

Μέτρηση και αξιολόγηση ακουστικών παραμέτρων στην Αίθουσα Τελετών του ΑΠΘ

Γκουλιάρας Κωνσταντίνος

AEM: 8793

Παπαγγέλης Άρης

AEM: 8883

Τσαλουχίδης Σπύρος

AEM: 8926



Εισαγωγή	3
1. Περιγραφή του χώρου [1]	4
2. Εξοπλισμός	6
3. Χωρική κατανομή ακουστικής πίεσης και οκταβική ανάλυση	13
3.1. Η διαδικασία	13
3.2. Μετρήσεις	14
3.3. Σχολιασμός μετρήσεων	16
3.4. Σκαριφήματα για L _{Zeq} και L _{Aeq}	17
3.5. Οκταβική ανάλυση σε συγκεκριμένες ομάδες θέσεων	30
3.6. Συμπεράσματα	40
3.7. Υπολογισμός SPL μέσω κώδικα	41
4. Χρόνος αντήχησης (Τ30 και Τ20)	43
4.1. Η Διαδικασία (Κλασική μέθοδος)	43
4.2. Μετρήσεις	45
4.2.1. Διέγερση μέσω της γραμμικής συστοιχίας μεγαφώνων	45
4.2.2. Μετρήσεις μέσω της πανκατευθυντικής πηγής	50
4.3. Υπολογισμός RT60 μέσω κώδικα	53
5. Δείκτης Μετάδοσης Ομιλίας (STI κατά STIPA)	57
5.1. Η άμεση μέθοδος	57
5.1.1. Η διαδικασία	57
5.1.2. Μετρήσεις STIPA	61
5.1.3. Συμπεράσματα	62
5.2. Υπολογισμός του STIPA με την έμμεση μέθοδο	64
5.2.1. Περιγραφή Υλοποίησης μέσω Κώδικα	65
5.2.2. Αποτελέσματα και Σχολιασμός	66
5.3. Σύγκριση των μεθόδων	67
Βιβλιογραφία	68

Εισαγωγή

Το αντικείμενο της φετινής εργασίας ήταν η μέτρηση των ακόλουθων ακουστικών παραμέτρων σε διάφορες θέσεις της αίθουσας τελετών του ΑΠΘ:

- στάθμη ηχητικής πίεσης (SPL)
- χρόνος αντήχησης της αίθουσας (RT60)
- δείκτης μετάδοσης της ομιλίας (STI)

Έπειτα, έπρεπε να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων και να εξαχθούν τα σχετικά συμπεράσματα ως προς την ακουστική της αίθουσας.

Τέλος, τα ίδια αποτελέσματα έπρεπε να υπολογιστούν και μέσω κώδικα, τόσο μέσω των μεθόδων που χρησιμοποιεί το ηχόμετρο της NTi Audio, όσο και μέσω σύγχρονων μεθόδων που περιγράφονται σε πρότυπα ISO, και να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

1. Περιγραφή του χώρου [1]

Η αίθουσα τελετών του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης έχει όγκο $5955 m^3$ και το συνολικό εμβαδόν των επιφανειών που περιλαμβάνει είναι $3407 m^2$. Έχει 950 καθίσματα στην πλατεία και 470 στον εξώστη που περιβάλλει σαν πέταλο την πλατεία, συνολικά δηλαδή 1420 καθήμενους.

Η σκηνή έχει επιφάνεια $155 m^2$ και είναι κατασκευασμένη από ένα ελαφρώς υπερυψωμένο ξύλινο δάπεδο με τρία πλατύσκαλα για τη φιλοξενία χορωδίας κλπ. Το υπόλοιπο δάπεδο είναι μαρμάρινο, ενώ στο μεγαλύτερο μέρος τους καλύπτονται από λεπτό χαλί. Τα καθίσματα στο ακροατήριο είναι ξύλινα ημιεπενδυμένα με αφρώδες υλικό και ύφασμα και ανακλινόμενα. Οι τοίχοι αποτελούνται κύρια από σοβαντισμένο και μη σκυρόδεμα. Το κάτω διάζωμα της αίθουσας διαχωρίζεται από τον εξώστη με ένα τσιμεντένιο άσπρο βαμμένο τοιχίο πάχους 15 εκατοστών. Πίσω από την σκηνή υπάρχει ένα μεγάλο ψηφιδωτό εμβαδού 75 τ.μ.



