

# ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής



*Πτοχιακή εργασία*

**Υπολογιστική πλατφόρμα για τη μελέτη της ηλεκτρακουστικής  
εγκατάστασης κλειστού χώρου με χρήση της γλώσσας  
προγραμματισμού Octave**

**Λουκάς Λαμπούδης**

*Επιβλέπων: Νικόλαος Στεφανάκης*

*Επίκουρος Καθηγητής*

*Ρέθυμνο, [μήνας] [έτος]*



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ**  
Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής

*Πτυχιακή Εργασία*

**Υπολογιστική πλατφόρμα για τη μελέτη της ηλεκτρακουστικής  
εγκατάστασης κλειστού χώρου με χρήση της γλώσσας  
προγραμματισμού Octave**

*Του*

*Λουκά Λαμπούδη*

*Επιβλέπων καθηγητής: Νικόλαος Στεφανάκης*

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την [Ημερομηνία ...η .... ..].

.....

XXX XXX

Βαθμίδα

.....

XXX XXX

Βαθμίδα

.....

XXX XXX

Βαθμίδα

*Ρέθυμνο, [ημέρα] [μήνας] [έτος]*

## Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Λουκάς Λαμπούδης, 2023

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

## Σημείωση

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους φίλους και φίλες μου για την πολύτιμη υποστήριξη που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια της πανδημίας. Η παρουσία και η ενθάρρυνση τους ήταν αποφασιστική για να μπορέσω να ασχοληθώ με αφοσίωση με τις σπουδές μου και να ολοκληρώσω αυτή τη φάση της ζωής μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την σύντροφο μου Ηρώ που ήταν δίπλα σε όλη τη διάρκεια πραγματοποίησης αυτής της πτυχιακής για την στήριξη της.

Δεν μπορώ να παραλείψω να εκφράσω την ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη μου προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Νικόλαο Στεφανάκη, για την αμέριστη βοήθεια και την εκτεταμένη καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλους τους τομείς αυτής της εργασίας. Η γνώση και η εμπειρία του αποδείχθηκαν πολύτιμες κατά τη διάρκεια της υλοποίησης της εργασίας και διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη των αποτελεσμάτων που προσπαθούσα να επιτύχω.

Τέλος, θέλω να αφιερώσω αυτήν την εργασία στη μακροχρόνια φίλη και συγκάτοικο μου για 13 χρόνια, τη Siu Fu, που χάθηκε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας. Η απουσία της ήταν ένας μεγάλος πόνος, αλλά η αφιέρωση αυτής της εργασίας σε αυτήν την αγαπημένη μου γάτα αποτελεί έναν τρόπο να τιμήσω τη μνήμη της και να εκφράσω την αιώνια ευγνωμοσύνη μου για την παρουσία της στη ζωή μου.

# Πίνακας Περιεχομένων

Σημείωση .....	4
Περίληψη .....	8
Abstract.....	9
Εισαγωγή .....	10
Απόδοση όρων .....	12
<b>1. Βασικά στοιχεία θεωρίας.....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Βασικές αρχές της θεωρίας της ακουστικής .....</b>	<b>13</b>
1.1.1 Υπολογισμός ηχητικών κυμάτων (Στάθμη πίεσης) .....	13
1.1.2 Σχέση στάθμης πίεσης και decibel (dB) .....	14
1.1.3 Πρόσθεση ασυσχέτιστων ηχητικών πηγών σε dB .....	15
1.1.4 Σχέση ηχητικής ισχύος και στάθμης ηχητικής ισχύος.....	16
1.1.5 Συντελεστής κατευθυντικότητας Q.....	16
1.1.6 Υπολογισμός απευθείας ήχου για μία συχνότητα.....	17
<b>1.2 Θεωρία ακουστικής για κλειστούς χώρους .....</b>	<b>18</b>
1.2.1 Συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς χώρους.....	18
1.2.2 Συντελεστής απορρόφησης και μέσος συντελεστής απορρόφησης .....	19
1.2.3 Πεδίο αντήχησης και σταθερά δωματίου.....	21
1.2.4 Κρίσιμη απόσταση.....	22
1.2.5 Διαφορά απευθείας προς ανακλώμενο ήχο (DRR).....	23
<b>2. Το μοντέλο κατευθυντικής συμπεριφοράς του ηχείου. ....</b>	<b>24</b>
<b>2.1 Η κατεύθυνση του ηχείου .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2 Η γωνιακή απόκριση του ηχείου .....</b>	<b>25</b>
<b>3. Υλοποίηση της ηλεκτρακουστικής μελέτης στο Octave .....</b>	<b>28</b>

<b>3.1 Προγραμματισμός στο Octave .....</b>	<b>28</b>
3.1.1 Αντικειμενοστραφής προγραμματισμός (object - oriented programming) .....	28
3.1.2 Τί είναι το Octave .....	29
<b>3.2 Η δομή του προγράμματος.....</b>	<b>30</b>
3.2.1 Περιεχόμενο του κώδικα.....	30
3.2.2 Η κλάση “Room” .....	30
3.2.3 Η κλάση “Area” .....	32
3.2.4 Η κλάση “Loudspeaker” .....	33
3.2.5 Η συνάρτηση “angularResponse” .....	35
3.2.6 Η συνάρτηση “calculateSoundLevels” .....	37
3.2.7 Η συνάρτηση “calculateSoundLevelsOmega” .....	39
3.2.8 Η συνάρτηση “calculateCosts” .....	42
3.2.9 Η συνάρτηση “plotAcoustics” .....	43
3.2.10 Οι συναρτήσεις “TUI” και “TUI_omega” .....	44
<b>4. Παραδείγματα χρήσης του κώδικα .....</b>	<b>46</b>
<b>4.1 Γενικές οδηγίες.....</b>	<b>46</b>
<b>4.2 Παραδείγματα .....</b>	<b>47</b>
4.2.1 Παράδειγμα 1 (1 ηχείο) .....	47
4.2.2 Παράδειγμα 2 (Περιμετρικά) .....	49
4.2.3 Παράδειγμα 3 (Ηχεία στην οροφή).....	51
4.2.4 Παράδειγμα 4 (Ηχεία στο δάπεδο) .....	53
<b>4.3 Παραδείγματα για συγκεκριμένη συχνότητα .....</b>	<b>54</b>
4.3.1 Παράδειγμα 5 (2 ηχεία, 1kHz).....	54
4.3.2 Παράδειγμα 6 (2 Line Arrays των 5 ηχείων, 5kHz) .....	56

<b>5. Συμπεράσματα - Προτάσεις.....</b>	<b>59</b>
<b>5.1 Συμπεράσματα.....</b>	<b>59</b>
<b>5.2 Προτάσεις .....</b>	<b>59</b>
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>61</b>
<b>Εργαλεία υλοποίησης.....</b>	<b>62</b>
<b>Σύνδεσμος για κατέβασμα του προγράμματος.....</b>	<b>62</b>

## Περίληψη

Η εργασία αποσκοπεί στη δημιουργία ενός προγράμματος στο προγραμματιστικό περιβάλλον Octave για τη μελέτη ηλεκτρακουστικών εγκαταστάσεων σε κλειστούς ή ανοιχτούς χώρους. Το πρόγραμμα επιτρέπει τον υπολογισμό της στάθμης του απευθείας ήχου σε ένα τρισδιάστατο ορθογώνιο πλέγμα, με τις διαστάσεις του πλέγματος να ορίζονται από τον χρήστη. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει τον αριθμό, τη θέση, τον προσανατολισμό και την κατευθυντικότητα των ηχείων.

Ένα σημαντικό ζήτημα που προέκυψε κατά την υλοποίηση των στόχων του προγράμματος ήταν η δημιουργία ενός μοντέλου για τη γωνιακή απόκριση των ηχείων σε σχέση με την κατευθυντικότητά τους. Παρόλο που η κλασική βιβλιογραφία στην ακουστική παρέχει μαθηματικούς τύπους για τον υπολογισμό της απευθείας ηχητικής πίεσης στον άξονα των ηχείων, δεν παρέχει αντίστοιχους τύπους για σημεία εκτός του άξονα. Στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, αυτό το πρόβλημα επιλύθηκε με τη δημιουργία ενός μοντέλου γωνιακής απόκρισης βασισμένο στην συνάρτηση Cauchy. Η εργασία αποτελεί επέκταση προηγούμενης πτυχιακής του τμήματος (Μπαγιώκος, 2021) σε προγραμματιστικό περιβάλλον με πολλές επιπρόσθετες δυνατότητες και πληροφορίες για μελέτες.

Το πρόγραμμα έχει σχεδιαστεί με στόχο να είναι απλό, κατανοητό και εύχρηστο και να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για πραγματικές μελέτες όσο και για εκπαιδευτικούς σκοπούς.



## **Abstract**

The aim of this project is to create a program in the Octave programming environment for studying electroacoustic installations in both enclosed and open spaces. The program allows users to calculate the direct sound level within a three-dimensional rectangular grid, with the grid dimensions customizable by the user. Furthermore, users have the flexibility to specify the number, position, orientation, and directivity of the loudspeakers.

A significant challenge encountered during the implementation of the program's objectives was the development of a model to accurately represent the angular response of the loudspeakers concerning their directivity. While classical literature in acoustics provides mathematical formulas for calculating the direct sound pressure along the loudspeaker axis, it lacks corresponding formulas for points located off the axis. To address this issue, the program utilizes an angular response model based on the Cauchy function. This work extends a previous departmental thesis (Bagiokos, 2021) to a programming environment with enhanced capabilities and additional information for advanced studies.

The program has been thoughtfully designed to be user-friendly, easily understandable, and straightforward. It serves as a versatile tool suitable for both practical applications and educational purposes.

## Εισαγωγή

Κατά τον σχεδιασμό μιας ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης σε έναν ανοιχτό ή κλειστό χώρο, υπάρχουν πολλές αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν. Παραδείγματα αυτών των αποφάσεων είναι ο αριθμός των ηχείων, η συνολική ισχύς που θα χρησιμοποιηθεί και η τοποθέτηση των ηχείων. Όταν αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα της διάταξης ηχείων σε χώρους με συναθροίσεις ακροατηρίου, και ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούμε κατανεμημένα ηχεία, δηλαδή πολλά ηχεία που είναι διασκορπισμένα στο χώρο, η διαδικασία λήψης αποφάσεων γίνεται πιο πολύπλοκη. Είναι δύσκολο για τον μελετητή να προσδιορίσει την τοποθεσία και τον προσανατολισμό των ηχείων έτσι ώστε ο ήχος να είναι ικανοποιητικός για όλους τους ακροατές.

Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, η παρούσα μελέτη επικεντρώνεται στη χρήση του προγράμματος "Octave" για τη δημιουργία ενός εργαλείου που θα βοηθά τον μελετητή στη λήψη των παραπάνω αποφάσεων όταν ασχολείται με την ηλεκτρακουστική εγκατάσταση σε χώρους. Στόχος του προγράμματος είναι να παρέχει έναν εύκολο τρόπο στον μελετητή για να καθορίζει παραμέτρους όπως η θέση, η ισχύς, ο προσανατολισμός και η κατευθυντικότητα των ηχείων. Με βάση αυτές τις παραμέτρους, το πρόγραμμα δημιουργεί τρισδιάστατα γραφήματα που απεικονίζουν την κατανομή της στάθμης του απευθείας ήχου σε μια τρισδιάστατη περιοχή του χώρου. Επιπλέον, το πρόγραμμα υπολογίζει τη στάθμη του ανακλώμενου ήχου για την περίπτωση ενός κλειστού χώρου, λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές που ισχύουν για το διάχυτο ηχητικό πεδίο. Ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για μελέτη σε ανοιχτό χώρο. Τέλος το πρόγραμμα επιτρέπει και υπολογισμούς για αρμονικές πηγές σε μεμονωμένες συχνότητες, λαμβάνοντας υπόψιν τις διαφορές φάσεις λόγω των διαφορετικών διαδρομών.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται και περιγράφονται τα βασικά θεωρητικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μελέτη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η προσέγγιση που ακολουθήθηκε για την γωνιακή απόκριση.

Στο τρίτο κεφάλαιο εξηγείται ο τρόπος υλοποίησης του προγράμματος. Περιγράφονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και η λειτουργία του προγράμματος, με έμφαση στις τεχνικές λεπτομέρειες και στον ακριβή τρόπο χρήσης του.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει παραδείγματα χρήσης του προγράμματος τα οποία έχουν σκοπό να επιδείξουν τις δυνατότητες του προγράμματος και να λειτουργήσουν ως βοηθητικά παραδείγματα για τους χρήστες.

Το πέμπτο κεφάλαιο αποτελεί τον επίλογο της εργασίας και αναφέρει προτάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις του προγράμματος.

## **Απόδοση όρων**

DRR (Direct to Reverberant Ratio)

Λόγος απευθείας ήχου προς ανακλώμενο

RT60 (Reverberation Time 60dB)

Χρόνος απόσβεσης για 60dB

DC (Distance Critical)

Κρίσιμη απόσταση

# 1. Βασικά στοιχεία θεωρίας

## 1.1 Βασικές αρχές της θεωρίας της ακουστικής

### 1.1.1 Υπολογισμός ηχητικών κυμάτων (Στάθμη πίεσης)

Στις πρακτικές εφαρμογές, η μέτρηση της έντασης του ήχου απαιτεί μια κατάλληλη μονάδα μέτρησης. Λόγω του ότι η μετατόπιση των μορίων του αέρα είναι πολύ μικρή για να μετρηθεί απευθείας, χρησιμοποιούμε τη μεταβολή της πίεσης σε σχέση με την θέση ισορροπίας (ατμοσφαιρική πίεση) ως ένδειξη της έντασης του ήχου. Σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιούμε ένα μικρόφωνο για να μετατρέψουμε την ακουστική ενέργεια σε ηλεκτρική. Για να υπολογίσουμε θεωρητικά το τετράγωνο της πίεσης, χρησιμοποιούμε τον τύπο που περιγράφει τη σχέση της πίεσης με τις παραμέτρους που την επηρεάζουν (Λουτρίδης, 2015, σελ.175):

$$p^2 = \frac{Q \cdot P_{ac} \cdot \rho_0 \cdot c}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (1.1)$$

Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται για τον θεωρητικό υπολογισμό του τετραγώνου της πίεσης σε μία εφαρμογή σχετική με την ακουστική. Οι μεταβλητές που εμφανίζονται στον τύπο έχουν τις εξής σημασίες:

- $p$  είναι η πίεση του ήχου ( $pa$ ).
- $Q$  είναι ο συντελεστής κατευθυντικότητας της πηγής.
- $P_{ac}$  είναι η ηχητική ισχύς του ήχου ( $Watt$ ).
- $\rho_0$  είναι η πυκνότητα του αέρα ( $kg/m^3$ ).
- $c$  είναι η ταχύτητα του ήχου ( $m/s$ ).
- $d$  είναι η απόσταση από την πηγή του ήχου ( $m$ ).

Ο τύπος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απόστασης στον τρισδιάστατο χώρο είναι η Ευκλείδεια απόσταση και προκύπτει ως εξής:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} \quad (1.2)$$

Όπου  $(x_1, y_1, z_1)$  και  $(x_2, y_2, z_2)$  είναι οι συντεταγμένες των δύο σημείων στον τρισδιάστατο χώρο, και  $d$  είναι η απόσταση μεταξύ τους. Ο τύπος αυτός χρησιμοποιεί το θεώρημα του Πυθαγόρα για τον υπολογισμό της απόστασης σε κάθε άξονα  $(x, y, z)$  και συνολικά την Ευκλείδεια απόσταση στον τρισδιάστατο χώρο.

