

**Μια υπολογιστική πλατφόρμα για τη μελέτη και βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης σε μεγάλους κλειστούς χώρους**

Νικόλαος Στεφανάκης<sup>1,2</sup>, Λουκάς Λαμπούδης<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής,  
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

<sup>2</sup>Ινστιτούτο Πληροφορικής, Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας  
nstefana@hmu.gr, laboudes\_lucas@hotmail.com

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η προσέγγιση που ακολουθείται συχνά για την ηλεκτρακουστική εγκατάσταση σε χώρους συνάθροισης κοινού είναι αυτή των κατανεμημένων ηχείων (distributed loudspeakers), όπου τα ηχεία είναι κατανεμημένα μέσα ή γύρω από την περιοχή ακρόασης. Η μελέτη τέτοιων περιπτώσεων συχνά απαιτεί την επιλογή ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων και μέχρι σήμερα δεν έχει προταθεί κάποιος τρόπος για τον αυτόματο προσδιορισμό των παραμέτρων αυτών. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται κατά πόσο παράμετροι όπως η θέση, ο προσανατολισμός και η ακουστική ισχύ λειτουργίας ενός συγκεκριμένου πλήθους ηχείων μπορούν να βελτιστοποιηθούν αυτόματα, με τη χρήση μη γραμμικών εργαλείων βελτιστοποίησης.*

***A computational platform for the study and optimization of the electroacoustic facility in large venues***

**ABSTRACT**

*In many cases, sound reinforcement in acoustic venues is based on the installation of multiple loudspeakers distributed around the listening region. The study of such cases involves defining a large number of parameters such as the loudspeaker placement, their orientation and their output acoustic power. Until today, decisions upon these parameters are based on trial and error and there is no established approach for the automatic optimization of these parameters. In this paper, we investigate whether such design parameters can be automatically defined by solving a non-linear least squares optimization problem.*

**Εισαγωγή**

Ο σχεδιασμός της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης σε χώρους συνάθροισης κοινού είναι μεγάλη σημασίας για τη σωστή αναμετάδοση της ηχητικής πληροφορίας και βεβαίως εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ακουστικές ιδιότητες του χώρου. Μία προσέγγιση που ακολουθείται συχνά είναι αυτή των κατανεμημένων ηχείων (distributed loudspeakers), όπου τα ηχεία είναι κατανεμημένα γύρω ή πάνω από την

περιοχή ακρόασης. Η μελέτη τέτοιων περιπτώσεων συχνά απαιτεί την επιλογή ενός μεγάλου αριθμού παραμέτρων όπως πχ που θα μπουν τα ηχεία, ποιος θα είναι ο προσανατολισμός τους καθώς και ποια θα είναι η ηλεκτρική ή ακουστική ισχύς στην οποία θα πρέπει να λειτουργούν ώστε να καλύπτουν τις ανάγκες χρήσης.

Τυπικά κριτήρια που θέτει ένας μελετητής για να κρίνει την αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας εγκατάστασης είναι η ομοιομορφία στον ήχο και η ευκρίνεια της πληροφορίας. Το πρώτο έχει να κάνει με το γεγονός ότι ιδανικά, η στάθμη του ήχου θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν ομοιόμορφη, χωρίς να υπάρχουν θέσεις που οι ακροατές εκτίθενται σε υπερβολικά μεγάλες ηχητικές στάθμες αλλά ούτε και θέσεις που η στάθμη του ήχου να μην επαρκεί. Η ευκρίνεια από την άλλη αφορά περισσότερο την ισορροπία ανάμεσα στα συστατικά του ήχου και κυρίως την αναλογία ανάμεσα στον απευθείας ήχο και την αντηχητική συνιστώσα. Μια καλή αναλογία θα εξασφαλίζει ότι η λεκτική πληροφορία γίνεται κατανοητή από τους ακροατές αλλά και ότι τα συστατικά του ήχου έχουν την ισορροπία που απαιτείται για την απόλαυση της μουσικής.

Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης είναι ένα ενεργό ερευνητικό πεδίο το οποίο έχει μελετηθεί από τη σκοπιά διαφορετικών περιπτώσεων χρήσης. Μια από τις πιο συνηθισμένες περιπτώσεις μελέτης είναι αυτή της γραμμικής συστοιχίας ηχείων (line array), όπου το πλήθος μονάδων και η καμπυλότητα της συστοιχίας μελετάται σε συνδυασμό με τη γεωμετρία της περιοχής ακρόασης [1]. Η βελτιστοποίηση της θέσης των ηχείων έχει μελετηθεί σε μεγάλο βαθμό και από τη σκοπιά του personal audio [2,3] καθώς και από αυτή της αναπαραγωγής ηχητικού πεδίου [4]. Τέλος, έχουν προταθεί εργαλεία για την βελτιστοποίηση της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης τα οποία εστιάζουν στη συχνοτική απόκριση του συστήματος ηχείου-δέκτη. Κριτήριο για την βελτιστοποίηση σε αυτήν την περίπτωση είναι η επίτευξη μιας όσο το δυνατό πιο επίπεδης απόκρισης συχνότητας, κυρίως στη ζώνη των στάσιμων κυμάτων όπου οι φασματικοί χρωματισμοί είναι πιο έντονοι [5,6].

Στην εργασία αυτή, η μελέτη της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης γίνεται στη ζώνη ανακλάσεων, που ως γνωστό αντιπροσωπεύει τη συχνοτική περιοχή όπου επικρατούν οι αρχές της στατιστικής ακουστικής [7]. Πιστεύουμε ότι αν και το φυσικό μοντέλο που επιτρέπει τη μελέτη της ακουστικής ενός κλειστού χώρου στη συγκεκριμένη ζώνη είναι ευρέως γνωστό, μέχρι σήμερα δεν έχει μελετηθεί επαρκώς η δυνατότητα κάποιες από τις παραμέτρους της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης να προσδιορίζονται με αυτόματο τρόπο. Στις ενότητες που ακολουθούν, θα επεξηγηθεί αρχικά το φυσικό μοντέλο που υιοθετείτε για το ηχητικό πεδίο στο χώρο. Στη συνέχεια, θα επεξηγηθούν οι μεταβλητές που λαμβάνονται υπόψη για την κατασκευή της αντικειμενικής συνάρτησης κόστους καθώς και οι παράμετροι σχεδιασμού που μπορούν να λαμβάνονται υπόψη στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Τέλος, μέσα από δύο διαφορετικά ρεαλιστικά σενάρια χρήσης, θα ακολουθήσει η αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθόδου.

## 1. Μεθοδολογία

Στην παρούσα εργασία, θεωρούμε ακουστικά «μεγάλους» κλειστούς χώρους, υπό την έννοια ότι οι διαστάσεις του χώρου είναι μεγάλες σε σχέση με τα μήκη κύματος που μελετώνται. Ως γνωστόν, τέτοιοι χώροι μπορούν να μελετηθούν με βάση τις

αρχές της στατιστικής ακουστικής, οι οποίοι υποθέτουν την δημιουργία ενός ομοιογενούς αντηχητικού πεδίου που η στάθμη του δεν μεταβάλλεται με τη θέση στο χώρο.

### 1.1 Απευθείας ήχος

Στην μόνιμη κατάσταση, η μέση τετραγωνική τιμή της πίεσης του απευθείας ήχου,  $p_{απ}$ , συνδέεται με την ακουστική ισχύ μέσω της σχέσης

$$p_{απ}^2 = \frac{QW\rho c}{2\pi r^2}. \quad (1.1)$$

όπου  $W$  είναι η ακουστική ισχύς του ηχείου σε Watt,  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα ( $\text{kg/m}^3$ ),  $c$  η ταχύτητα του ήχου ( $\text{m/s}$ ) και  $r$  η απόσταση μεταξύ ηχείου και δέκτη σε m, ενώ  $Q$  είναι ο συντελεστής κατευθυντικότητας της πηγής. Η Εξ. (1) είναι έγκυρη μόνο πάνω στον άξονα του ηχείου και δεν επιτρέπει υπολογισμούς σε περιοχές του χώρου ακρόασης όπου η γωνία με τον άξονα του ηχείου είναι μη μηδενική. Ως εκ τούτου, προτείνουμε μια τροποποίηση της Σχέσης (1.1) που λαμβάνει υπόψιν και το συντελεστή γωνιακής απόκρισης της πηγής