Εικόνες 1.1 και 1.2: Αίθουσα τελετών Α.Π.Θ.

Ο εξώστης καταλήγει σε κατακόρυφες βαμμένες άσπρες σανίδες, όπου διαχωρίζονται από 4 ορθογώνιες τσιμεντένιες κολώνες. Ίδιες κολώνες υπάρχουν και στο τέλος του κάτω διαζώματος για στήριξη του εξώστη. Το κάτω διάζωμα τερματίζει σε τσιμεντένιο τοίχο, ο οποίος όμως καλύπτεται από ενισχυμένη βελούτε κουρτίνα. Η κονσόλα βρίσκεται δεξιά από τη σκηνή, κοντά στα πρώτα καθίσματα που οδηγούν στον εξώστη, ενώ πίσω από το ψηφιδωτό βρίσκονται οι ενισχυτές του συστήματος ηχοτροφοδοσίας.

Στην αίθουσα υπάρχουν συνολικά 4 μεγάλες ξύλινες πόρτες, 2 στους τοίχους εκατέρωθεν της σκηνής, και 2 που είναι συνήθως καλυμμένες από ενισχυμένη βελούτε κουρτίνα. Το πιο ενδιαφέρον ίσως μέρος της αίθουσας κατασκευαστικά, αλλά και ακουστικά, είναι η οροφή. Η οροφή δεν είναι επίπεδη, αλλά ξεκινά ως επίπεδη πάνω από την σκηνή και ανυψώνεται κοίλα από τη μέση προς το τέλος της και αποτελείται από εναλλαγές οριζόντιων λωρίδων σκυροδέματος και ηρακλείτη κατά μήκος στο μεγαλύτερο μέρος της. Οι λωρίδες ηρακλείτη βρίσκονται σε βάθος περίπου 10 cm σε σχέση με τις τσιμεντένιες. Πάνω από την σκηνή, οι λωρίδες ηρακλείτη έχουν πλάτη περίπου στο 1/3 αυτού των τσιμεντένιων και πηγαίνοντας προς το τέλος του εξώστη της αίθουσας, καταλήγουν τα δύο πλάτη να είναι ίσα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η οροφή να είναι πιο ανακλαστική πάνω από τη σκηνή (ώστε οι ομιλητές και μουσικοί να ακούνε καλά τον εαυτό τους) και πιο ηχοαπορροφητική πάνω από τον εξώστη (ώστε να αποφεύγονται τα στάσιμα κύματα).