### 1.1.2 Σχέση στάθμης πίεσης και decibel (dB)

Η σχέση μεταξύ της στάθμης πίεσης και των decibels ( $dB$ ) δίνεται από τον γνωστό τύπο:

$$L_p \text{ direct} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{p_{\text{direct}}^2}{p_0^2} \right) \quad (1.3)$$

όπου  $L_p$  είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης σε  $dB$ ,  $p$  είναι η πίεση του ήχου που μετράμε και  $p_0$  είναι η πίεση αναφοράς όπου ισχύει  $p_0 = 20 \mu Pa$ . Το  $p_0$  είναι η ελάχιστη διαφορά πίεσης που μπορεί να αντιληφθεί ένας μέσος άνθρωπος.

Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιούμε τη μέτρηση της ακουστικής πίεσης σε  $dB$  είναι διότι το εύρος των μεταβολών της πίεσης είναι τεράστιο από  $20 \mu Pa$  έως  $200 Pa$ . Επίσης, η λογαριθμική κλίμακα μας επιτρέπει να αντιληφθούμε και να εκτιμήσουμε καλύτερα τις διαφορές στην ένταση του ήχου καθώς το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται τις διαφορές της πίεσης ενός ήχου λογαριθμικά.

### 1.1.3 Πρόσθεση ασυσχέτιστων ηχητικών πηγών σε dB

Η πρόσθεση στάθμεων δύο ή περισσότερων πηγών δεν γίνεται αριθμητικά αλλά λογαριθμικά. Επομένως όταν πρόκειται για την πρόσθεση δύο ή περισσότερων ασυσχέτιστων ηχητικών πηγών, η συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης (σε  $dB$ ) υπολογίζεται από τον λογάριθμο του αθροίσματος των στάθμεων κάθε πηγής. Μαθηματικά, αυτό μπορεί να εκφραστεί ως (Λουτρίδης, 2015, σελ.33):

$$L_{p \text{ total}} = 10 \log_{10} \left( 10^{\left(\frac{L_1}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{L_2}{10}\right)} + \dots + 10^{\left(\frac{L_n}{10}\right)} \right) \quad (1.4)$$

όπου  $L$  είναι η στάθμη ηχητικής πίεσης (σε  $dB$ ) της κάθε ηχητικής πηγής και  $n$  το πλήθος των πηγών.

Για την πρόσθεση τετραγωνικών πιέσεων, που εκφράζουν την πίεση του ήχου σε ένα σημείο του χώρου, απαιτείται μια διαφορετική μέθοδος πρόσθεσης. Επειδή η πίεση του ήχου ακολουθεί το νόμο της τετραγωνικής ρίζας, δεν μπορούμε να προσθέσουμε απλά τις πιέσεις δύο ή περισσότερων πηγών. Αντί αυτού, πρέπει να προσθέσουμε τις τετραγωνικές τιμές των πιέσεων κάθε πηγής ως εξής (Λουτρίδης, 2015, σελ.32):

$$p_{\text{total}}^2 = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_n^2 \quad (1.5)$$

όπου  $p$  είναι η πίεση της κάθε ηχητικής πηγής και  $n$  είναι ο συνολικός αριθμός των πηγών που προστίθενται.

#### 1.1.4 Σχέση ηχητικής ισχύος και στάθμης ηχητικής ισχύος

Για να υπολογίσουμε την στάθμη ηχητικής ισχύος χρησιμοποιούμε τον τύπο (Λουτρίδης, 2015, σ. 57):

$$L_w = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{W}{W_{\text{ref}}} \right) \quad (1.6)$$

όπου  $W_{\text{ref}} = 10^{-12}$  watt.

Σε περίπτωση που έχουμε το  $L_w$  και θέλουμε να βρούμε το  $W$  τότε χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

$$W = 10^{\frac{L_w}{10}} \cdot W_{\text{ref}} \quad (1.7)$$

#### 1.1.5 Συντελεστής κατευθυντικότητας $Q$

Ο συντελεστής κατευθυντικότητας  $Q$  είναι ένα μέτρο που περιγράφει πόσο κατευθυντική είναι η ακτινοβολία ήχου από μια πηγή. Υψηλές τιμές του  $Q$  υποδηλώνουν ότι η ακτινοβολία είναι πιο στενή άρα και κατευθυντική, ενώ χαμηλές τιμές υποδηλώνουν ότι η ακτινοβολία είναι πιο ευρεία άρα μη κατευθυντική. Ορίζεται ως η ένταση που παράγει η πηγή πάνω στον άξονα του ηχείου ( $I$ ) σε σχέση με την ένταση μιας πανκατευθυντικής πηγής ( $I_0$ ) ίσης ισχύος και προκύπτει ως εξής (Λουτρίδης, 2015, σ. 65):

$$Q = \frac{I}{I_0} \quad (1.8)$$

Αυτό σημαίνει πως όταν  $Q = 1$  η πηγή είναι πανκατευθυντική ενώ για  $Q > 1$  είναι κατευθυντική. Στην βιβλιογραφία παρόλο που υπάρχει τρόπος να εκτιμήσουμε την



κατευθυντική συμπεριφορά μιας πηγής πάνω στον άξονα εκπομπής της, δεν υπάρχει κάποια θεωρία σχετικά με το πώς μοιράζεται η στάθμη σε όλες τις κατευθύνσεις. Για τον παραπάνω λόγο δημιουργήσαμε ένα μοντέλο συμπεριφοράς που αναλύεται στο δεύτερο κεφάλαιο.

### 1.1.6 Υπολογισμός απευθείας ήχου για μία συχνότητα

Για μια πανκατευθυντική πηγή που εκπέμπει ακουστική ισχύ  $W$ , ισχύει η σχέση (Λουτρίδης, 2015, σ. 57):

$$I = \frac{W}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (1.9)$$

όπου  $I$  είναι η ακουστική ένταση σε απόσταση  $r$  από την πηγή.

Για την περίπτωση όπου το  $r$  είναι αρκετά μεγαλύτερο από τις διαστάσεις της πηγής, γνωρίζουμε ότι τα ακουστικά κύματα είναι προσεγγιστικά επίπεδα, παρόλο που στην πραγματικότητα είναι σφαιρικά. Επομένως, η ακουστική ένταση σχετίζεται με την ακουστική πίεση μέσω της παρακάτω σχέσης (Λουτρίδης, 2015, σ. 57):

$$I = \frac{p^2}{2 \cdot \rho_0 \cdot c} \quad (1.10)$$

όπου  $p$  είναι το πλάτος της πίεσης,  $\rho_0$  είναι η πυκνότητα του μέσου και  $c$  είναι η ταχύτητα του ήχου.

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις, προκύπτει η σχέση που συνδέει την ακουστική πίεση με την ισχύ:

$$p = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{W \rho_0 c}{2\pi}} \quad (1.11)$$

Για ένα ημιτονοειδές σήμα στη μόνιμη κατάσταση με συχνότητα  $f$  και σφαιρική διάδοση, η παραπάνω σχέση μπορεί να τροποποιηθεί για να περιλαμβάνει τη φάση:

$$p = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{W\rho_0 c}{2\pi}} e^{-jkr} \quad (1.12)$$

όπου  $k$  είναι ο κυματικός αριθμός  $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c}$  (1.13).

Τέλος, η παραπάνω σχέση μπορεί να γενικευτεί για πηγές με αυθαίρετη κατεύθυνση μέσω της σχέσης:

$$p = \frac{\Gamma(\theta)}{r} \sqrt{\frac{W\rho_0 c}{2\pi}} e^{-jkr} \quad (1.14)$$

όπου  $\Gamma(\theta)$  είναι η γωνιακή απόκριση της πηγής και  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζεται από το σημείο ακρόασης με τον άξονα του ηχείου.

Η παραπάνω σχέση στην πτυχιακή αυτή αξιοποιείται με βάση το μοντέλο γωνιακής απόκρισης που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2. Παίρνοντας το μέτρο μιγαδικού αριθμού και λαμβάνοντας υπόψιν ότι η RMS τιμή της πίεσης για ημιτονοειδή διέγερση ισούται με το πλάτος διά την τιμή  $\sqrt{2}$ , προκύπτει εν τελεί μια σχέση που μας δίνει την ακουστική στάθμη συναρτήσει της μιγαδικής πίεσης. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο γωνιακής απόκρισης  $\Gamma(\theta)$  δίνει καθαρά πραγματικές τιμές, που σημαίνει ότι η παραδοχή που κάνουμε είναι ότι οι αποκλίσεις από τον άξονα του ηχείου επηρεάζουν μόνο το πλάτος και όχι τη φάση του ηχητικού πεδίου. Στην πράξη, αυτό μπορεί να μην είναι εντελώς αληθές.

## 1.2 Θεωρία ακουστικής για κλειστούς χώρους

### 1.2.1 Συμπεριφορά του ήχου σε κλειστούς χώρους

Η συμπεριφορά του ήχου σε έναν κλειστό χώρο προσδιορίζεται από την αντήχηση και την ανακλαστικότητα του ήχου εντός του χώρου. Όταν ο ήχος εκπέμπεται μέσα σε έναν

κλειστό χώρο, αντηχεί και ανακλάται από τις επιφάνειες των τοίχων, των δαπέδων και των οροφών. Ο ήχος επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η απορρόφηση των υλικών επιφανειών, ο όγκος του χώρου, η γεωμετρία του χώρου και η παρουσία αντικειμένων μέσα στον χώρο. Η αντήχηση μπορεί να δημιουργήσει επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις του ήχου που προκαλούν αργότερες εκφάνσεις του ήχου (reverberation), μειώνοντας έτσι την καθαρότητα και την κατανόηση του ήχου.

Ο τύπος του Fitzroy είναι ένας από τους τύπους που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του χρόνου αντήχησης ( $RT60$ ) σε έναν κλειστό χώρο. Αυτός ο τύπος βασίζεται στην ιδέα ότι ο χρόνος αντήχησης είναι αντιστρόφως ανάλογος του συντελεστή απορρόφησης του χώρου. Με άλλα λόγια, όσο πιο απορροφητικές είναι οι επιφάνειες του χώρου, τόσο μικρότερος είναι ο χρόνος αντήχησης και το αντίστροφο.

Η συμπεριφορά του ήχου σε έναν κλειστό χώρο είναι σημαντική για την ακουστική επεξεργασία του χώρου, τη σχεδίαση των ηχητικών συστημάτων και τη δημιουργία ευχάριστων ακουστικών περιβαλλόντων.

### 1.2.2 Συντελεστής απορρόφησης και μέσος συντελεστής απορρόφησης

Ο συντελεστής απορρόφησης σε έναν κλειστό χώρο αναφέρεται στην ικανότητα ενός υλικού ή επιφάνειας να απορροφήσει τον ήχο που τον χτυπά. Αποτελεί ένα μέτρο της ποσότητας της ακουστικής ενέργειας που απορροφάται από το υλικό σε σχέση με την εισερχόμενη ακουστική ενέργεια. Θα μπορούσαμε να την περιγράψουμε με την σχέση (Λουτρίδης, 2015, σελ.134):

$$\alpha = \frac{E_r}{E_i} \quad (1.15)$$

Η τιμή του κυμαίνεται από 0 έως 1, όπου η τιμή 0 αντιπροσωπεύει πλήρη ανάκλαση (καμία απορρόφηση) και η τιμή 1 αντιπροσωπεύει πλήρη απορρόφηση (καμία ανάκλαση). Όπου  $E_r$  είναι η ενέργεια που ανακλάται και όπου  $E_i$  η ενέργεια που εισέρχεται.

Ο συντελεστής απορρόφησης εξαρτάται από τις ακουστικές ιδιότητες του υλικού ή της επιφάνειας, όπως η πυκνότητα, η σκληρότητα, η ταλάντωση και η υφή. Υλικά με μεγάλο

συντελεστή απορρόφησης απορροφούν μεγάλο μέρος της εισερχόμενης ακουστικής ενέργειας, μειώνοντας έτσι τις αντηχητικές ανακλάσεις και τη συνολική αντήχηση στον χώρο.

Ο μέσος συντελεστής απορρόφησης είναι μια μέτρηση που αντιπροσωπεύει τη συνολική απορροφητικότητα του ήχου ενός χώρου. Αποτελεί τον μέσο όρο των συντελεστών απορρόφησης των διάφορων επιφανειών και υλικών που απαρτίζουν τον χώρο κι επομένως υπολογίζεται από τον τύπο (Λουτρίδης, 2015, σελ.166):

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 \cdot s_1 + \alpha_2 \cdot s_2 + \dots + \alpha_n \cdot s_n}{S} \quad (1.16)$$

Σημαντικό είναι ότι η απορρόφηση ενός υλικού είναι διαφορετική για κάθε συχνοτικό εύρος. Ένα υλικό για παράδειγμα όπως το χαλί έχει μεγαλύτερη απορροφητικότητα στις υψηλές συχνότητες και μικρότερη στις χαμηλές. Είθισται λοιπόν να μελετάμε την απορροφητικότητα ανά συχνοτική περιοχή.

Ένας πρακτικός τρόπος για να βρούμε την απορροφητικότητα ενός χώρου είναι μέσω του χρόνου απόσβεσης ( $RT60$ ), του χρόνου δηλαδή που χρειάζεται ο ήχος για να μειωθεί κατά  $60 \text{ dB}$ , κάτι που σύμφωνα με τον Fitzroy υπολογίζεται ως εξής (Πασχαλίδου, 2021, σελ.73):

$$RT60 = \frac{0.161 \cdot V}{S \cdot \ln(1 - \alpha)} \quad (1.17)$$

Εάν λοιπόν μετρήσουμε με ένα μικρόφωνο τον χρόνο απόσβεσης  $RT60$  μπορούμε να βρούμε τον μέσο συντελεστή απορρόφησης λύνοντας τον παραπάνω τύπο ως προς αυτόν:

$$a = 1 - e^{-0.161 \frac{V}{S \cdot RT60}} \quad (1.18)$$

όπου  $S$  είναι η συνολική επιφάνεια του χώρου (πάτωμα, ταβάνι, τοίχων) και όχι το εμβαδόν του. Για έναν ορθογώνιο χώρο βρίσκονται το  $S$  από τον τύπο:

$$S = 2 \cdot x \cdot y + 2 \cdot x \cdot z + 2 \cdot y \cdot z \quad (1.19)$$

όπου  $x$  το μήκος,  $y$  το πλάτος και  $z$  το ύψος και η μονάδα μέτρησης είναι  $m^2$ .

### 1.2.3 Πεδίο αντήχησης και σταθερά δωματίου

Σε κλειστούς χώρους, ο ήχος ανακλάται επανειλημμένα ανάμεσα στις επιφάνειες του δωματίου, δημιουργώντας ένα πεδίο αντήχησης. Αυτό συμβαίνει καθώς η ενέργεια του ήχου απορρίπτεται και ανακλάται πίσω προς τον χώρο. Οι ανακλάσεις του ήχου προκαλούν την αύξηση του χρόνου αποσβέσεως του ήχου και την ενίσχυση ή απόσβεση ορισμένων συχνοτήτων, επηρεάζοντας την ακουστική ποιότητα του χώρου.

Για να περιγράψουμε σωστά το πεδίο αντήχησης, μπορούμε να πούμε ότι αντιπροσωπεύει την επίδραση των ανακλάσεων του ήχου σε έναν κλειστό χώρο. Αυτές οι ανακλάσεις μπορούν να παραμορφώσουν τον ήχο, να επηρεάσουν τη διακριτικότητα, τον χρόνο απόκρισης και τον όγκο του ήχου. Ο τύπος που περιγράφει την τετραγωνική τιμή της σταθερής πίεσης στο πεδίο αντήχησης είναι (Λουτρίδης, 2015, σελ.175):

$$p_{reverberant}^2 = \frac{4 \cdot P_{ac} \cdot \rho_0 \cdot c}{R} \quad (1.20)$$

- $p$  είναι η πίεση του ήχου ( $pa$ ).
- $Q$  είναι ο συντελεστής κατευθυντικότητας της πηγής.
- $P_{ac}$  είναι η ηχητική ισχύς του ήχου ( $Watt$ ).
- $\rho_0$  είναι η πυκνότητα του αέρα ( $kg/m^3$ ).
- $R$  είναι η σταθερά δωματίου ( $sabin$ ).