$$p_{απ}^2(\theta) = \frac{QW\rho c}{2\pi r^2} \Gamma^2(\theta), \quad (1.2)$$

όπου  $\Gamma(\theta) = \frac{p(\theta)}{p(\theta=0)}$  είναι ο συντελεστής γωνιακής απόκρισης του ηχείου και  $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της ευθείας γραμμής που ενώνει το δέκτη με το ηχείο και τον άξονα του ηχείου. Σημειώνεται εδώ ότι η συνάρτηση  $\Gamma(\theta)$  μπορεί να προκύπτει από μετρήσεις και να αντιπροσωπεύει την πραγματική κατευθυντική συμπεριφορά ενός ηχείου, μπορεί όμως και να είναι μια ντετερμινιστική συνάρτηση της γωνίας  $\theta$ . Στην εργασία αυτή ακολουθήσαμε ένα μαθηματικό μοντέλο για τον προσδιορισμό του  $\Gamma(\theta)$  συναρτήσει του συντελεστή κατευθυντικότητας  $Q$ , το οποίο βασίζεται στη χρήση της συνάρτησης Cauchy [8].

Για τον υπολογισμό της συνιστώσας του απευθείας ήχου όταν υπάρχουν παραπάνω από ένα ηχεία, υιοθετούμε την αρχή ανεξαρτησίας των πηγών βάσει της οποίας, η συνολική RMS τιμή του απευθείας ήχου μπορεί να υπολογιστεί μέσω της Σχέσης

$$p_{απ}^2 = p_{απ,1}^2 + p_{απ,2}^2 + \dots + p_{απ,M}^2, \quad (1.3)$$

όπου  $p_{απ,m}$  είναι η RMS τιμή της ακουστικής πίεσης όπως διαμορφώνεται από το  $m$ -ιστό ηχείο. Η συγκεκριμένη υπόθεση αναμένεται να είναι έγκυρη υπό την προϋπόθεση ότι τα ηχεία είναι αρκετά μακριά το ένα από το άλλο σε σχέση με τα μήκη κύματος που εξετάζονται και ότι η ανάλυση γίνεται σε σχετικά μεγάλα συχνοτικά εύρη, όπως πχ εύρη οκτάβας. Επιπλέον, η συγκεκριμένη συνθήκη μας επιτρέπει να εργαστούμε λαμβάνοντας υπόψιν μόνο το μέτρο της ακουστικής πίεσης σε κάθε σημείο, αγνοώντας τη φάση.

### 1.2 Ανακλώμενος και συνολικός ήχος

Στη μόνιμη κατάσταση, η στάθμη του αντηχητικού πεδίου υπολογίζεται συναρτήσει της σταθεράς δωματίου  $R$  και της συνολικής ακουστικής ισχύος  $W$  μέσω της Σχέσης

$$p_{αν}^2 = \frac{4W\rho c}{R}. \quad (1.4)$$

Δεδομένης της RMS τιμής του απευθείας και ανακλώμενου ήχου, η RMS τιμή του συνολικού ήχου  $p_{ολ}$  μπορεί να υπολογιστεί ως  $p_{ολ}^2 = p_{απ}^2 + p_{αν}^2$ .

### 1.3 Λόγος απευθείας ήχου προς ανακλώμενο

Ο λόγος απευθείας ήχου προς ανακλώμενο (Direct to Reverberant Ratio – DRR) ορίζεται για κάθε σημείο του χώρου ακρόασης ως η διαφορά ανάμεσα στη στάθμη του απευθείας και του ανακλώμενου ήχου, δηλ  $DRR = L_{ap} - L_{av}$ . Για τις περιπτώσεις μελέτης που εξετάζονται σε αυτήν την εργασία, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό κριτήριο, καθότι η τιμή του σχετίζεται με την ευκρίνεια της ηχητικής πληροφορίας που καταφτάνει στο δέκτη, ειδικά για περιπτώσεις που η βασική χρήση του χώρου είναι η ομιλία,

