

## Ακουστική μελέτη και βελτίωση studio ηχογραφήσεων και μουσικής εξάσκησης

Ιωάννης Αράγκουλες  
Φυσικός  
MSc Acoustics, ΑΣΠ-ΕΑΠ  
[john.arapkoules@gmail.com](mailto:john.arapkoules@gmail.com)

Γεώργιος Καλλίρης  
Καθηγητής ΑΠΘ  
ΔΠΣ, ΑΣΠ-ΕΑΠ  
[gkai@jour.auth.gr](mailto:gkai@jour.auth.gr)

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί την ακουστική μελέτη ενός υπάρχοντος χώρου μουσικής εξάσκησης και ηχογραφήσεων (studio). Επιχειρήθηκε η αξιολόγηση της υφιστάμενης ηχομόνωσης του χώρου και της εσωτερικής ακουστικής του. Προέκυψαν αποτελέσματα, με βάση τα οποία προτείνονται χρήσιμες παρεμβάσεις βελτίωσης της ακουστικής του συμπεριφοράς. Ως μελέτη περίπτωσης, θα μπορούσε να αποτελέσει έναν οδηγό για παρόμοιες μελέτες.

### *Acoustic study and improvement of a recording studio*

### ABSTRACT

This work is the acoustic study of an extant music practicing and recording studio. Evaluation of its current soundproofing and its internal acoustics is attempted. Interesting results arose according to which, useful modifications are suggested over its acoustic properties. As a case study, it could provide a guide for similar works.

### Εισαγωγή

Ενώ υπάρχουν πολλές έρευνες και αναφορές σχετικά με την ακουστική που πρέπει να έχει το δωμάτιο ελέγχου, σε ένα studio ηχογραφήσεων ή εξάσκησης, φαίνεται ότι είναι λίγες οι επιστημονικές μελέτες γύρω από την ακουστική του κυρίως χώρου, χωρίς να διακρίνονται εύκολα κάποια γενικώς παραδεκτά πρότυπα.

Ο Everest [1] εξηγεί ότι ο ιδανικός χρόνος αντήχησης εξαρτάται από το είδος της μουσικής που παίζεται σε ένα studio. Ο διαχωρισμός των οργάνων, που απαιτείται στη μίξη, οδηγεί σε προτιμητέους χρόνους αντήχησης μικρότερους από ότι σε μια αίθουσα μουσικής. Επισημαίνει ακόμη ότι σύμφωνα με έρευνες, είναι συνήθως αποδεκτή μια αύξηση του χρόνου αντήχησης στις χαμηλές συχνότητες, ενώ στις υψηλές συχνότητες ο έλεγχός του είναι εύκολος ακόμη και με κινούμενες επιφάνειες όπως κουρτίνες. Οι Shea & Everest [2] αναλύουν ότι η εφαρμογή της έννοιας του χρόνου αντήχησης σε μικρά studio μπορεί να είναι μόνο ενδεικτική, αφού προϋποθέτει το ηχητικό πεδίο να είναι διάχυτο, γεγονός σπάνιο σε ένα μικρό χώρο. Η ακουστική του καθορίζεται κυρίως από την απόσβεση των συντονισμών που διεγείρονται από την παραγόμενη μουσική. Ο Walker [3] στο εγχειρίδιο για τα studio του BBC, προτείνει κάποιους χρόνους αντήχησης, ανάλογα με το είδος της μουσικής, μαζί με τις αντίστοιχες ανοχές. Ο Voelker [4] προτείνει για τα διάφορα