Η σταθερά δωματίου σχετίζεται άμεσα με τον μέσο συντελεστή απορρόφησης  $\bar{\alpha}$  και προκύπτει από τον τύπο(Λουτρίδης, 2015, σελ.175):

$$R = \frac{S \cdot \bar{\alpha}}{1 - \bar{\alpha}} \quad (1.21)$$

Η μονάδα μέτρησης είναι τα sabin και στην περίπτωση που  $\bar{\alpha} < 0.2$ , συχνά θεωρούμε πως ισχύει  $R = S \cdot \bar{\alpha}$ .

Όπως και στην περίπτωση του απευθείας ήχου έτσι και στον ανακλώμενο για να λογαριθμήσουμε την τετραγωνική πίεση, χρησιμοποιούμε τον γνωστό τύπο:

$$L_p \text{ reverberant} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{p_{\text{reverberant}}^2}{p_0^2} \right) \quad (1.22)$$

με  $p_0 = 20 \mu Pa$ .

#### 1.2.4 Κρίσιμη απόσταση

Σε έναν κλειστό χώρο, η συνολική στάθμη του ήχου αποτελείται από δύο στάθμες, μία προερχόμενη από το πεδίο απευθείας ήχου και μία προερχόμενη από το αντηχητικό πεδίο. Η στάθμη του αντηχητικού πεδίου υπερισχύει σε σημεία που είναι πιο μακριά από την πηγή, ενώ η στάθμη του απευθείας ηχητικού πεδίου υπερισχύει σε σημεία που είναι πιο κοντά στην πηγή. Η απόσταση όπου η στάθμη του αντηχητικού πεδίου είναι ίση με τη στάθμη του απευθείας ηχητικού πεδίου ονομάζεται κρίσιμη απόσταση (critical distance -  $D_c$ ) και δίνεται από τον τύπο (Λουτρίδης, 2015, σελ.176):

$$D_c = \sqrt{\frac{Q \cdot R}{16 \cdot \pi}} \quad (1.23)$$

### 1.2.5 Διαφορά απευθείας προς ανακλώμενο ήχο (DRR)

Στην ακουστική, το ακρωνύμιο DRR (Direct-to-Reverberant Ratio) αποτελεί ένα μέτρο που χρησιμοποιείται για να αποτυπώσει την ισορροπία μεταξύ του απευθείας ήχου και της αντήχησης σε έναν χώρο. Συγκεκριμένα είναι η διαφορά σε dB του απευθείας από τον ανακλώμενος ήχο (Μπαγιώκος, 2021).

$$DRR = L_p \text{ direct} - L_p \text{ reverberant} \quad (1.24)$$

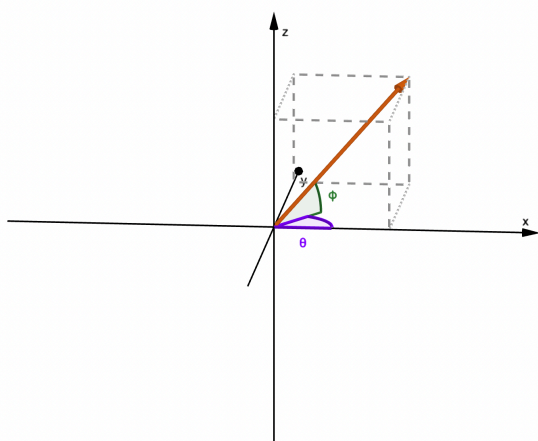
Όταν ο απευθείας ήχος είναι πιο ισχυρός από την αντήχηση, η ακουστική εμπειρία είναι καλύτερη και η κατανόηση του περιεχομένου γίνεται ευκολότερη. Αντίθετα, όταν η αντήχηση υπερισχύει, μπορεί να είναι δυσκολότερο να ακουστεί ο απευθείας ήχος και να αντιληφθεί η ομιλία. Ο DRR χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα της ακουστικής για την αξιολόγηση της ακουστικής ποιότητας κλειστών χώρων και η μελέτη του μπορεί να βοηθήσει στην βελτίωση και ευκρίνεια του περιεχομένου του ήχου.

## 2. Το μοντέλο κατευθυντικής συμπεριφοράς του ηχείου.

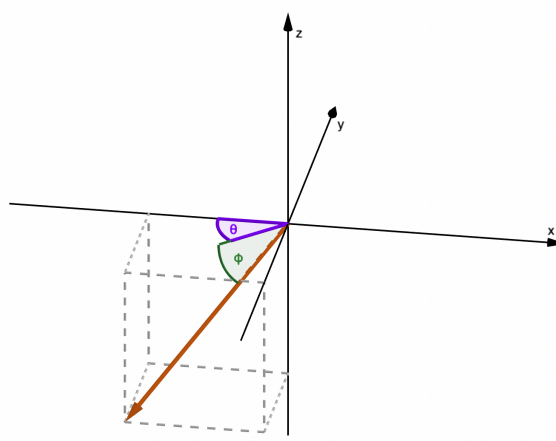
Για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά μιας πηγής στον τρισδιάστατο χώρο, είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε την κατεύθυνση προς την οποία εκπέμπει αλλά και τον τρόπο που η ακτινοβολία του απευθείας ήχου μεταβάλλεται με την γωνία. Με άλλα λόγια πρέπει να έχουμε κάποιο μαθηματικό μοντέλο που να περιγράφει τη γωνιακή απόκριση του ηχείου. Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου της γωνιακής απόκρισης, το οποίο είναι επέκταση του μοντέλου που παρουσιάστηκε σε παλαιότερη πτυχιακή εργασία του τμήματος (Μπαγιώκος, 2021). Συγκεκριμένα, επεκτείνουμε το μοντέλο αυτό ώστε να είναι λειτουργικό και στις τρεις διαστάσεις και για αυτό χρησιμοποιήσαμε ένα τρισδιάστατο σύστημα πολικών συντεταγμένων.

### 2.1 Η κατεύθυνση του ηχείου

Ένας τρόπος για να περιγράψουμε αυτή την κατεύθυνση είναι μέσω των πολικών συντεταγμένων ενός διανύσματος, τα οποία περιγράφονται ως εξής: το μέτρο του διανύσματος, η αζιμουθιακή γωνία  $\theta$  (azimuthal angle) και η πολική γωνία  $\phi$  (polar angle).



Εικόνα 1: Διάνυσμα κατεύθυνσης για  $\theta = 45^\circ$  και  $\phi = 45^\circ$ .



Εικόνα 2: Διάνυσμα κατεύθυνσης για  $\theta = -135^\circ$  και  $\phi = -45^\circ$ .



Με τη γνώση αυτών των δύο γωνιών, μπορούμε να περιγράψουμε κάθε δυνατή κλίση της πηγής. Για παράδειγμα όταν  $\theta = 0^\circ$  το ηχείο κοιτάζει ανατολικά και όταν  $\theta = 90^\circ$  βόρεια. Για την πολική γωνία όταν  $\varphi = 90^\circ$  κοιτάζει προς τα επάνω, όταν  $\varphi = -90^\circ$  προς τα κάτω, ενώ όταν  $\varphi = 0^\circ$  δεν έχει καμία κλίση στον κάθετο άξονα  $z$ .

Το επόμενο βήμα είναι να μετατρέψουμε τις πολικές συντεταγμένες σε ένα μοναδιαίο διάνυσμα  $unitvector = (x, y, z)$ . Αυτό γίνεται χρησιμοποιώντας τις παρακάτω τριγωνομετρικές σχέσεις:

$$\begin{aligned} x &= \cos\left(\frac{\pi \cdot \theta}{180}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot \phi}{180}\right) \\ y &= \sin\left(\frac{\pi \cdot \theta}{180}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot \phi}{180}\right) \\ z &= \sin\left(\frac{\pi \cdot \phi}{180}\right) \end{aligned} \tag{2.1}$$

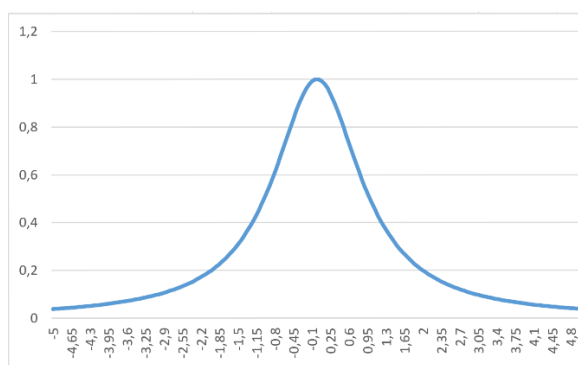
Σημειώνεται ότι η γωνία πρέπει να εκφράζεται σε ακτίνια, και για αυτό λόγο πολλαπλασιάζουμε τις μοίρες της γωνίας με  $\frac{\pi}{180}$ .

## 2.2 Η γωνιακή απόκριση του ηχείου

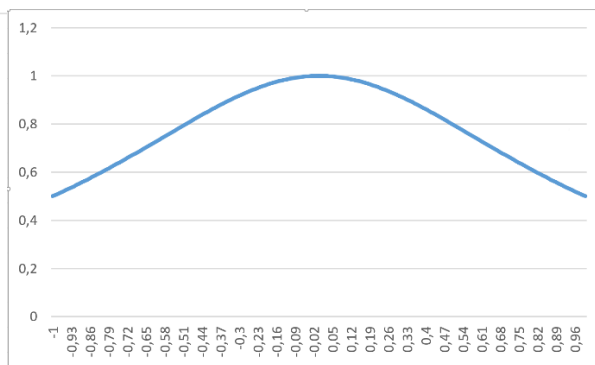
Για την προσέγγιση της κατευθυντικής συμπεριφοράς της πηγής σε όλες τις γωνίες χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο που βασίζεται στην εξίσωση Cauchy και φτιάχτηκε μία συνάρτηση που υπολογίζει την γωνιακή απόκριση του ηχείου συναρτήσει της γωνίας απόκρισης. Ξεκινώντας λοιπόν από την γνωστή εξίσωση Cauchy παρόμοια με το μοντέλο προηγούμενης πτυχιακής (Μπαγιώκος, 2021):

$$f(x) = \frac{x}{1 + x^2} \tag{2.2}$$

Αν χρησιμοποιήσουμε την παραπάνω συνάρτηση διαπιστώνουμε ότι αλλάζοντας το εύρος  $(-x_{\max}, x_{\max})$  του  $x$ , αλλάζει και η καμπύλη της συνάρτησης. Η συνάρτηση παίρνει μέγιστη τιμή για  $x = 0$  και είναι συμμετρική ως προς αυτό και μετά είναι φθίνουσα συνάρτηση της απόλυτης τιμής του  $x$ . Όλα τα παραπάνω την καθιστούν ιδανική για να μοντελοποιήσουμε την γωνιακή απόκριση ενός ηχείου, καθότι γνωρίζουμε ότι εν γένει τα διαγράμματα κατευθυντικότητας είναι συμμετρικά ως προς τον άξονα του ηχείου. Παρακάτω συγκρίνουμε 2 διαγράμματα με διαφορετικό εύρος:



Εικόνα 3:  $-5 \leq x \leq 5$ . (Μπαγιώκος, 2021)



Εικόνα 4:  $-1 \leq x \leq 1$ . (Μπαγιώκος, 2021)

Εφόσον για την γωνία  $\theta$  χρειαζόμαστε ένα εύρος  $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  μπορούμε να γράψουμε την συνάρτηση ως (Μπαγιώκος, 2021):

$$p^2(\theta) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\theta}{180^\circ} \cdot x_{\max}\right)^2} \quad (2.3)$$

Από την παραπάνω εξίσωση, θα προκύπτει η τετραγωνική πίεση συναρτήσει της γωνίας  $\theta$ . Το επόμενο βήμα είναι να συνδέσουμε το  $Q$  με το  $x_{\max}$  κι επομένως:

$$Q = \frac{1}{2 \cdot x_{\max}} \int_{-x_{\max}}^{x_{\max}} \frac{1}{1 + x^2} dx \quad (2.4)$$

το οποίο με χρήση γνωστών τριγωνομετρικών ταυτοτήτων γράφεται διαφορετικά ως εξής:

$$Q = \frac{X_{max}}{\text{atan}(X_{max})} \quad (2.5)$$

Το ερώτημα που τίθεται τώρα είναι το εξής: πώς για μία δεδομένη τιμή  $Q$  βρίσκουμε την αντίστοιχη τιμή του  $X_{max}$ ; Για να απαντήσουμε σε αυτό ακολουθήσαμε την εξής προσεγγιστική λύση:

- Παράγουμε ένα πλήθος από διατεταγμένα ζεύγη  $(x, y = \frac{x}{\text{atan}(|x|)})$  για ένα πλήθος διακριτών τιμών  $x \in [0,50]$
- Για δεδομένη τιμή του  $Q$ , βρίσκουμε την τιμή του  $y_0$  που είναι πιο κοντά στο  $Q$  και στη συνέχεια το  $x_{max}$  τίθεται ίσο με την τιμή του  $x$  που αντιστοιχείται με το  $y_0$ .

Έτσι η μέγιστη τιμή  $Q$  για  $x = 50$  είναι  $Q = 32.241$  και η μικρότερη  $Q = 1$  για  $x = 0$ . Από αυτό προκύπτει ότι το εύρος του δείκτη κατευθυντικότητας είναι  $Q \in [1,32]$

Έτσι φτάνουμε στην τελική μορφή της εξίσωσης μας που είναι:

$$p^2(\theta, \phi) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x_{max}}{\pi} \cdot \text{unitVector}\right)^2} \quad (2.6)$$

Επομένως μπορούμε να καταλήξουμε σε μία γενική εξίσωση για τον απευθείας ήχο στην περιοχή ακρόασης:

$$L_p(\theta, \phi) = L_w + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi d^2} \right) + 10 \log (p^2(\theta, \phi)). \quad (2.7)$$

## 3. Υλοποίηση της ηλεκτρακουστικής μελέτης στο Octave

### 3.1 Προγραμματισμός στο Octave

#### 3.1.1 Αντικειμενοστραφής προγραμματισμός (object - oriented programming)

Ο αντικειμενοστραφής προγραμματισμός (Object-Oriented Programming, OOP) είναι μια μεθοδολογία προγραμματισμού που βασίζεται στην έννοια των "αντικειμένων". Στην OOP, ένα πρόγραμμα αναπτύσσεται γύρω από τα αντικείμενα, τα οποία αποτελούν τις βασικές μονάδες της λογικής και της δομής του προγράμματος.

Κάθε αντικείμενο αποτελείται από δεδομένα και λειτουργίες που μπορούν να εκτελέσουν ενέργειες στα δεδομένα αυτά. Τα δεδομένα ονομάζονται μέλη του αντικειμένου, ενώ οι λειτουργίες ονομάζονται μέθοδοι. Η αλληλεπίδραση μεταξύ των αντικειμένων γίνεται μέσω της ανταλλαγής μηνυμάτων μεταξύ τους.

Ο αντικειμενοστραφής προγραμματισμός έχει σχεδιαστεί για να παρέχει έναν πιο οργανωμένο και ευέλικτο τρόπο ανάπτυξης λογισμικού. Οι βασικές αρχές του OOP περιλαμβάνουν την κληρονομικότητα (inheritance), την πολυμορφισμό (polymorphism), και την ενθυλάκωση (encapsulation).