### 1.4 Σχεδιασμός του προβλήματος βελτιστοποίησης

Οι τεχνικές βελτιστοποίησης αποσκοπούν στην εύρεση του βέλτιστου συνόλου παραμέτρων σχεδιασμού  $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  το οποίο ελαχιστοποιεί (ή μεγιστοποιεί), μία αντικειμενική συνάρτηση κόστους. Οι παράμετροι σχεδιασμού μπορούν να υπόκειται σε περιορισμούς ισότητας ή ανισότητας. Λόγω του μεγάλου εύρους των εφαρμογών που βρίσκουν οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, στις μέρες μας μπορεί να τους βρει κανείς ενσωματωμένους σε πολλές γλώσσες προγραμματισμού όπως είναι οι γλώσσες MATLAB, Octave και Python. Η μαθηματική διατύπωση της του προβλήματος βελτιστοποίησης για την περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα εργασία είναι της μορφής:

$$\min_{\mathbf{x}} \|f(\mathbf{x})\|_2^2 = \min_{\mathbf{x}} \sum_{k=1}^K F_k^2(\mathbf{x}) \quad (1.5)$$

υπό την προϋπόθεση

$$LB_n \leq x_n \leq UB_n, n = 1, 2, \dots, N \quad (1.6)$$

όπου  $LB_n$  και  $UB_n$  είναι αντίστοιχα η ελάχιστη και μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή για τη  $n$ -ιοστή παράμετρο σχεδιασμού και  $k=1,2,\dots,K$  είναι ο δείκτης του σημείου ακρόασης.

Από τη Σχέση (1.5) είναι φανερό ότι ο προσδιορισμός της συνάρτησης κόστους είναι θεμελιώδους σημασίας για την υλοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στην παρούσα εργασία, η συνάρτηση κόστους σχεδιάζεται ώστε να αντιπροσωπεύει δύο βασικά κριτήρια καλής ακουστικής. Η πρώτη απαίτηση είναι στην περιοχή ακρόασης η στάθμη του συνολικού ήχου  $L_{ολ}$  να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τιμή μιας επιθυμητής στάθμη  $L_{επ}$ . Η δεύτερη απαίτηση είναι στην περιοχή ακρόασης να επικρατούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερες τιμές του  $DRR$ . Θεωρώντας ότι  $L_{ολ,k}$  και  $DRR_k$  αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα τις τιμές της συνολικής στάθμης και του  $DRR$  στο σημείο ακρόασης με δείκτη  $k$ , η συνάρτηση κόστους για το κάθε σημείο ορίζεται ως εξής:

$$F_k(\mathbf{x}) = |L_{ολ,k} - L_{επ}| + \lambda(DRR_{min} - DRR_k)(DRR_{min} > DRR_k), \quad (1.7)$$

όπου  $DRR_{min}$  είναι η τιμή μιας ελάχιστης αποδεκτής τιμής  $DRR$  η οποία ορίζεται από το χρήστη. Η παραπάνω συνάρτηση κόστους είναι προφανώς μια μη γραμμική συνάρτηση των παραμέτρων σχεδιασμού. Ο πρώτος όρος στο δεξί μέλος ποσοτικοποιεί τις αποκλίσεις μεταξύ πραγματικής και επιθυμητής στάθμης. Η έννοια της ελάχιστης αποδεκτής τιμής  $DRR$  γίνεται κατανοητή αν σκεφτούμε ότι τα σημεία στο χώρο ακρόασης που είναι κάτω από αυτήν την τιμή σχετίζονται με μειωμένη ευκρίνεια πληροφορίας και επομένως θα πρέπει να επιβαρύνουν τη συνάρτηση κόστους, τόσο περισσότερο όσα πιο πολλά dB είναι κάτω από αυτήν την ελάχιστη αποδεκτή τιμή. Ο όρος  $(DRR_{min} > DRR_k)$  είναι μια δυαδική συνάρτηση η οποία θα παίρνει την τιμή 1 όταν ικανοποιείται η συνθήκη  $DRR_{min} > DRR_k$  και

τιμή 0 σε αντίθετη περίπτωση. Η ύπαρξή του είναι καθοριστικής σημασίας καθότι εξασφαλίζει ότι σημεία του χώρου ακρόασης που έχουν τιμή πάνω από το ελάχιστο αποδεκτό όριο δεν θα επιβαρύνουν καθόλου τη συνάρτηση κόστους και επιπλέον εξασφαλίζει ότι η συνάρτηση κόστους (Εξ. (1.7)) θα μπορεί να παίρνει μόνο θετικές τιμές.