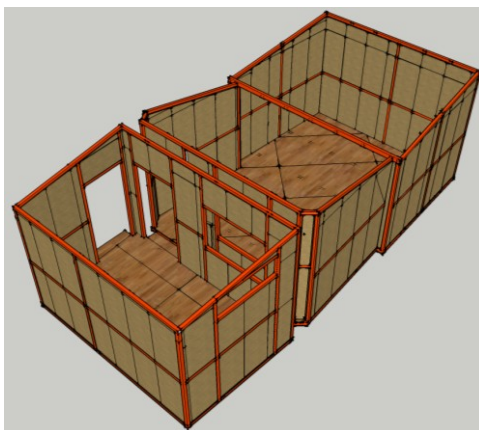
είδη μουσικής διαφορετικούς χρόνους αντήχησης με διαφορετική φασματική κατανομή. Ο Newell [5] εξηγεί ότι η ίδια η ηχομόνωση συνήθως χειροτερεύει την ακουστική του δωματίου, αφού εγκλωβίζει την ηχητική ενέργεια, καθιστώντας τους συντονισμούς αντονότερους, ενώ προτείνει το «ουδέτερο» (neutral) δωμάτιο, ως αυτό που δίνει αρκετή «ζωντάνια» στα όργανα ώστε να αναδεικνύεται ο χαρακτήρας του καθενός οργάνου. Ο Long [6] θεωρεί ότι ένας καλός χώρος ηχογράφησης πρέπει να έχει πολύ ησυχία (NR10-15), αρκετή ηχομόνωση, έλλειψη ακουστικών λαθών (πολλαπλή ηχώ), κανή απορρόφηση (συχνά μεταβλητή), λογική διάχυση, απομονωμένους χώρους για ηχογράφηση, οπτική επαφή με το δωμάτιο ελέγχου, έλεγχο της αντήχησης των μπάσων και των συντονισμών.

Σε ό,τι αφορά την απαιτούμενη ηχομόνωση, επίσης δεν φαίνεται να υπάρχουν κοινά αποδεκτά πρότυπα, αλλά εξαρτάται από τις ηχητικές στάθμες που επικρατούν μέσα και έξω από το χώρο. Ο Newell θεωρεί ως ελάχιστη αποδεκτή ηχομόνωση  $D=75\text{dB}$  (αν το studio βρίσκεται σε οικιστικό περιβάλλον με περιβαλλοντικό θόρυβο  $35\text{dB}$  και εξυπηρετεί φυσικά τύμπανα που παράγουν στάθμη έως  $110\text{dB}$ ), ενώ ο Long προτείνει την εξασφάλιση  $45\text{dB}$  στα όρια της ιδιοκτησίας.

Η ακουστική αξιολόγηση, λοιπόν, ενός studio, με επιστημονικούς όρους, απαιτεί την αποδοχή κάποιων επιθυμητών παραμέτρων (μέσω βιβλιογραφικής επισκόπησης), την αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης (μέσω μετρήσεων και υπολογισμού μεγεθών από εξισώσεις και λογισμικά) και τη σύγκριση των επιθυμητών με τα μετρημένα - υπολογισμένα μεγέθη.