Εικόνες 1.3 και 1.4: Εξώστης, Κυρτή οροφή από σκυρόδεμα και ηρακλείτη

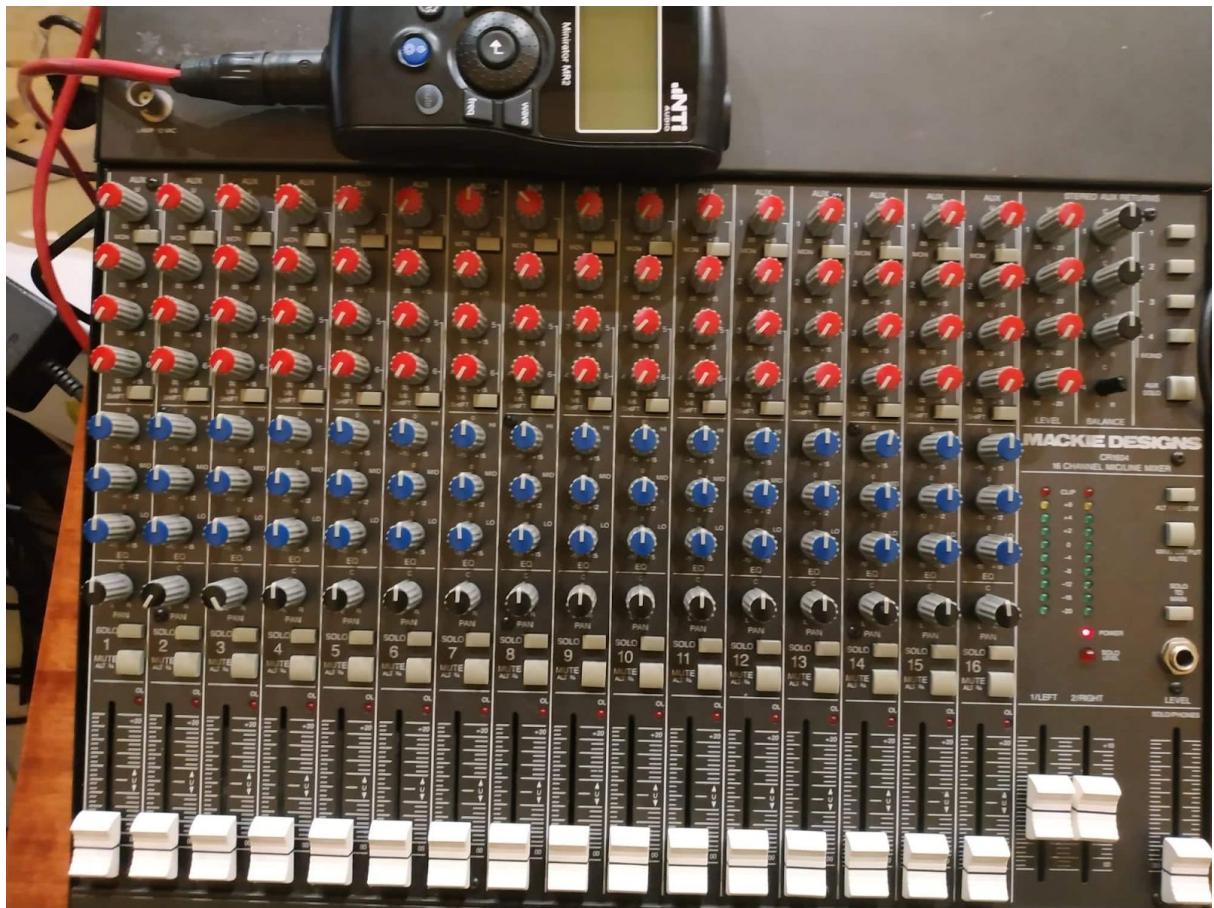
2. Εξοπλισμός

Για τις μετρήσεις μας χρησιμοποιήσαμε την κονσόλα Mackie CR1604, το ηχόμετρο και αναλυτή NTi XL2, την κάρτα ήχου Lexicon Lambda, το πυκνωτικό μικρόφωνο μετρήσεων Superlux ECM-999, τον βαθμονομητή στάθμης ήχου Brüel & Kjaer, Sound Level Calibrator Type 4230 και η γεννήτρια σημάτων ήχου NTi Audio Minirator MR2. Τέλος χρησιμοποιούμε το πρόγραμμα Audacity, για ηχογράφηση και επεξεργασία σημάτων ήχου.



Εικόνα 2.1: Μίκτης, γεννήτρια ακουστικών σημάτων, κάρτα ήχου, και ηχόμετρο

- Η κονσόλα **Mackie CR1604** είναι ένας δεκαεξακάναλος αναλογικός μίκτης ήχου, με εισόδους mic και line level, και channel strips με: auxiliary in/out, equalizer 3 περιοχών, level, pan, mute, και solo για κάθε κανάλι. Έχει επίσης faders για το main output level καθώς και για το output level για ακουστικά που μπορούν να συνδεθούν στο μίκτη.