### 1.5 Παράμετροι σχεδιασμού

Ανάλογα με την περίπτωση μελέτης, η προσέγγιση που προτείνεται στην παρούσα εργασία επιτρέπει μια μεγάλη ευελιξία ως προς την επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού, καθώς και ως προς την οριοθέτηση των τιμών τους. Παρακάτω γίνεται μια αναφορά στις βασικές παραμέτρους σχεδιασμού:

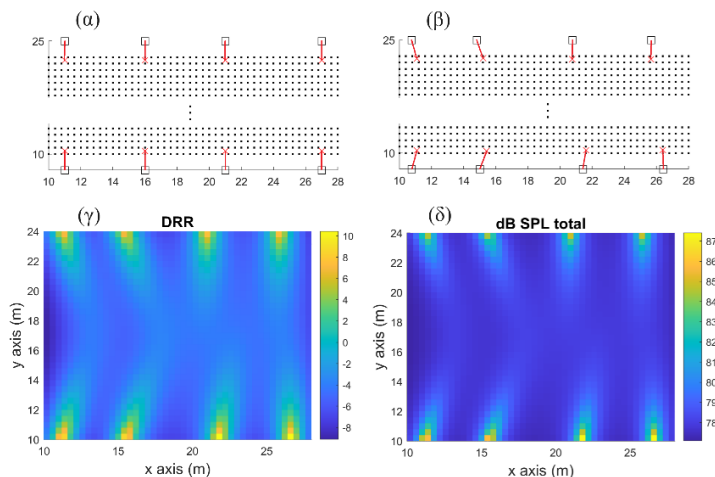
Ακουστική ισχύς: Η βέλτιστη τιμή ισχύος των ηχείων διαμορφώνεται ανάλογα με την απαίτηση για την επιθυμητή τιμή στάθμης του συνολικού ήχου στην περιοχή ακρόασης  $L_{επ}$ . Η ακουστική ισχύς μπορεί να διαφοροποιείται από ηχείο σε ηχείο, ωστόσο μπορεί κανείς να επιβάλει τη συνθήκη όλα τα ηχεία να έχουν την ίδια ισχύ εξόδου  $W$ , γεγονός που ελαττώνει σημαντικά και το πλήθος των προς βελτιστοποίηση παραμέτρων. Υπόκειται στον περιορισμό  $0 \leq W < \infty$ .

Θέση των ηχείων: Η θέση των ηχείων στο πρόγραμμα προσδιορίζεται με βάση καρτεσιανές συντεταγμένες της μορφής  $\mathbf{r} = (x, y, z)$ , που σημαίνει ότι μπορεί να αξιοποιηθούν από ένας μέχρι και τρεις βαθμοί ελευθερίας για τον προσδιορισμό της θέσης κάθε ηχείου. Πρακτικοί λόγοι ωστόσο επιβάλλουν συχνά περιορισμούς όσον αφορά το εύρος των τιμών που μπορούν να πάρουν οι συντεταγμένες του κάθε ηχείου. Για παράδειγμα, τοποθέτηση των ηχείων στο ταβάνι ή σε συγκεκριμένο πλευρικό τοίχο κάποιου χώρου επιβάλλουν ότι η τιμή του  $z$ , του  $x$  ή και του  $y$  θα πρέπει να είναι συγκεκριμένη. Επίσης, η οριοθέτηση των τιμών  $x$ ,  $y$  και  $z$  μέσω της Σχέσης (1.6) μπορεί να εξασφαλίζει ότι οι θέσεις των ηχείων θα είναι εντός των φυσικών διαστάσεων του χώρου, ή εντός του χώρου που θεωρείται ελεύθερος από λοιπό εξοπλισμό κλπ.

Προσανατολισμός των ηχείων: Δύο επιπλέον σημαντικοί παράμετροι σχεδιασμού που σχετίζονται με τον προσανατολισμό των ηχείων είναι η αξιμότητα και η πολική γωνία,  $\theta$  και  $\varphi$  αντίστοιχα, οι οποίες ορίζονται με βάση το τυπικό σύστημα σφαιρικών συντεταγμένων. Οι δύο αυτές γωνίες υπόκεινται στους γενικούς περιορισμούς  $-180^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$  και  $-90^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ , ωστόσο ο χρήστης μπορεί να θεσπίσει σταθερές τιμές ή να περιορίσει το επιθυμητό εύρος τιμών ανάλογα με την περίπτωση που μελετάται.