Η κληρονομικότητα επιτρέπει σε ένα αντικείμενο να κληρονομεί τα χαρακτηριστικά και τις λειτουργίες ενός άλλου αντικειμένου, ενώ ο πολυμορφισμός επιτρέπει σε μία μέθοδο να έχει διαφορετική συμπεριφορά ανάλογα με τον τύπο του αντικειμένου που την καλεί. Η ενθυλάκωση αφορά την συσκευασία των δεδομένων και των μεθόδων ενός αντικειμένου μέσα σε μια μονάδα, προστατεύοντας έτσι τα δεδομένα από την απευθείας πρόσβαση από άλλα αντικείμενα.

Η χρήση του OOP μπορεί να βοηθήσει στην οργάνωση και την επαναχρησιμοποίηση του κώδικα, καθώς και στην ανάπτυξη πιο συντηρήσιμων και επεκτάσιμων εφαρμογών. Τα παραπάνω αποτελούν μία σύνοψη του κεφαλαίου 4 (Αλεξανδράκη, 2009). Αυτοί είναι και οι λόγοι που προτιμήθηκε ο OOP για την ανάπτυξη του προγράμματος.

### 3.1.2 Τί είναι το Octave

Το Octave είναι ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα για αριθμητικούς υπολογισμούς και ανάλυση δεδομένων. Έχει σχεδιαστεί για να παρέχει μια γλώσσα προγραμματισμού με παρόμοια σύνταξη αυτής του MATLAB και να υποστηρίζει ποικίλες λειτουργίες για αριθμητικούς υπολογισμούς, γραφικές παραστάσεις και επεξεργασία δεδομένων.

Το Octave προσφέρει ένα διαδραστικό περιβάλλον όπου ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισάγει εντολές και να εκτελεί αριθμητικούς υπολογισμούς αμέσως. Μπορεί επίσης να γράψει σενάρια (scripts) για να εκτελέσει ακολουθίες εντολών, να δημιουργήσει κλάσεις ή συναρτήσεις (functions) για επαναχρησιμοποίηση κώδικα.

Οι δυνατότητες του Octave περιλαμβάνουν:

- **Αριθμητικοί υπολογισμοί:** Μπορεί να εκτελεί πολύπλοκες αριθμητικές πράξεις, όπως πράξεις με πίνακες, διανύσματα και πολυώνυμα. Ο Octave υποστηρίζει πράξεις γραμμικής άλγεβρας, πιθανοτικών υπολογισμούς, αριθμητική ολοκλήρωση, επίλυση συστημάτων εξισώσεων και άλλες μαθηματικές λειτουργίες.
- **Επεξεργασία δεδομένων:** Ο χρήστης μπορεί να εισάγει, να αναλύσει και να επεξεργαστεί δεδομένα από διάφορες πηγές. Ο Octave παρέχει εργαλεία για τη διαχείριση και επεξεργασία πινάκων και πινάκων διασποράς, καθώς και για την εκτέλεση ερωτημάτων σε βάσεις δεδομένων.
- **Γραφικές παραστάσεις:** Μπορεί να δημιουργήσει διαγράμματα, γραφήματα, διανύσματα, πίνακες και άλλες γραφικές παραστάσεις για οπτικοποίηση δεδομένων και αποτελεσμάτων των υπολογισμών.

Το Octave υποστηρίζει επίσης πρόσθετα (packages) που παρέχουν επιπλέον λειτουργίες και επεκτασιμότητα στο περιβάλλον. Επίσης, καθώς είναι ένα πρόγραμμα ανοιχτού κώδικα, η κοινότητα των χρηστών συνεισφέρει στην ανάπτυξη του και στη δημιουργία νέων λειτουργιών και βελτιώσεων. Συνολικά, το Octave αποτελεί ένα ισχυρό

εργαλείο για αριθμητικούς υπολογισμούς, επεξεργασία δεδομένων και γραφικές παραστάσεις, καθιστώντας το κατάλληλο για επιστημονικούς, μηχανικούς, στατιστικούς και άλλους επαγγελματίες που ασχολούνται με την ανάλυση δεδομένων και τους αριθμητικούς υπολογισμούς. Τα παραπάνω αποτελούν μία σύνοψη της εισαγωγής του βιβλίου (Lachniet, 2020).

## 3.2 Η δομή του προγράμματος

### 3.2.1 Περιεχόμενο του κώδικα

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει τρεις κλάσεις: **Room**, **Area** και **Loudspeaker** και πέντε συναρτήσεις: **angularResponse**, **calculateSoundLevels**, **calculateSoundLevelsOmega**, **calculateCosts** και **plotAcoustics**. Επιπλέον μέσα στον κώδικα συμπεριλαμβάνονται οι συναρτήσεις **TUI** και **TUI\_omega** για την χρήση του προγράμματος από άτομα που δεν είναι εξοικειωμένα στον κώδικα του Octave. Τέλος περιέχονται τα 6 παραδείγματα που μελετάμε στο κεφάλαιο 4.

Το όνομα που δόθηκε στο πρόγραμμα είναι το ASimuT (Acoustics Simulation Toolkit).

### 3.2.2 Η κλάση “Room”

Η κλάση **Room** περιγράφει ένα ορθογώνιο δωμάτιο και υπολογίζει τις ακουστικές του ιδιότητες. Δέχεται τρία ορίσματα και περιέχει τις εξής μεταβλητές και μεθόδους:

#### Είσοδοι (Inputs):

- **dims**: Αναπαριστά τις διαστάσεις του δωματίου (πίνακας με 3 στοιχεία) σε μέτρα. Το πρώτο στοιχείο του πίνακα αντιστοιχεί στον άξονα  $x$ , το δεύτερο στον  $y$  και το τρίτο στον  $z$ .

- **RT60**: Αναπαριστά τον χρόνο απόσβεσης (reverberation time) του δωματίου, μετρημένο 60 dB κάτω από την κορυφαία ένταση του ήχου, σε δευτερόλεπτα.

### Μεταβλητές (Properties):

- **V**: Αναπαριστά τον όγκο του δωματίου σε κυβικά μέτρα.
- **S**: Αναπαριστά την επιφάνεια του δωματίου σε τετραγωνικά μέτρα.
- **a**: Αναπαριστά το συντελεστή απορρόφησης του δωματίου (τιμή από 0 έως 1, χωρίς μονάδα).
- **R**: Αναπαριστά την σταθερά δωματίου σε sabin.

### Μέθοδοι (Methods):

- **Room**: Ο κατασκευαστής (constructor) που αρχικοποιεί ένα αντικείμενο της κλάσης Room.
- **roomCharacteristics**: Μέθοδος που δέχεται σαν ορίσματα τις μεταβλητές dims και RT60 και επιστρέφει τις τιμές για τον όγκο, το εμβαδό των επιφανειών και τη σταθερά δωματίου R.

Ο αλγόριθμος της μεθόδου **roomCharacteristics** ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Ελέγχει την ορθότητα των τιμών που εισάγουμε.
2. Υπολογίζει τον όγκο του δωματίου.
3. Υπολογίζει το εμβαδό των επιφανειών του δωματίου σύμφωνα με τη σχέση (1.19).
4. Υπολογίζει τον μέσο συντελεστή  $\bar{\alpha}$  σύμφωνα με τη σχέση (1.18).
5. Υπολογίζει την σταθερά δωματίου  $R$  σύμφωνα με τη σχέση (1.21).

Ένα παράδειγμα για τη δημιουργία ενός αντικειμένου Room είναι:

```
R = Room();  
R.roomCharacteristics([6, 15, 4], 0.8);
```

Με τις παραπάνω γραμμές κώδικα δημιουργούμε ένα αντικείμενο Room με διαστάσεις 6x15x4 και χρόνο απόσβεσης  $RT60 = 0.8s$ .

### 3.2.3 Η κλάση “Area”

Η κλάση **Area** δημιουργεί μια τρισδιάστατη περιοχή με συγκεκριμένη έκταση και βήμα μεγέθους. Δέχεται τέσσερα ορίσματα και περιέχει τις εξής μεταβλητές και μεθόδους:

#### **Είσοδοι (Inputs):**

- **p1**: Πίνακας με δύο στοιχεία που ορίζει το πρώτο σημείο του πλέγματος [x,y].
- **p2**: Πίνακας με δύο στοιχεία που ορίζει το τελικό σημείο του πλέγματος [x,y].
- **z**: Το ύψος της περιοχής ακρόασης που μελετάμε σε μέτρα.
- **step**: Το βήμα που ορίζει την πυκνότητα του πλέγματος, δηλαδή το πλήθος των μικροφώνων η διαφορετικά των ακροατών στον χώρο ακρόασης.
- **Room**: Τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου Room για έλεγχο των τιμών εισόδου.

#### **Μεταβλητές (Properties):**

- **X**: Οι x-συντεταγμένες της περιοχής σε μέτρα.
- **Y**: Οι y-συντεταγμένες της περιοχής σε μέτρα.
- **Z**: Οι z-συντεταγμένες της περιοχής σε μέτρα.

#### **Μέθοδοι (Methods):**

- **Area**: Ο κατασκευαστής (constructor) που δημιουργεί ένα αντικείμενο της κλάσης `Area`.
- **createArea**: Μέθοδος που δέχεται σαν ορίσματα το αρχικό σημείο του πλέγματος, το τελικό σημείο του, το ύψος της περιοχής ακρόασης, το βήμα και τα χαρακτηριστικά του δωματίου. Δημιουργεί τον χώρο ακρόασης και επιστρέφει το τρισδιάστατο πλέγμα που μελετάμε.



Ο αλγόριθμος της μεθόδου **createArea** εκτελεί τις εξής ενέργειες:

1. Ελέγχει την ορθότητα των τιμών που εισάγουμε.
2. Δημιουργεί το πλέγμα του χώρου ακρόασης.
3. Ελέγχει εάν το μέγεθος του πλέγματος ξεπερνά τις διαστάσεις του δωματίου

Ως παράδειγμα χρήσης έχουμε:

```
A = Area();  
A.createArea([2, 2], [12, 12], 1.5, 0.5, R);
```

Έτσι δημιουργούμε ένα αντικείμενο της κλάσης όπου η περιοχή ακρόασης που μελετάμε ξεκινάει από το σημείο (2,2) και εκτείνεται μέχρι το σημείο (12,12). Το ύψος είναι 1,5m και το βήμα του πλέγματος (0.5). Επίσης σαν τελευταίο όρισμα δέχεται τα χαρακτηριστικά του αντικειμένου Room ώστε η περιοχή μελέτης να μην είναι εκτός του δωματίου.

### 3.2.4 Η κλάση “Loudspeaker

Η κλάση Loudspeaker δημιουργεί αντικείμενα που αναπαριστούν ηχεία. Επίσης η κλάση υπολογίζει την απόσταση ενός ηχείου από κάθε σημείο του δικτύου και υπολογίζει την ηχητική πίεση για κάθε ηχείο. Περιέχει τις εξής ιδιότητες και μεθόδους:

#### **Είσοδοι (Inputs):**

- **x, y, z:** Πίνακας με 3 στοιχεία με τις συντεταγμένες του ηχείου (x, y, z).
- **Lw:** Η ισχύς του ηχείου σε dB (sound power level).
- **Q:** Ο δείκτης κατευθυντικότητας του ηχείου (1 – 32).

- **orientation**: Πίνακας με 2 στοιχεία που περιλαμβάνει την κλίση του ηχείου για  $(\theta, \varphi)$  γωνίες σε μοίρες.

### Μεταβλητές (Properties):

- **unitVector**: Το μοναδιαίο διάνυσμα που αναπαριστά τον προσανατολισμό του ηχείου.

### Μέθοδοι (Methods):

- **Loudspeaker**: Ο κατασκευαστής της κλάσης.
- **addLoudspeaker**: Μέθοδος που προσθέτει ένα ηχείο στον χώρο. Δέχεται σαν ορίσματα την θέση του ηχείου, τον συντελεστή κατευθυντικότητας  $Q$ , την στάθμη ηχητικής πίεσης και την κλίση του ηχείου. Υπολογίζει το μοναδιαίο διάνυσμα κατεύθυνσης και την ηχητική πίεση.

Ο αλγόριθμος της μεθόδου **addLoudspeaker** εκτελεί τις εξής ενέργειες:

1. Ελέγχει την ορθότητα των τιμών που εισάγουμε.
2. Μετατρέπει την αζιμουθιανή γωνία  $\theta$  και την πολική γωνία  $\varphi$  σε ένα μοναδιαίο διάνυσμα  $[x, y, z]$ .
3. Υπολογίζει την ισχύ του ηχείου  $W$  σύμφωνα με τη σχέση (1.7).
4. Υπολογίζει το διάνυσμα κατεύθυνσης του ηχείου σύμφωνα με τη σχέση (2.1).

Ένα παράδειγμα χρήσης είναι:

```
L = Loudspeaker();  
L.addLoudspeaker([1, 1, 2], 14, 90, [45, -20]);
```

Στο παράδειγμα αυτό δημιουργούμε ένα ηχείο στο σημείο  $[1,1,2]$ , με  $Q = 14$ ,  $L_w = 90dB$ , με γωνία  $\theta = 45^\circ$  (βορειοανατολικά) και  $\phi = -20^\circ$  (προς τα κάτω).

Εάν θέλουμε να τοποθετήσουμε πολλαπλά ηχεία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια **for** εντολή ως εξής:

```
Nlsp = 4;

for k = 1:Nlsp
    L(k) = Loudspeaker();
end

L(1).addLoudspeaker([4,4,4],14,90,[0,-90]);
L(2).addLoudspeaker([4,9,4],14,90,[0,-90]);
L(3).addLoudspeaker([9,4,4],14,90,[0,-90]);
L(4).addLoudspeaker([9,9,4],14,90,[0,-90]);
```

### 3.2.5 Η συνάρτηση “angularResponse”

Η συνάρτηση **angularResponse** υπολογίζει τη γωνιακή απόκριση ενός ηχείου, και δέχεται σαν ορίσματα το μοναδιαίο διάνυσμα του ηχείου και τον δείκτη κατευθυντικότητας **Q**. Επιστρέφει την γωνιακή απόκριση σε pascal.

#### Ορίσματα (Arguments):

- **thetaIN**: Η γωνία που σχηματίζει ο άξονας του ηχείου με το σημείο ακρόασης.
- **Q**: Ο δείκτης κατευθυντικότητας του ηχείου.

#### Έξοδος (output):

- **angResp**: Η γωνιακή απόκριση του ηχείου για κάθε σημείο του πλέγματος σε pascal.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί η συνάρτηση είναι:

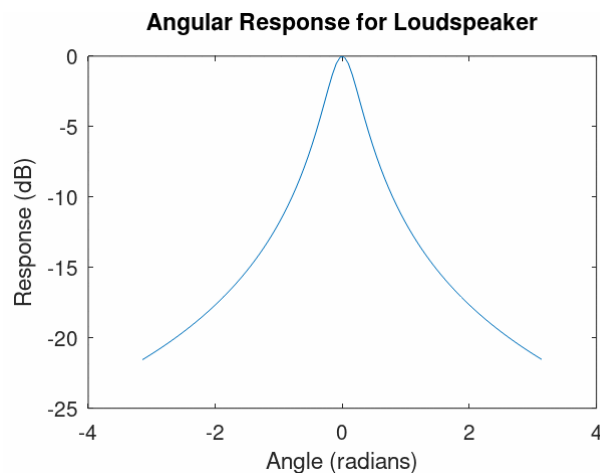
5. Δημιουργεί έναν διάνυσμα **x** από 0 έως 50 με βήμα 0.05 και υπολογίζει τον πίνακα **y** ως την αναλογία  $x / \text{atan}(x)$ .
6. Υπολογίζει το **dQy** ως τη διαφορά μεταξύ του **Q** και του **y**.