Εικόνα 2.2: Κονσόλα Mackie CR1604

- Ο προσαρμογέας/κάρτα ήχου **Lexicon Lambda** έχει 5 αναλογικές εισόδους: 2 εισόδους μικροφώνου XLR με προενισχυτές με κέρδος 44dB και phantom power +48V, 1 ¼" TRS jack για κάθε είσοδο μικροφώνου, 2 ¼" TRS balanced line level εισόδους, και μία ¼" είσοδο οργάνου. Έχει 2 ¼" TRS line level outputs, ενισχυτή ακουστικών, Midi I/O, μετατροπείς A/D και D/A 24 bit και υποστηρίζει sample rates 44.1 kHz και 48 kHz. Έχει επίσης τη δυνατότητα monitoring χωρίς καθυστέρηση της εισόδου, και τροφοδοτείται μέσω USB.

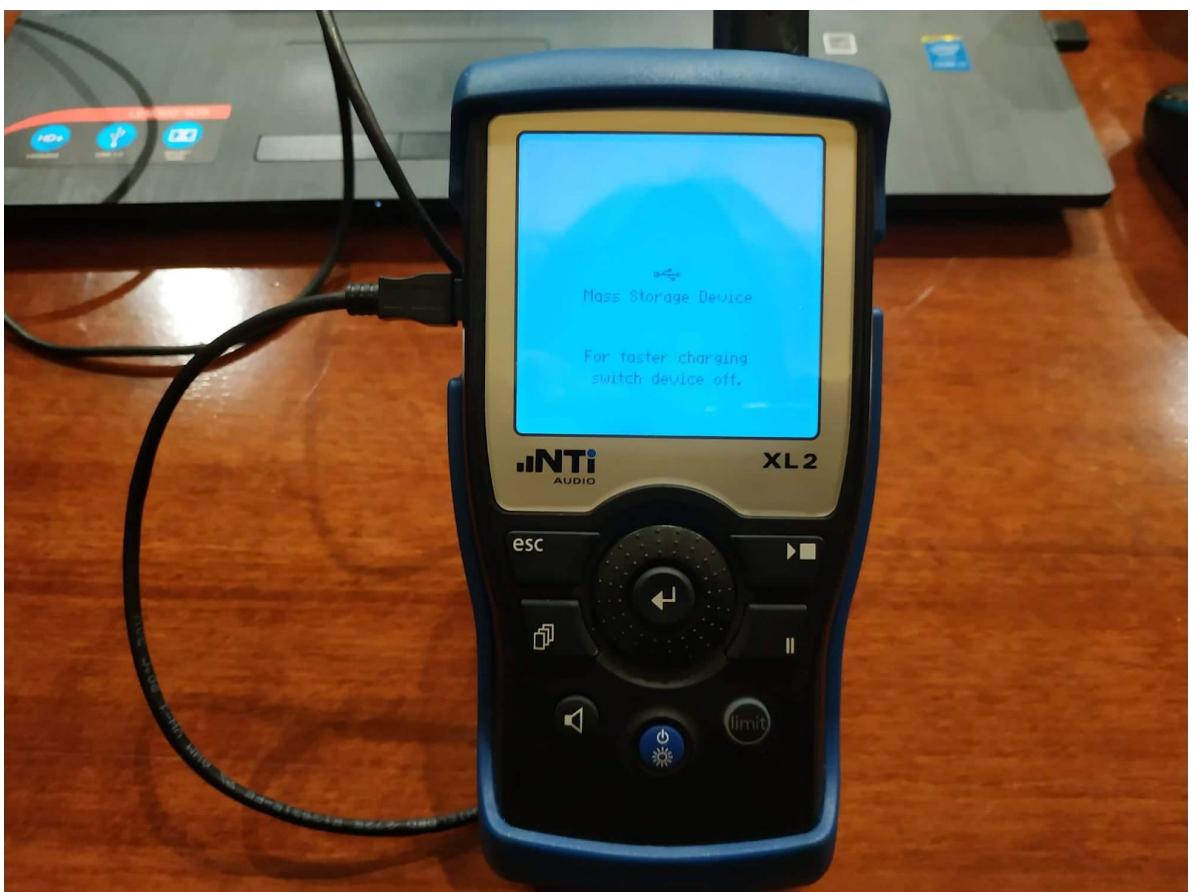


Εικόνα 2.3: Κάρτα ήχου Lexicon Lambda (εμπρόσθια όψη)



Εικόνα 2.4: Κάρτα ήχου Lexicon Lambda (οπίσθια όψη)

- Το ηχόμετρο/αναλυτής ηχητικών σημάτων **NTi Audio XL2** μετράει την ηχητική στάθμη μέσω του μικροφώνου μετρήσεων που συνδέουμε στην είσοδο XLR του, και μπορεί (μεταξύ άλλων), να υπολογίσει με RTA (Real Time Analysis) ηχητική στάθμη με σταθμίσεις Z,A,C, Lmin, Lmax, Leq κλπ. Επίσης, το χρησιμοποιούμε για να μετρήσουμε χρόνο αντίχησης RT60, STIPA, FFT analysis.



Εικόνα 2.5: Ηχόμετρο NTi Audio XL2

- Ο βαθμονομητής στάθμης **Brue & Kjaer, Sound Level Calibrator Type 4230**, παράγει μια συχνότητα 1000Hz στα 94 dB (1 Pa) με ακρίβεια ± 0.3 dB. Χρησιμοποιείται για να ρυθμίσουμε κατάλληλα την ευαισθησία του μικροφώνου.