Συντελεστής κατευθυντικότητας: Ο συντελεστής κατευθυντικότητας  $Q$  υπόκειται στον γενικό περιορισμό  $1 \leq Q < \infty$ . Στο πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να θεθεί ως ελεύθερη παράμετρος που μπορεί να διαφοροποιείται για το κάθε ηχείο ή να έχει σταθερή τιμή για όλα τα ηχεία. Εναλλακτικά, η τιμή του μπορεί να είναι σταθερή και να καθορίζεται από το χρήστη ανάλογα και με την κεντρική συχνότητα η οποία μελετάται.

## 2. Υλοποίηση και Αποτελέσματα

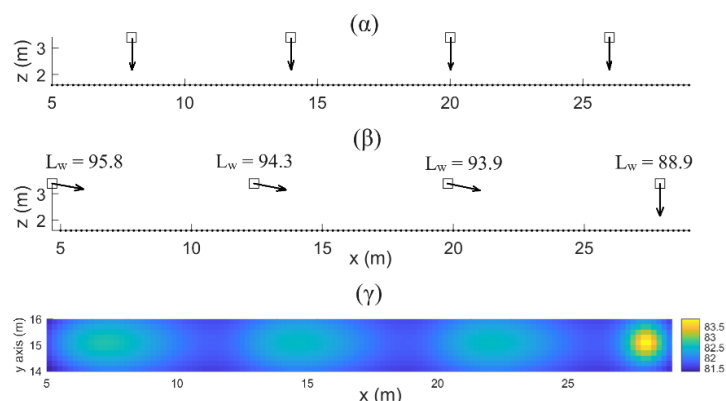


Σχήμα 2.1. Θέσεις και προσανατολισμός των ηχείων πριν (α) και μετά (β) την βελτιστοποίηση για το Σενάριο 1. Οι διακυμάνσεις του DRR και της συνολικής στάθμης πίεσης μετά την βελτιστοποίηση φαίνονται στο (γ) και (δ) αντίστοιχα.

### 2.1 Σενάριο #1

Θεωρούμε ένα κλειστό χώρο διαστάσεων  $L_x=40$ ,  $L_y=30$  και  $L_z=4$  m με χρόνο αντήχησης  $T=1.7$  s και μέσα σε αυτόν μια ορθογώνια περιοχή ακρόασης με κάτω αριστερή γωνία το σημείο  $(x=10, y=10, z=2)$  m και πάνω δεξιά γωνία το σημείο  $(x=28, y=24, z=2)$  m. Ο χώρος ακρόασης καλύπτεται από ένα ομοιόμορφο πλέγμα  $46 \times 36=1656$  μικροφώνων. Θεωρούμαι οκτώ διαθέσιμα ηχεία, τέσσερα από τα οποία μπορούν να κινούνται πάνω στην ευθεία  $y=9$  m και τέσσερα πάνω στην ευθεία  $y=25$  m. Το ύψος των ηχείων είναι ίδιο με αυτό της περιοχής ακρόασης. Θεωρούμε επίσης ότι όλα τα ηχεία αποδίδουν την ίδια στάθμη ακουστικής ισχύος  $L_w$ , της οποίας η τιμή θα πρέπει να προσδιοριστεί με βάση τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Ως παραμέτρους σχεδιασμού θεωρούνται η στάθμη ακουστικής ισχύος  $L_w$ , η θέση του κάθε ηχείου ως προς τον άξονα  $-x$  και ο προσανατολισμός του κάθε ηχείου ως προς την αζιμούθια γωνία η οποία είναι δυνατόν να κυμαίνεται εντός του εύρους  $-91^\circ \leq \theta \leq 91^\circ$ . Η γωνία ανύψωσης των ηχείων τίθεται ίση με  $\varphi=0^\circ$ . Ως επιθυμητή στάθμη του συνολικού ήχου τίθεται  $L_{e\pi} = 78$  dB SPL ενώ για την ελάχιστη αποδεκτή τιμή του DRR θέτουμε  $DRR_{min} = -3.5$  dB, το οποίο είναι και ένα ρεαλιστικό όριο για την δεδομένη ακουστική του χώρου και πλήθος των ηχείων. Τέλος, ο συντελεστής  $\lambda$  στην Εξ. (1.7) τίθεται ίσος με  $\lambda=5$ . Ο συντελεστής κατευθυντικότητας των ηχείων τίθεται ίσος με  $Q=9$  και θεωρείται σταθερός για όλα τα ηχεία. Η βελτιστοποίηση έγινε στο MATLAB με χρήση της συνάρτησης *fmincon*.

