίεση $p=1$ atm οι εξισώσεις είναι :

$$\nabla \times \left[\frac{-1}{\rho_c} (\nabla_{p_i} - q_d) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} \right] = Q_m \quad (1.1)$$

Πρόκειται για την κυματική εξίσωση $\nabla^2 y - \frac{1}{c^2} \frac{d^2 y}{dt^2} = 0$ στην οποία ο χρόνος έχει

απλοποιηθεί (frequency domain) άρα στην νέα εξίσωση δεν υπάρχει $\frac{d^2 y}{dt^2}$ είναι

δηλαδή μιας μορφής

$$\nabla^2 y - \kappa - \omega = \delta$$

Όπου κ , ω και δ είναι κάποιες σταθερές $\omega = \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c}$, $\delta = Q_m$

Ισχύουν :

$$\rho_t = \rho + \rho_b \quad (1.2)$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c}\right)^2 - k_z^2 \quad (1.3)$$

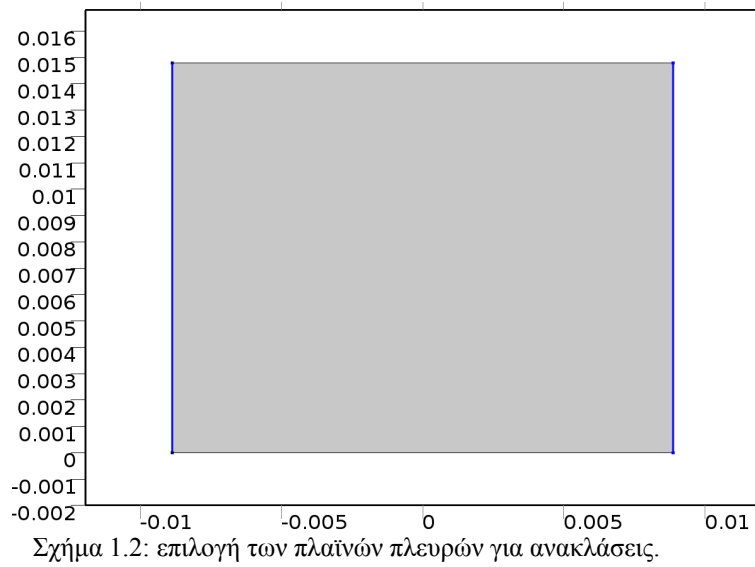
$$c_c = c, \quad \rho_c = \rho \quad (1.4)$$

Όπου p είναι η ηχητική πίεση (σε Pascal) όπου σε περίπτωση απουσίας ροής είναι απλά η στατική πίεση. p_b είναι το υπόβαθρο της ακουστικής πίεσης. Και p_t πρόκειται για την συνολική ακουστική πίεση. Η σχέση 1.2 μας λέει απλά ότι η συνολική πίεση εξαρτάται από την ακουστική πίεση υποβάθρου και την πίεση περιβάλλοντος. k είναι

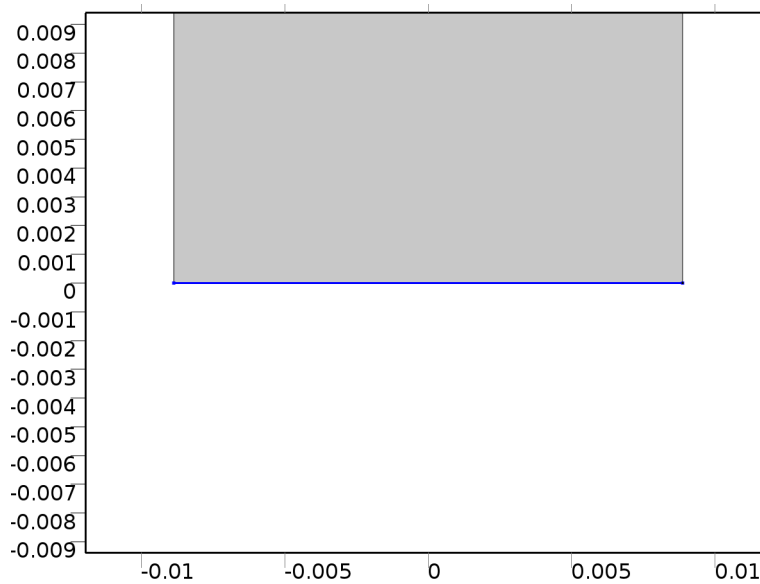
ο κυματαριθμός $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, k_{eq} είναι το άθροισμα του k με τον κυματά ρυθμο

επίπεδου κύματος k_z που βγαίνει έξω από το επίπεδο (out-of-planewave), c είναι η ταχύτητα του ήχου.

Στην συνέχεια προσθέτουμε άλλες δυο συναρτήσεις την «planewaveradiation» και «normalacceleration». Η πρώτη πρόκειται για μια οριακή συνθήκη “ακτινοβολίας” για ένα επίπεδο κύμα. Αν η γωνία πρόσπτωσης είναι κοντά στο φυσιολογικό τότε επιτρέπει στο επίπεδο κύμα να ακολουθεί από τον τομέα μοντελοποίησης στο σημείο ή τα σημεία που έχουμε ορίσει με τις ελάχιστες δυνατές ανακλάσεις.

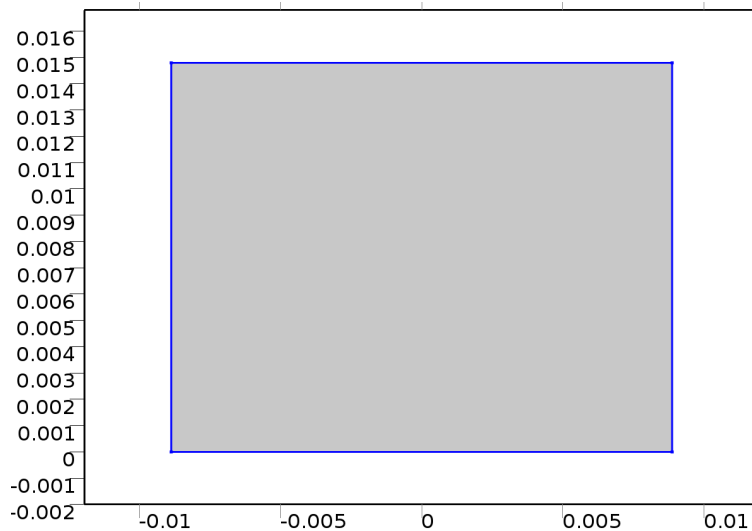


Ορίζουμε την επιτάχυνση $a_n = a_0 = 1,5 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ ως πλάτος επιτάχυνσης στην κάτω πλευρά του τετραγώνου πλαισίου (βλέπε σχήμα 1.3)
 Ο ορισμός αυτός δηλώνει με την επιτάχυνση δονείται η επιφάνεια και κατά συνέπεια γεννιέται το επίπεδο ακουστικό κύμα.



2.2 Καταγραφή τροχιών σωματιδίων (Particletracing)

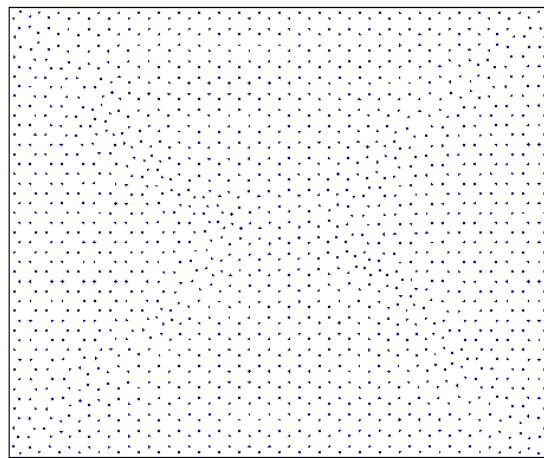
Η φυσική συνάρτηση `particletracing` έχει ως λειτουργία τον υπολογισμό της κίνησης και την ανίχνευση των σωματιδίων μέσα σε ένα ρευστό υλικό. Οι δυνάμεις που μπορούν να ασκούνται στο μέσο αυτής είναι η τριβή, η βαρύτητα, οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις και η δύναμη ακουστοφόρησης που θα εξετάσουμε παρακάτω. Στην αρχή πρέπει να ορίσουμε τα όρια που θα εφαρμόζεται αυτή η ανίχνευση και μέχρι τα όρια αυτά θα ασκούνται οι οποίες δυνάμεις ορίσουμε να υπάρχουν στο μέσο διάδοσης. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα ορίσαμε την περιφέρεια του τετραγώνου γιατί στο εσωτερικό του θέλουμε να υπάρχουν σωματίδια και να ασκούνται οι δυνάμεις. Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ποια θα είναι η κατάσταση των σωματιδίων μόλις έρθουν σε επαφή με τα όρια που έχουμε ορίσει σαν τοίχο. Γενικά υπάρχουν αρκετές καταστάσεις όπως πχ τα σωματίδια «να παγώνουν» τοπικά σε αυτά τα σημεία της περιφέρειας, να περνάνε από τα όρια, να υπάρχει κρούση και να επιστρέφουν πίσω, ή και να εξαφανίζονται. Στο πείραμα επιλέξαμε το τελευταίο, όταν δηλαδή τα σωματίδια με την άσκηση κάποιας δύναμης φτάνουν στα όρια που έχουμε θέσει θα εξαφανίζονται .



Σχημα1.4: επιλογή πλευρών για όρια (τοίχος) των σωματιδίων.

Στη συνάρτηση «`particleproperties`» ορίζουμε τις ιδιότητες των σωματιδίων που θα υπάρχουν μέσα στο μέσο. Οι ιδιότητες που ορίζουμε είναι η διάμετρος dp και η πυκνότητα του Pp . Συγκεκριμένα $dp=d_p= \lambda/10m$ και $Pp=\rho_p=500kg/m^3$.Επίσης υπάρχει η δυνατότητα να ορίσεις σε αυτή την κατηγορία τον ατομικό αριθμό z του αερίου.

Για να υπάρχουν σωματίδια σε κάποιον δεδομένο χώρο είναι απαραίτητο να ορίσουμε το σημείο ή τα σημεία ή ακόμα και την επιφάνεια που θέλουμε να ξεκινήσουν να υπάρχουν. Για να γίνει αυτό υπάρχουν δυο τρόποι και είναι δυο ξεχωριστές συναρτήσεις (δομές). Πρώτος τρόπος είναι η δομή «initial» που ορίζει το σημείο ή την επιφάνεια που θα ξεκινούν τα σωματίδια μέσα στο χώρο, αλλά πρέπει να ορίσεις και το που θα φτάνουν «outlet». Δεύτερος τρόπος είναι το «release» πρόκειται για μια δομή στην οποία δηλώνεις το μέρος καθώς και το χρόνο σε δευτερόλεπτα (s) που θέλεις να εμφανίζονται τα σωματίδια. Επιλέγουμε λοιπόν όλο τον χώρο του τετράγωνου και το «release» για δημιουργία σωματιδίων σε χρόνο (0s)(βλέπε σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: δημιουργία σωματιδίων με δομή release σε χρόνο 0s.

Προσθέσαμε άλλες τρεις δομές στις οποίες πρόκειται για δυνάμεις που βοηθούν στην κίνηση των σωματιδίων όπως η βαρύτητα (gravity), η τριβή (drag force), και η ακουστοφόρηση (acoustophoretic).

2.3 Ακουστοφόρηση (Acoustophoresis)

Η κατανομή και διαχωρισμός των σωματιδίων σε κάποιο μέσο μπορεί να γίνει με τις δυνάμεις της ακτινοβολίας ακουστικών πεδίων ή/και ακουστικής ροής που προκαλεί οπισθέλκουσες κινήσεις. Αυτές οι δυο μέθοδοι χαρακτηρίζουν την δύναμη ακουστοφόρησης (acoustophoretic). Πρόκειται δηλαδή για την δύναμη που ελέγχει τα σωματίδια (διαχωρισμός ή κατανομή) μέσω του ήχου. Οι δυνάμεις ακουστικής ακτινοβολίας πεδίου ασκούνται κατευθείαν στα σωματίδια λόγω της μεταφοράς της ορμής και έτσι το ακουστικό κύμα τα διασκορπίζει.

$$F = -\nabla U_{rad} \quad (1,5)$$

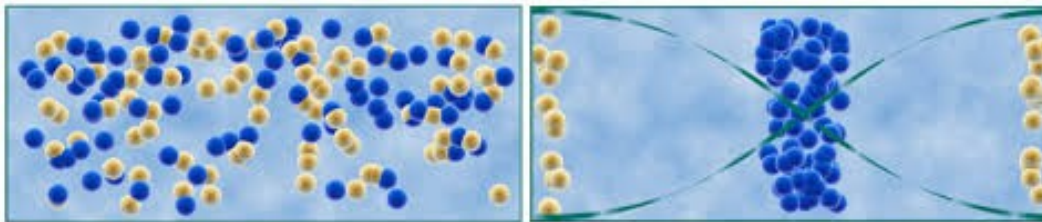
Η παραπάνω σχέση εκφράζει μαθηματικά την δύναμη ακτινοβολίας ηχητικού πεδίου και τον μέσο όρο της κινητικής και δυναμικής ενέργειας των ακουστικών πεδίων σε οποδήποτε γεωμετρικό χώρο. Η δύναμη αυτή ενεργεί στα μικρά σωματίδια ενός ρευστού και είναι ανάλογης βαθμίδας του δυναμικού του ακουστικού πεδίου. U_{rad} είναι το δυναμικό του ακουστικού πεδίου που δίνεται από την σχέσεις:

$$U_{rad} = V_p \left[f_1 \frac{1}{2\rho c^2} \langle p^2 \rangle - f_2 \frac{3}{4} \rho \langle u^2 \rangle \right] \quad (1.6)$$

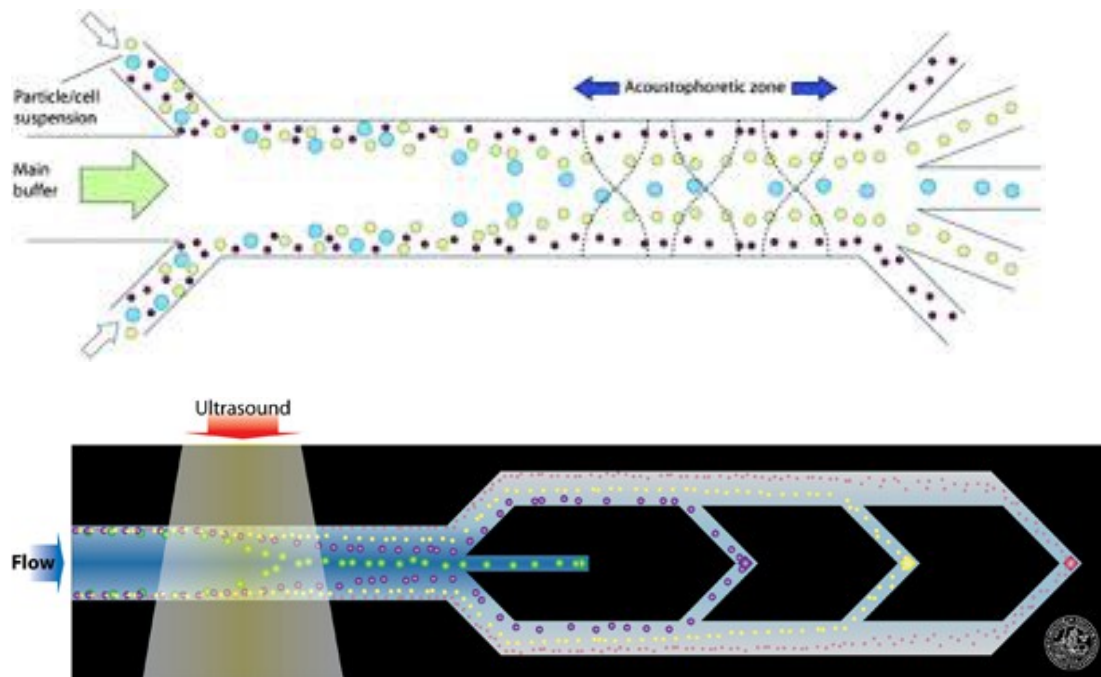
$$f_1 = 1 - \frac{K_0}{K_p}, \quad f_2 = \frac{2(\rho_p - \rho)}{2\rho_p + \rho} \quad (1.7)$$

Όπου V_p : όγκος του σωματιδίου, f_1 και f_2 είναι συντελεστές σκέδασης (μονοπολική και διπολική). Αυτές οι συνθήκες ισχύουν μόνο όταν η ακτίνα του σωματιδίου είναι πολύ μικρότερη από το μήκος κύματος του ακουστικού κύματος. $\langle u^2 \rangle$ είναι η μέση τιμή του τετραγώνου της ταχύτητας των σωματιδίων (m/s) και ρ η πυκνότητα του μέσου και χρησιμοποιείται για γραμμικά προβλήματα ακουστικής.

Παρακάτω βλέπουμε δυο εικόνες που γίνεται διαχωρισμός σωματιδίων με την δύναμη ακουστοφόρησης.



Εικόνα 1.1: πριν τον διαχωρισμό (αριστερά) και μετά τον διαχωρισμό (δεξιά).



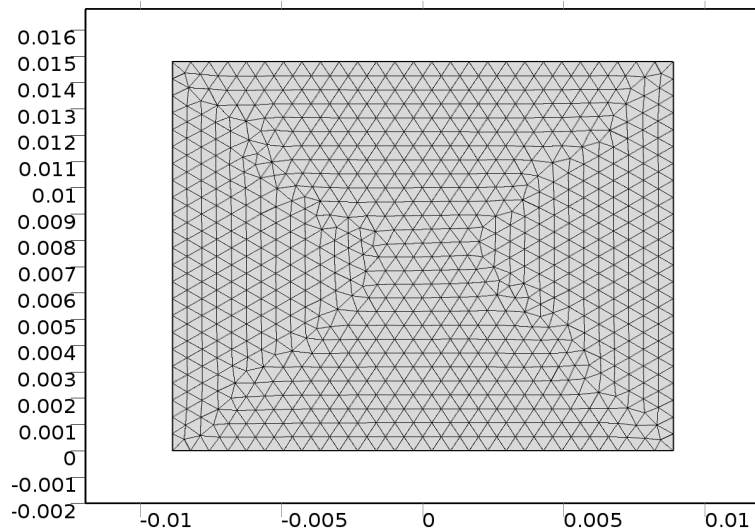
Εικόνα 1.2: διαχωρίζονται τα σωματίδια με την βοήθεια ακουστικών κυμάτων.

Για τον διαχωρισμό των σωματιδίων ανάλογα το μέγεθος και την πυκνότητά τους, χρησιμοποιείται η δύναμη της ακουστοφόρησης σε ελεύθερη ροή ($f-f-A$). Όπως φαίνεται και στις εικόνες 1.2 τα σωματίδια με διαφορετικό διάμετρο και πυκνότητα εισέρχονται στο μέσο διάδοσης μέσω δύο πλευρικών εισόδων ενός κύριου καναλιού. Στο σημείο «acoustophoretic zone» για την πρώτη εικόνα και «ultrasound» για την δεύτερη, υπάρχει ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος που παράγει την ακουστική ακτινοβολία των υπερήχων. Στο πεδίο μεταξύ των δύο πλευρικών τοιχωμάτων δημιουργείται στάσιμο κύμα και έτσι παράγεται ένα πεδίο ακουστικής πίεσης, κάθετο προς την κατεύθυνση των σωματιδίων. Όταν τα σωματίδια εισέρχονται σε αυτό το πεδίο ακουστικής πίεσης τότε μεταφέρονται προς το κέντρο του καναλιού με ταχύτητα που εξαρτάται από το μέγεθος, την πυκνότητα και την συμπίεστικότητα του σωματιδίου. Με αυτό λοιπόν τον τρόπο όπως βλέπουμε και στην εικόνα 1.2 διαχωρίζονται τα σωματίδια διαφορετικού μεγέθους μεταξύ τους μέσω της ακουστικής ακτινοβολίας.