## 1. Ο χώρος

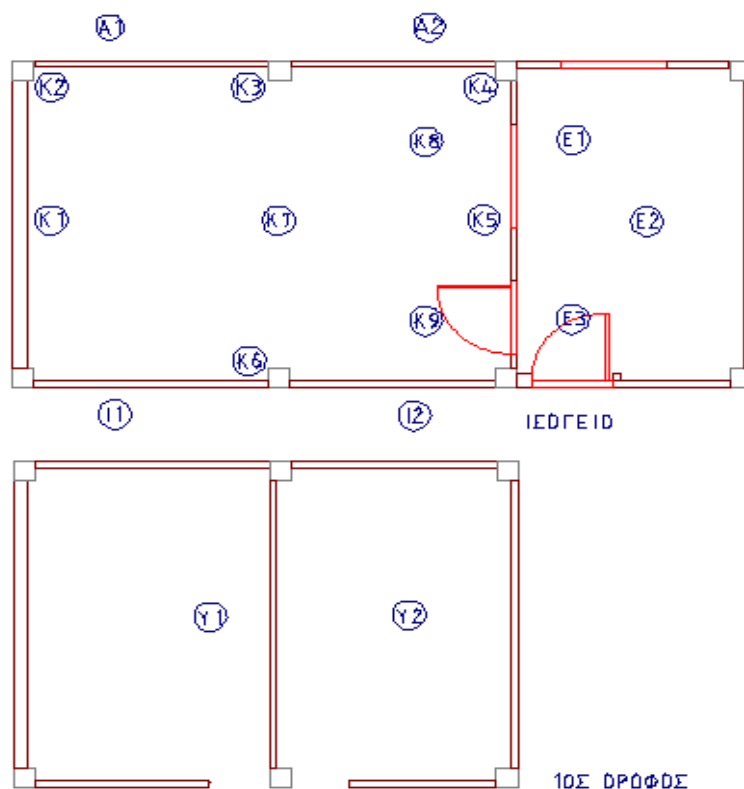
Ο εξεταζόμενος χώρος (Σχ. 1.1) βρίσκεται στο ισόγειο πολυκατοικίας σε ήσυχη αστική περιοχή. Έχει διαστάσεις εσωτερικά  $6\times 4\times 2,6\text{m}$  και εφάπτεται στο δωμάτιο ελέγχου. Αποτελείται από εξωτερικό κέλυφος συνηθισμένων δομικών υλικών και εσωτερικό κέλυφος από διπλή γυψοσανίδα και ξύλο, προσαρμοσμένο σε ενιαίο μεταλλικό σκελετό. Οι απέναντι επιφάνειες του εσωτερικού κελύφους είναι γενικά μη παράλληλες, ενώ μεταξύ των κελυφών υπάρχει ηχοαπορροφητικό υλικό. Ο εξαερισμός γίνεται με αξονικούς ανεμιστήρες, έναν εισόδου και έναν εξόδου αέρα για κάθε δωμάτιο, οι οποίοι βρίσκονται σε εξωτερικό αίθριο χώρο.



Σχήμα 1.1: Τρισδιάστατη απεικόνιση σταδίου κατασκευής του studio (SketchUp)

Οι ακουστικές μετρήσεις έγιναν με τη βοήθεια ηχητικής πηγής (ηχείο ευρείας ζώνης), δέκτη (παντοκατευθυντικό μικρόφωνο), ψηφιακού μετατροπέα (κάρτα ήχου), υπολογιστή και σχετικού λογισμικού (με δυνατότητα πολλαπλών απεικονίσεων), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της λογαριθμικής σάρωσης ημιτόνου.

Κατά τις μετρήσεις, τόσο η πηγή όσο και ο δέκτης τοποθετήθηκαν σε διάφορες θέσεις (Σχ. 1.2), σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα [7]. Προέκυψαν έτσι πολλοί συνδυασμοί μετρήσεων και αντίστοιχων απεικονίσεων, οι οποίες ομαδοποιήθηκαν ανά θέση του δέκτη. Η μέθοδος αυτή μπορεί επίσης να υποδείξει τις βέλτιστες θέσεις των πραγματικών ηχητικών πηγών και τις βέλτιστες θέσεις ακρόασης.



Σχήμα 1.2 : Οι χώροι και οι θέσεις που αναφέρονται (LibreCad).

## 2. Η ηχομόνωση

### 2.1. Επιθυμητά μεγέθη ηχομόνωσης

Από τη βιβλιογραφική επισκόπηση προκύπτει ότι απαιτείται ηχομόνωση εξεταζόμενη σε όλες τις ακουστές συχνότητες, της τάξης των 70dB συνολικά, που μπορεί να ελαττώνεται στις χαμηλές συχνότητες (ελάχιστη τιμή 35dB) αφού

- Υποστηρίζει τη χρήση Η/Α εξοπλισμού και τυμπάνων (μέγιστη στάθμη 110dB)
- Βρίσκεται σε ήσυχο οικιστικό περιβάλλον (μέγιστη στάθμη 45dB στα όρια)
- Λειτουργεί όλο το εικοσιτετράωρο (Σχ. 2.1)