7. Βρίσκει την ελάχιστη απόσταση του  $dQy$  από το μηδέν και τον αντίστοιχο δείκτη στον πίνακα  $x$  με τη βοήθεια της εντολής  $[~, idx] = \min(\text{abs}(dQy))$ .
8. Υπολογίζει το  $xMax$  ως το στοιχείο του  $x$  που αντιστοιχεί στο ελάχιστο δείκτη, δηλαδή  $xMax = x(idx)$ .
9. Υπολογίζει το  $p2$  ως  $1 / (1 + ((xMax / pi) * thetaIN).^2)$  σε pascal.

Ένα παράδειγμα χρήσης είναι:

```
theta = linspace(-pi, pi, 100);
Q = 8;
response = angularResponse(theta, Q);
plot(theta, response);
xlabel('Angle (radians)');
ylabel('Response (dB)');
title('Angular Response for Loudspeaker');
```

Ο παραπάνω κώδικας μας δίνει την γωνιακή απόκριση  $-\pi \leq \theta \leq \pi$  για  $Q = 8$  και θα μας την σχεδιάσει.



**Εικόνα 5:** Plot της γωνιακής απόκρισης για  $Q=8$  και  $-\pi \leq \theta \leq \pi$ .

### 3.2.6 Η συνάρτηση “calculateSoundLevels”

Η συνάρτηση **calculateSoundLevels** χρησιμοποιείται για να υπολογίσει τα επίπεδα ήχου σε μια περιοχή βάσει των ιδιοτήτων των ηχείων, της περιοχής ακρόασης και των παραμέτρων του δωματίου. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τη συνολική στάθμη πίεσης ήχου, τη στάθμη του απευθείας, τη στάθμη πίεσης του ανακλώμενου ήχου και το DRR.

#### Ορίσματα (Arguments):

1. **Loudspeaker**: Τα στοιχεία της κλάσης Loudspeaker.
2. **Area**: Τα στοιχεία της κλάσης Area.
3. **Room**: Τα στοιχεία της κλάσης Room.

#### Έξοδος (Output):

**soundLevel**: Μία δομή με τιμές για τα εξής:

- **soundLevel.total**: Συνολική στάθμη πίεσης ήχου σε dB.
- **soundLevel.direct**: Η στάθμη πίεσης του απευθείας ήχου σε dB.
- **soundLevel.reverb**: Η στάθμη πίεσης του ανακλώμενου ήχου σε dB.
- **soundLevel.DRR**: Η διαφορά του απευθείας ήχου από τον ανακλώμενο σε dB.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί η συνάρτηση ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Αρχικοποιείται μια σειρά μεταβλητών και πίνακες για τους υπολογισμούς.
  - **rho**: Πυκνότητα του αέρα σε  $\text{kg/m}^3$ .
  - **c**: Ταχύτητα του ήχου σε m/s.
  - **Nlsp**: Το πλήθος των ηχείων.
  - **pref**: Η πίεση αναφοράς σε pascal,  $pref = 20 \cdot 10^{-6}$ .
  - **pref2**: Το τετράγωνο της πίεσης αναφοράς σε pascal.
  - **Nmics**: Αριθμός μικροφώνων στην περιοχή.
  - **micVector**: Πίνακας για την αποθήκευση των συντεταγμένων των μικροφώνων.

- **pd2\_sum**: Αρχικοποίηση της συνολικής τιμής των τετραγωνισμένων επιπέδων πίεσης άμεσου ήχου σε Pa.
- **pr2\_sum**: Αρχικοποίηση της συνολικής τιμής των τετραγωνισμένων επιπέδων πίεσης ανακλασμένου ήχου σε Pa.
- **angResp**: Πίνακας για την αποθήκευση των γωνιακών αποκρίσεων.

2. Επαναλαμβάνεται ο ακόλουθος κώδικας για κάθε ηχείο:

- Υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των ακροατών και του ηχείου σύμφωνα με τη σχέση (1.2).
- Υπολογίζεται η τετραγωνική πίεση του απευθείας ήχου σε pascal (Pa) σύμφωνα με τη σχέση (1.1).
- Υπολογίζεται η τετραγωνική πίεση του ανακλώμενου ήχου σε pascal (Pa) σύμφωνα με τη σχέση (1.20).
- Υπολογίζεται η γωνιακή απόκριση χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `angularResponse`.
- Πολλαπλασιάζεται η τετραγωνική πίεση επί τον συντελεστή που εξαρτάται από τη γωνιακή απόκριση του ηχείου.
- Προστίθεται η ανακλώμενη και απευθείας στάθμη πίεσης κάθε ηχείου σύμφωνα με τη σχέση (1.4).

3. Μετασχηματίζεται το διάνυσμα στάθμης πίεσης ήχου ώστε να αντιστοιχεί στο πλέγμα (`meshgrid`) των συντεταγμένων της περιοχής: `Area.X`, `Area.Y` και `Area.Z`

4. Τα υπολογισμένα επίπεδα ήχου αποθηκεύονται στη δομή δεδομένων `'soundLevel'`.

- `soundLevel.total`: Συνολική στάθμη πίεσης ήχου σε dB.
- `soundLevel.direct`: Η στάθμη πίεσης του απευθείας ήχου σε dB.
- `soundLevel.reverb`: Η στάθμη πίεσης του ανακλώμενου ήχου σε dB.
- `soundLevel.DRR`: Η διαφορά του απευθείας ήχου από τον ανακλώμενο σε dB.

Ένα παράδειγμα χρήσης είναι:

```
Room = RoomObject;  
Area = AreaObject;  
Loudspeaker = [Loudspeaker1, Loudspeaker2, Loudspeaker3];  
soundLevel = calculateSoundLevels(Loudspeaker, Area, Room);
```

Αφού δημιουργήσουμε το δωμάτιο, την περιοχή ακρόασης και εφόσον προσθέσουμε ένα ηχείο, μπορούμε να καλέσουμε την συνάρτηση **calculateSoundLevels** με τα τρία παραπάνω ορίσματα για να κάνει τους υπολογισμούς.

### 3.2.7 Η συνάρτηση “calculateSoundLevelsOmega”

Η συνάρτηση **calculateSoundLevelsOmega** είναι ίδια με την συνάρτηση **calculateSoundLevels** με την διαφορά ότι μελετάμε τα επίπεδα του ήχου για κάποια συχνότητα. Εν αντιθέσει με την **calculateSoundLevels** η οποία υποθέτει ότι οι ηχητικές συνιστώσες από διαφορετικές πηγές είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους, στη συγκεκριμένη συνάρτηση λαμβάνεται υπόψιν και η φάση, με αποτέλεσμα να μπορούν να μελετηθούν φαινόμενα δημιουργικής ή καταστροφικής συμβολής. Αναλυτικότερη περιγραφή της υλοποίησης δίνεται στην ενότητα 1.1.6.

#### **Ορίσματα (Arguments):**

1. **Loudspeaker:** Τα στοιχεία της κλάσης Loudspeaker.
2. **Area:** Τα στοιχεία της κλάσης Area.
3. **Room:** Τα στοιχεία της κλάσης Room.
4. **Frequency:** Η συχνότητα που μελετάμε.

## Έξοδος (Output):

**soundLevel:** Μία δομή με τιμές για τα εξής:

- **soundLevel.total:** Συνολική στάθμη πίεσης ήχου σε dB.
- **soundLevel.direct:** Η στάθμη πίεσης του απευθείας ήχου σε dB.
- **soundLevel.reverb:** Η στάθμη πίεσης του ανακλώμενου ήχου σε dB.
- **soundLevel.DRR:** Η διαφορά του απευθείας ήχου από τον ανακλώμενο σε dB.

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί η συνάρτηση ακολουθεί τα εξής βήματα:

1. Αρχικοποιείται μια σειρά μεταβλητών και πίνακες για τους υπολογισμούς.

- **rho:** Πυκνότητα του αέρα σε  $\text{kg/m}^3$ .
- **c:** Ταχύτητα του ήχου σε m/s.
- **k:** Είναι ο κυματάριθος για μία συχνότητα και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (1.13).
- **Nlsp:** Το πλήθος των ηχείων.
- **pref:** Η πίεση αναφοράς σε pascal,  $pref = 20 \cdot 10^{-6}$ .
- **pref2:** Το τετράγωνο της πίεσης αναφοράς σε pascal.
- **Nmics:** Αριθμός μικροφώνων στην περιοχή.
- **micVector:** Πίνακας για την αποθήκευση των συντεταγμένων των μικροφώνων.
- **pd2\_sum:** Αρχικοποίηση της συνολικής τιμής των τετραγωνισμένων επιπέδων πίεσης άμεσου ήχου σε Pa.
- **pr2\_sum:** Αρχικοποίηση της συνολικής τιμής των τετραγωνισμένων επιπέδων πίεσης ανακλασμένου ήχου σε Pa.
- **angResp:** Πίνακας για την αποθήκευση των γωνιακών αποκρίσεων.

2. Επαναλαμβάνεται ο ακόλουθος κώδικας για κάθε ηχείο:

- Υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των ακροατών και του ηχείου σύμφωνα με τη σχέση (1.2).



- Υπολογίζεται η τετραγωνική πίεση του απευθείας ήχου για μία συχνότητα σε pascal (Pa) σύμφωνα με τη σχέση (1.14).
  - Υπολογίζεται η τετραγωνική πίεση του ανακλώμενου ήχου σε pascal (Pa) σύμφωνα με τη σχέση (1.20).
  - Υπολογίζεται η γωνιακή απόκριση χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `angularResponse`.
  - Πολλαπλασιάζεται η τετραγωνική πίεση επί τον συντελεστή που εξαρτάται από τη γωνιακή απόκριση του ηχείου.
  - Προστίθεται η ανακλώμενη και απευθείας στάθμη πίεσης κάθε ηχείου σύμφωνα με τη σχέση (1.4).
3. Μετασχηματίζεται το διάνυσμα στάθμης πίεσης ήχου ώστε να αντιστοιχεί στο πλέγμα (meshgrid) των συντεταγμένων της περιοχής: `Area.X`, `Area.Y` και `Area.Z`
4. Τα υπολογισμένα επίπεδα ήχου αποθηκεύονται στη δομή δεδομένων `soundLevel`.
- **`soundLevel.total`**: Συνολική στάθμη πίεσης ήχου σε dB.
  - **`soundLevel.direct`**: Η στάθμη πίεσης του απευθείας ήχου σε dB.
  - **`soundLevel.reverb`**: Η στάθμη πίεσης του ανακλώμενου ήχου σε dB.
  - **`soundLevel.DRR`**: Η διαφορά του απευθείας ήχου από τον ανακλώμενο σε dB.

Ένα παράδειγμα χρήσης είναι:

```
Room = RoomObject;
Area = AreaObject;
Loudspeaker = [Loudspeaker1, Loudspeaker2, Loudspeaker3];
soundLevel = calculateSoundLevelsOmega(Loudspeaker, Area, Room, 1000);
```

Αφού δημιουργήσουμε το δωμάτιο, την περιοχή ακρόασης και εφόσον προσθέσουμε ένα ηχείο, μπορούμε να καλέσουμε την συνάρτηση **`calculateSoundLevelsOmega`** με τα τέσσερα παραπάνω ορίσματα για να κάνει τους υπολογισμούς.

### 3.2.8 Η συνάρτηση “calculateCosts”

Η συνάρτηση `calculateCosts` υπολογίζει τις αποκλίσεις του επιπέδου πίεσης ήχου (SPL) και του λόγου απευθείας προς ανακλάσεις (DRR) από τους επιθυμητούς στόχους. Η συνάρτηση θα μπορούσε να βοηθήσει τον μελετητή καθώς προσπαθεί να αξιολογήσει το αποτέλεσμα του σχεδιασμού, καθώς προσφέρει ένα αντικειμενικά ποσοτικό κριτήριο του πόσο καλό είναι το ηχητικό πεδίο μέσα στο χώρο ακρόασης.

#### **Ορίσματα (Arguments):**

1. **soundLevel**: Δομή που περιέχει πληροφορίες για το επίπεδο πίεσης ήχου που υπολογίζει η συνάρτηση calculateSoundLevels ή η calculateSoundLevelsOmega.
2. **desiredSPL**: Επιθυμητό επίπεδο πίεσης ήχου (SPL) σε dB.
3. **limitDRR**: Όριο για τον λόγο απευθείας προς ανακλάσεις (DRR) σε dB.

#### **Έξοδοι (Outputs):**

1. **deviationsSPL**: Παρουσιάζει τη συνολική απόκλιση του επιπέδου πίεσης ήχου (SPL) από το επιθυμητό SPL. Η τιμή αυτή μας δίνει μια εκτίμηση για το πόσο κοντά βρισκόμαστε στον επιθυμητό στόχο για την ηχητική πίεση.
2. **deviationsDRR**: Αναπαριστά τη συνολική απόκλιση του λόγου απευθείας προς ανακλάσεις (DRR) από το καθορισμένο όριο. Αυτή η τιμή μας επιτρέπει να αξιολογήσουμε πόσο κοντά βρισκόμαστε στο επιθυμητό αποτέλεσμα για τον λόγο απευθείας προς ανακλάσεις.

Οι παραπάνω τιμές μας βοηθούν να κατανοήσουμε πόσο κοντά βρισκόμαστε στον επιθυμητό στόχο τόσο για την στάθμη ηχητικής πίεσης όσο και για το DRR. Όταν οι τιμές τείνουν προς το μηδέν, είμαστε πιο κοντά στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Είναι σημαντικό να κατανοήσει ο χρήστης αυτήν την έννοια ώστε να μπορεί να μελετήσει και να συγκρίνει πιθανές εγκαταστάσεις.

Ο αλγόριθμος της συνάρτησης εκτελεί τα εξής βήματα:

1. Υπολογίζει την απόλυτη διαφορά ανάμεσα στη πραγματική και την επιθυμητή στάθμη του ήχου. Προσθέτει όλες τις διαφορές για να υπολογίσει τη συνολική απόκλιση.
2. Δημιουργεί έναν δυαδικό πίνακα με βάση το αν οι τιμές του DRR είναι μικρότερες από το όριο που καθορίζεται από τον χρήστη. Οι τιμές στον δυαδικό πίνακα θα είναι 1 εάν η τιμή του DRR είναι μικρότερη από το όριο και 0 αλλιώς.
3. Υπολογίζει την απόκλιση των τιμών DRR από το όριο, παίρνοντας τη διαφορά ανάμεσα στο όριο και τις τιμές του DRR πολλαπλασιασμένες με τον δυαδικό πίνακα. Εάν η τιμή του DRR είναι μικρότερη από το όριο, η αντίστοιχη τιμή στον δυαδικό πίνακα είναι 1 και η απόκλιση θα είναι θετική (δηλαδή όριο - DRR). Εάν η τιμή του DRR είναι μεγαλύτερη από ή ίση με το όριο, η αντίστοιχη τιμή στον δυαδικό πίνακα είναι 0 και η απόκλιση θα είναι 0.

Ένα παράδειγμα για τη χρήση της συνάρτησης είναι το εξής:

```
soundLevel = struct('total', [70, 72, 68; 73, 75, 71], 'DRR', [-5, -3, -4; -6, -2, -3]);
desiredSPL = 70;
limitDRR = -4;
[deviationsSPL, deviationsDRR] = calculateCosts(soundLevel, desiredSPL, limitDRR);
```

### 3.2.9 Η συνάρτηση “plotAcoustics”

Η συνάρτηση **plotAcoustics** χρησιμοποιείται για την τρισδιάστατη οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων:

#### **Ορίσματα (Arguments):**

1. **Loudspeaker:** Ένας πίνακας αντικειμένων Loudspeaker που αντιπροσωπεύουν τα ηχεία.