Eikόνα 2.6: Brue & Kjaer, Sound Level Calibrator Type 4230

- Το **Superlux ECM-999** είναι ένα πανκατευθυντικό μικρόφωνο μετρήσεων με flat συχνοτική απόκριση από 20-20.000 Hz, 200Ω αντίσταση εξόδου, μέγιστο SPL 128 dB και ελάχιστον SNR 70 dB. Τροφοδοτείται με phantom power (48V).



Εικόνα 2.7: Πανκατευθυντικό μικρόφωνο Superlux ECM-999

- Η γεννήτρια ηχητικών σημάτων **NTi Audio Minirator MR2** παράγει διάφορα δοκιμαστικά σήματα που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση ηχητικών συστημάτων. Έχει εξόδους RCA και XLR με αντιστάσεις εξόδου 200Ω και τροφοδοτείται από 3 AA μπαταρίες. Μπορεί να παράγει σήματα: sine, sweep, chirp, delay test, pink noise, white noise, και polarity.



Εικόνα 2.8: Γεννήτρια ηχητικών σημάτων NTi Audio Minirator MR2

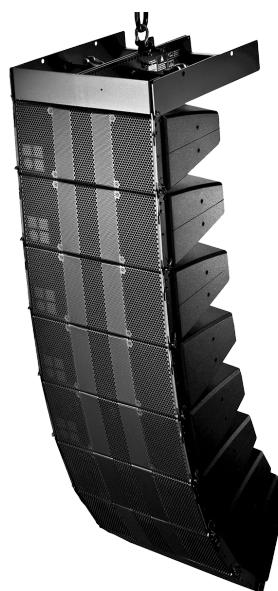
- Στην αίθουσα χρησιμοποιούνται line arrays από την d&b audiotechnik, συγκεκριμένα τα T10. Τα **d&b audiotechnik T10** είναι παθητικά μεγάφωνα 2 δρόμων που έχουν 2 ηχεία των 6.5", ένα compression driver 1.4" υψηλών συχνοτήτων, έναν περιστρεφόμενο κυματοδηγό με κόρνα και έναν ακουστικό φακό. Χρησιμοποιούμενα σε line arrays, τα T10 έχουν οριζόντια διασπορά 90 μοιρών μεχρι και τα 600Hz, ενώ ο ακουστικός φακός πλαταίνει τη διασπορά των υψηλών συχνοτήτων στις 105 μοίρες.