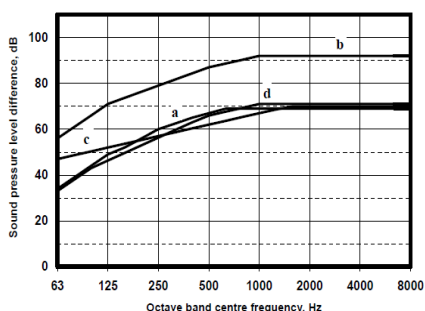


Fig. 1. Examples of sound insulation criteria

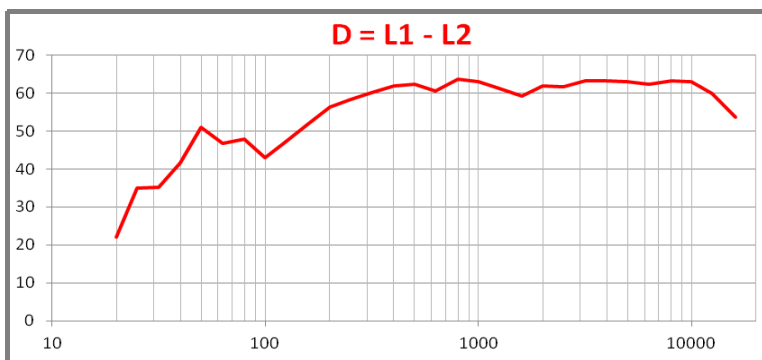
- a between two Radio talks studios
- b between two large general-purpose TV studios
- c between a Radio drama studio and a private office
- d between a Television sound control room and a canteen/kitchen

Σχήμα 2.1: Παραδείγματα επαρκούς ηχομόνωσης σε studio μεταξύ χώρων [3]

2.2. Μετρήσεις ηχομόνωσης

Η παρεχόμενη ηχομόνωση μετρήθηκε μεταξύ του Κυρίως δωματίου ηχογράφησης και των χώρων: δωμάτιο Ελέγχου, Αυλή, παρακείμενος χώρος Ισογείου, Υπνοδωμάτια 1<sup>ου</sup> ορόφου. Όπως υπαγορεύει η τυποποίηση του ΕΛΟΤ [7] το μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε τουλάχιστον 3 θέσεις, οι οποίες απείχαν τουλάχιστον 0,7m μεταξύ τους, τουλάχιστον 0,5m από τους τοίχους, τουλάχιστον 1m από την ηχητική πηγή και 1.60 m, θέση αυτιών όρθιου ενήλικα. Επειδή ο εξεταζόμενος χώρος έχει ως κύρια χρήση τη μουσική, εξετάστηκε όλο το φάσμα των ακουστών συχνοτήτων. Λόγω της περιορισμένης όμως απόκρισης του ηχείου – πηγής, οι μετρήσεις κάτω από 40 Hz κρίθηκαν περιορισμένης αξιοπιστίας.

Μετρήθηκε έτσι, η διαφορά στάθμης και, με υπολογισμό της κατάταξης ηχομείωσης,  $R_w$ , [8] βρέθηκε η ηχομόνωση ανάμεσα στα δύο δωμάτια (52dB), και η μόνωση έναντι ηχορύπανσης από το studio σε προσκείμενους χώρους (51dB για τον εξωτερικό χώρο, 59dB για τον ίδιο όροφο και 61dB για τον υπερκείμενο όροφο) (Σχ. 2.2). Για την ηχοπροστασία του studio μετρήθηκε ο θόρυβος βάθους στο χώρο (34dBA). Τέλος, οι ανεμιστήρες εξαερισμού σε πλήρη λειτουργία, μετρήθηκαν να προκαλούν ηχητικές στάθμες 65dB στα όρια της ιδιοκτησίας.