2. **Area:** Ένα αντικείμενο Area που αντιπροσωπεύει τον τρισδιάστατο χώρο όπου υπολογίζονται τα επίπεδα ήχου.
3. **Room:** Ένα αντικείμενο Room που αντιπροσωπεύει τις διαστάσεις του δωματίου και τον συντελεστή ανάκλασης.

### Έξοδοι (Outputs):

- **Υποδιάγραμμα 1:** Μας δείχνει την θέση των ηχείων στο δωμάτιο και το πλήθος των μικροφώνων στην περιοχή ακρόασης.
- **Υποδιάγραμμα 2:** Μας δείχνει τη στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάθε σημείο του χώρου ακρόασης σε κλειστό χώρο.
- **Υποδιάγραμμα 3:** Μας δείχνει την τιμή του DRR σε κάθε σημείο του χώρου ακρόασης.
- **Υποδιάγραμμα 4:** Μας δείχνει τη στάθμη ηχητικής πίεσης σε κάθε σημείο του χώρου ακρόασης σε ανοιχτό χώρο.

Ένα παράδειγμα χρήσης της συνάρτησης είναι:

```
Room = RoomObject;  
Area = AreaObject;  
Loudspeaker = [Loudspeaker1, Loudspeaker2, Loudspeaker3];  
soundLevel = SoundLevelStructure;  
plotAcoustics(Loudspeaker, Area, Room, soundLevel);
```

### 3.2.10 Οι συναρτήσεις “TUI” και “TUI\_omega”

Οι συναρτήσεις αυτές αποτελούν ένα Text-based User Interface για τη χρήση του προγράμματος από άτομα που δεν είναι εξοικιωμένα με τον κώδικα του octave. Εκτελώντας τις παραπάνω συναρτήσεις το πρόγραμμα ζητάει μέσω απλών ερωτήσεων από τον χρήστη να εισάγει τις τιμές κάθε μεταβλητής.

Η συνάρτηση TUI αφορά τη μελέτη με την χρήση της calculateSoundLevels ενώ η συνάρτηση TUI\_omega με τη χρήση της calculateSoundLevelsOmega που μελετά για συγκεκριμένη συχνότητα.

## 4. Παραδείγματα χρήσης του κώδικα

### 4.1 Γενικές οδηγίες

Για τη σωστή χρήση του κώδικα, ο χρήστης πρέπει να ακολουθήσει τα παρακάτω βήματα:

1. Δημιουργία ορθογωνίου δωματίου: Ο χρήστης πρέπει να εισάγει τις διαστάσεις του δωματίου που επιθυμεί να μελετήσει, καθώς και τον συντελεστή RT60 που αντιπροσωπεύει τον χρόνο αποσβέσεως του ήχου στο δωμάτιο.
2. Δημιουργία χώρου ακρόασης: Μέσα στο δωμάτιο, ο χρήστης ορίζει τον χώρο ακρόασης. Ο ορισμός περιλαμβάνει τον ορισμό των γωνιών του πλέγματος που καθορίζουν τα όρια του χώρου ακρόασης, καθώς και το ύψος που επιθυμεί να μελετήσει ο χρήστης.
3. Προσθήκη ηχείων: Ο χρήστης δημιουργεί και τοποθετεί τα ηχεία μέσα στον χώρο ακρόασης. Σημειώνεται ότι ο χρήστης πρέπει να ορίσει τον συντελεστή κατευθυντικότητας των ηχείων, ο οποίος πρέπει να κυμαίνεται από 1 έως 32. Η τιμή 1 αντιπροσωπεύει μη κατευθυντικά ηχεία, ενώ η τιμή 32 αντιστοιχεί σε πλήρως κατευθυντικά ηχεία.
4. Υπολογισμός ακουστικού μοντέλου: Μετά τη δημιουργία του μοντέλου μελέτης, ο χρήστης ζητά από το πρόγραμμα να υπολογίσει το ακουστικό μοντέλο του. Αυτό συμπεριλαμβάνει τον υπολογισμό παραμέτρων όπως ηχητική πίεση, αντίσταση ήχου και επαναφορά ήχου.
5. Υπολογισμός αποκλίσεων: Έπειτα ο χρήστης μπορεί να ζητήσει από το πρόγραμμα τις αποκλίσεις της στάθμης ηχητικής πίεσης (SPL) και του DRR από τους επιθυμητούς στόχους. Αυτές οι αποκλίσεις μας δίνουν μια ιδέα για το πόσο κοντά βρισκόμαστε στον επιθυμητό στόχο.

6. Οπτικοποίηση αποτελεσμάτων: Στο τελευταίο βήμα, ο χρήστης ζητά από το πρόγραμμα την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων του ακουστικού μοντέλου. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει γραφικές αναπαραστάσεις των παραμέτρων του ήχου ή άλλα σχετικά γραφήματα.

Σημειώνεται ότι δεν υπάρχουν περιορισμοί όσον αφορά το μέγεθος του δωματίου ή του χώρου ακρόασης. Ο χρήστης έχει την ελευθερία να τοποθετήσει όσα ηχεία ή μικρόφωνα επιθυμεί για την μελέτη του. Ωστόσο, είναι σημαντικό να εισαγάγει λογικές τιμές, όπως θετικές τιμές για τις διαστάσεις και πραγματικούς αριθμούς. Φυσικά, όσο περισσότερα ηχεία ή μικρόφωνα τοποθετούνται, τόσο πιο απαιτητικός γίνεται ο υπολογισμός, και έτσι ο χρόνος εμφάνισης αποτελεσμάτων εξαρτάται από την επεξεργαστική ισχύ του υπολογιστή που χρησιμοποιείται. Τέλος, πρέπει να τονίσουμε ότι ο μόνος περιορισμός είναι ότι ο συντελεστής κατευθυντικότητας της πηγής πρέπει να είναι από 1 έως 32.

## 4.2 Παραδείγματα

### 4.2.1 Παράδειγμα 1 (1 ηχείο)

Στο πρώτο παράδειγμα δημιουργείται 1 ηχείο το οποίο τοποθετείται στην δυτική πλευρά και κοιτάζει προς τον χώρο ακρόασης (ανατολικά) δηλαδή ισχύει ότι  $\theta = 0^\circ$  και  $Q = 20$ .

```
% Room
R = Room();
R.roomCharacteristics([10, 10, 3], 0.5);

% Area
A = Area();
A.createArea([3, 3], [7, 7], 2, 0.2, R);

% Properties of the Loudspeaker
Point = [2, 5, 2];
Q = 20;
Lw = 100;
theta = 0;
```

```

phi = 0;

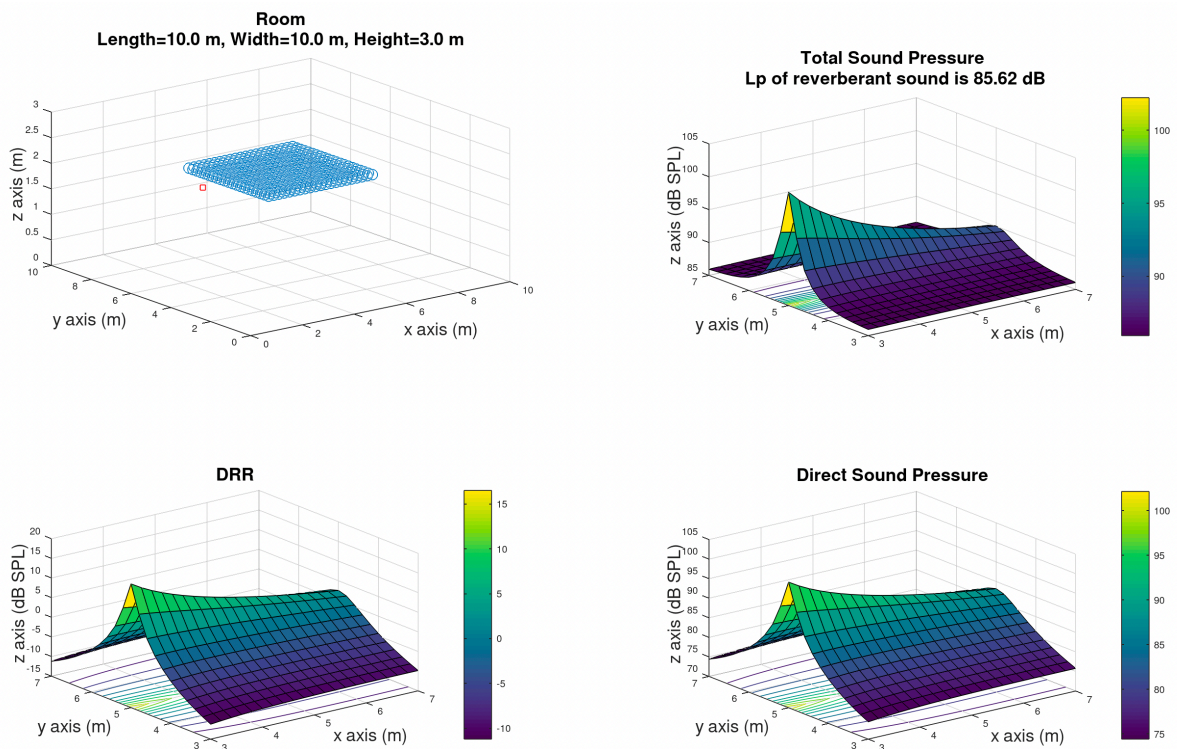
% Add loudspeaker
L = Loudspeaker();
L.addLoudspeaker(Point, Q, Lw, [theta, phi]);

% Calculate sound levels
soundLevel = calculateSoundLevels(L, A, R);

% Calculate deviations
desiredSPL = 88;
limitDRR = -3;
[deviationsSPL, deviationsDRR] = calculateCosts(soundLevel, desiredSPL,
limitDRR)

% Plot acoustics
plotAcoustics(L, A, R, soundLevel);

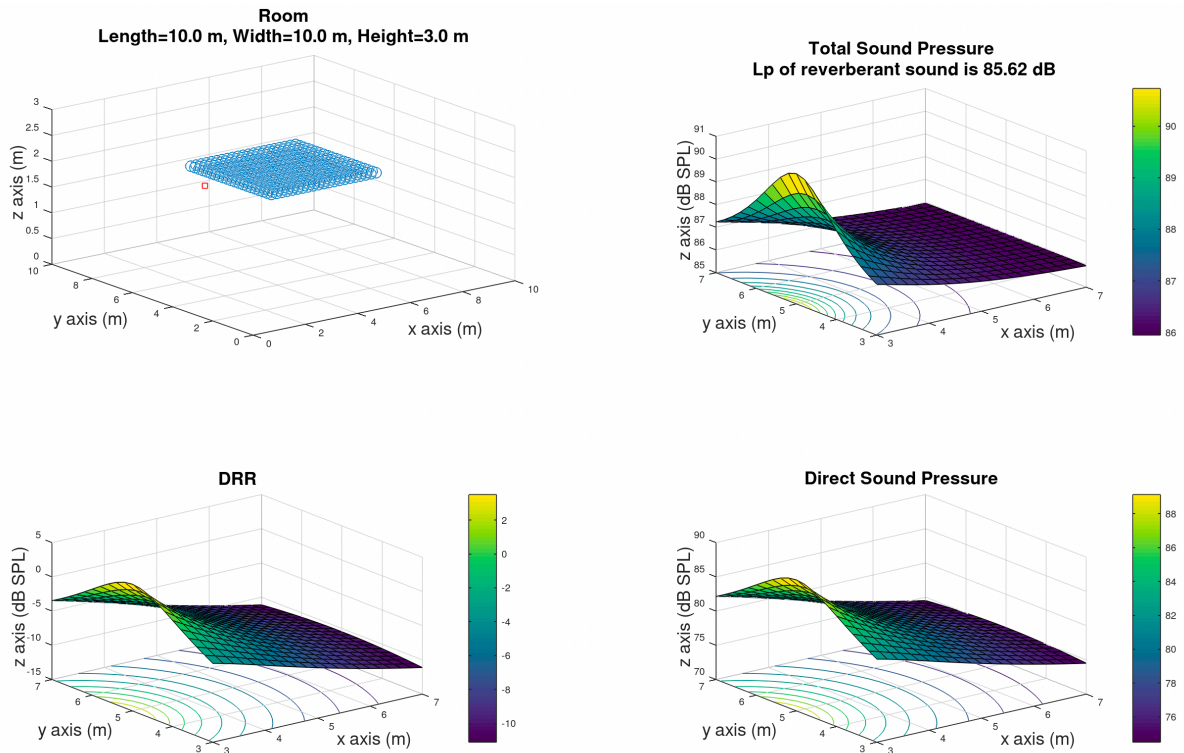
```



**Εικόνα 6:** Παράδειγμα με ένα ηχείο με  $Q = 20$ .

Ας συγκρίνουμε το ίδιο παράδειγμα αλλάζοντας τον συντελεστή κατευθυντικότητας με  $Q = 1$  (πανκατευθυντικό).





Εικόνα 7: Παράδειγμα με ένα ηχείο με  $Q = 1$ .

Παρατηρούμε ότι στην εικόνα 7 ( $Q=1$ ) η έξοδος του ηχείου εξαπλώνεται περισσότερο στον χώρο και η μέγιστη τιμή του απευθείας ήχου είναι περίπου  $89dB$ . Στην εικόνα 6 είναι περίπου  $102dB$  και η διάδοση είναι συγκεντρωμένη και ισχυρότερη ως προς τον άξονα  $x$ . Μέσω αυτής της σύγκρισης μπορούμε να διαπιστώσουμε τη λειτουργία του μοντέλου κατευθυντικότητας.