2.4 Δομή πλέγματος (mesh)

Mesh ή αλλιώς πλέγμα είναι μια βασική επιλογή για την λύση τέτοιων προβλημάτων ανακατανομής σωματιδίων με την χρήση ακουστικού πεδίου. Με αυτό δημιουργούμε ένα πλέγμα δυνατών θέσεων στην επιφάνεια που εξετάζουμε και μπορούμε να το κάνουμε πυκνό ή αραιό ανάλογα με το πρόβλημα. Όσο πιο πυκνό είναι το πλέγμα τόσο μεγαλύτερη η ακρίβεια του αποτελέσματος αλλά απαιτεί μεγαλύτερη (περισσότερη) επεξεργασία και χρόνο από το λογισμικό. Ενώ αντίθετα όσο πιο αραιό είναι τόσο «μικραίνει» η ακρίβεια και έτσι είναι γρηγορότερη η

ταχύτητα εκτέλεσης. Όπως είναι κατανοητό από το mesh που θα επιλέξουμε εξαρτάται και η ακρίβεια του αποτελέσματος. Για παράδειγμα στην συνάρτηση «particletracing» τα σωματίδια διακρίνονται καλύτερα και είναι περισσότερα σε αριθμό όσο πιο μικρή είναι η απόσταση μεταξύ των κέντρων των σημείων στο πλέγμα. Μεγάλα κενά σημαίνει λιγότερη ευκρίνεια, μικρά κενά μεγαλύτερη ευκρίνεια. Για τις ανάγκες του της διπλωματικής δεν χρειάζεται να χωρίσουμε το πλέγμα σε μεγάλες υποδομές, αλλά καταλαμβάνει ολόκληρη την επιφάνεια του τετραγώνου, όπως φαίνεται για παράδειγμα στο παρακάτω σχήμα.



Σχημα1.6: Οπτική απεικόνιση τυπικού πλέγματος.

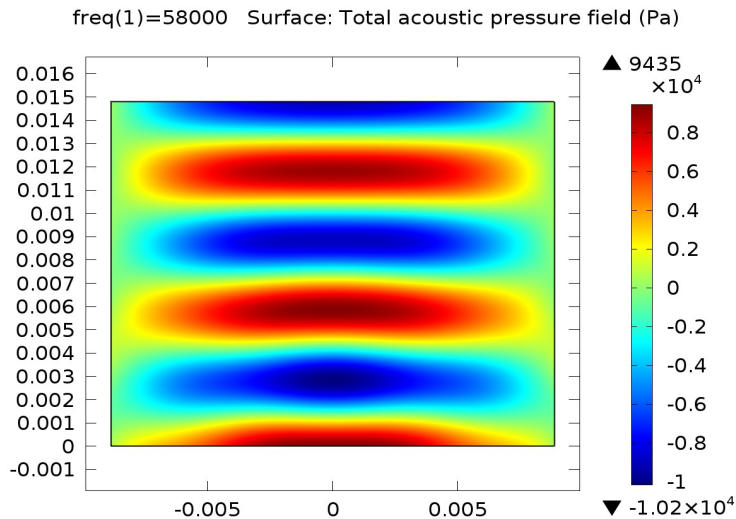
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Πειραματικό μέρος

3.1 Τροποποίηση πειράματος

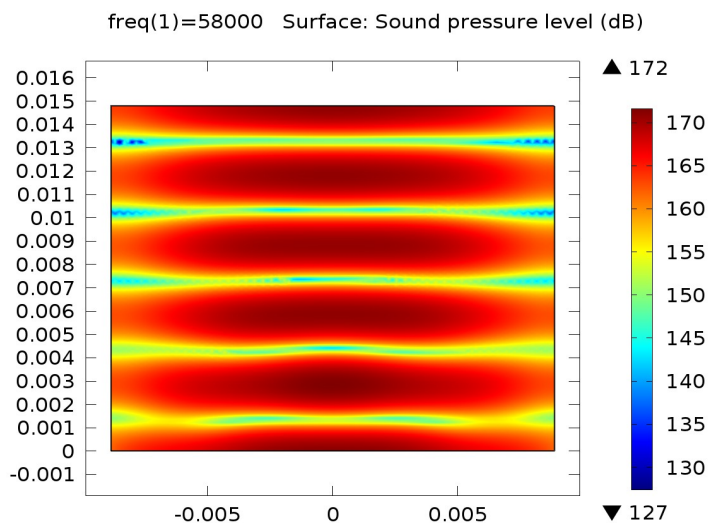
Κάθε δομή και υποδομή των συναρτήσεων «pressureacousticphysics» και «particletracingphysics» εξαρτάται σαν όρισμα από τις συχνοτικές περιοχές που θέλουμε να λύσουμε το πρόβλημα στο πεδίο των συχνοτήτων «frequencydomain». Αυτό έχει σαν επακόλουθο, κάθε εξίσωση να λαμβάνει υπόψη της το συχνοτικό πεδίο που θα ορίσουμε στην δομή της μελέτης και όχι το χρονικό περιεχόμενο των κινήσεων. Τα 58KHz είναι μια συχνότητα που υπάρχει συντονισμός σύμφωνα με τις διαστάσεις του χώρου που έχουμε επιλέξει. Έτσι στο «frequencydomain» θέτουμε σαν όρισμα $f_0 = 58$ KHz και κατά συνεπεία κάθε εξίσωση θα επιλύεται γύρω από την συχνότητα 58KHz.

Στην περίπτωση της μελέτης στο πεδίο του χρόνου, «timedomain» μπορούμε να ορίσουμε το χρονικό παράθυρο πχ από 0 έως 0.5 δευτερόλεπτα με βήμα 0.01s. Πρέπει να σημειωθεί ότι το η λύση στο πεδίο συχνοτήτων στην υπολογίζει ακουστικά πεδία και πιέσεις, ενώ η λύση στο πεδίο του χρόνου υπολογίζει τροχιές σωματιδίων (particletracing). Έτσι το αποτέλεσμα του υπολογισμού στο πεδίο συχνοτήτων θα μας δώσει ως αποτέλεσμα την κατανομή της ακουστικής πίεσης του χώρου, ενώ αν κάνουμε υπολογισμό στο πεδίο του χρόνου θα έχουμε τις χωροχρονικές κατανομές των σωματιδίων.

Παρακάτω δείχνουμε πραγματικούς υπολογισμούς στο πεδίο των συχνοτήτων όπου φαίνονται οι κατανομές τις ακουστικής πίεσης (σχήματα 1.7 και 1.8).



Σχημα1.7:αποτέλεσμα από studyστο freqdomain για την ακουστική πίεση.

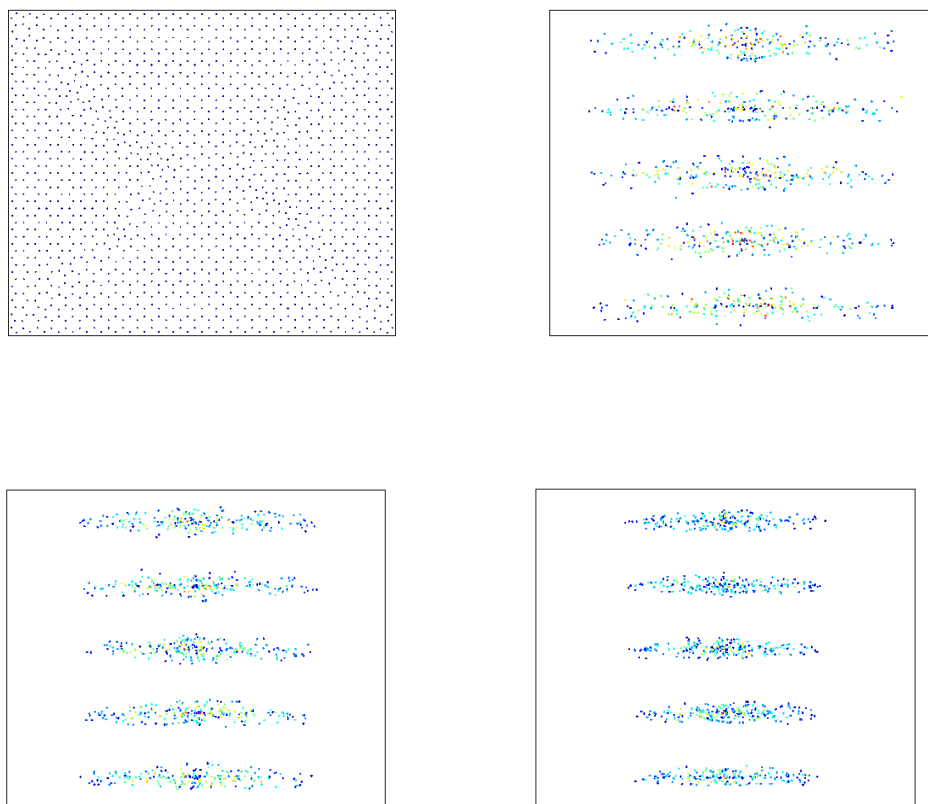


Σχημα1.8:Αποτέλεσμα από studyfreq domain για στάθμη ακουστικής πίεσης.

Στα παραπάνω στα σχήματα 1.7 και 1.8 βλέπουμε το αποτέλεσμα του freq.domain για «pressureacoustic» και «soundpressurelevel». Η κάτω πλευρά του σωλήνα ταλαντώνεται με πλάτος επιτάχυνσης a_0 που έχουμε ορίσει στη αρχή με την συχνότητα συντονισμού. Με την ταλάντωση αυτή παράγονται ακουστικά κύματα συγκεκριμένης κάθε φορά συχνότητας ,στην συγκεκριμένη περίπτωση $f=58\text{KHz}$. Με τις ανακλάσεις του χώρου δημιουργούνται στάσιμα κύματα και η ενεργεία ή η ακουστική πίεση που κατανέμεται στον χώρο είναι ανάλογη κάθε φορά με την συχνότητα συντονισμού του χώρου όπως φαίνεται και στα σχήματα. Η μεγαλύτερη πίεση στο σχήμα1.7 διακρίνεται στα 0.8 με $0.9 \times 10^4\text{Pa}$ και απεικονίζεται με έντονο κόκκινο χρώμα και βρίσκεται σε τρία σημεία του χώρου σε τρεις λοβούς (πάνω, μέση και κάτω). Η μικρότερη με είναι αρνητική -0.8 έως $-1 \times 10^4\text{Pa}$ και απεικονίζεται με σκούρο γαλάζιο. Στα 0Pa που βρίσκονται δεξιά και αριστερά του χώρου είναι με πράσινο χρώμα. Στο σχήμα 1.8 βλέπουμε την στάθμη ακουστικής πίεσης με μεγαλύτερη στάθμη στα 170db με σκούρο κόκκινο και είναι έξι σημεία στο χώρο,

αμέσως μετά στα 165db που είναι στην περιφέρεια. Υπάρχουν κίτρινες λωρίδες με στάθμη περίπου από 145 έως 155db. Σε αυτές τις κίτρινες λωρίδες που δημιουργούνται λόγω της δύναμης ακουστοφόρησης θα κατανεμηθούν εν τέλει και τα περισσότερα σωματίδια. Σε έξι λοιπόν λωρίδες στο χώρο θα πρέπει να βρίσκονται τα σωματίδια πράγμα που θα φανεί ξεκάθαρα παρακάτω που θα λύσουμε το ίδιο πρόβλημα στο πεδίο του χρόνου.

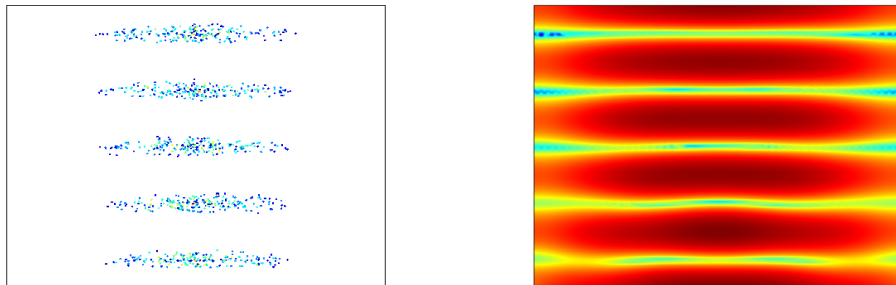
Έπειτα κάνουμε τον υπολογισμό στο πεδίο του χρόνου χρονικό βήμα 0.01s και χρονικό παράθυρο λύσης από 0s έως 0.5s. Ενδεικτικά παρακάτω φαίνονται τα σωματίδια σε χρόνο 0s, 0.1s, 0.3s, 0.5s



Σημια 1.9: κατανομή σωματιδίων σε χρόνο 0s (πάνω αριστερά), 0.1s (πάνω δεξιά), 0.3s (κάτω αριστερά) και 0.5s (κάτω δεξιά)

Στα παραπάνω σχήματα φαίνονται τα αποτελέσματα του «particle tracing» σε διάφορους χρόνους. Αρχικά όπως αναφέραμε και στην δομή «release» σε χρόνο 0s υπάρχουν τα σωματίδια σε ήρεμη κατάσταση (σε κάθε τελεία του πλέγματος mesh βρίσκεται ένα σωματίδιο βλέπε σχήμα 1.6), σε χρόνο 0.01s αρχίζουν οι δυνάμεις να ασκούνται, σε χρόνο 0.1s αρχίζουν να περνούν τις θέσεις τους στις κίτρινες λωρίδες που είδαμε ποιο πάνω στο σχήμα «sound pressure level» κατευθυνόμενα κυρίως από την δύναμη ακουστοφόρησης. Όμως υπάρχουν ακόμα κάποια που είναι διάσπαρτα

στο χώρο. Σε χρόνο 0.3s αυτό παίρνει καλύτερη μορφή και σε χρόνο ποια 0.5s τελειοποιείται όπως φαίνεται και στο σχημα1.9 και 1.10

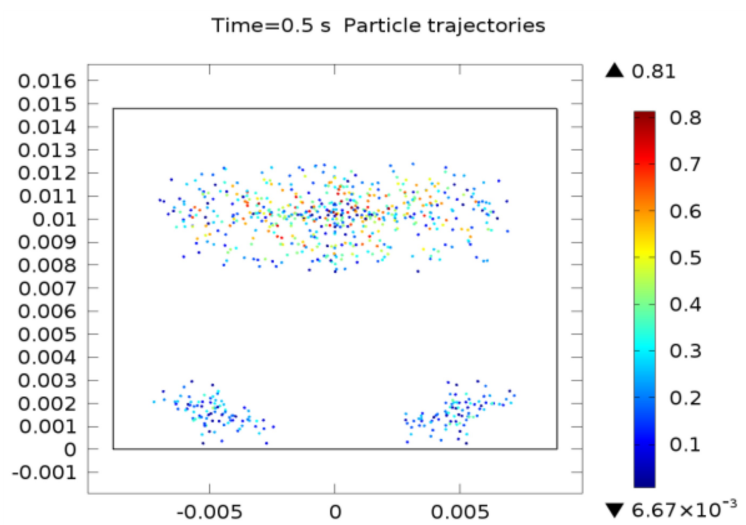
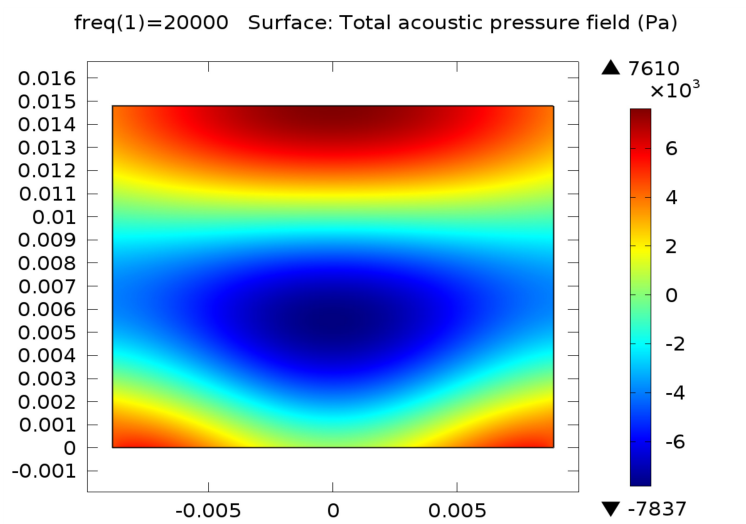


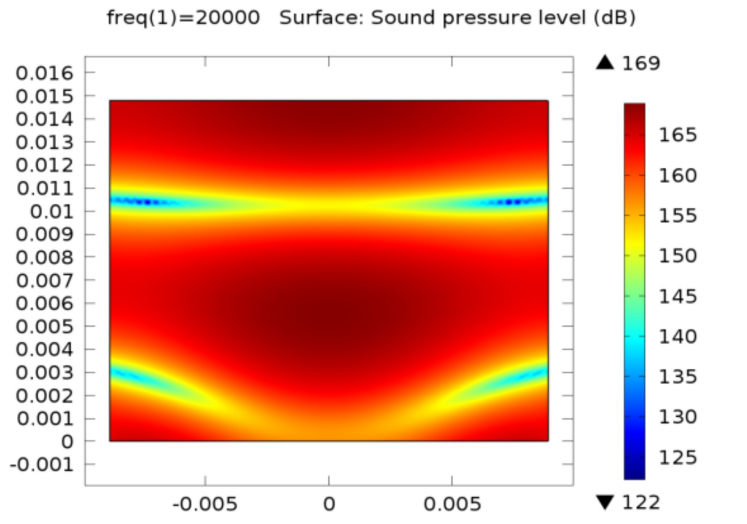
Σχήμα 1.10: βλέπουμε την τελική κατανομή των σωματιδίων στις κίτρινες λωρίδες από το σχήμα της στάθμης ακουστικής πίεσης για σύγκριση

Για να δούμε πως λειτουργεί η κατανομή στο χώρο ανάλογα με τον συντονισμό του χώρου αλλάζουμε κάθε φορά την συχνότητα ταλάντωσης και τροποποιούμε την δομή της μελέτης στο freq.domain και ανάλογα στο timedomain. Ο χώρος αναμένεται να συντονίζει με διαφορετικό τρόπο δηλαδή οι κοιλίες πίεσης να βρίσκονται σε διαφορετικά σημεία του χώρου ή να είναι διαφορετικός ο αριθμός τους ανάλογα με την συχνότητα. Και αφού δούμε το αποτέλεσμα της κατανομής ακουστικής πίεσης στον χώρο τότε με την τροποποίηση του studytime θα πρέπει να δούμε τα σωματίδια να κινούνται σε αυτές τις ανομοιομορφίες πίεσης κάθε φορά σε χρόνο μέχρι 0.5 s. Παρακάτω φαίνονται τα σχήματα particle tracing physics σε διάφορες συχνότητες καθώς και soundpressurelevel και acousticpressure.

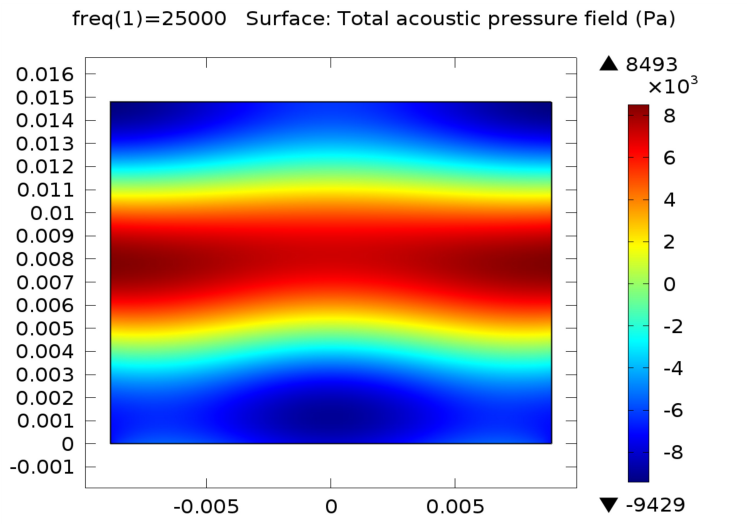
Πρέπει να αναφέρουμε πως στα παρακάτω σχήματα φαίνεται μόνο η κατανομή (και όχι ο διαχωρισμός ακόμα). Και σκοπός είναι να δούμε πως τα ακουστικά κύματα των υπερήχων ασκούν δυνάμεις με τέτοιο τρόπο ώστε μπορούν να κατευθύνουν τα σωματίδια σε διάφορες περιοχές χαμηλής πίεσης που δημιουργούνται κάθε φορά στον χώρο.