Ως αρχική συνθήκη, τα ηχεία τοποθετήθηκαν με βάση το Σχήμα 2.1(α). Για τα τέσσερα κάτω ηχεία η αζιμούθια γωνία τέθηκε ίση με  $90^\circ$  ενώ για τα τέσσερα πάνω ηχεία ίση με  $-90^\circ$ . Ως μια μετρική για την κάλυψη του ακροατηρίου, υπολογίσαμε το  $DRR_{-5dB}$ , το οποίο είναι το ποσοστό των σημείων ακρόασης που το DRR είναι πάνω από  $-5$  dB. Πριν την βελτιστοποίηση αυτή η τιμή ήταν  $DRR_{-5dB} = 58.1\%$ . Τρέχοντας τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης, οι θέσεις, ο προσανατολισμός



Σχήμα 2. Θέσεις και προσανατολισμός των ηχείων πριν (α) και μετά (β) την βελτιστοποίηση για το Σενάριο 2. Οι διακυμάνσεις της συνολικής στάθμης πίεσης μετά την βελτιστοποίηση φαίνονται στο (γ).

και η (κοινή) ακουστική ισχύς τροποποιήθηκαν και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 2.1(β). Μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι τόσο οι θέσεις όσο και ο προσανατολισμός των ηχείων άλλαξε σε σχέση με τις αρχικές τιμές. Η τιμή της ακουστικής ισχύος που επέστρεψε ο αλγόριθμος ήταν 88.3 dB. Η τιμή του  $DRR_{-5dB}$  μετά την βελτιστοποίηση ήταν 75.4%, γεγονός που αποδεικνύει ότι η κάλυψη στην περιοχή ακρόασης βελτιώθηκε. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1(β) η στροφή κάποιων εκ των ηχείων βοήθησε σημαντικά σε αυτήν την βελτίωση. Η κατανομή του DRR και της συνολικής στάθμης του ήχου φαίνονται στο Σχήμα 2.1(γ) και 2.1(δ) αντίστοιχα, όπου μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι συνολική στάθμη του ήχου στο μεγαλύτερο μέρος της περιοχής ακρόασης είναι κοντά στα 78 dB SPL, με τη μέγιστη τιμή σε κάποια σημεία του ακροατηρίου να φτάνει ωστόσο τα 87 dB SPL.

## 2.2 Σενάριο #2

Για κλειστό χώρο ίδιων διαστάσεων με αυτόν της Ενότητας 2.1 και χρόνο αντήχησης  $T=2.1$  s, θεωρούμε τώρα ένα σενάριο όπου τα ηχεία πρέπει να τοποθετηθούν στο ύψος  $z=3.4$  m, πάνω από την περιοχή ακρόασης που βρίσκεται σε ύψος  $z=1.6$  m. Η περιοχή ακρόασης είναι πάλι ορθογώνια με κάτω αριστερή γωνία το σημείο ( $x=5, y=14, z=1.6$ ) m και πάνω δεξιά γωνία το σημείο ( $x=29, y=16, z=1.6$ ) m. Το πλάτος της περιοχής ακρόασης είναι μόλις 2 m, οπότε ουσιαστικά η μελέτη περιορίζεται κατά μήκος της περιοχής ακρόασης. Για το τρέχων σενάριο, θεωρούμε τέσσερα ηχεία με κοινό συντελεστή κατευθυντικότητας  $Q=6$  και αρχικές θέσεις και προσανατολισμό που φαίνεται στο Σχήμα 2.2(α). Η αρχική γωνία ανύψωσης κάθε ηχείου ήταν  $\varphi=-90^\circ$ . Ως παραμέτρους σχεδιασμού θεωρούμε την θέση κατά τον άξονα  $-x$ , την στροφή ως προς το  $\varphi$  και την ισχύ  $L_w$  του κάθε ηχείου. Εν αντιθέσει με το προηγούμενο σενάριο, θεωρείται τώρα ότι η ισχύς της κάθε μονάδας μπορεί να έχει διαφορετική τιμή. Συνολικά, ο αλγόριθμος καλείται να βρει βέλτιστες τιμές για 12 παραμέτρους σχεδιασμού.