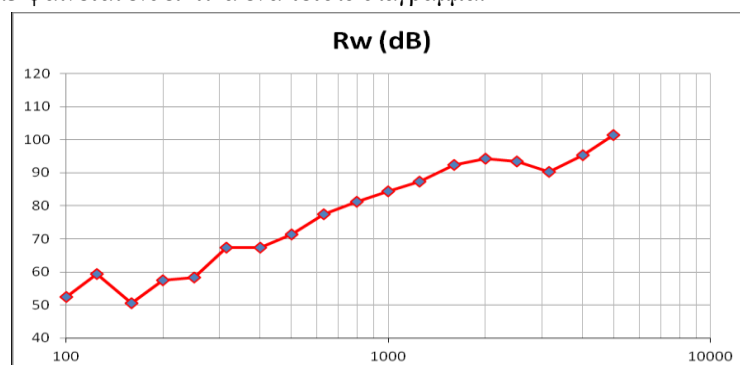


Σχήμα 2.2: Μετρημένη ηχομόνωση μεταξύ studio και υπερκείμενου ορόφου.

2.3. Θεωρητικοί υπολογισμοί ηχομόνωσης

Από βιβλιογραφικές πηγές (διαγράμματα με οπτική παρατήρηση) καταγράφηκε η ηχομόνωση που παρέχουν τα απλά χωρίσματα μεταξύ των εξεταζόμενων χώρων,

σύμφωνα με τη γεωμετρία και τα υλικά τους, υπολογίστηκε ο δείκτης ηχομείωσης κάθε πολλαπλού χωρίσματος και υπολογίστηκε φασματικά η κατάταξη ηχομείωσης,  $R_w$  που επισημάνθηκε στα 500Hz (67dB μεταξύ των δωματίων, 74dB για τον αύλειο χώρο, 71dB για τον ίδιο όροφο & 82dB για τον υπερκείμενο όροφο). Στο σχήμα 2.3 φαίνεται ενδεικτικά ένα τέτοιο διάγραμμα.



Σχήμα 2.3: Υπολογισμένη ηχομόνωση μεταξύ studio και παρακείμενου ισογείου

#### 2.4. Αξιολόγηση ηχομόνωσης

Συγκρίνοντας τις επιθυμητές και τις μετρούμενες τιμές ηχομόνωσης, συνολικά η ηχομόνωση του studio, προκύπτει ικανοποιητική, αλλά όχι για όλες τις συχνότητες: στις χαμηλές συχνότητες είναι και παρατηρημένα ελλείψεις, όταν εξασκείται πλήρες μουσικό συγκρότημα. Πάντως, όχληση στο περιβάλλον παρατηρήθηκε ότι προκαλείται περισσότερο από τη λειτουργία του εξαερισμού, που ξεπερνά τα θεσμοθετημένα όρια.

#### 2.5. Προτάσεις βελτίωσης ηχομόνωσης

Με δεδομένη την περιορισμένη εμπορική εκμετάλλευση του studio, καθώς και την παρατηρημένη όχληση, προτείνεται αρχικά η αντιμετώπιση του θορύβου από τους ανεμιστήρες του εξαερισμού, με χρήση κλωβών και ηχοπαγίδων.

Μια δεύτερη παρέμβαση που θα μπορούσε να γίνει, είναι να αυξηθεί η επιφανειακή μάζα των υλικών του εσωτερικού κελύφους συνολικά, με εφαρμογή επιπλέον στρώσεων, γυψοσανίδας, ξύλου ή και ηχομονωτικών μεμβρανών. Με διπλασιασμό της επιφανειακής μάζας, θα επέλθει επιπλέον ηχομόνωση έως 6dB, όπως αναφέρεται στη βιβλιογραφία και μείωση της συχνότητας συντονισμού. Ταυτόχρονα όμως θα προκληθούν κατασκευαστικά προβλήματα διευθέτησης των ύστερων αρχιτεκτονικών στοιχείων, όπως πόρτα, ηλεκτρολογική εγκατάσταση και ζωγραφική επιφανειών.