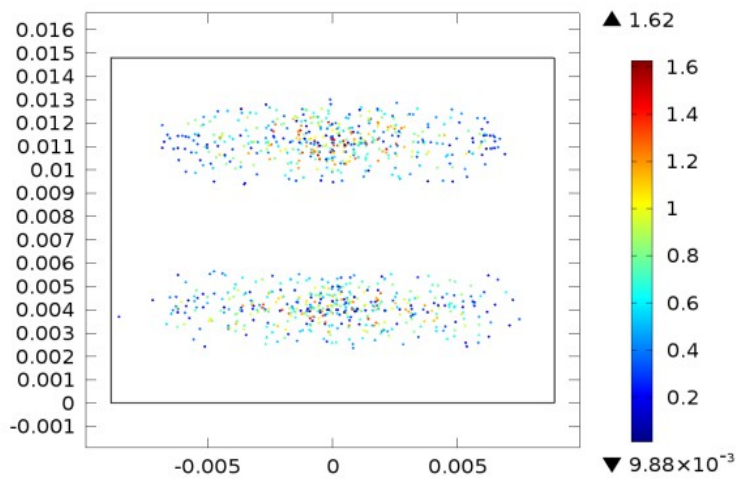
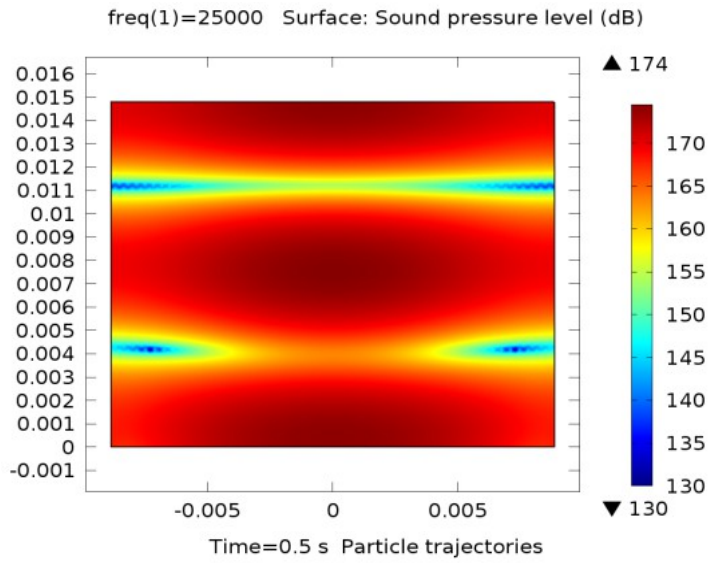
Για συχνότητα 20kHz:



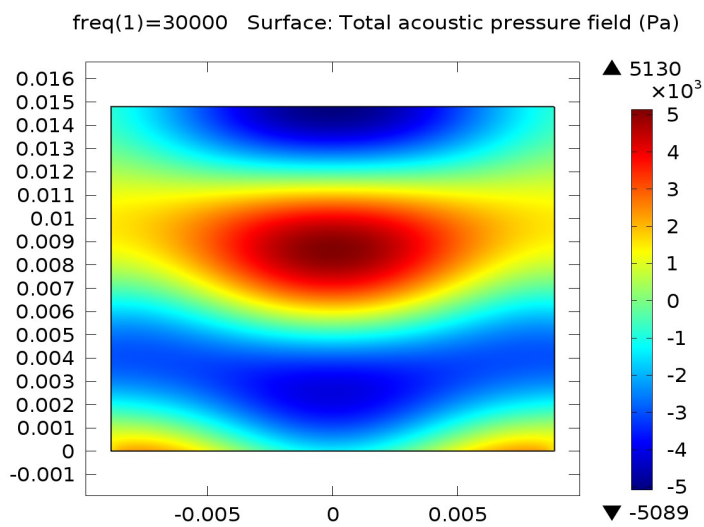


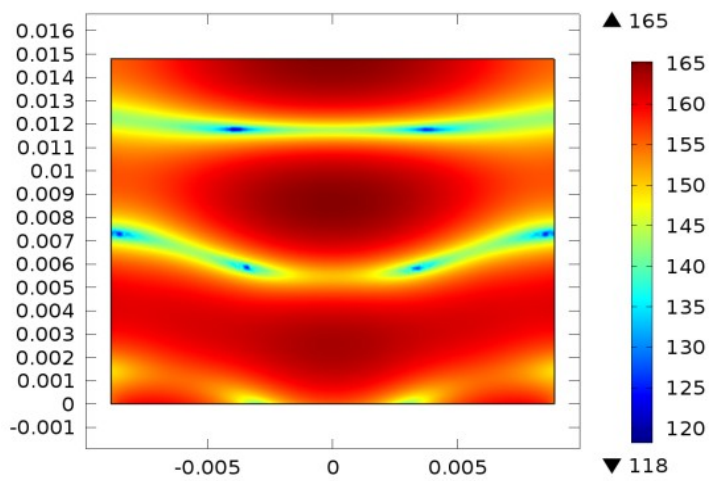
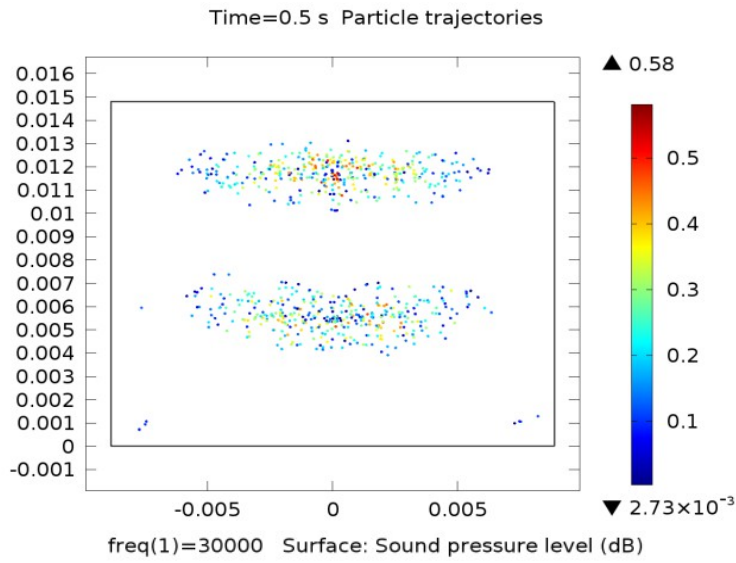
Για συχνότητα 25kHz:



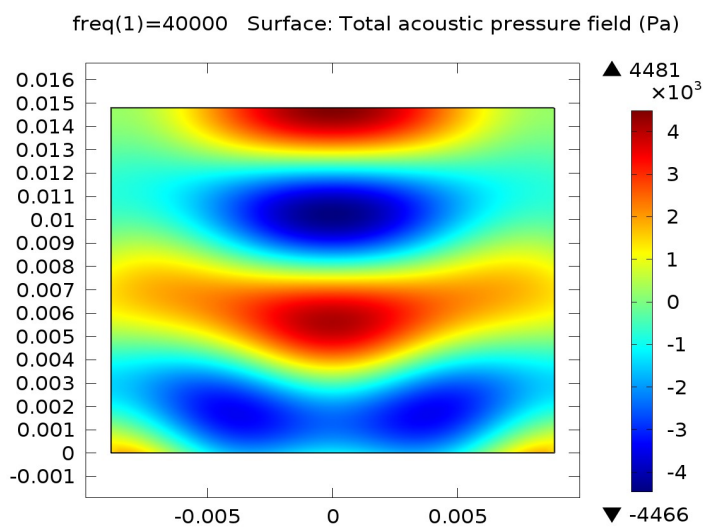


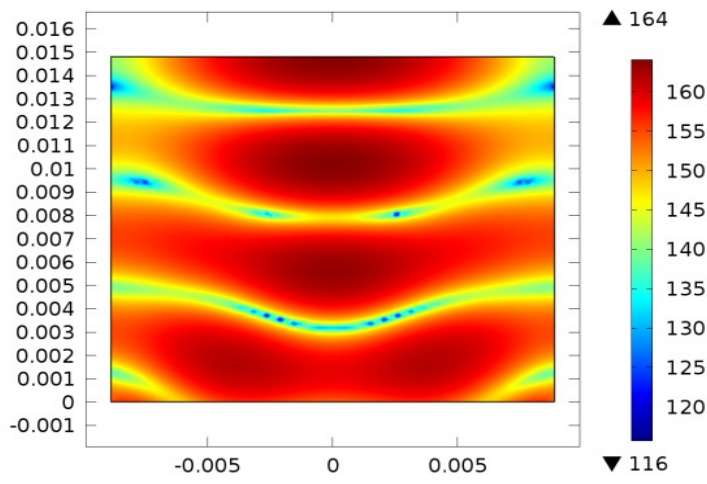
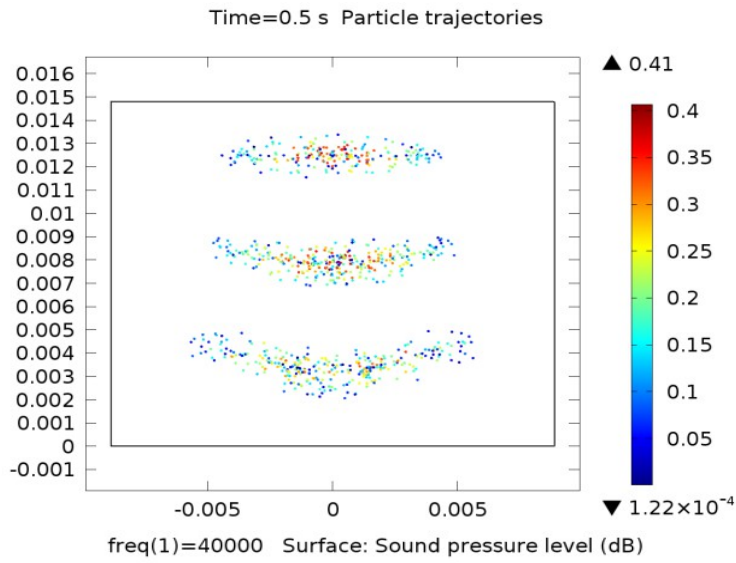
Για συχνότητα 30kHz:



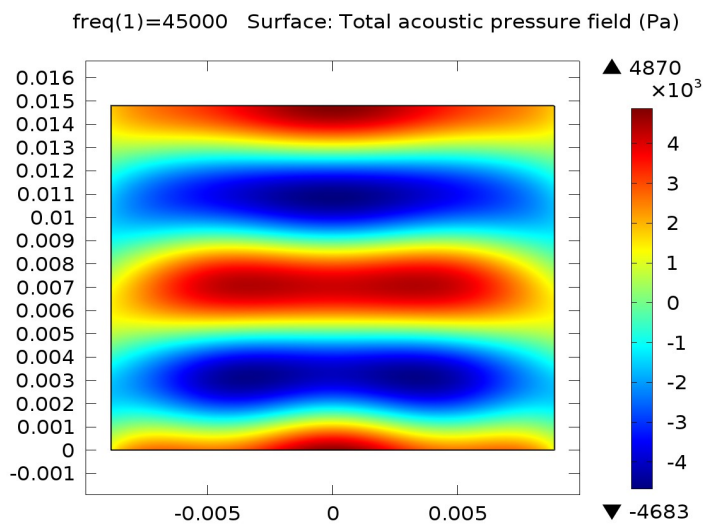


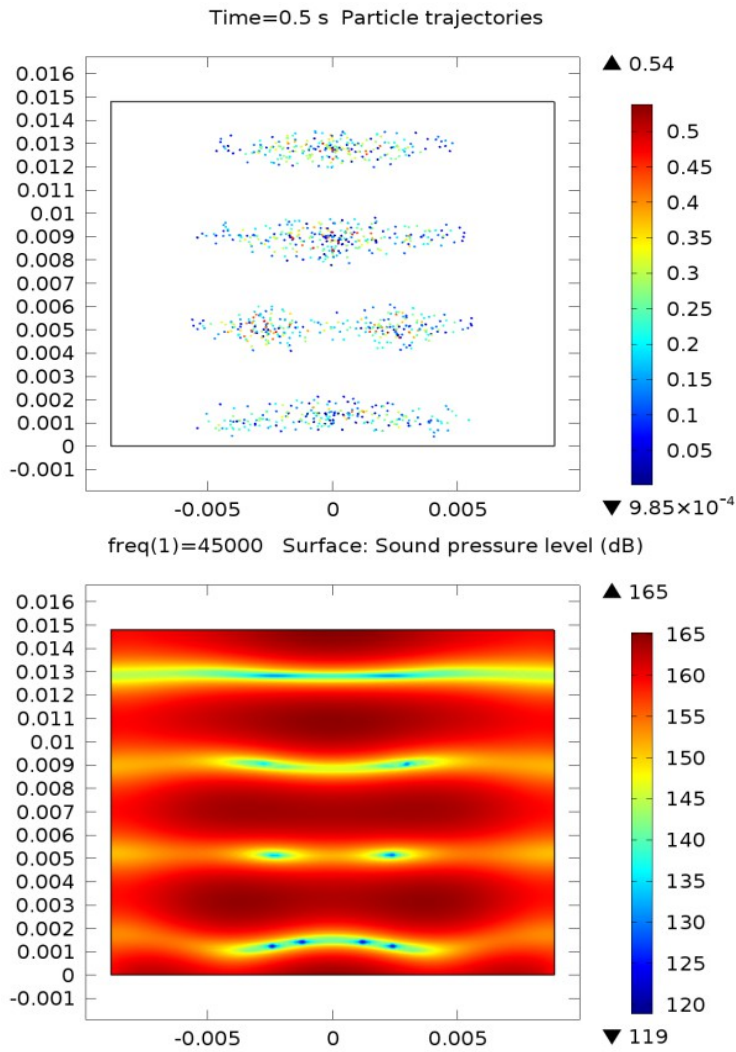
Για συχνότητα 40kHz:





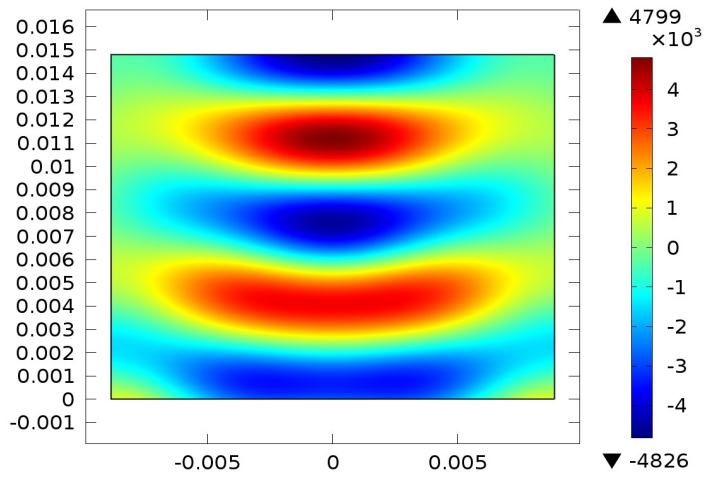
Για συχνότητα 45kHz:



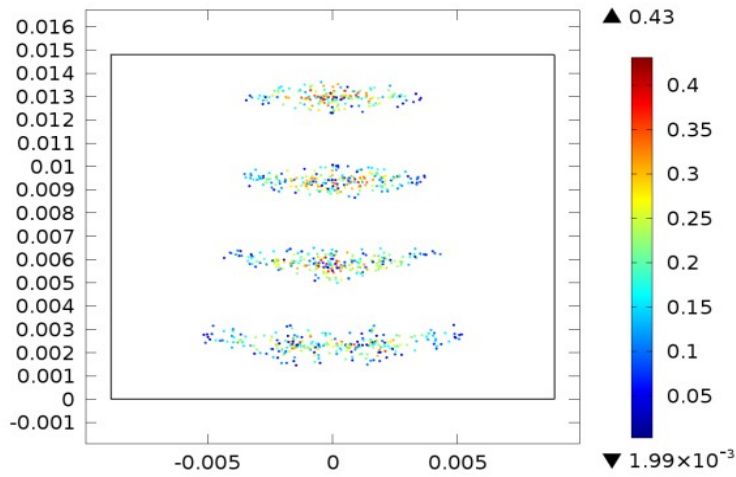


Για συχνότητα 50kHz:

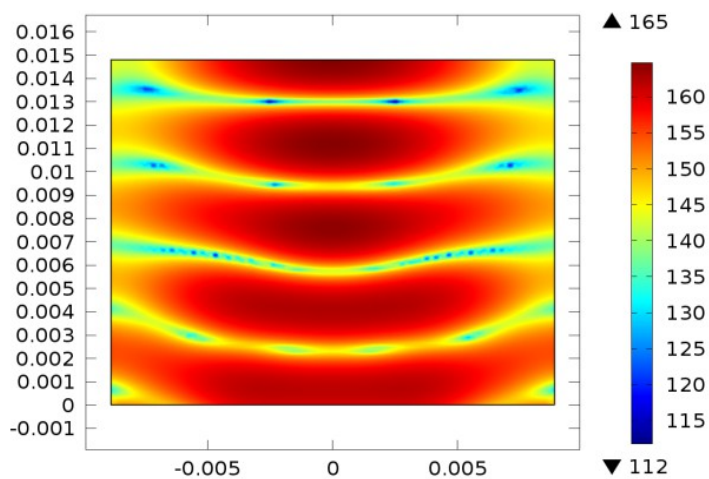
freq(1)=50000 Surface: Total acoustic pressure field (Pa)



Time=0.5 s Particle trajectories

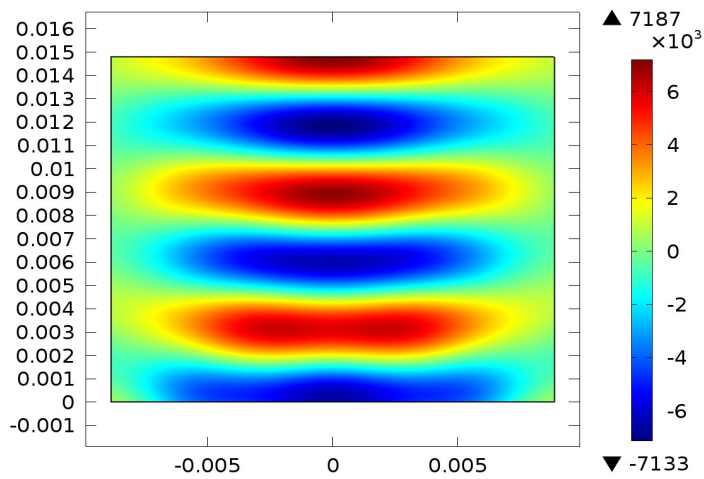


freq(1)=50000 Surface: Sound pressure level (dB)

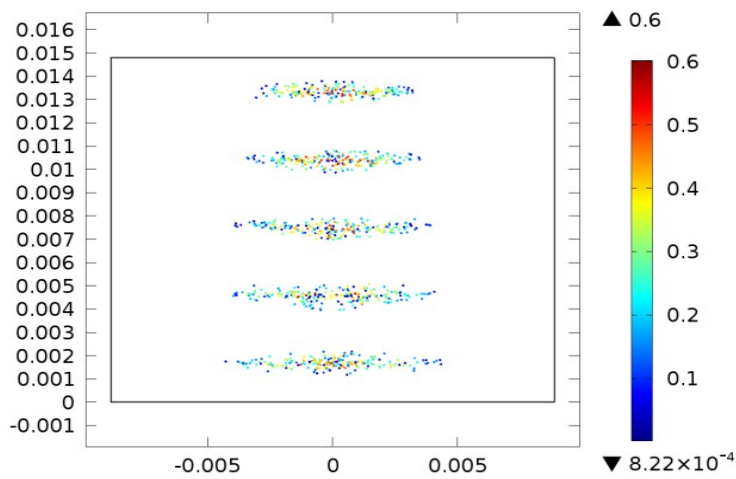


Για συχνότητα 60kHz:

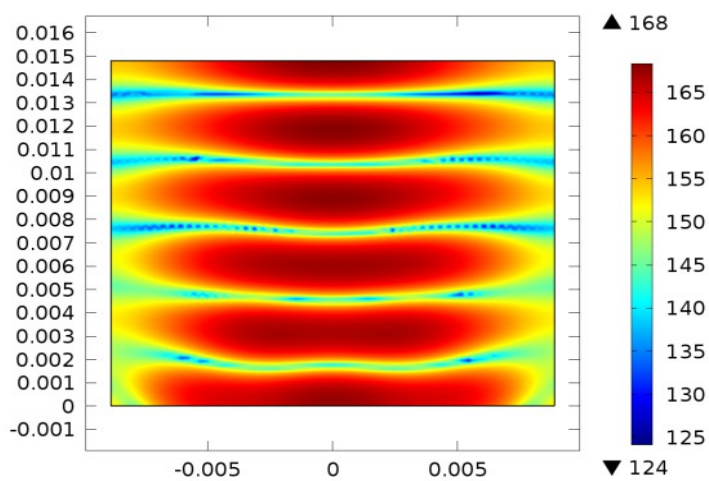
freq(1)=60000 Surface: Total acoustic pressure field (Pa)



Time=0.5 s Particle trajectories

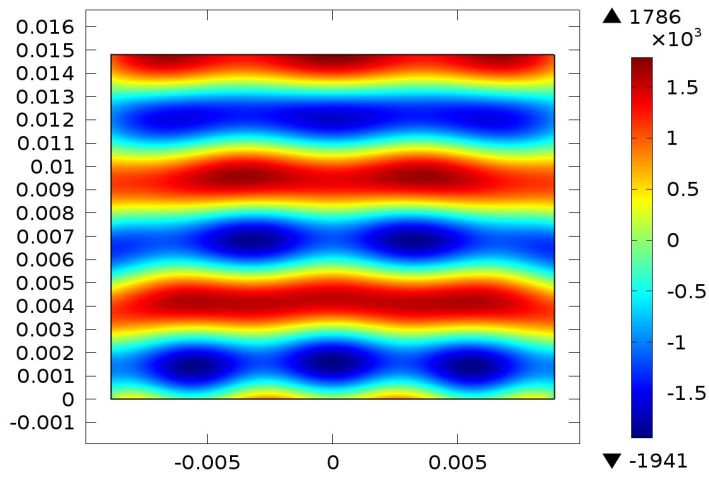


freq(1)=60000 Surface: Sound pressure level (dB)