Η τιμή του  $DRR_{-5dB}$  με βάση τον αρχικό σχεδιασμό ήταν 60.9%, ενώ μετά την βελτιστοποίηση ήταν 100.0%, γεγονός που αποδεικνύει ότι η κάλυψη στην περιοχή ακρόασης βελτιώθηκε αισθητά. Επιπλέον, από το Σχήμα 2.2(γ) φαίνεται ότι

οι διακυμάνσεις της στάθμης του ήχου περιορίζονται σε ένα εύρος από 81.5 έως 83.5 dB, πολύ κοντά στην επιθυμητή τιμή των 82 dB SPL. Αξίζει να παρατηρήσει κανείς την σημαντική αλλαγή στην στροφή των ηχείων ως προς την γωνία ανύψωσης (εκτός του τέρμα δεξιού ηχείου) και την διαφοροποίηση της ακουστικής τους ισχύος που κρίθηκε απαραίτητη από τον αλγόριθμο για την επίτευξη της επιθυμητής στάθμης.

### 3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία, προτείνεται η χρήση μη γραμμικών τεχνικών βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης μέσα σε ένα κλειστό χώρο. Η προτεινόμενη προσέγγιση φαίνεται ικανή στο να δίνει αποδεκτές λύσεις, σε κάθε περίπτωση όμως οι τελικές αποφάσεις θα πρέπει να περνάνε από την κρίση του μελετητή. Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί δε υπάρχει σε καμία περίπτωση εγγύηση ότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης θα τερματίσει στην καθολικά βέλτιστη λύση. Επαναλαμβάνοντας το ίδιο πείραμα με λίγο διαφορετικές αρχικές συνθήκες ως προς τις θέσεις των ηχείων παρατηρήσαμε ότι οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων διέφεραν κάθε φορά, γεγονός που αποδεικνύει ότι ο αλγόριθμος εν τέλει είχε τερματίσει σε τοπικό ελάχιστο και όχι σε καθολικό ελάχιστο.

### 4. Αναφορές

- [1] Urban, M., Heil, C. and Bauman, P., Wavefront sculpture technology. *Journal of the Audio Engineering Society*, **51**(10), pp.912-932 (2003)
- [2] Zhu, M. and Zhao, S., Broadband loudspeaker placement optimization for personal sound zones systems. In *The 24th International Congress on Acoustics* (2022)
- [3] Kim, D., Kim, K., Wang, S., Lee, S.Q. and Crocker, M.J., Maximization of the directivity ratio with the desired audible gain level for broadband design of near field loudspeaker arrays, *Journal of Sound and Vibration*, **330**(23) (2011).
- [4] Khalilian, H., Bajić, I.V. and Vaughan, R.G., Joint optimization of loudspeaker placement and radiation patterns for sound field reproduction. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (2015).
- [5] D'Antonio, P. and Cox, T.J., Room optimizer: A computer program to optimize the placement of listener, loudspeakers, acoustical surface treatment and room dimensions in critical listening rooms. In *Audio Engineering Society Convention 103*. (1997)
- [6] Stefanakis, N., Sarris, J. and Cambourakis, G., Source placement for equalization in small enclosures. *Journal of the Audio Engineering Society*, **56**(5), (2008).
- [7] Σκαρλάτος Δημήτριος, *Εφαρμοσμένη Ακουστική, Ηχοπροστασία*, Εκδόσεις Gotsis (2018).
- [8] Λαμπούδης Λουκάς. *Υπολογιστική πλατφόρμα για τη μελέτη της ηλεκτρακουστικής εγκατάστασης κλειστού χώρου με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Octave*, Πτυχιακή Εργασία, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, (2023): <https://apothesis.hmu.gr/handle/123456789/11090>