### 3. Η εσωτερική ακουστική

#### 3.1. Επιθυμητά μεγέθη εσωτερικής ακουστικής

Από τη βιβλιογραφία και συμβιβάζοντας τις διαφορετικές προσεγγίσεις, θα πρέπει ο χώρος να μην παρουσιάζει διακριτούς συντονισμούς. Επίσης θα πρέπει να

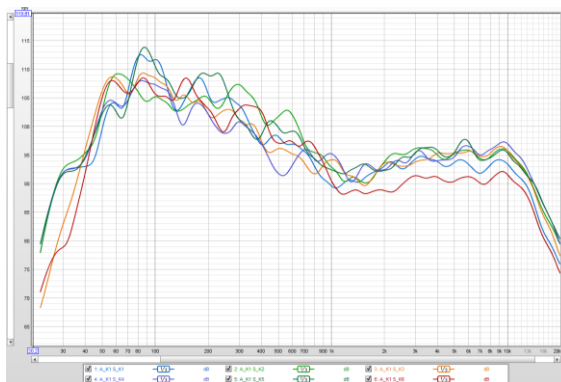
παρουσιάζει χρόνο αντήχησης  $RT60 = 0.3-0.6s$ , ο οποίος μπορεί να αυξάνεται στις χαμηλές συχνότητες ενώ θα πρέπει να μειώνεται στις υψηλές. Βοηθητική θα ήταν η ύπαρξη θαλάμου (booth) για τα τύμπανα και μεταβαλλόμενων στοιχείων, καθώς:

- Προορίζεται κυρίως για χρήση μουσικής
- Υποστηρίζει ακουστικά σχήματα αλλά και υποστηριζόμενα με H/A διατάξεις
- Υποστηρίζει ηχογράφηση αλλά και μουσική εξάσκηση
- Ο κυρίως χώρος είναι μικρός

### 3.2. Μετρήσεις εσωτερικής ακουστικής

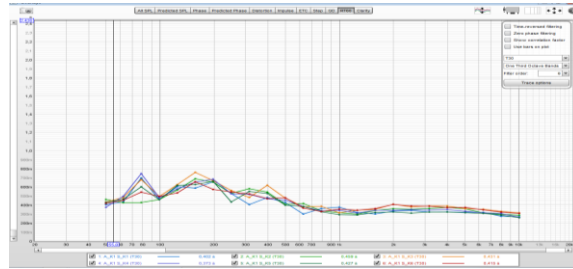
Προφανώς η κρουστική απόκριση είναι μοναδική για κάθε ζεύγος ηχητικής πηγής και δέκτη στο χώρο. Για την εξαγωγή ασφαλέστερων συμπερασμάτων, μετρήθηκαν οι κρουστικές αποκρίσεις για τους συνδυασμούς θέσεων πηγής (K1, K2, K3, K4, K5, K6) και δέκτη (K1, K5, K7, K8) που φαίνονται στο σχήμα 2. Το μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε ύψος 1,60m, ενώ απομακρύνθηκαν το σετ τυμπάνων και το βάθρο τους, καθώς παρατηρήθηκε ότι αλλοιώνουν την αντήχηση του δωματίου. Τα αποτελέσματα ομαδοποιήθηκαν για κάθε θέση του μικροφώνου, ώστε να αναδειχθούν ευκολότερα οι όποιες αναγκαίες παρεμβάσεις.

Στο σχήμα 3.1 έχει αποτυπωθεί η ηχητική στάθμη SPL στη θέση ακρόασης K1, σε σχέση με τη συχνότητα, από το λογισμικό. Επιλέχθηκε υπέρθεση των καμπυλών για τις διάφορες θέσεις της πηγής, προκειμένου να εξαχθούν άμεσα στατιστικά συμπεράσματα. Παρατηρείται σχετική ομοιομορφία των σταθμών, χωρίς έντονους συντονισμούς, εκτός από την περιοχή των 85Hz περίπου, όπου φαίνεται να παρουσιάζουν μέγιστο οι περισσότερες καμπύλες.