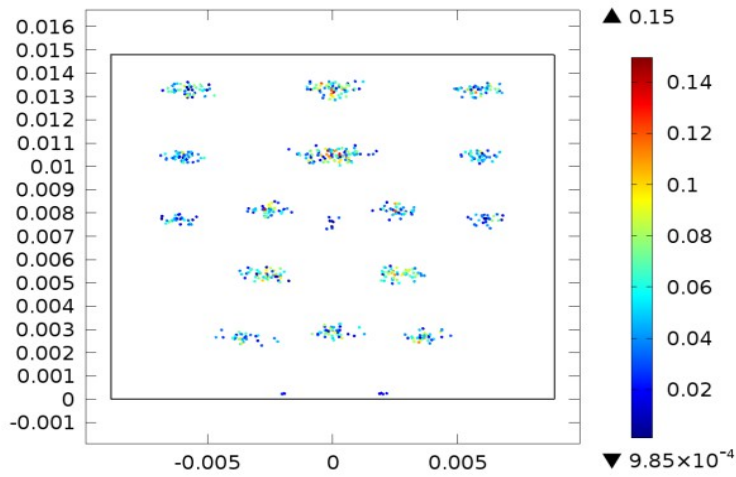


Για συχνότητα 65kHz:

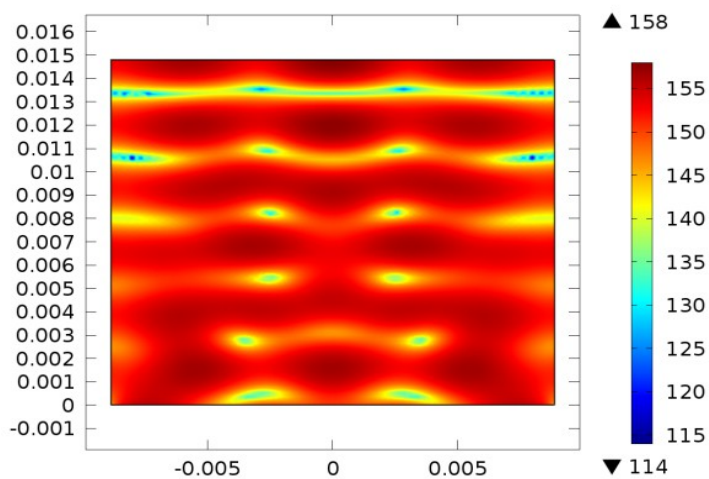
freq(1)=65000 Surface: Total acoustic pressure field (Pa)



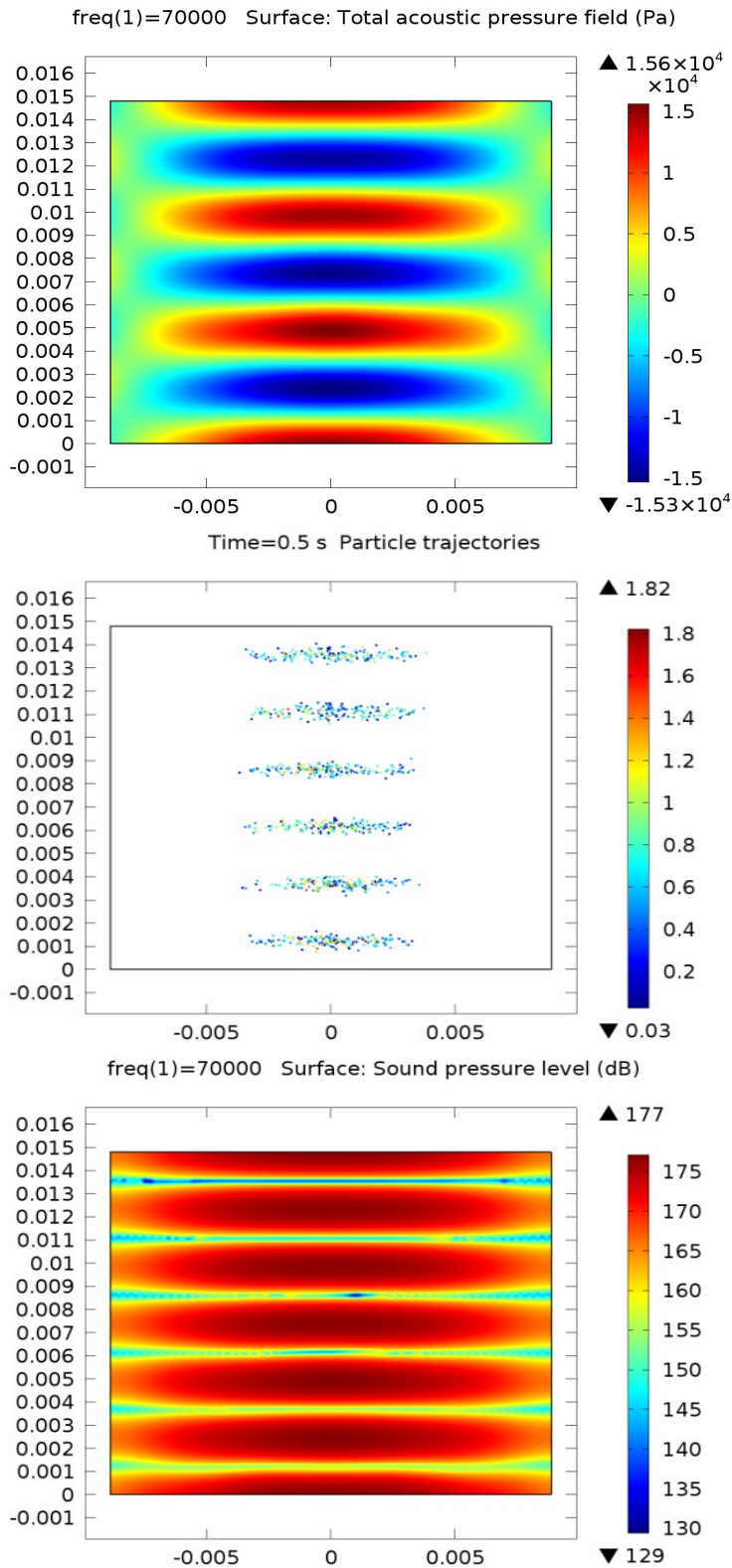
Time=0.5 s Particle trajectories



freq(1)=65000 Surface: Sound pressure level (dB)



Για συχνότητα 70kHz:



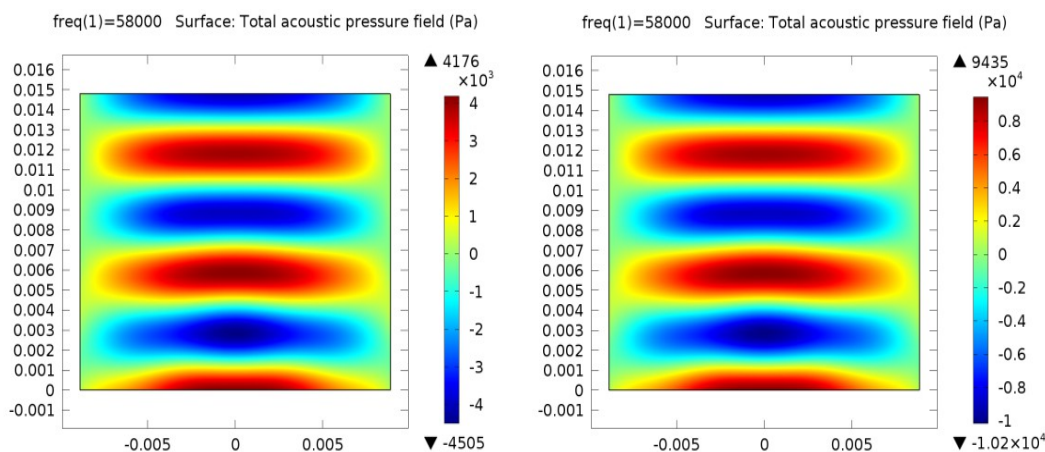
Σε κάποιες συχνότητες όπως φαίνεται και στα σχήματα, υπάρχει συντονισμός όπως για παράδειγμα στα 58KHz και στα 70KHz (68.8KHz). Υπάρχουν όμως και καμπυλωτές γραμμές χαμηλής πίεσης όπως στα ~60KHz και στα ~40KHz . Σε αυτές

τις συχνότητες δεν υπάρχει συντονισμός στον χώρο και για αυτόν τον λόγο τα σωματίδια κατανέμονται σε μια χαραγμένη καμπύλη κυρτή προς τα πάνω. Η κατανομή των σωματιδίων με σταθερή διάμετρο στον συγκεκριμένο σωλήνα ανταποκρίνεται απόλυτα στην κατανομή της ακουστικής πίεσης του χώρου σε κάθε συχνότητα. Λόγο της δύναμης ακουστοφόρησης τα σωματίδια ανταποκρίθηκαν στην κίνηση αυτή και όπως βλέπουμε στα παρακάτω σχήματα στο εύρος συχνοτήτων που μελετήσαμε (από 20kHz έως 70kHz) δεν επηρέασε αυτήν την κίνηση στο να μην συμβεί.

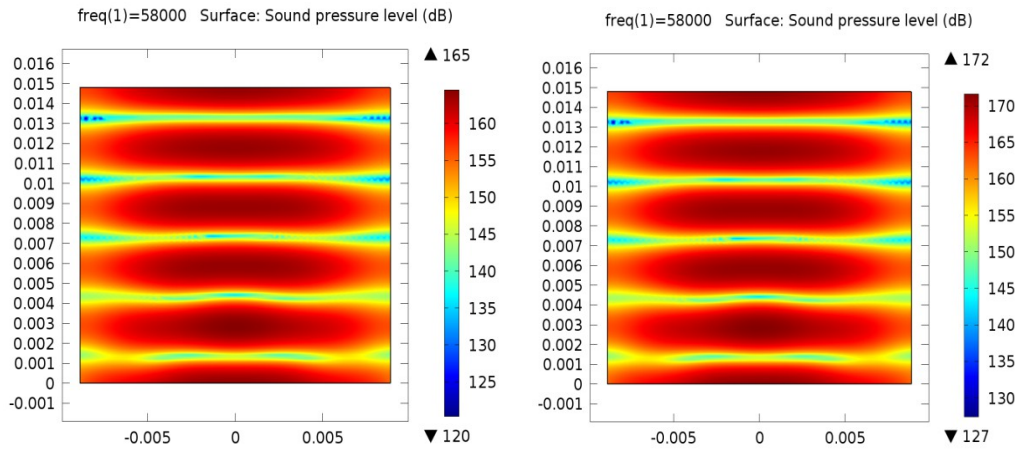
3.2 Αλλαγή επιτάχυνσης

Στην συνέχεια ακλούθησαν δυο πειράματα διαφορετικού τύπου και παρατηρήσαμε την κατανομή των σωματιδίων στον χώρο επηρεασμένα από την δύναμη της ακουστοφόρησης των υπερήχων. Αρχικά αλλάξαμε το πλάτος της επιτάχυνσης της ταλάντωσης της πλευράς του σωλήνα για να δούμε αν θα υπάρξει αρχικά παρόμοια με πριν κατανομή ενεργείας στον χώρο και επιπλέον η ίδια κίνηση προς τις κοιλίες πίεσης από την πλευρά των σωματιδίων. Ποιο συγκεκριμένα η νέα επιτάχυνση που ορίσαμε είναι: $a_0 = 6.64 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ αντί για $a_0 = 1.5 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ που

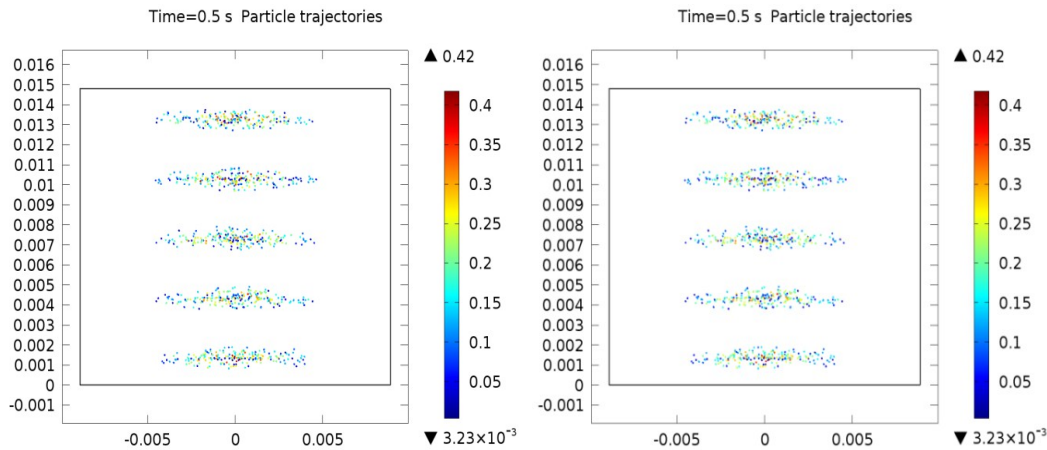
εφαρμόστηκε το προηγούμενο πείραμα. Για συχνότητα στην δομή study βάλουμε μια σταθερή $f = 58 \text{ KHz}$ και ακλουθήσαμε την ίδια διαδικασία με πριν τροποποιώντας πρώτα το freq.domain και στην συνέχεια το time domain στους ίδιους χρόνους από 0s έως 0.5s με βήμα πάλι 0.01s. Τα αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες σε σχέση με την προηγούμενη επιτάχυνση στην ίδια πάντα συχνότητα.



Σχήμα(1.11): κατανομή ακουστικής πίεσης στον χώρο. Αριστερά η νέα επιτάχυνση $a_0 = 6.64 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ και δεξιά η αρχική $a_0 = 1.5 \times 10^6 \text{ m/s}^2$.



Σχήμα (1.12):κατανομή στάθμης ακουστικής πίεσης στον χώρο . αριστερά η νέα επιτάχυνση $\alpha\theta = 6.64 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ και δεξιά η αρχική $\alpha\theta = 1.5 \times 10^6 \text{ m/s}^2$.

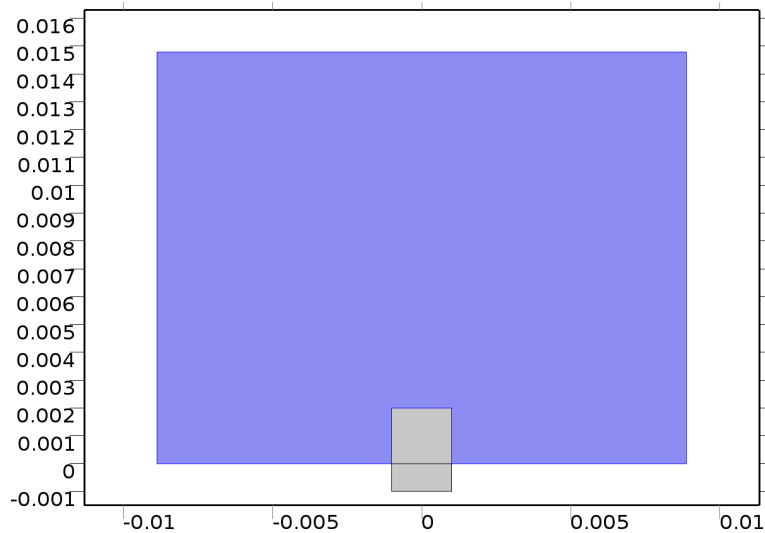


Σχήμα (1.13):κατανομή στάθμης σωματιδίων στις κοιλιές των στάσιμων του χώρου . αριστερά η νέα επιτάχυνση $\alpha\theta = 6.64 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ και δεξιά η αρχική $\alpha\theta = 1.5 \times 10^6 \text{ m/s}^2$.

Όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχήματα η αλλαγή του πλάτους της επιτάχυνσης ταλάντωσης, δεν άλλαξε καθόλου το αποτέλεσμα των μετρήσεων. Η κατανομή ενέργειας ή η κατανομή ακουστικής πίεσης στον χώρο παρέμεινε η ίδια με την αρχική τιμή επιτάχυνσης . Συνεπώς και τα σωματίδια όπως φαίνεται και στα σχήματα λαμβάνουν εν τέλει ακριβώς τις ίδιες θέσεις και στις δυο περιπτώσεις διαφορετικών επιταχύνσεων ταλάντωσης.

3.3 Τροποποίηση με πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο

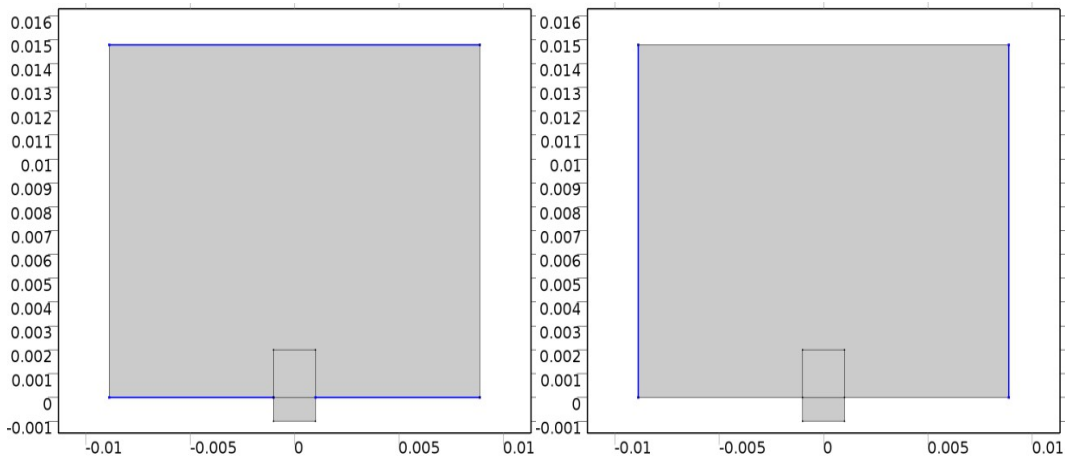
Επιλέξαμε να κάνουμε ένα δεύτερο πείραμα κατανομής που διαφέρει λίγο από τα μέχρι τώρα πειράματα για να δούμε την ευαισθησία της κατανομής των σωματιδίων αν αλλάξουμε λίγο την γεωμετρία του χώρου. Ποιο συγκεκριμένα στην γεωμετρία του χώρου δηλαδή του ακουστικού σωλήνα που φτιάξαμε, ‘κόβουμε’ 1mm από την κάτω πλευρά του σωλήνα. Στο άνοιγμα ενός χιλιοστού που φτιάξαμε τοποθετούμε ένα ορθογώνιο κάθετα. Οι διαστάσεις του είναι περίπου πλάτος 1mm και μήκος 3mm. Η τοποθέτηση του ορθογώνιου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



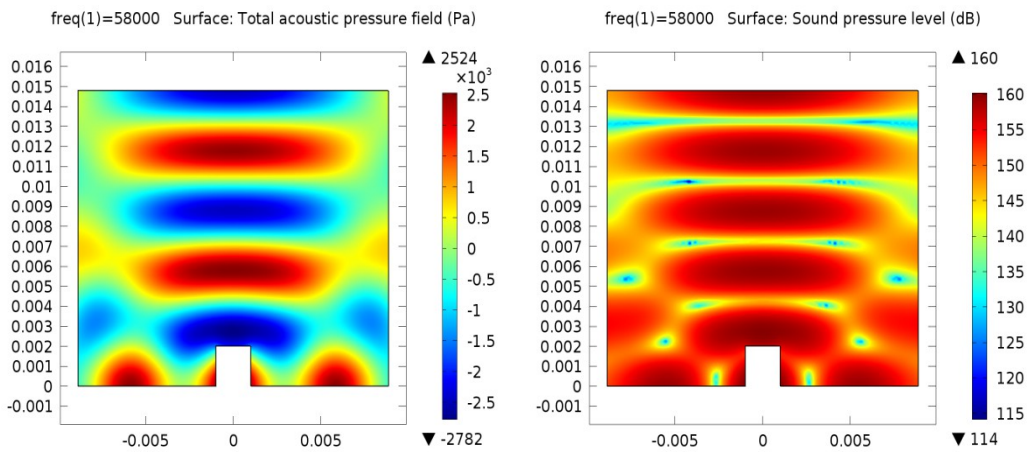
Σχήμα(1.14): Απεικόνιση του νέου χώρου με τις διαστάσεις του σωλήνα και του ορθογώνιου στην κάτω πλευρά .