#### 4.2.2 Παράδειγμα 2 (Περιμετρικά)

Το δεύτερο παράδειγμα είναι μία μοντελοποίηση ενός συστήματος με 6 ηχεία τα οποία έχουν τοποθετηθεί περιμετρικά από τον χώρο ακρόασης. Όλα τα ηχεία κοιτάζουν στον χώρο ακρόασης, με τα 4 στις μεγάλες πλευρές να είναι με κλίση  $\theta = 10^\circ, 190^\circ, -10^\circ, 170^\circ$  ώστε να κοιτάζουν προς το κέντρο του. Το ύψος των ηχείων είναι το ίδιο με το ύψος των μικροφώνων στον χώρο ακρόασης και επομένως ισχύει ότι  $\phi = 0^\circ$  για όλα τα ηχεία. Τα ηχεία  $L(3)$  και  $L(4)$ , βρίσκονται στο κέντρο των μικρών πλευρών με αυτό που είναι δυτικά να έχει αζιμουθιανή κλίση  $\theta = 90^\circ$  και αυτό που είναι ανατολικά  $\theta = 90^\circ$ .

```

R = Room();
R.roomCharacteristics([12, 12, 3.5], 0.5);

A = Area();
A.createArea([3, 2], [9, 10], 2, 0.3, R);

Nlsp = 6;
Q = 4;
Lw = 80;

for k = 1:Nlsp
    L(k) = Loudspeaker();
end

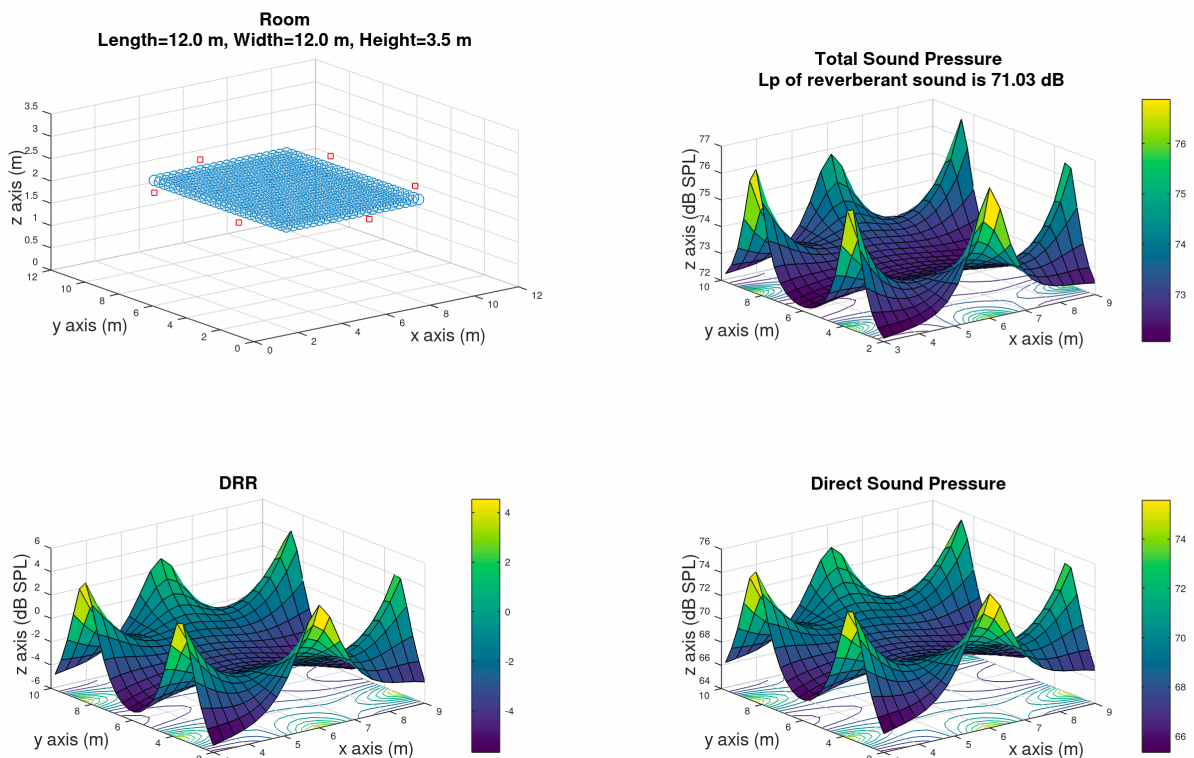
L(1).addLoudspeaker([2, 3.5, 2], Q, Lw, [10, 0]); % Bottom-left corner
L(2).addLoudspeaker([10, 3.5, 2], Q, Lw, [190, 0]); % Bottom-right
corner
L(3).addLoudspeaker([6, 1, 2], Q, Lw, [90, 0]); % Top-left corner
L(4).addLoudspeaker([6, 11, 2], Q, Lw, [-90, 0]); % Left center
L(5).addLoudspeaker([2, 8.5, 2], Q, Lw, [-10, 0]); % Top-right corner
L(6).addLoudspeaker([10, 8.5, 2], Q, Lw, [170, 0]); % Right center

soundLevel = calculateSoundLevels(L, A, R);

desiredSPL = 72;
limitDRR = -3;
[deviationsSPL, deviationsDRR] = calculateCosts(soundLevel, desiredSPL,
limitDRR)

plotAcoustics(L, A, R, soundLevel);

```



Εικόνα 8: Παράδειγμα 2 με περιμετρικά τα ηχεία.

Σε αυτό το παράδειγμα θα ήταν χρήσιμο να κρατήσουμε για λόγους σύγκρισης τις τιμές των αποκλίσεων για την στάθμη ηχητικής πίεσης ( $deviationsSPL = 747.94$ ) και για το DRR ( $deviationsDRR = 193.52$ ).

### 4.2.3 Παράδειγμα 3 (Ηχεία στην οροφή)

Στο τρίτο παράδειγμα χρησιμοποιήθηκαν 6 ηχεία ίδιων χαρακτηριστικών με το παράδειγμα 2 και τοποθετήθηκαν στην οροφή κοιτάζοντας προς τα κάτω. Άρα για όλα τα ηχεία ισχύει  $\theta = 0^\circ$ ,  $\phi = -90^\circ$ ,  $Q = 4$  και  $L_w = 80dB$ .

```
% Room
R = Room();
R.roomCharacteristics([12, 12, 3.5], 0.5);

% Area
A = Area();
A.createArea([3, 2], [9, 10], 2, 0.2, R);

% Add loudspeakers
Nlsp = 6;
Q = 4;
Lw = 80;

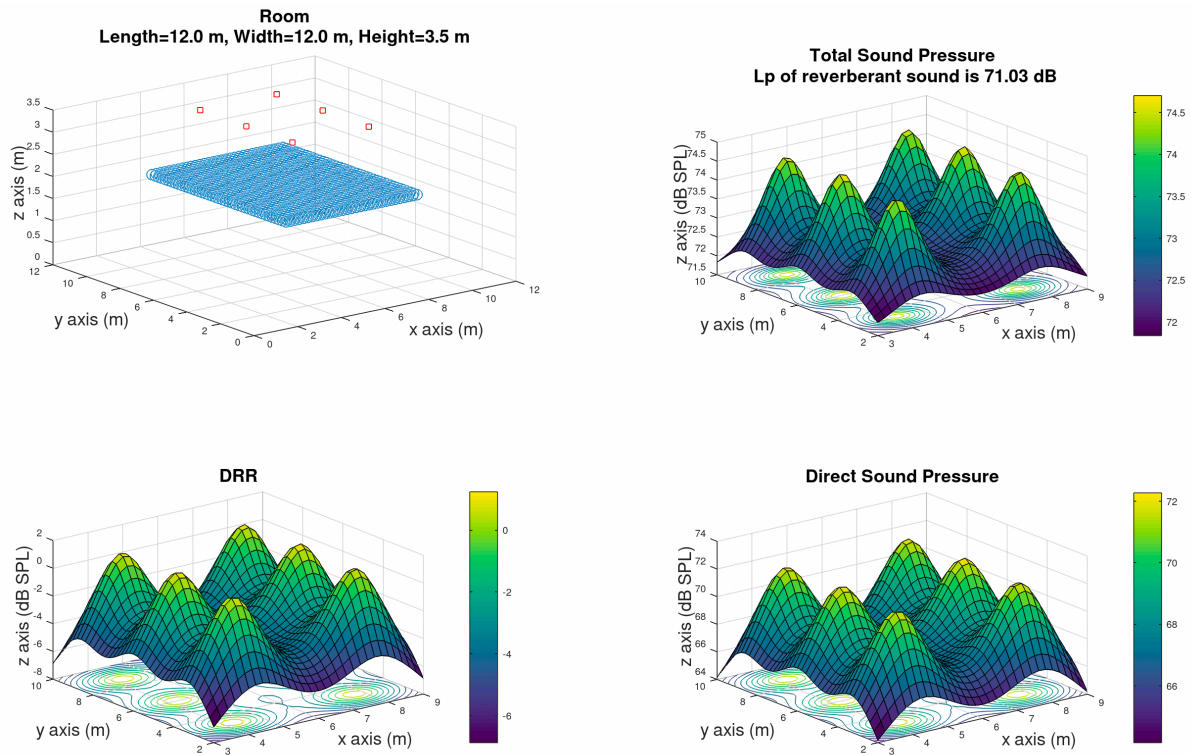
for k = 1:Nlsp
    L(k) = Loudspeaker();
end

L(1).addLoudspeaker([4.25, 3.25, 3.5], Q, Lw, [0, -90]); % Bottom-left
corner
L(2).addLoudspeaker([4.25, 8.75, 3.5], Q, Lw, [0, -90]); % Top-left
corner
L(3).addLoudspeaker([4.25, 6, 3.5], Q, Lw, [0, -90]); % Left center
L(4).addLoudspeaker([7.75, 3.25, 3.5], Q, Lw, [0, -90]); % Bottom-right
corner
L(5).addLoudspeaker([7.75, 8.75, 3.5], Q, Lw, [0, -90]); % Top-right
corner
L(6).addLoudspeaker([7.75, 6, 3.5], Q, Lw, [0, -90]); % Right center

% Calculate sound levels
soundLevel = calculateSoundLevels(L, A, R);

% Calculate deviations
desiredSPL = 72;
limitDRR = -3;
[deviationsSPL, deviationsDRR] = calculateCosts(soundLevel, desiredSPL,
limitDRR)

% Plot acoustics
plotAcoustics(L, A, R, soundLevel);
```



**Εικόνα 9:** Παράδειγμα 3 με τα ηχεία στην οροφή.

Εδώ οι τιμές των αποκλίσεων για τα επιθυμητά SPL και DRR είναι:  $deviationsSPL = 1197.3$  και  $deviationsDRR = 668.88$ . Συγκρίνοντας λοιπόν τις τιμές των αποκλίσεων με το παράδειγμα 2, παρατηρούμε ότι η τοποθέτηση αυτή φαίνεται θεωρητικά κατώτερη. Ωστόσο, δεν σημαίνει ότι κάτι τέτοιο είναι αληθές στην πράξη, καθώς πρέπει να λάβουμε υπόψιν και άλλους παράγοντες. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των περιμετρικών ηχείων (παράδειγμα 2), εάν ο χώρος ακρόασης είναι γεμάτος ακροατές, τα άτομα που βρίσκονται περιμετρικά θα απορροφούν κατά πολύ τον ήχο, ενώ όσοι βρίσκονται στο κέντρο θα λαμβάνουν κατά πολύ λιγότερη ακτινοβολία ήχου.

Σε κάθε περίπτωση, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι το πρόγραμμα της εργασίας και συγκεκριμένα τα αποτελέσματα της κλάσης `calculateCosts` μπορεί να χρησιμοποιηθεί για σύγκριση ηλεκτροακουστικών εγκαταστάσεων.

#### 4.2.4 Παράδειγμα 4 (Ηχεία στο δάπεδο)

Σε αυτό το παράδειγμα τα ηχεία τοποθετήθηκαν κάτω από την περιοχή ακρόασης με σκοπό την προσομοίωση μιας εγκατάστασης monitoring που αφορά τα άτομα επί σκηνής.

```
Room
R = Room();
R.roomCharacteristics([20, 10, 4], 0.5);

% Area
A = Area();
A.createArea([0.5, 2], [3, 8], 2, 0.2, R);

Nlsp = 3;
Q = 4;
Lw = 100;

% Add loudspeakers
for k = 1:Nlsp
    L(k) = Loudspeaker();
end

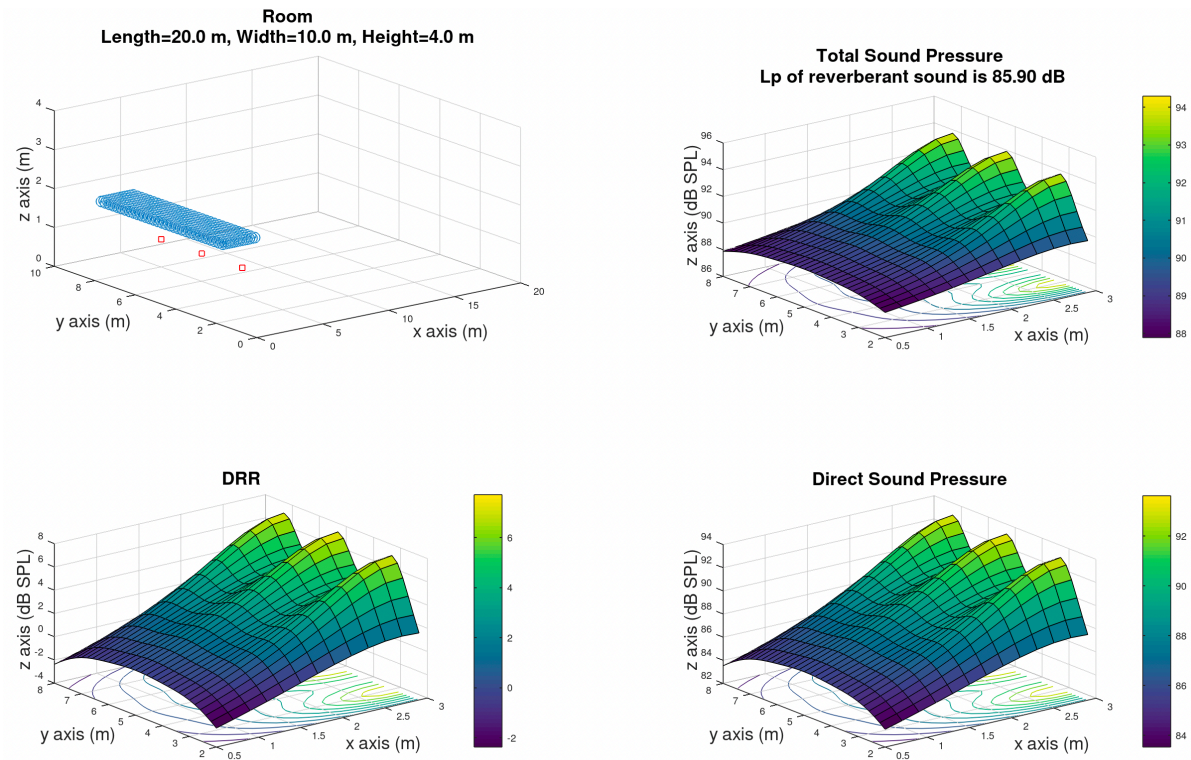
L(1).addLoudspeaker([3.5, 3, 1], Q, Lw, [180, 45]);
L(2).addLoudspeaker([3.5, 7, 1], Q, Lw, [180, 45]);
L(3).addLoudspeaker([3.5, 5, 1], Q, Lw, [180, 45]);

% Calculate sound levels
soundLevel = calculateSoundLevels(L, A, R);

% Calculate deviations
desiredSPL = 90;
limitDRR = -3;
[deviationsSPL, deviationsDRR] = calculateCosts(soundLevel, desiredSPL,
limitDRR)

% Plot acoustics
plotAcoustics(L, A, R, soundLevel);
```

Τα 3 ηχεία είναι τοποθετημένα 1 μέτρο κάτω από την περιοχή ακρόασης με πολική κλίση  $\phi = 45^\circ$ . Οι αποκλίσεις δείχνουν αρκετά ικανοποιητικές και με το DRR να βρίσκεται στο επιθυμητό, συγκεκριμένα:  $deviationsSPL = 537.08$  και  $deviationsDRR = 0$ .



Εικόνα 10: Παράδειγμα 4 με τα ηχεία κάτω από τον χώρο ακρόασης.

### 4.3 Παραδείγματα για συγκεκριμένη συχνότητα

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται προσομοιώσεις ανά συχνότητα χρησιμοποιώντας την συνάρτηση `calculateSoundLevelsOmega`. Αυτή είναι μία ακόμη λειτουργία που προσφέρει το πρόγραμμα με σκοπό να μελετήσουμε φαινόμενα θετικής ή καταστροφικής συνεισφοράς μιας και λαμβάνεται υπόψιν η φάση.