Σχήμα 3.1 : Απεικόνιση ηχητικών σταθμών σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

Στο σχήμα 3.2 έχει αποτυπωθεί ο χρόνος αντήχησης  $RT60$  στη θέση ακρόασης K1, σε σχέση με τη συχνότητα, από το λογισμικό. Και εδώ επιλέχθηκε υπέρθεση των καμπυλών για εξαγωγή άμεσων στατιστικών συμπερασμάτων. Εδώ παρατηρούμε αυξημένο χρόνο αντήχησης στην τριτοοκτάβα των 80Hz, μειωμένο στα 100Hz και πάλι αυξημένο στην περιοχή 125 – 200Hz. Για συχνότητες πάνω από 500Hz, ο χρόνος αντήχησης παραμένει κάτω από 500ms για κάθε θέση της πηγής.

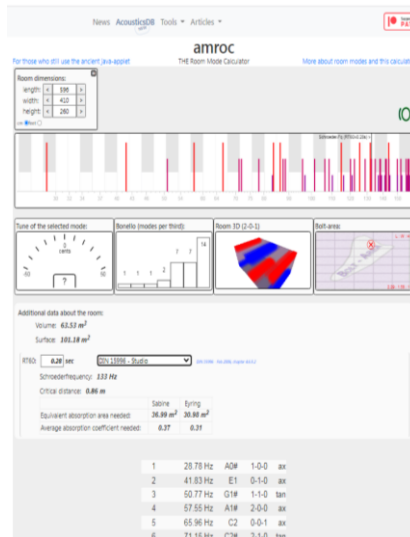


Σχήμα 3.2: Απακόνιση χρόνου αντήχησης σε συνάρτηση με τη συχνότητα.

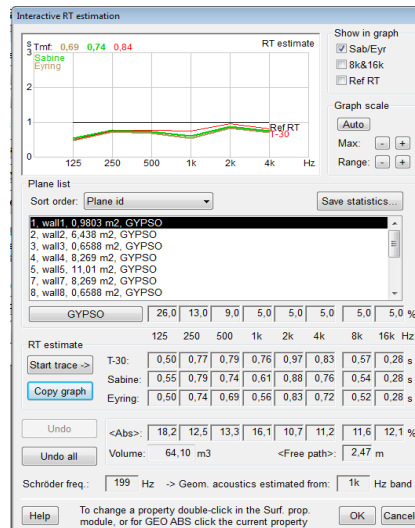
### 3.3. Θεωρητικοί υπολογισμοί εσωτερικής ακουστικής

Οι θεωρητικοί υπολογισμοί έγιναν με 3 τρόπους:

- με υπολογισμό των συντονισμών, μέσω κατάλληλης προσομοίωσης, που αξιολόγησε θετικά το χώρο ως προς το κριτήριο Bonello και εντός της περιοχής Bolt, αλλά έδειξε αυξημένη πυκνότητα συντονισμών στα 85 & 130Hz (Σχ.3.3),
- με υπολογισμό της ολικής απορρόφησης του δωματίου και του χρόνου αντήχησης RT60, κατά Sabine (0,73s αυξημένου στις χαμηλές συχνότητες),
- με χρήση λογισμικού ακουστικής προσομοίωσης, όπου δόθηκαν οι διαστάσεις του δωματίου, οι συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών του και οι θέσεις πηγής – δέκτη, οπότε υπολογίστηκαν η στάθμη SPL (με μέγιστο στα 500Hz) ο χρόνος αντήχησης (0,8s) και η συχνότητα Schroeder (199Hz) (Σχ. 3.4).



Σχήμα 3.3: Υπολογισμός συντονισμών του χώρου από λογισμικό (Amroc)



Σχήμα 3.4: Υπολογισμός χρόνου αντήχησης και συχνότητας Schroeder από λογισμικό (Catt-Acoustics)

### 3.4. Αξιολόγηση εσωτερικής ακουστικής

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των κρουστικών αποκρίσεων με τα υπολογισμένα και τα επιθυμητά προκύπτει ότι οι στάθμες SPL παρουσιάζουν

φασματικά σχετική ομοιομορφία (μέγιστη απόκλιση 15dB στα 85Hz και 130Hz περίπου) ενώ οι χρόνοι αντήχησης είναι αποδεκτοί (μέχρι 500ms), αλλά όχι σε όλες τις θέσεις και τις συχνότητες (μέγιστη απόκλιση έως 0,2s στις ίδιες συχνότητες).