Στην δομή «material» ορίζουμε το μικρό ορθογώνιο να λειτουργεί σαν πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος. Άρα τώρα έχουμε δυο υλικά στον χώρο μέσα στον σωλήνα αερίου είναι ενσωματωμένος και ένας πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλο με τις διαστάσεις του ορθογώνιου. Στην συνέχεια μέσω της φυσικής δομής «pressure acoustic» στο «frequency domain» θα πρέπει να αλλάξουμε τα ορίσματα σε κάθε υπό-δομή για να λειτουργεί ο χώρος με βάση τα νέα δεδομένα. Ποιο συγκεκριμένα τα ακουστικά όρια πλέον δεν είναι μόνο η πάνω πλευρά του σωλήνα αλλά και η κάτω, οι δυο δηλαδή πλευρές μια αριστερά του κρύσταλλου και μια δεξιά. Οι ανακλάσεις του χώρου παραμένουν οι ίδιες στις δυο πλαϊνές πλευρές. Ποιο αναλυτικά η παραπάνω περιγραφή φαίνεται στα παρακάτω σχήματα. Τέλος ορίζουμε τον πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο σαν πηγή ταλάντωσης, αλλά ορίσαμε μόνο την επιφάνεια του ορθογώνιου που βρίσκετε μέσα στον σωλήνα γιατί μόνο αυτή η διαταραχή μας ενδιαφέρει. Αφού τελειώσουμε με τις νέες διαστάσεις του χώρου μπορούμε να προχωρήσουμε στην τροποποίηση του πειράματος. Όπως ακριβώς κάναμε και στην περίπτωση του διαχωρισμού χωρίς πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο το ίδιο θα πρέπει να εκτελέσουμε και τώρα. Δηλαδή να τροποποιήσουμε κάθε δομή που εξαρτάται από την συχνότητα που και σε αυτήν την περίπτωση η συχνότητα ορίσαμε τη συχνότητα ταλάντωσης $f=58\text{KHz}$ και στην συνέχεια κάθε δόνηση εξαρτάται από τον χρόνο. Και σε αυτό το πείραμα όπως έχουμε δει μέχρι τώρα ο ταλαντωτής δηλαδή ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος θα ταλαντωθεί με κάποια συχνότητα δημιουργώντας κύματα υπερήχων που θα ανακλαστούν στις πλευρές του σωλήνα και

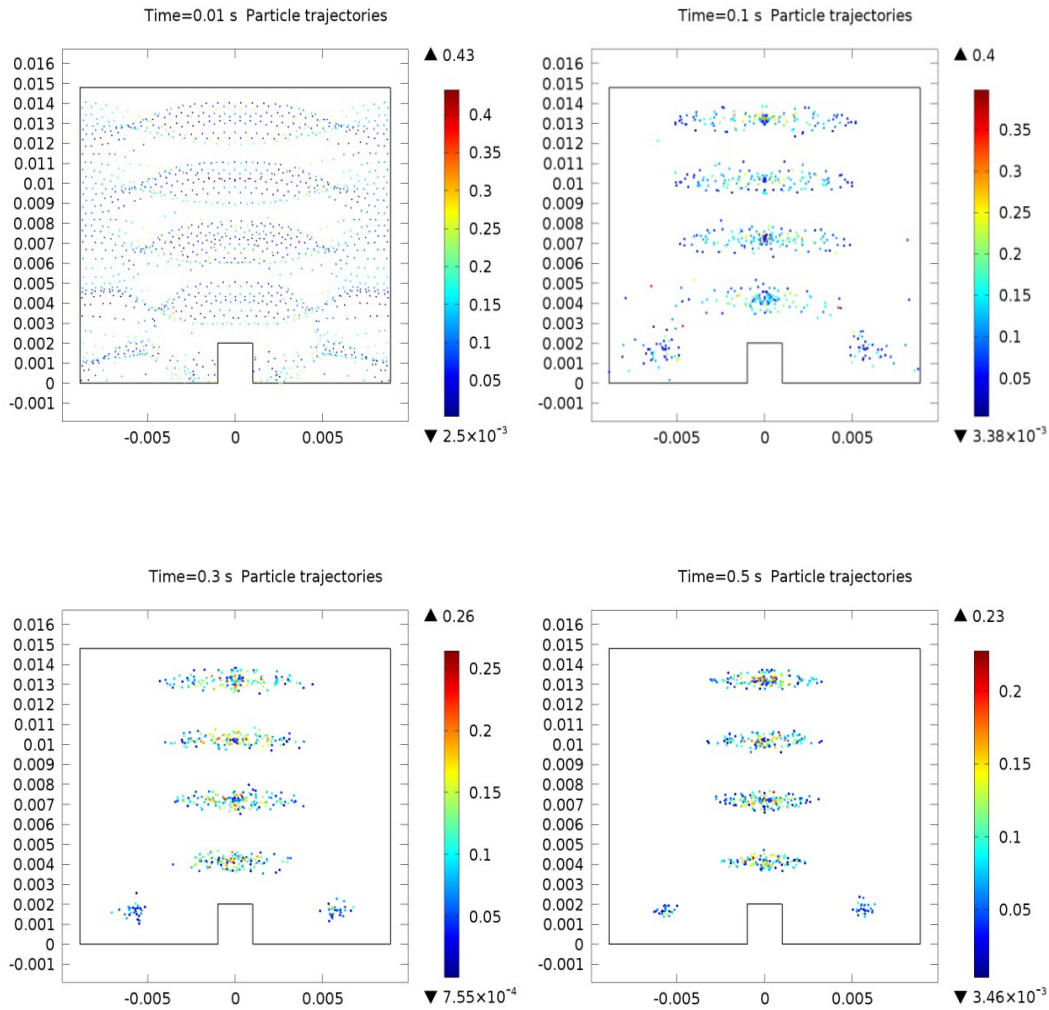
θα δημιουργηθούν στάσιμα κύματα. Αφού κατανεμηθεί η ενεργεία των στάσιμων κυμάτων στον χώρο τότε τα σωματίδια με τις δυνάμεις που δέχονται κινούνται προς την κατεύθυνση των κοιλιών. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται αυτή απεικόνιση των αποτελεσμάτων του πειράματος.



Σχήμα(1.15): Απεικόνιση των ορίων ακουστικής πίεσης (αριστερά) και ανακλάσεων του χώρου (δεξιά). Ο ορισμός απεικονίζεται με μπλε γραμμή.



Σχήμα(1.16): αριστερά η ακουστική πίεση σε Pascals έτσι όπως κατανέμεται στον χώρο και δεξιά η στάθμη ακουστικής πίεσης σε dB έτσι όπως κατανέμεται και αυτή στον χώρο.



Σχήμα(1.17): πύκνωση στην κίνηση των σωματιδίων προς την κατεύθυνση των κοιλιών σε χρόνους 0.01s(πάνωαριστερά) , 0.1s(πάνωδεξιά) ,0.3s(κάτωαριστερά) και 0.5s(κάτωδεξιά)

Όπως φαίνεται και στα παραπάνω σχήματα η κίνηση των σωματιδίων επηρεάστηκε σημαντικά από την νέα γεωμετρία του χώρου. Τα σωματίδια κινήθηκαν στον χώρο οδηγούμενα από την δύναμη ακουστοφόρησης και εν τέλει πήγαν προς τις κοιλιές των στάσιμων κυμάτων που υπήρχαν στον χώρο. Με συχνότητα σταθερή στα 58KHz βλέπουμε πως κινούνται από χρόνο 0.01s και πως σιγά σιγά κατευθύνονται ακριβώς πάνω στις κίτρινες λωρίδες από την απεικόνιση της στάθμης ακουστικής πίεσης σε χρόνο έως 0.5s.

3.4 Διαχωρισμός σωματιδίων

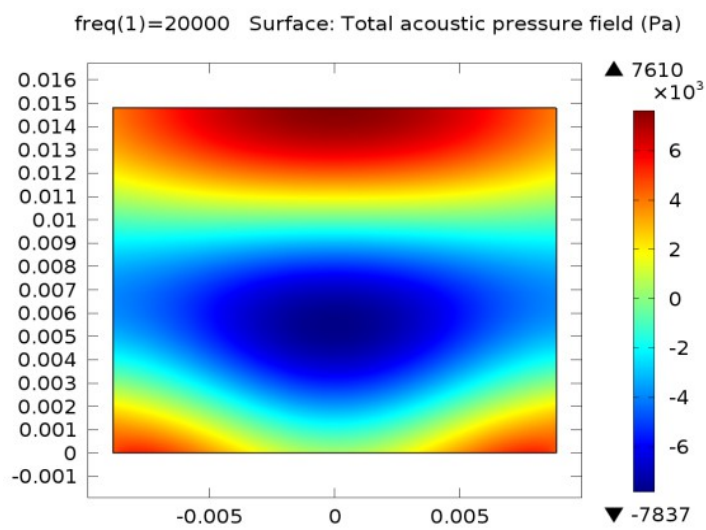
Όπως αναφέραμε παραπάνω ο βασικός σκοπός της πτυχιακής άσκησης είναι να αποδείξουμε αν τα σωματίδια με διαφορετική διάμετρο που είναι κατανομημένα στον χώρο σε κάποιο μέσο μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ τους χρησιμοποιώντας ακουστικά κύματα υπερήχων. Για μέσο διάδοσης χρησιμοποιήθηκε ο ατμοσφαιρικός αέρας καθώς και τα αέρια Υδρογόνο (H_2), και τα ευγενή αέρια Ξένο (Xe), Αργό (Ar) και Ήλιο (He). Ο χώρος αυτήν την φορά που πραγματοποιήθηκε το πείραμα του διαχωρισμού είναι ίδιος με το αρχικό των πειραμάτων. Δηλαδή δεν θα υπάρχει πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος. Η διαταραχή θα προέρχεται από την ταλάντωση της κάτω πλευράς του χώρου όπου και θα ταλαντώνεται με πλάτος επιτάχυνσης

$a_0 = 1.5 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ και στο εσωτερικό του σωλήνα θα υπάρχει διαφορετικό αέριο

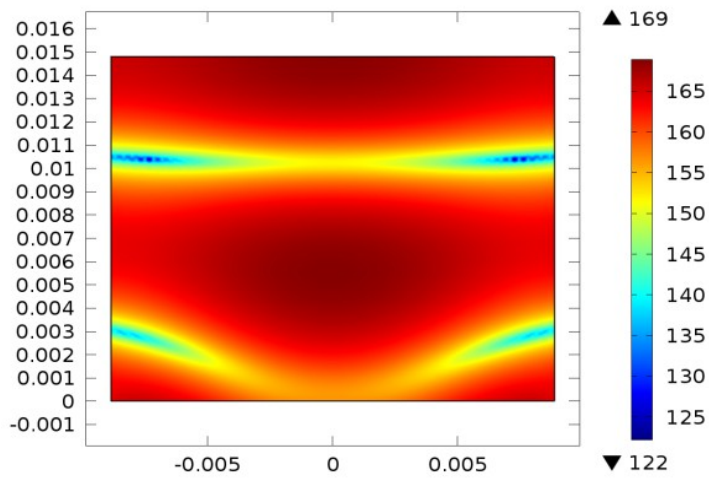
μέσοδιάδοσης. Θα προσομοιώσουμε τον διαχωρισμό με σωματίδια διαφορετικού μεγέθους. Για τον διαχωρισμό των σωματιδίων μεταξύ τους χρησιμοποιούμε τα ίδια σωματίδια που κάναμε την κατανομή, με την διάφορα ότι κάποια θα έχουν τώρα διαφορετική διάμετρο. Έτσι κατά κάποιο τρόπο θα υπάρχουν στον χώρο δυο τύπων σωματίδια. Το πρόγραμμα 'βαφτίζει' ή ορίζει για κάθε σωματίδιο έναν αριθμό -μια ταυτότητα-, αυτήν του η ταυτότητα χρησιμοποιείται σε οποιοδήποτε ανάλυση, είσοδο δεδομένων ή εξερχόμενη πληροφορία σχετικά με τα σωματίδια. Για παράδειγμα η δομή «mesh» χρησιμοποίησε αυτήν την ταυτότητα για να τοποθετήσει κάθε ένα σωματίδιο σε κάθε τέλεια του πλέγματος. Κάνουμε λοιπόν μια υπόθεση και την επιλεγούμε σαν όρισμα στην διάμετρο των σωματιδίων στην δομή «particleproperties». Η νέα διάμετρος είναι $d_p = d_p * \text{if}(\text{random}(\text{fpt.pidx}) > 0,5, 1)$. Η εντολή «Random» γεννάει τυχαίους αριθμούς και αν αυτός ο τυχαίος αριθμός που είναι η νέα ταυτότητα του σωματιδίου είναι μεγαλύτερος από το μηδέν τότε πολλαπλασιάζεται με το 1, σε αντίθετη περίπτωση με 0,5. Αν δηλαδή είναι θετικός αριθμός τότε $d_p = d_p$ αλλιώς $d_p = d_p / 2$. Με αυτό τον τρόπο έχουμε ορίσει σωματίδια δύο τύπων τα πρώτα με κάποια διάμετρο και τα δεύτερα με την μισή των πρώτων. Η διάμετρο d_p παραμένει το αρχικό όρισμα που βάλουμε σαν διάμετρο και στην κατανομή των σωματιδίων. Θα πρέπει να διακρίνουμε αν με τους ορισμούς αυτούς στο πείραμα μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός των σωματιδίων ασκώντας ακουστικές δυνάμεις και πιέσεις στο χώρο. Επίσης πρέπει να βρούμε αν γίνεται σε ποιες συχνότητες ορατός αυτός ο διαχωρισμός και με ποιον τρόπο ξεχωρίζουν χωρικά τα μεγάλης διαμέτρου (και βαριά) σωματίδια από τα μικρής διαμέτρου (και ελαφριά) σωματίδια. Τέλος όταν γίνει η αλλαγή του μέσου κίνησης (διαφορετικό αέριο), ποιες μεταβολές θα επιφέρει τόσο στην κατανομή ακουστικής πίεσης όσο και στην κατανομή και τον διαχωρισμό των σωματιδίων. Αρχικά χρησιμοποιήσαμε για μέσο διάδοσης τον αέρα σε διαφορές συχνότητες 20, 25, 30, 40, 45, 50, 60, 65, και 70 KHz. Όπως και στην περίπτωση της κατανομής χωρίς πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο, η μια πλευρά του σωλήνα ταλαντώνεται με συγκεκριμένο πλάτος επιτάχυνσης. Από αυτήν την ταλάντωση θα παράγονται ακουστικά κύματα με σταθερή συχνότητα που θα ορίζεται κάθε φορά διαφορετική. Με τις ανακλάσεις που υπάρχουν στο χώρο θα δημιουργηθούν στάσιμα κύματα και η ακουστική πίεση θα κατανέμεται στον χώρο ανάλογα τον συντονισμό του χώρου, όπου θα είναι διαφορετικός ανάλογα με την συχνότητα. Στα σωματίδια είναι προγραμματισμένο στην δομή «release» να ξεκινούν από τις αρχικές τελείες του πλέγματος «mesh» σε χρόνο 0s θα ασκούνται δυνάμεις από χρόνο 0,01s οι οποίες θα είναι υπεύθυνες για την κίνηση τους, όπως συνέβαινε και στην περίπτωση της απλής κατανομής. Αναμένουμε ότι, επειδή η δύναμη

ακουστοφόρησης εξαρτάται από τα αδρανειακά χαρακτηριστικά του σωματιδίου, θα πρέπει να γίνετε αντιληπτός ο διαχωρισμός των σωματιδίων διαφορετικής διαμέτρου σε κάθε συχνότητα. Στα παρακάτω σχήματα επιδεικνύεται με διάφορα πειράματα ο διαχωρισμός των σωματιδίων, η στάθμη της ακουστικής πίεσης και η κατανομή της πίεσης στον χώρο για κάθε συχνότητα.

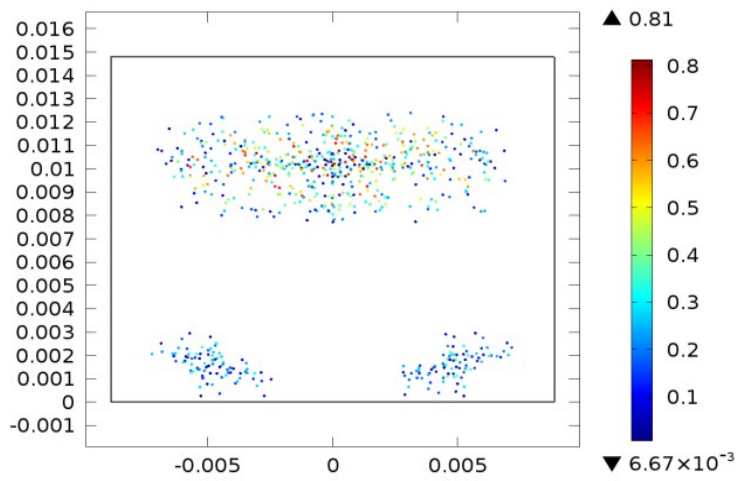
Για συχνότητα $f=20000\text{hz}$



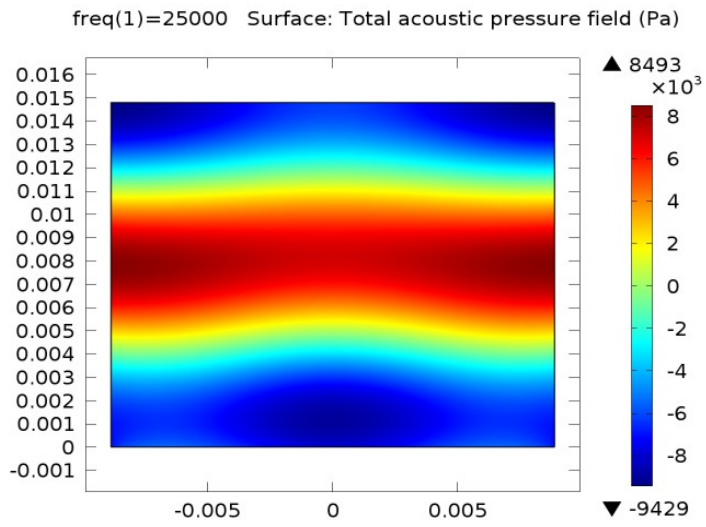
freq(1)=20000 Surface: Sound pressure level (dB)

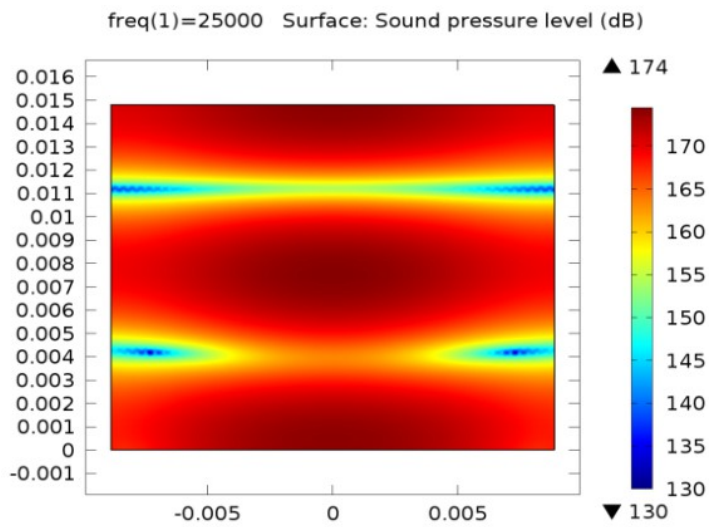
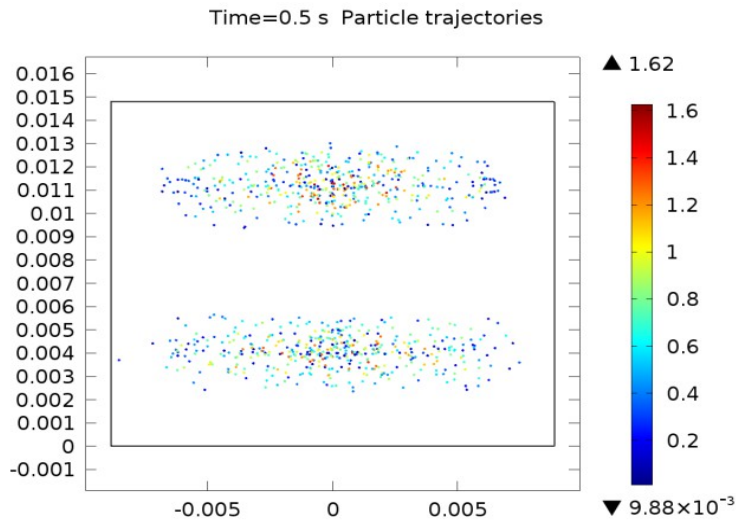