#### 4.3.1 Παράδειγμα 5 (2 ηχεία, 1kHz)

Εδώ τοποθετήθηκαν 2 πανκατευθυντικά ηχεία ( $Q = 1$ ) που εκπέμπουν καθαρό τόνο συχνότητας  $1kHz$ .

```

R = Room();
R.roomCharacteristics([10, 10, 5], 0.3);

A = Area();
A.createArea([3, 3], [7, 7], 2, 0.1, R);

Nlsp = 2;
PointR = [2,4,2];
PointL = [2,6,2];
Q = 1;
Lw = 100;
theta = 0;
phi = 0;

for k = 1:Nlsp
    L(k) = Loudspeaker();
end

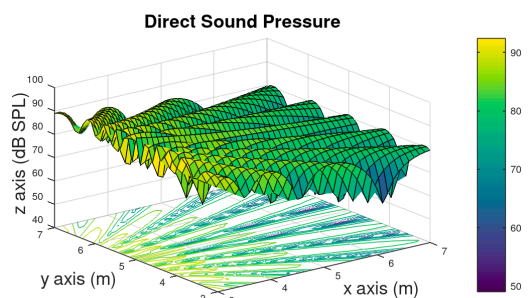
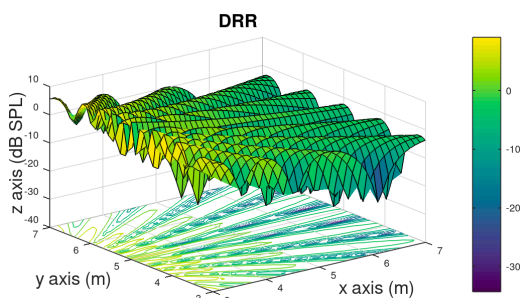
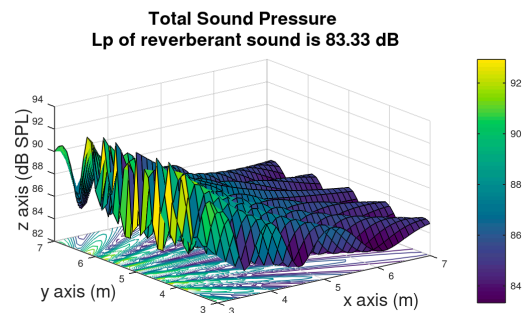
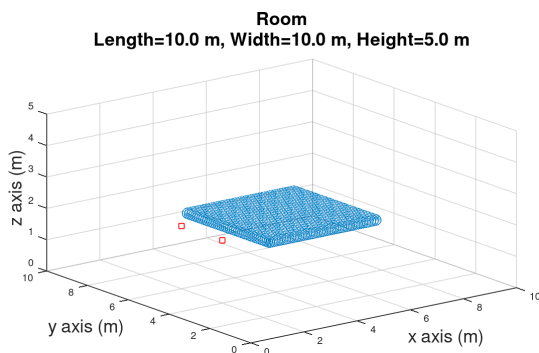
L(1).addLoudspeaker(PointR, Q, Lw, [theta, phi]);
L(2).addLoudspeaker(PointL, Q, Lw, [theta, phi]);

soundLevel = calculateSoundLevelsOmega(L, A, R, 1000);

desiredSPL = 86;
limitDRR = -6;
[deviationsSPL, deviationsDRR] = calculateCosts(soundLevel, desiredSPL,
limitDRR);

plotAcoustics(L, A, R, soundLevel);

```



Εικόνα 11: Παράδειγμα 5 με 2 ηχεία για συχνότητα 1kHz.

Στην εικόνα 11 και συγκεκριμένα το 4ο διάγραμμα (Direct Sound Pressure), παρατηρούμαι ότι στο “πάτωμα” του διαγράμματος σχηματίζονται κάποιες “κενές” και κάποιες χρωματιστές λωρίδες. Έτσι μπορούμε να πούμε χονδρικά ότι στις κενές λωρίδες έχουμε φαινόμενα καταστροφικής συμβολής για τη συχνότητα που μελετάμε. Αυτές οι λωρίδες είναι οι λεγόμενοι κροσσοί συμβολής που συναντάμε στην περίπτωση που έχουμε ηχεία συνδεδεμένα με την ίδια ηλεκτρική πηγή.

#### 4.3.2 Παράδειγμα 6 (2 Line Arrays των 5 ηχείων, 5kHz)

Στο τελευταίο παράδειγμα παρουσιάζεται μία ενδεικτική εγκατάσταση ηχείων τύπου line array, όπου έχουμε κάθετες συστοιχίες πανομοιότυπων ηχείων. Η συστοιχία έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να εξασφαλίζει ομοιόμορφη κάλυψη του χώρου ακρόασης σε όλα τα σημεία του. Μια γενική περιγραφή θα μπορούσε να είναι η παρακάτω:

Ο χώρος ακρόασης χωρίζεται σε οριζόντιες σειρές και κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε διαφορετική ζώνη του ακροατηρίου. Τα ηχεία τοποθετούνται σε κάθετες συστοιχίες, και κάθε οριζόντιο ζευγάρι ηχείων στοχεύει στις αντίστοιχες οριζόντιες σειρές του ακροατηρίου. Για να επιτευχθεί τα ηχεία πρέπει να έχουν υψηλό δείκτη κατευθυντικότητας  $Q$ .

Συγκεκριμένα, τα πάνω ηχεία τοποθετούνται σε ύψος και κλίση που να στοχεύει στις τελευταίες οριζόντιες σειρές του ακροατηρίου. Τα δεύτερα από πάνω ηχεία τοποθετούνται με τη σειρά τους σε κλίση που να στοχεύει στις προτελευταίες σειρές, και ούτω καθεξής. Τα τελευταία (κάτω) ηχεία τοποθετούνται σε κλίση που να στοχεύει στις πρώτες οριζόντιες σειρές του ακροατηρίου.

Να σημειωθεί ότι υπάρχει μία μικρή μετακίνηση ως προς τον κάθετο άξονα όσο κατεβαίνουμε, με τα ηχεία να απομακρύνονται ελαφρώς από το ακροατήριο.

Τέλος είναι σημαντικό να τονιστεί ότι μία μελέτη συστημάτων line array είναι πολύ πιο συνθετή και στο παράδειγμα μας δεν καλύπτεται πλήρως. Ωστόσο το παράδειγμα παραμένει χρήσιμο στο βαθμό που θέλουμε να υπολογίσουμε τις γωνίες και τις βασικές ανάγκες για την κάλυψη του χώρου ακρόασης.



```

R = Room();
R.roomCharacteristics([30, 10, 10], 1);

A = Area();
A.createArea([6, 2], [25, 8], 1.6, 0.3, R);

Nlsp = 10;
Q = 20;
Lw = 100;
LspY1 = 3.5;
LspY2 = 6.5;
step = 2;
LspA1 = -10;
LspA2 = LspA1 - step;
LspA3 = LspA1 - 2*step;
LspA4 = LspA1 - 3*step;
LspA5 = LspA1 - 4*step;

for k = 1:Nlsp
    L(k) = Loudspeaker();
end

L(1).addLoudspeaker([4, LspY1, 5], Q, Lw+14, [0, LspA1]);
L(2).addLoudspeaker([3.8, LspY1, 4.5], Q, Lw+7, [0, LspA2]);
L(3).addLoudspeaker([3.6, LspY1, 4], Q, Lw+5, [0, LspA3]);
L(4).addLoudspeaker([3.4, LspY1, 3.5], Q, Lw, [0, LspA4]);
L(5).addLoudspeaker([3.2, LspY1, 3], Q, Lw, [0, LspA5]);
L(6).addLoudspeaker([4, LspY2, 5], Q, Lw+14, [0, LspA1]);
L(7).addLoudspeaker([3.8, LspY2, 4.5], Q, Lw+7, [0, LspA2]);
L(8).addLoudspeaker([3.6, LspY2, 4], Q, Lw+5, [0, LspA3]);
L(9).addLoudspeaker([3.4, LspY2, 3.5], Q, Lw, [0, LspA4]);
L(10).addLoudspeaker([3.2, LspY2, 3], Q, Lw, [0, LspA5]);

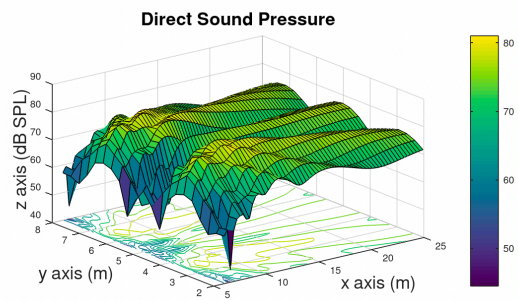
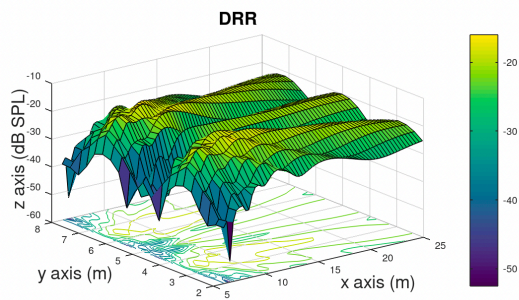
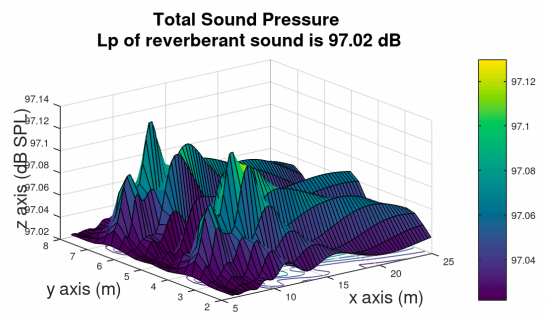
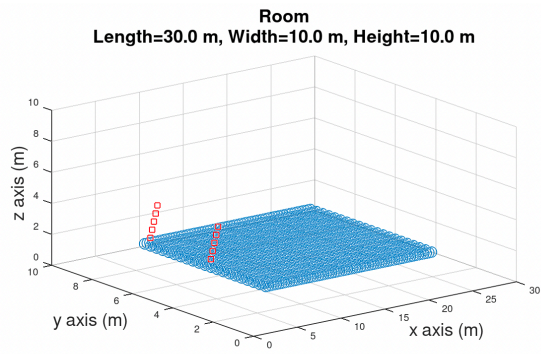
soundLevel = calculateSoundLevelsOmega(L, A, R, 5000);

desiredSPL = 97;
limitDRR = -30;
[deviationsSPL, deviationsDRR] = calculateCosts(soundLevel, desiredSPL,
limitDRR)

plotAcoustics(L, A, R, soundLevel);

```

Ένα line array σύστημα αφορά κυρίως ανοιχτούς και μεγάλους χώρους και για αυτό παρατηρώντας την εικόνα 12 και το διάγραμμα για το Direct Sound Pressure μπορούμε να διακρίνουμε την ομοιόμορφη κατανομή καθώς και τις συμβολές για τη συχνότητα  $5k Hz$ . Στην πράξη, το πλάτος και η φάση του κάθε ηχείου ρυθμίζονται μέσα από ειδικό λογισμικό ώστε να έχουμε βέλτιστο αποτέλεσμα. Για τις ανάγκες του παραδείγματος ωστόσο, όλα τα ηχεία έχουν την ίδια φάση.



**Εικόνα 12:** Παράδειγμα 6 με 2 line arrays των 5 ηχείων για συχνότητα 1kHz.

## 5. Συμπεράσματα - Προτάσεις

### 5.1 Συμπεράσματα

Το A.Simu.T. (Acoustics Simulation Toolkit) είναι ένα ισχυρό εργαλείο του Octave που δημιουργήθηκε για την προσομοίωση της ακουστικής ενός χώρου και τον υπολογισμό των επιπέδων ήχου σε τρισδιάστατους χώρους. Το εργαλείο αποτελείται από τρεις κύριες κλάσεις: Room, Area και Loudspeaker, καθώς και από διάφορες συναρτήσεις για τον υπολογισμό των ακουστικών ιδιοτήτων και την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

Οι κύριες λειτουργίες του εργαλείου περιλαμβάνουν τη δυνατότητα ορισμού των χαρακτηριστικών του χώρου (διαστάσεις, συντελεστής απορρόφησης κλπ), την δημιουργία προαρμόσιμων περιοχών για προσομοίωση, προσθήκη πολλών ηχείων με διαφορετικά χαρακτηριστικά και προσανατολισμούς, και τον υπολογισμό των επιπέδων ήχου για μια συγκεκριμένη διαμόρφωση. Επιπλέον, το εργαλείο επιτρέπει τον υπολογισμό των ακουστικών ιδιοτήτων ενός χώρου για συγκεκριμένες συχνότητες, επιτρέποντας πιο λεπτομερείς αναλύσεις.

### 5.2 Προτάσεις

Για μελλοντικές βελτιώσεις και εξελίξεις του κώδικα θα ήθελα να προτείνω μεταξύ άλλων τα εξής:

1. **Γραφική Διεπαφή Χρήστη (GUI):** Η δημιουργία γραφικής διεπαφής του προγράμματος θα παρέχει μια φιλικότερη προς τον χρήστη εμπειρία, καθιστώντας το πιο προσιτό σε χρηστές όχι τόσο εξοικειωμένους με την χρήση κώδικα. Μια προσθήκη που θα απλοποιήσει τη διαδικασία ρύθμισης και απεικόνισης των προσομοιώσεων.
2. **Επιπλέον ακουστικοί δείκτες:** Η συμπερίληψη άλλων ακουστικών δεικτών όπως: μετρήσεις ομιλίας (διαύγεια, ποσοστό απώλειας συμφώνων) ή μετρήσεις ποιότητας χώρου (κρίσιμη απόσταση), θα επεκτείνει το πεδίο και τις εφαρμογές του εργαλείου.

3. **Βάση δεδομένων υλικών:** Σε συνέχεια του προηγούμενου η ενσωμάτωση μιας βάσης δεδομένων υλικών με διάφορους συντελεστές απορρόφησης για κοινά κτηριακά υλικά θα δίνει στον χρήστη μία καλύτερη εικόνα για την ακουστική συμπεριφορά του χώρου.
4. **Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης:** Η εισαγωγή αλγορίθμων βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό βέλτιστων τιμών όσον αφορά τις παραμέτρους λειτουργίας των ηχείων ή ακόμα και της θέσης τους μέσα στο χώρο.
5. **Βελτίωση της φασικής συμπεριφοράς:** Η μελέτη και η δημιουργία ενός μοντέλου που θα απεικονίζει με ακρίβεια την φάση ανά συχνότητα, αναλόγως με την κλίση του ηχείου θα βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.
6. **Μελέτη Line Array Συστημάτων:** Η δημιουργία μιας ειδικής λειτουργίας για τη μελέτη των line array συστημάτων θα προσφέρει τον υπολογισμό των βέλτιστων γωνιών και αποστάσεων για τα ηχεία, επιτυγχάνοντας την καλύτερη δυνατή κατανομή ήχου στον χώρο ακρόασης. Επιπλέον, θα υπολογίζει τις διαφορές στην ισχύ που τροφοδοτείται σε κάθε σειρά ηχείων, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την βελτιστοποίηση του συστήματος.

## Βιβλιογραφία

Αλεξανδράκη, Χ., 2009. *Ειδικά θέματα μουσικού προγραμματισμού*. Τ.Ε.Ι Κρήτης.

Λουτρίδης, Ι., Σ., 2015. *Ακουστική Αρχές και Εφαρμογές*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα

Μπαγιώκος, Β., 2021. *Δημιουργία πλατφόρμας στο excel για τη μελέτη της ακουστικής συμπεριφοράς ενός χώρου συναρτήσει της ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης*. Πτυχιακή Εργασία. Ρέθυμνο: Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Πασχαλίδου, Σ., 2021. *Εφαρμοσμένη Ακουστική (1), σημειώσεις εργαστηρίου*. Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

Lachniet, J., 2020. *Introduction to GNU Octave A brief tutorial for linear algebra and calculus students*. [e-book] Wytheville Community College. Διαθέσιμο από: <https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/557> [8 Ιανουαρίου 2023].

Octave.org, (1996-2023). *GNU Octave (version 8.2.0)*. [online] Διαθέσιμο από: <https://docs.octave.org/latest/> [23 Ιουλίου 2023]

## **Εργαλεία υλοποίησης**

GeoGebra online (εικόνες 1 και 2)

Macbook Air M2

Octave 6.2.0

Pages, version 12

## **Σύνδεσμος για κατέβασμα του προγράμματος**

<https://www.dropbox.com/scl/fo/crybwiq1fatp8thitv64i/h?rlkey=ln6jywztrhx869rstheopxzfg>