### 3.5. Προτάσεις βελτίωσης εσωτερικής ακουστικής

Για τη βελτίωσή τους προτείνεται η τοποθέτηση απορροφητών τύπου μεμβράνης, που θα είναι συντονισμένοι στις προβληματικές συχνοτικές περιοχές και θα παρέχουν επαρκή ηχητική απόσβεση (80-90Hz που εμφανίζεται με αυξημένη στάθμη και χρόνο αντήχησης και 125-250Hz με αυξημένο χρόνο αντήχησης). Επειδή η ενδιάμεση συχνοτική περιοχή των 100Hz παρουσιάζει μειωμένο χρόνο αντήχησης, θα πρέπει η όποια παρέμβαση να είναι συχνοτικά εντοπισμένη. Οι απορροφητές αυτοί θα έχουν κατασκευαστικά τη μορφή επιφανειών – πάνελ, στερεωμένων περιμετρικά σε καδρόνια κατάλληλου πάχους, δημιουργώντας κατάλληλο διάκενο, ενώ θα περιέχουν ελαφρύ απορροφητικό υλικό.

## 4. Συμπεράσματα

Η ηχομόνωση του χώρου, αφού κρίθηκε οριακά επαρκής από τις μετρήσεις αλλά και από τη μέχρι τώρα λειτουργία, και όσο οι κοινωνικές συνθήκες, όπως η ανοχή των γειτόνων, παραμένουν ίδιες, φαίνεται ότι δεν χρειάζεται αντιμετώπιση. Αν όμως στο μέλλον οι συνθήκες αλλάξουν ή αν υπάρξει προοπτική 24ωρης λειτουργίας με θορυβώδη μουσικά σύνολα, η ηχομόνωση θα πρέπει να βελτιωθεί.

Η εσωτερική ακουστική, αφού επίσης κρίθηκε οριακά επαρκής από τις μετρήσεις αλλά και από τη μέχρι τώρα λειτουργία, και όσο η χρήση του χώρου δηλαδή μουσική εξάσκηση και δειγματική ηχογραφήση (demo) παραμένει ίδια, επίσης δεν χρήζει άμεσες αντιμετώπισης. Η προτεινόμενη παρέμβαση όμως, αναμένεται να τη βελτιώσει περισσότερο.

Συνολικά συμπεραίνεται ότι η ακουστική του studio το καθιστά κατάλληλο για περιορισμένη αλλά όχι για απρόσκοπτη εμπορική εκμετάλλευση. Οι προτεινόμενες βελτιώσεις αποσκοπούν να λύσουν τα σημαντικότερα προβλήματα, με περιορισμένο οικονομικό κόστος.

## Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1] F. Everest *The Master Handbook of Acoustics 4<sup>th</sup> ed* McGraw-Hill (2001).
- [2] N. Shaw & F. Everest *Master Handbook of Acoustics 4<sup>th</sup> ed* Journal of The Acoustical Society of America - 110. 10.1121/1.1398048 (2001).
- [3] R. Walker *Acoustic Criteria and Specification* BBC R & D White Paper, WHP 021 (2002).
- [4] E.J. Voelker *Studio Production Systems* (2002;). Ανακτήθηκε 6-6-2022 από <https://www.scribd.com/document/89954111/Chapter10-3>.
- [5] P. Newell *Recording Studio Design* Elsevier Ltd., Great Britain (2008).
- [6] M. Long *Architectural Acoustics*, 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier Inc. (2014).
- [7] Δ. Σκαρλάτος *Εφαρμοσμένη ακουστική 4<sup>η</sup> έκδοση* Gotsis, Πάτρα (2015).
- [8] Α. Κουκούλης *Μελέτη ακουστικής αναβάθμισης στο νεοκλασικό κτήριο του Δημοτικού Ωδείου Βόλου* ΜΔΕ Ε.Α.Π., Βόλος (2022).