Time=0.5 s Particle trajectories

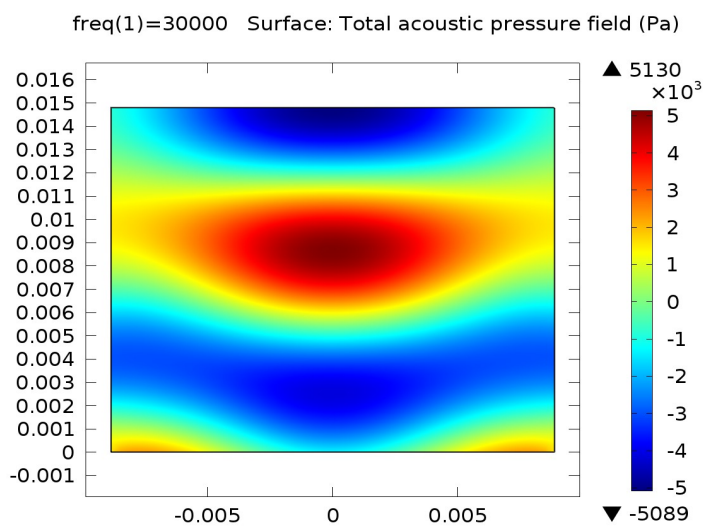


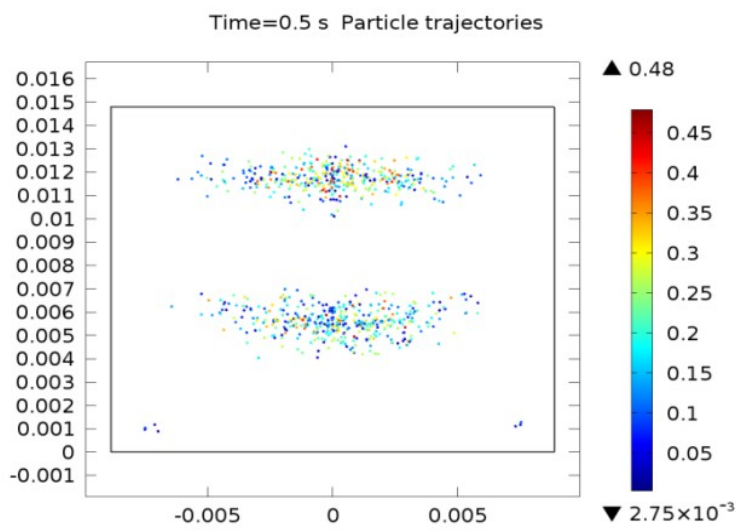
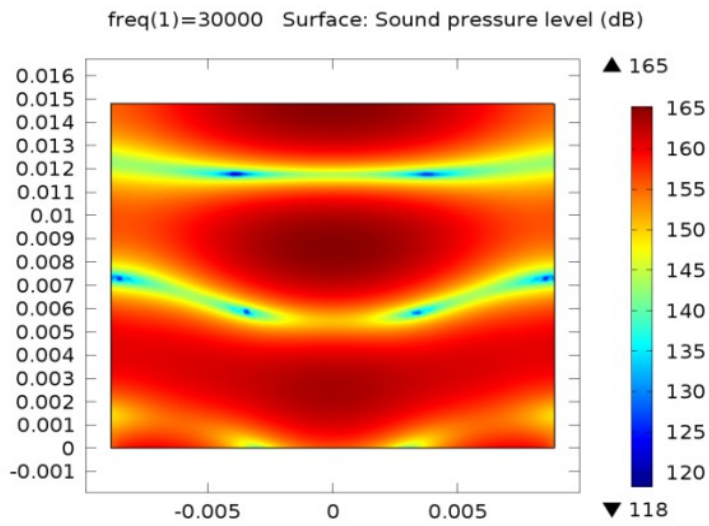
Για συχνότητα $f=25000\text{Hz}$





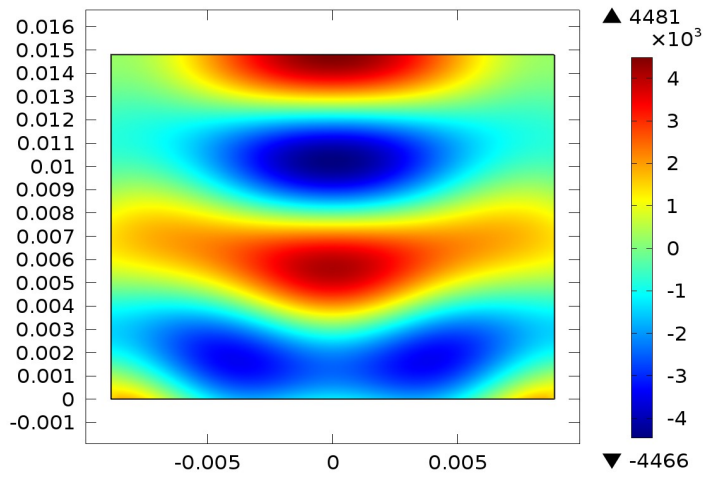
Για συχνότητα $f=30000\text{Hz}$



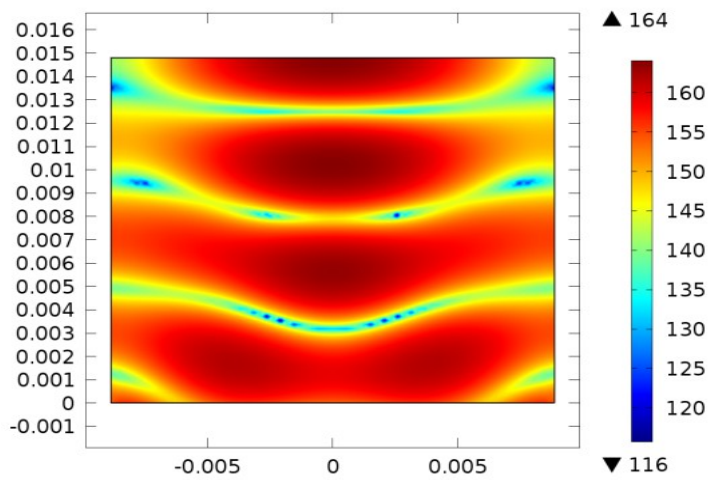


Για συχνότητα $f=40000\text{Hz}$

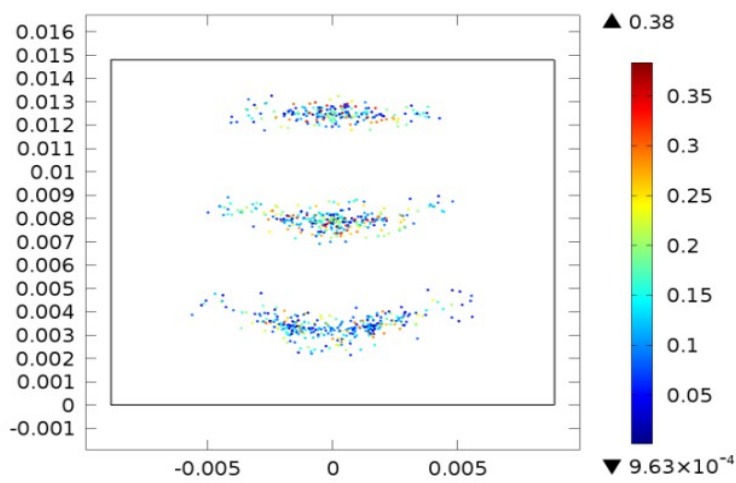
freq(1)=40000 Surface: Total acoustic pressure field (Pa)



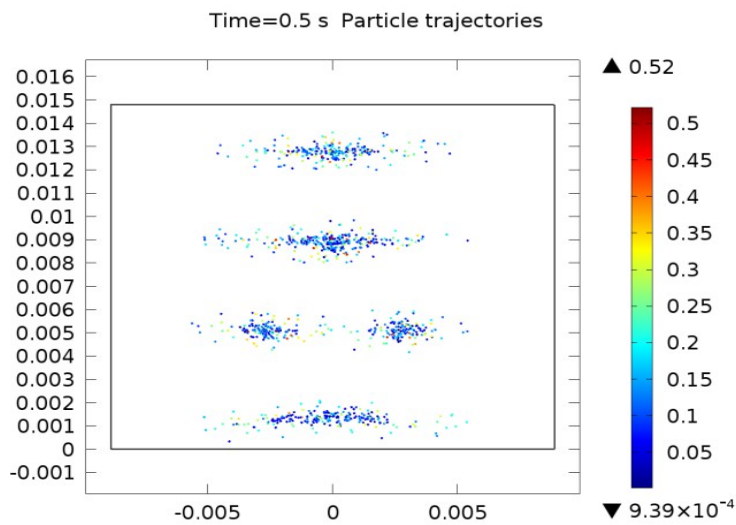
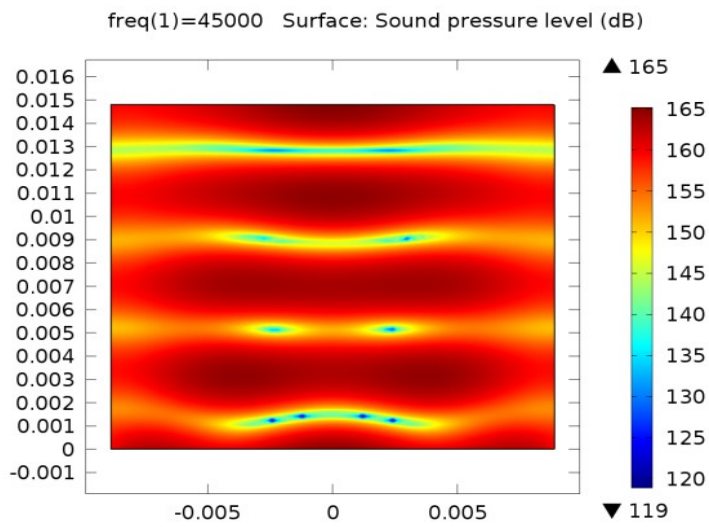
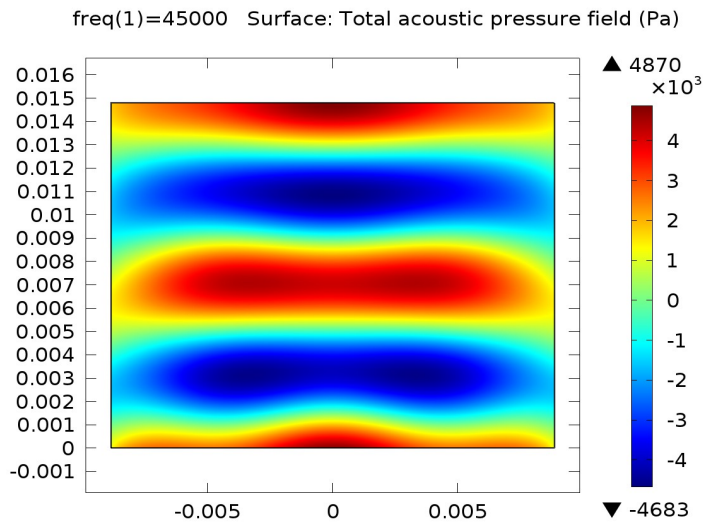
freq(1)=40000 Surface: Sound pressure level (dB)



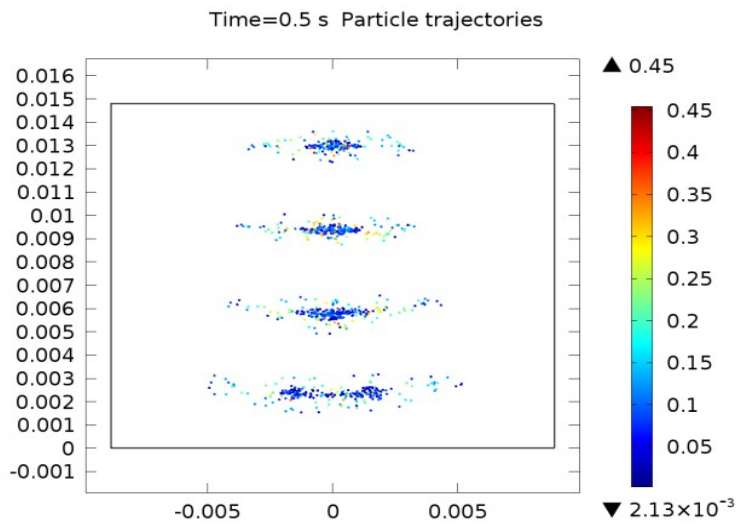
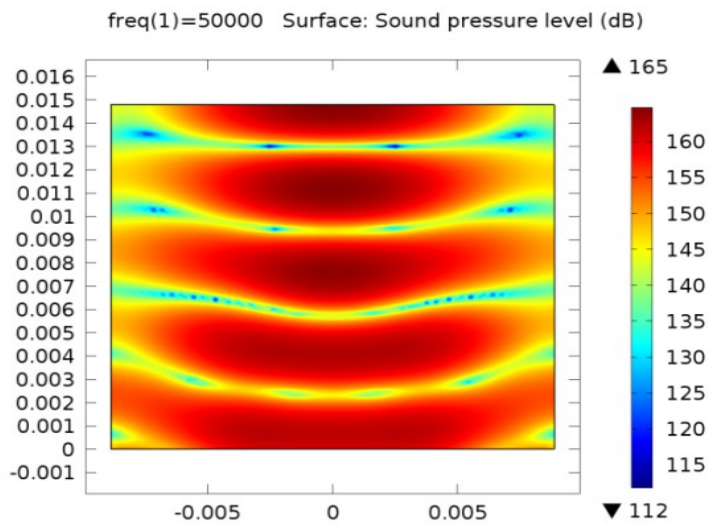
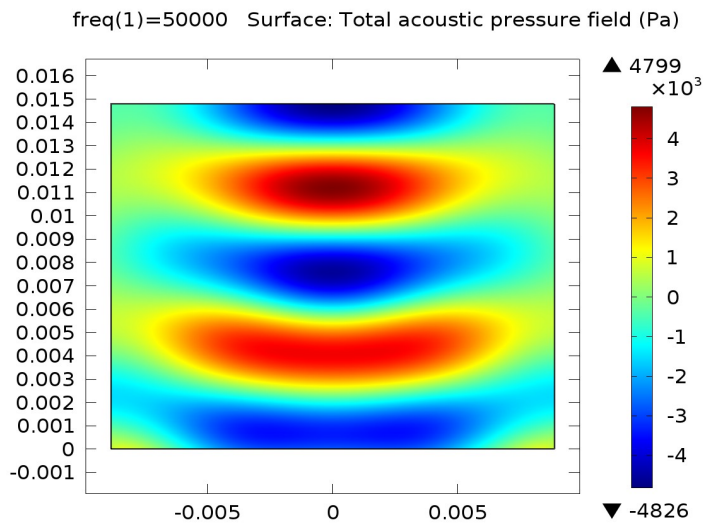
Time=0.5 s Particle trajectories



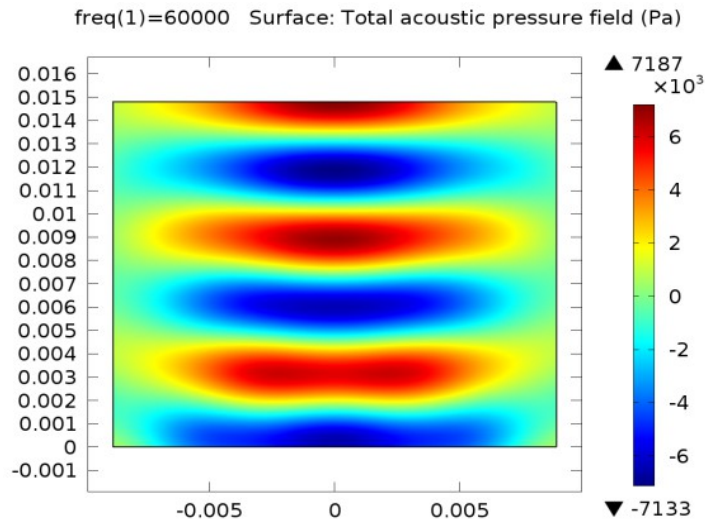
Για συχνότητα $f=45000\text{Hz}$

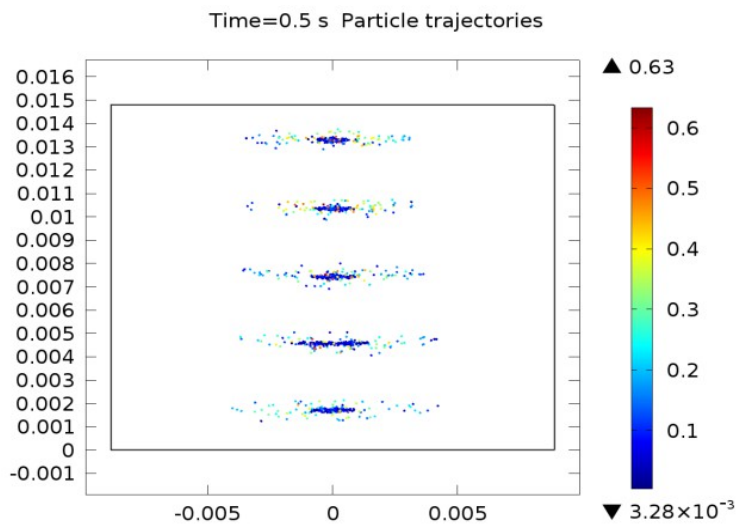
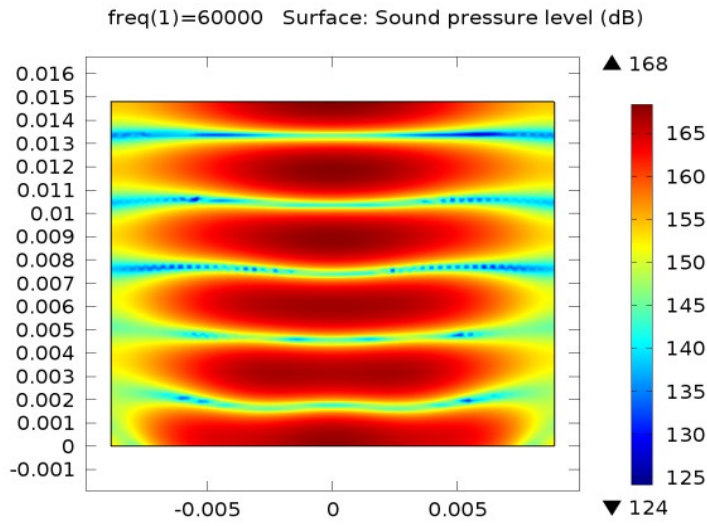


Για συχνότητα $f=50000\text{Hz}$



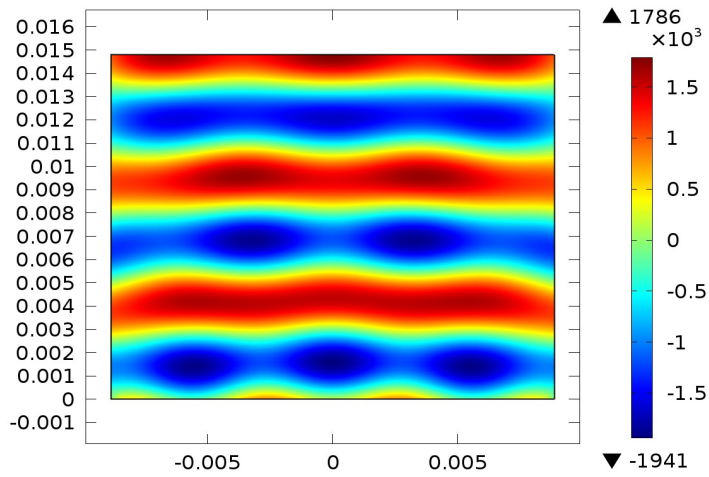
Για συχνότητα $f=60000\text{Hz}$



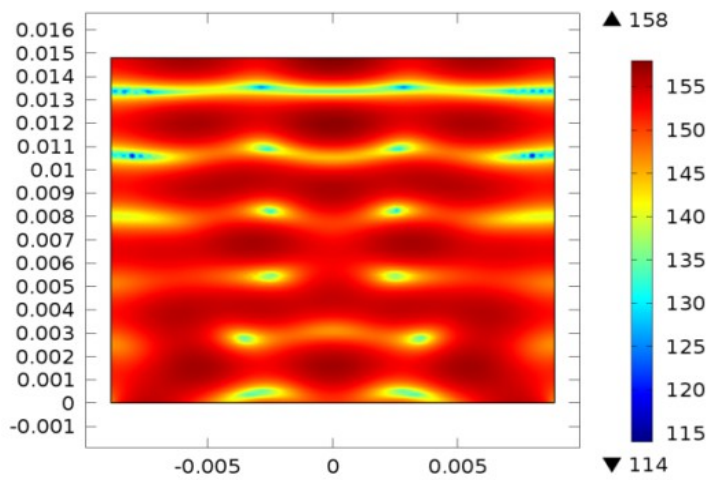


Για συχνότητα $f=65000\text{Hz}$

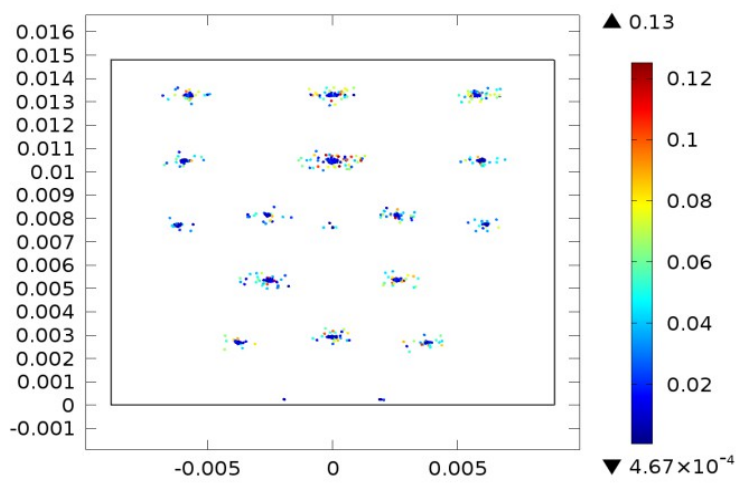
freq(1)=65000 Surface: Total acoustic pressure field (Pa)



freq(1)=65000 Surface: Sound pressure level (dB)

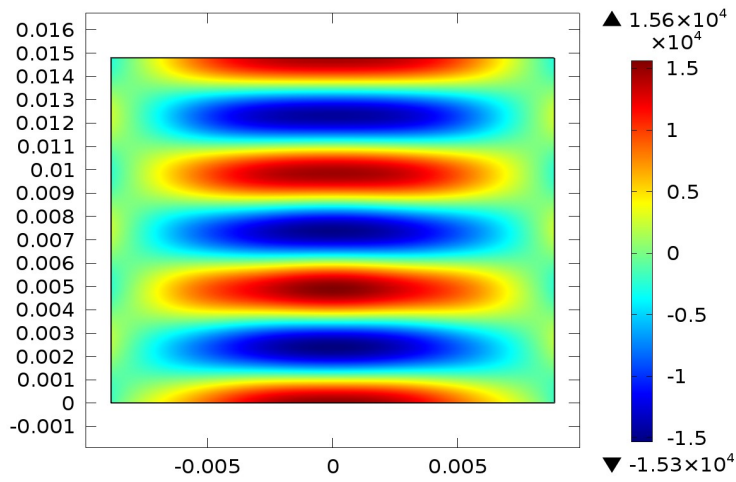


Time=0.5 s Particle trajectories

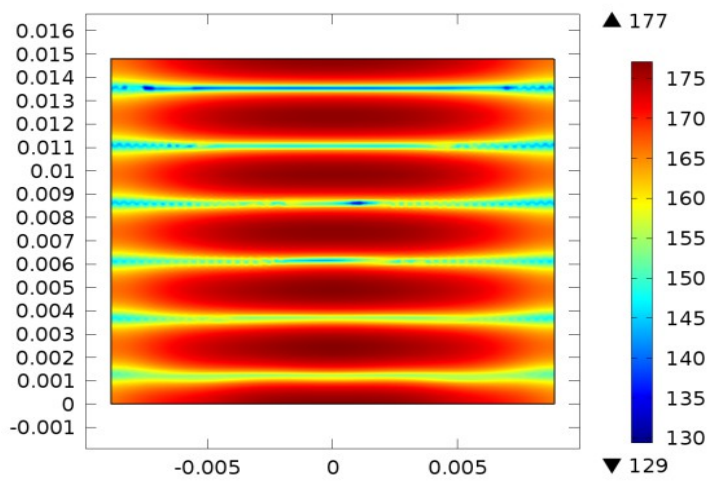


Για συχνότητα $f=70000\text{Hz}$

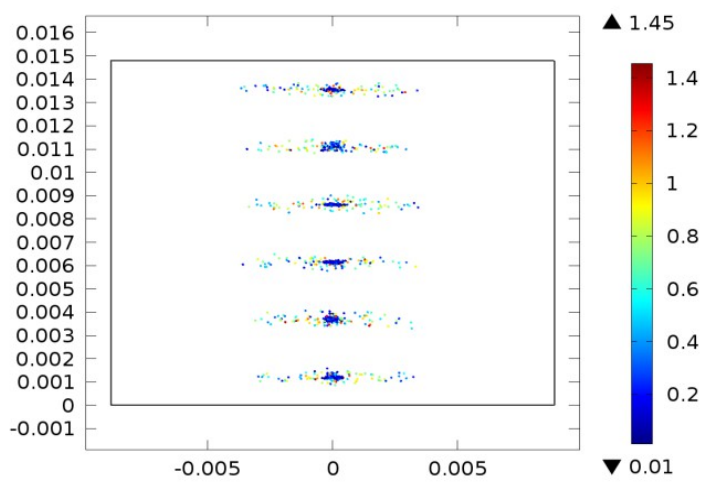
freq(1)=70000 Surface: Total acoustic pressure field (Pa)



freq(1)=70000 Surface: Sound pressure level (dB)



Time=0.5 s Particle trajectories

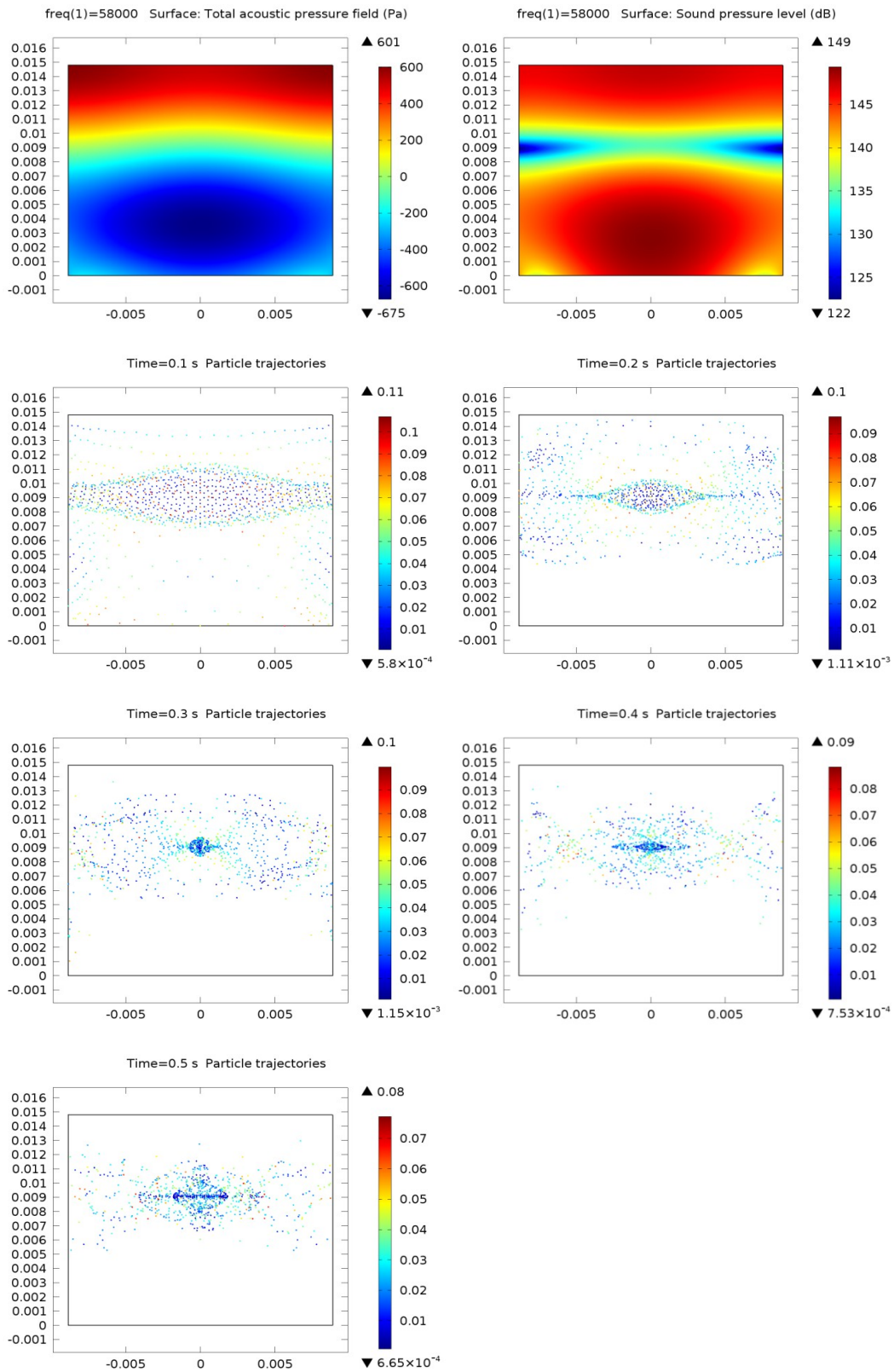


Στα παραπάνω σχήματα η απεικόνιση έγινε μόνο σε χρόνο 0.5s ενώ η τροποποίηση έγινε κανονικά όπως και στην κατανομή από χρόνο 0s έως 0.5s με βήμα 0.01s. Στα παραπάνω σχήματα φαίνεται ο διαχωρισμός που υλοποιήθηκε, αυτό όμως συνέβη ξεκάθαρα από κάποια συχνότητα και μετά. Αν παρατηρήσουμε τις εικόνες των συχνοτήτων 20,25 και 30KHz τότε θα δούμε πως δεν υπάρχει ουσιαστικός διαχωρισμός και το σύστημα λειτουργεί κανονικά όπως στην κατανομή των σωματιδίων στο αρχικό πείραμα με ένα είδος σωματιδίων. Από την συχνότητα 40KHz (όπου αρχίζει να φαίνεται ο διαχωρισμός) και μετά υπάρχει ένας ξεκάθαρος εμφανής διαχωρισμός των δυο σωματιδίων διαφορετικής διαμέτρου. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα σωματίδια οδηγούμενα από ακουστικές δυνάμεις κατανέμονται στις περιοχές με τις αντίστοιχες κίτρινες λωρίδες σε ένα σχήμα στάθμης ακουστικής πίεσης, όπου σε εκείνες τις περιοχές υπάρχει μια στάθμη από 145 έως 155db ανάλογα με την συχνότητα. Επειδή η δύναμη ακουστοφόρησης είναι ανάλογη της παραγωγού της ακουστικής πίεσης, ίσως για αυτόν τον λόγο μετά τα 40KHz εμφανίζεται ο διαχωρισμός των σωματιδίων αφού εκεί υπάρχουν απότομες χωρικές αυξομειώσεις της ακουστικής πίεσης. Μετά τα 40KHz διακρίνουμε μια εστίαση σε κάποια σημεία από τα ελαφριά σωματίδια ενώ τα βαρύτερα δεν εστιάζονται τόσο πολύ και βρίσκονται σε ποιο μεγάλη απόσταση μεταξύ τους. Στις κεντρικές περιοχές εστίασης βρίσκονται κυρίως τα σωματίδια του ενός είδους ενώ τα άλλα είναι κατανεμημένα σε αρκετά μεγαλύτερο πλάτος και πάχος δομής.

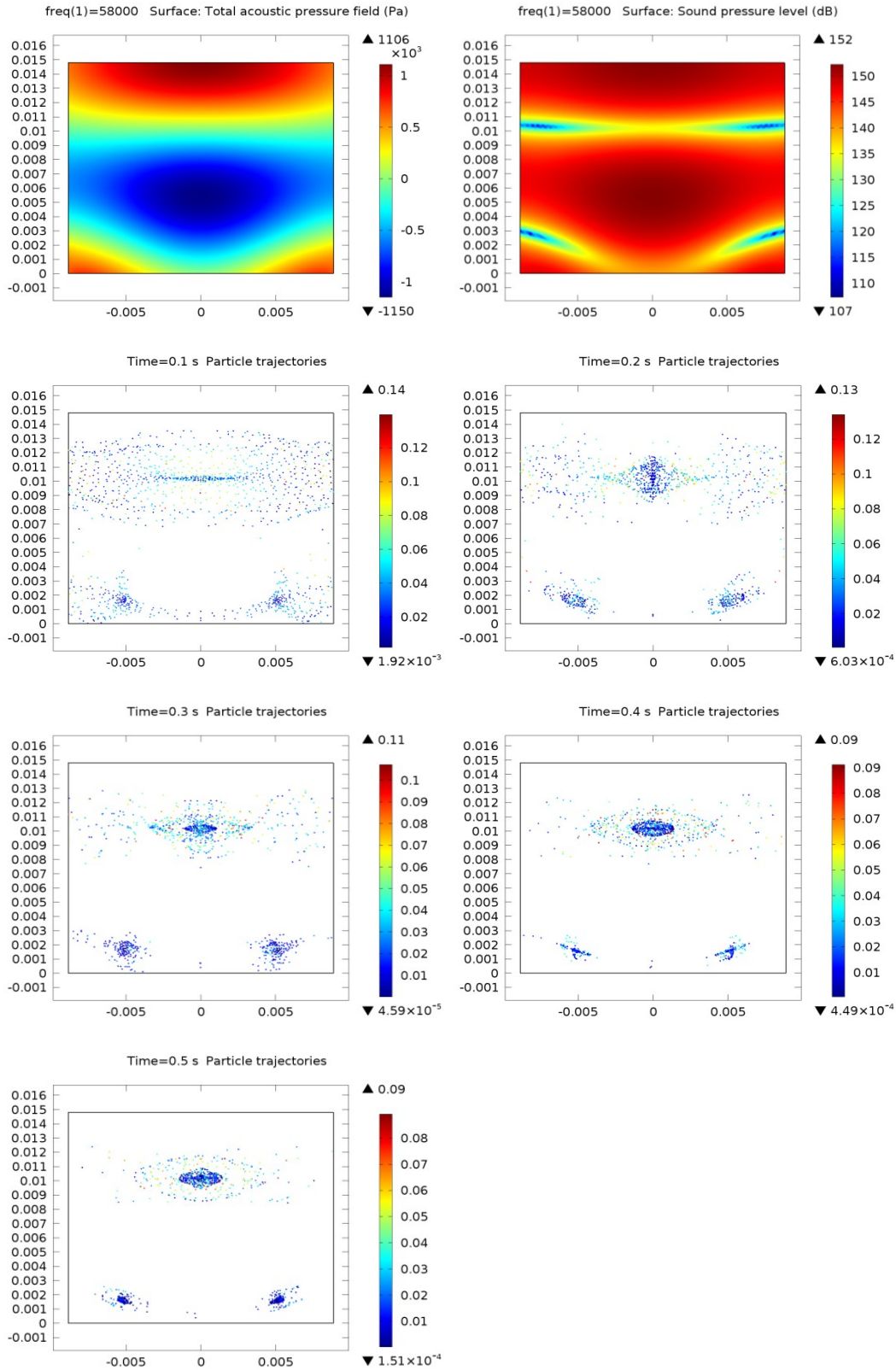
3.5 Διαχωρισμός σε διαφορετικό μέσο διάδοσης

Στην συνέχεια επαναλαμβάνουμε το πείραμα με ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους, με την μόνη διαφορά ότι αλλάξαμε το μέσο διάδοσης. Τα πειράματα αυτή τη φορά έγιναν στη συχνότητα $f=58\text{KHz}$ και απλά επαναλαμβάνουμε το πείραμα αλλάζοντας το αέριο μέσο διάδοσης όπως αναφέραμε παραπάνω. Όπως ήδη αναφέραμε η δύναμη ακουστοφόρησης εξαρτάται την χωρική παράγωγο της ακουστικής πίεσης και είναι αντίστροφος ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο μέσο. Αυτό σημαίνει ότι αλλάζοντας το μέσο διάδοσης και κατά συνέπεια την ταχύτητα διάδοσης του ήχου, c , θα επηρεάζεται κάθε φορά και η δύναμη ακουστοφόρησης. Έτσι περιμένουμε διαφορετικές κατανομές σωματιδίων σε διαφορετικά μέσα διάδοσης. Οι ταχύτητες διάδοσης για κάθε μέσο τις ορίζουμε στην δομή «material» όπως ορίσαμε και για τον αέρα στα προηγούμενα πειράματα. Οι ταχύτητες του ήχου για τα διάφορα μέσα που χρησιμοποιήσαμε είναι για το Υδρογόνο 1270m/s, για Αργό 319m/s, για το Ήλιο 1007 m/s και για το Ξένο 178m/s. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ο διαχωρισμός των σωματιδίων σε κάθε διαφορετικό μέσο και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους ανά 0.1s. Η συχνότητα διαταραχής θα είναι σταθερή σε κάθε μέσο διάδοσης, $f=58\text{KHz}$.

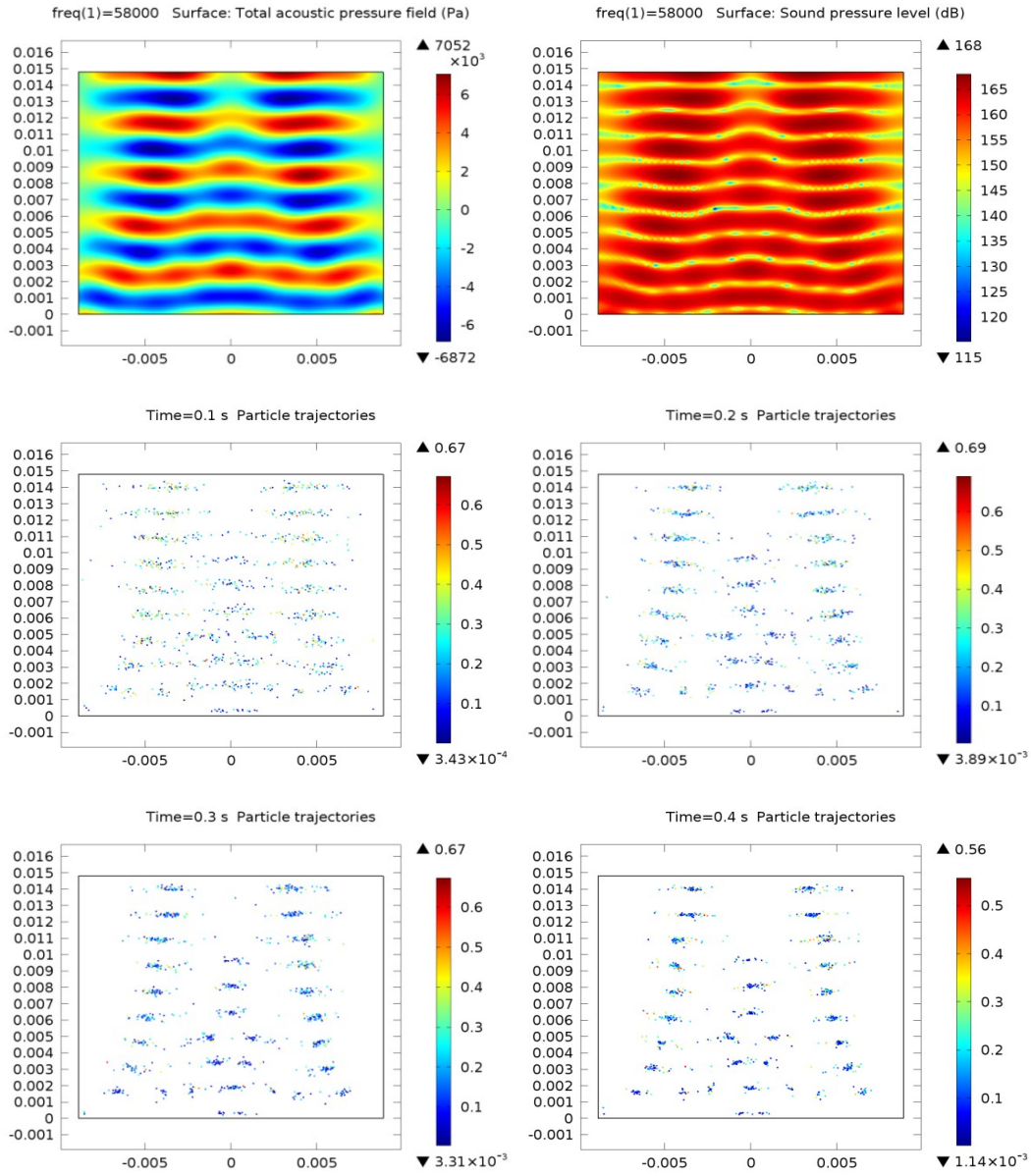
Υδρογόνο (H₂):

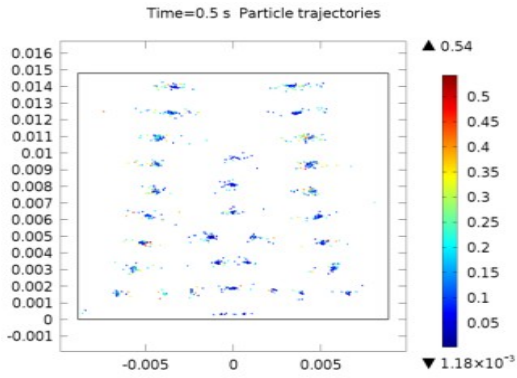


Ήλιο (He):

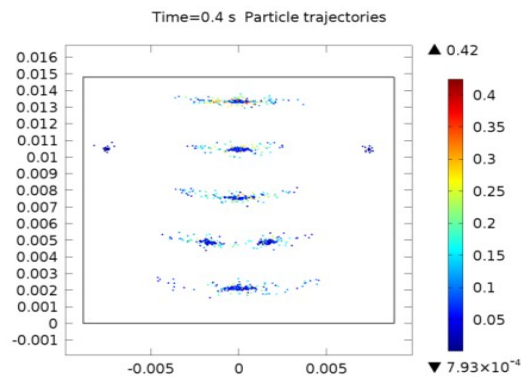
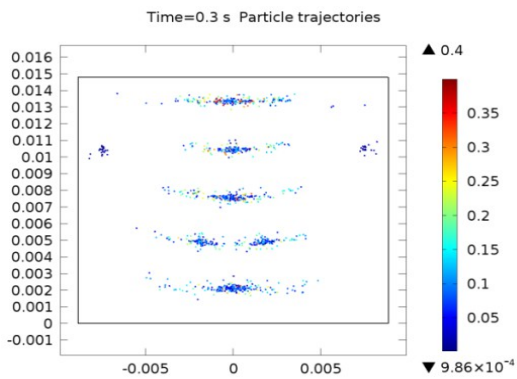
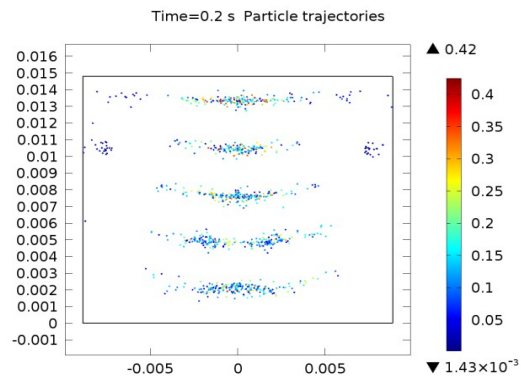
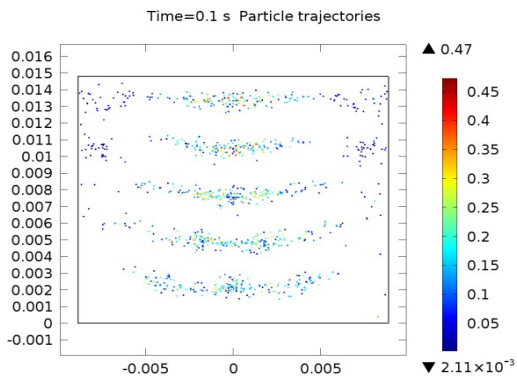
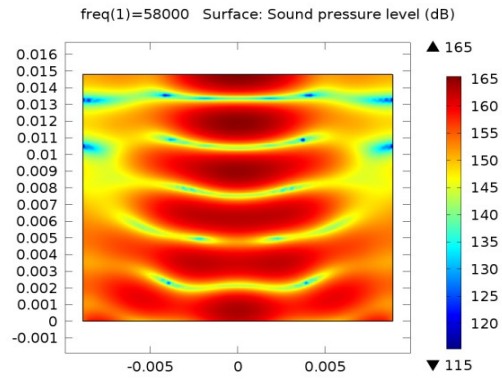
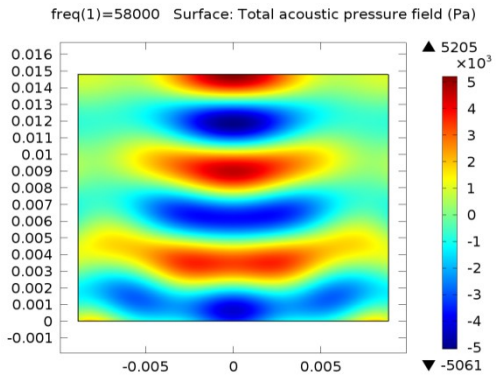


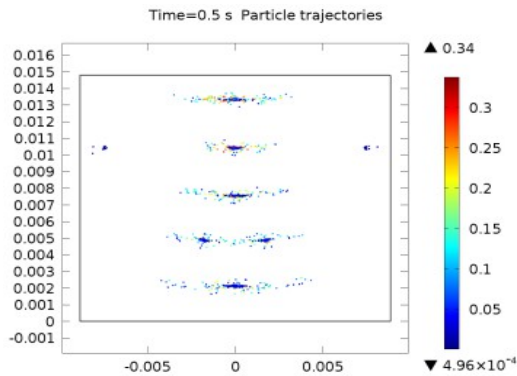
Ξένο (Xe)





Αργό (Ar):





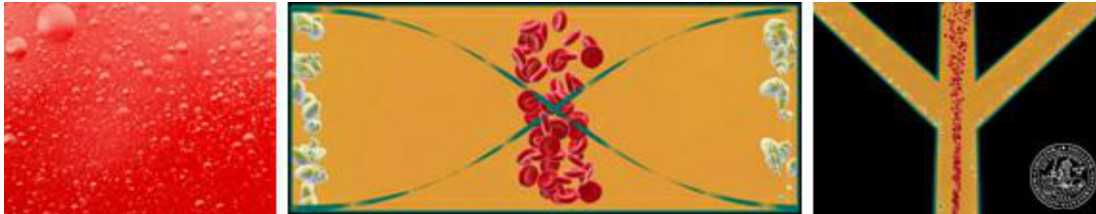
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Συμπεράσματα – Εφαρμογές Μεθόδου

4.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων-συμπεράσματα, εφαρμογές μεθόδου

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει ο διαχωρισμός των σωματιδίων που πραγματοποιήθηκε στα πειράματά μας, εξαρτάται από την συχνότητα διέγερσης του χώρου που αυτά βρίσκονται και επομένως από την κατατομή της πίεσης που υπάρχει στον χώρο. Εξαρτάται όμως και από το μέσο διάδοσης του χώρου αυτού. Αν παρατηρήσουμε και στα σχήματα των αποτελεσμάτων, σε μέσο με μικρή ταχύτητα διάδοσης όπως για παράδειγμα στο Ξένο ο διαχωρισμός είναι πιο εμφανής και χρειάζεται λιγότερο χρόνο για να πραγματοποιηθεί από ότι σε μέσο με μεγαλύτερη ταχύτητας διάδοσης όπως στο πχ στο Υδρογόνο, στο οποίο και χρειάστηκε χρόνος μεγαλύτερος του 0.2 s για να είναι εμφανής και μάλιστα μόνο σε ένα συγκεκριμένο μέρος στον χώρο. Σε αυτό το αποτέλεσμα σίγουρα θα πρέπει να λάβουμε υπόψη μας τις διαστάσεις του χώρου και σε ποια συχνότητα συντονίζει στο συγκεκριμένο μέσο, αλλά και το γεγονός ότι η παράγωγος της ακουστική πίεση είναι υπεύθυνη για την όποια κίνηση που κάνουν τα σωματίδια και η οποία με την σειρά της είναι αντίστροφος ανάλογη με την ταχύτητα διάδοσης του μέσου. Αν δηλαδή έχουμε ένα μέσο με ταχύτητα διάδοσης μεγάλη όπως π.χ. το Υδρογόνο τότε η παράγωγος της ακουστικής πίεσης είναι σχετικά μικρότερη σε σχέση με αυτή που δημιουργείται σε ένα «δυσκίνητο» σχετικά ως προς την διάδοση υλικής διαταραχής μέσο όπως το Ξένο ή ακόμα και το Αργό. Συμφώνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων, συμπεραίνουμε ότι το συνολικό μέγεθος της κίνησης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Κάποιοι από αυτούς είναι το μέγεθος των σωματιδίων (άρα και το βάρος), το πλάτος της ακουστικής πίεσης και η συχνότητα του ακουστικού κύματος. Η κατεύθυνση που θα κινηθεί το σωματίδιο εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα και την συμπιεστότητα τόσο του σωματιδίου όσο και του μέσου στο οποίο μεταδίδεται.

Η χρήση διαχωρισμού με ακουστική ακτινοβολία και δυνάμεις φαίνεται να έχει πολύ επιστημονικό ενδιαφέρον. Η χρήση της έχει εφαρμογή σε πολλούς τομείς της επιστήμης και της τεχνολογίας όπως για παράδειγμα στην ιατρική. Π.χ. ιδιαίτερο ενδιαφέρον μπορεί να έχει σε αιματολογικές θεραπείες, όπου χρειάζεται διαχωρισμός του καθαρού μέρους που αποτελείται μόνο από αιμοπετάλια, ερυθρά αιμοσφαίρια ή πλάσμα. Πρόκειται για ένα σύστημα το οποίο πχ χρησιμοποιώντας την δύναμη της ακουστοφόρησης θα μπορούσε πχ να απομακρύνει πρωτεΐνες και πλάσμα και άλλες χαμηλού μοριακού βάρους ενώσεις από τα ερυθρά αιμοσφαίρια με την χρήση

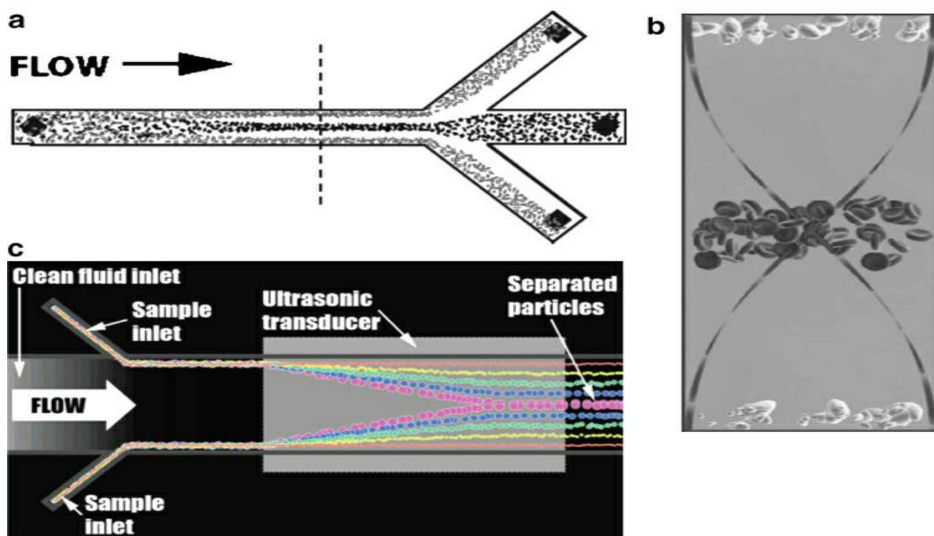
υπερήχων. Άρα το αρχικό δείγμα αίματος διαχωρίζεται μέσω της ακουστικής ακτινοβολίας σε δείγμα χωρίς πρωτεΐνες και λιπίδια. Αυτό το αποτέλεσμα του δείγματος χωρίς πρωτεΐνες και λιπίδια βοηθά πχ στην στοχευόμενη μετάγγιση αίματος σε ασθενείς που πάσχουν από ανεπάρκεια αιμοσφαιρίνης .



Εικόνα 4.1: αριστερότερα το δείγμα αίματος με τα λιπίδια , στο κέντρο ο διαχωρισμός δεξιά ο διαχωρισμός στον κόμβο.

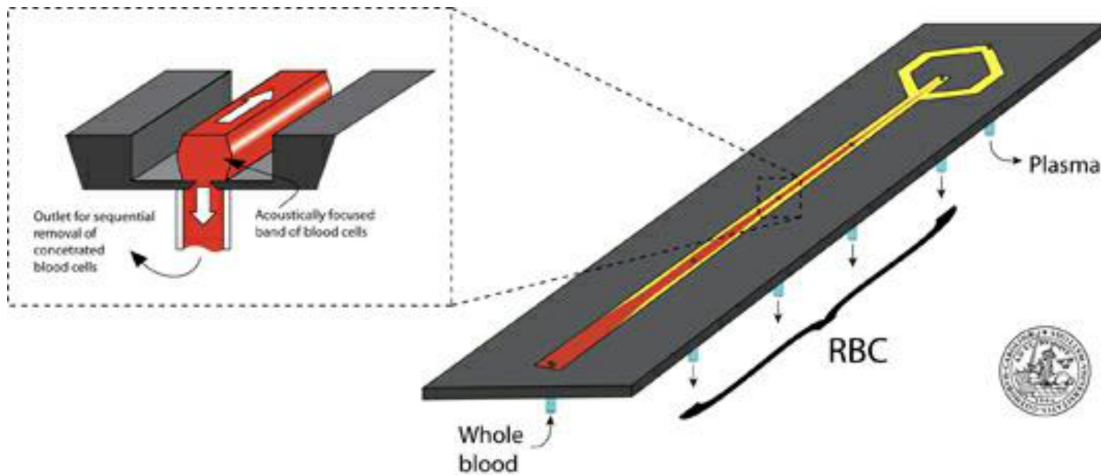
Κατά παρόμοιο τρόπο λειτουργούν σήμερα οι μέθοδοι για χειρισμό και καθαρισμό κυττάρων . Βασικές λειτουργίες της ακουστοφορεσης για δυαδικό διαχωρισμό “πλύσιμο” κυττάρων παρατηρούνται στις κλινικές διαγνωστικές και θεραπευτικές μεθόδους. Οι εφαρμογές ακουστικών δυνάμεων έχουν χρησιμοποιηθεί εδώ και δεκαετίες για να χειριστούν σωματιδιακή ύλη. Με ακριβή σχεδιασμό και καθορισμένες συνθήκες του ρευστού, (δηλαδή η σωστή ροή) επιτυγχάνεται ο σωστός ελεγχος και διαχωρισμός των κυττάρων. Τα κυτταρα που υπάρχουν σε ένα ακουστικό πεδίο θα δεκτον μια ακουστική δύναμη τέτοιας ακτινοβολίας η οποία θα τα αναγκάσει να μεταναστεύσουν. Η κίνηση αυτή θα είναι είτε στον δεσμό του κύματος είτε στην κοιλιά. Αυτή η κατεύθυνση της κίνησης εξαρτάτε από τις φυσικές ιδιότητες τόσο του κύτταρου όσο και του μέσου διάδοσης. Ποιο συγκεκριμένα στο παρακάτω σχήμα θα περιγράψει ο διαχωρισμός αυτός. Προκηται για σύστημα χειρισμού κυττάρων με ελάχιστη μηχανική καταπόνηση που προκαλείται από ακουστικές δυνάμεις.

Η επιρροή της ακουστικής αυτής δύναμης όπως αναφέραμε εξαρτατε από τις ιδιότητες των κυττάρων άλλα και του μέσου διάδοσης. Ξεκινάει λοιπόν κάποιο δείγμα κυττάρων από το σημείο αφετηρίας, οπου κουνονται δια μέσου του σωλήνα. Σε κάποιο σημείο ξεκινάει η ακουστική δύναμη να επηρεάζει την κατεύθυνση των κυττάρων , κάποια κοινιούνται στο μέσο δηλαδή σε δεσμό και κάποια στις κοιλίες, δηλαδή στα τοιχώματα, αναλογα τις δαστάσεις τους. Κατευθυνόμενα λοιπον προς τον κόμβο που υπάρχει στο σύστημα (κάποια κύτταρα ή σωματίδια με τις διαστάσεις που κατευθύνονται από την ακουστική ακτινοβολία δια μεσου των τοιχομάτων) οδηγούνται αριστερά και δεξιά, ενώ τα υπόλοιπα που κοινωντουσαν στην μέση του μέσου οδηγούνται στο κέντρο του κόμβου. Με αυτόν τον τρόπο το αρχικό δήγμα κυττάρων που έχουμε καθαρίζει από αθέμιτες ουσίες. Οι οποίες εχουν διαφορετική διάμετρο από τα καθαρά



Εικόνα 4.2 α) κίνηση σωματιδίων και διαχωρισμός στον κόμβο β) διαχωρισμός κυττάρων και κοιλίες γ)ελεύθερη κίνηση σωματιδίων και διαχωρισμός με ακουστικές δυνάμεις

Το βασικό πλεονέκτημα του διαχωρισμού με ακουστικές δυνάμεις τόσο των κυττάρων όσο κι του αίματος είναι ότι δεν υπάρχει επαφή. Για παράδειγμα στην διάρκεια μιας χειρουργικής επέμβασης το αίμα μπορεί να μολυνθεί, και ένα σύστημα μη-επαφής ώστε να καθαριστεί και να επιστραφεί στον δοτή, χρίζει αναγκαία την λειτουργία διαχωρισμού με ακουστικές δυνάμεις. Πειράματα έχουν δείξει ότι η αποτελεσματικότητα καθαρισμού του αίματος έδειξε 95% ανάκτηση κυττάρων αίματος ενώ το 95% των λιπιδίων σωματιδίων απομακρύνθηκε. Σε άλλη μια περίπτωση όπου θα αποτελούσε για τα συστήματα διαχωρισμού, μείζονα πρόκληση είναι η δημιουργία ελεύθερου κυττάρου πλαζματος υψηλής ποιότητας. Κατά παρόμοιο τρόπο με τους προηγούμενους το πρόβλημα επιλύεται με την χρήση ενός “τσιπ” (βλέπε εικόνα) και την εισαγωγή ενός ζεύγους εξόδων στον κεντρικό πυθμένα του διαύλου διαχωρισμού. Το υγρό δέχεται καθολη την διάρκεια της κίνησης του ακουστική ακτινοβολία. Τελικά σιγά σιγά λόγω των ακουστικών δυνάμεων το πλάσμα οδηγούμενο από τα τοιχώματα εκτρέπεται προς τις πλευρές του κόμβου ενώ τα υπόλοιπα κύτταρα εξέρχονται από την κεντρική έξοδο. Προφανώς αυτο για να επιτευχθεί με τον βέλτιστο τρόπο χρειάζεται χρόνος, γ’αυτον τον λόγο τα “τσιπ” περνούν και την μορφή ενός μεανδρου, για να προλάβουν ακουστικές δυνάμεις να διαχωρίσουν τα σωματίδια (πλάσμα) πριν τον κόμβο. Το “τσιπ” ακουστικής πλασματοσφαιρισης αποδείχθηκε ικανό να παράγει πλέγμα με κυτταρική περιεκτικότητα μικρότερη από 6×10^9 ερυθροκυτταρα ανά λίτρο, επίπεδο που το καθιστά ικανό για μετάγγιση.



Εικόνα 4.3 “τσιπ” ελεύθερης κινήσεις κυττάρων και διαχωρισμού με ακουστική ακτινοβολία

Τέλος μια άλλη εφαρμογή θα μπορούσε να είναι ο διαχωρισμός αερίων από μείγματα που υπάρχουν στην φύση. Ο διαχωρισμός αυτός θα μπορούσε να είναι φθηνός και γρήγορος και να γίνει στην πηγή του αερίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Σκαρλάτος Δημήτρης[2003] «Εφαρμοσμένη Ακουστική»

Επιστημονικά άρθρα:

- [2] Filip Petersson, Lena Åberg, Ann-Margret Swärd-Nilsson, and Thomas Laurell, Free Flow Acoustophoresis: Microfluidic-Based Mode of Particle and Cell Separation, (2007)
- [3] Diana G. Sadikova, Timofey N. Pashovkin, Cell Concentration and Separation in the Field of a Standing Ultrasonic Wave for Medicine and Biotechnology (2013)
- [4] A. Wloch, H. Czyz, T. Jasinski, Ultrasonic Methods of the Cells Separation in Human Blood (2014)
- [5] A. Lenshof, T. Laurell, Emerging Clinical Applications of Microchip-Based Acoustophoresis (2011)
- [6] Anke Urbansky, Andreas Lenshof, Josefina Dykes, Thomas Laurell, Stefan Scheduling, Affinity-Bead-Mediated Enrichment of CD8+ Lymphocytes from Peripheral Blood Progenitor Cell Products Using Acoustophoresis (2016)
- [7] Lenshof A, T. Laurell, Continuous separation of cells and particles in microfluidic systems (2010)
- [8] Sameer Deshmukh, Zbigniew Brzozka, Thomas Laurell, Per Augustsson, Acoustic radiation forces at liquid interfaces impact the performance of acoustophoresis (2014)
- [9] Filip Petersson, Andreas Nilsson, Cecilia Holm, Henrik Jonsson, Thomas Laurell, Separation of lipids from blood utilizing ultrasonic standing waves in microfluidic channels (2004)
- [10] Filip Petersson, Andreas Nilsson, Cecilia Holm, Henrik Jonsson, Thomas Laurell, Continuous separation of lipid particles from erythrocytes by means of laminar flow and acoustic standing wave forces (2004)