System data

Frequency response (-5 dB standard)	68 Hz - 18 kHz
Frequency response (-5 dB CUT mode)	120 Hz - 18 kHz
Max. sound pressure (Line/Arc setup • PS setup, 1 m, free field) ¹	
with D6/10D	129 • 127 dB
with D20/30D	132 • 130 dB
with D80	132 • 130 dB
Input level (100 dB SPL/1 m)	-13 dBu

Loudspeaker data

Nominal impedance	16 ohms
Power handling capacity (RMS/peak 10 msec)	200/800 W
Nominal dispersion angle (line source, horizontal)	105°
Nominal dispersion angle (point source, h x v)	90° x 35°
Components	2 x 6.5" driver with neodymium magnet 1.4" exit compression driver on rotatable waveguide passive crossover network
Connections	2 x NLT4 F/M optional 2 x EP5 or 2 x NL4
Weight	11kg (24 lb)



Εικόνα 2.9: Μεγάφωνα d&b audiotechnik T10

3. Χωρική κατανομή ακουστικής πίεσης και οκταβική ανάλυση

Η πρώτη εργαστηριακή άσκηση αφορά τη μέτρηση της ακουστικής πίεσης (SPL) σε ενδεικτικές θέσεις της αίθουσας τελετών, και την εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας ως ηχητική διέγερση ένα σήμα ροζ θορύβου, καταγράφηκαν οι τιμές πίεσης χωρίς στάθμιση και με στάθμιση τύπου A, σε 40 θέσεις της πλατείας και του εξώστη. Καταγράφηκε επίσης η οκταβική κατανομή της ηχητικής πίεσης, χωρίς στάθμιση.

3.1. Η διαδικασία

Για να πάρουμε τις μετρήσεις μας, συνδέσαμε το μικρόφωνό μας στο ηχόμετρο, το οποίο παρείχε τα 48V phantom power που χρειάζεται το μικρόφωνο. Εν συνεχείᾳ με τον εξωτερικό μας βαθμονομητή, βαθμονομήσαμε το ηχόμετρο.

Συνδέσαμε τη γεννήτρια ηχητικών σημάτων στην κονσόλα, ή έξοδος της οποίας πηγαίνει στο σύστημα ηχοτροφοδοσίας, και ρυθμίσαμε την ευαισθησία του καναλιού έτσι ώστε στην πρώτη θέση να μετράμε L_{eq} 80 dB. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε αυθαίρετα. Στη συνέχεια πήραμε μετρήσεις για καθεμία από τις 40 θέσεις, 20 στην πλατεία και 20 από τον εξώστη, με τον ίδιο τρόπο. Οι μετρήσεις αυτές διήρκησαν 5 δευτερόλεπτα η καθεμία και τα αποτελέσματά τους αποθηκεύτηκαν στο ηχόμετρο.

Το σήμα που παράγεται στη γεννήτρια, ο ροζ θόρυβος, έχει την ιδιότητα ότι η φασματική πυκνότητα ισχύος του είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη συχνότητα και κάθε οκτάβα έχει την ίδια ενέργεια. Γι αυτό το λόγο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ηλεκτρακουστικής, καθώς το ανθρώπινο αυτί αναγνωρίζει τη συχνότητα με λογαριθμικό τρόπο.

3.2. Μετρήσεις

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα, και επισημαίνονται στην κάτωφη της αίθουσας.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι τιμές SPL στάθμης (L_{Zeq} και L_{Aeq}) συγκεκριμένων θέσεων της αίθουσας.

Έπειτα, ακολουθούν σκαριφήματα της πλατείας και του εξώστη με τις θέσεις color coded ανάλογα με τη στάθμη πίεσης που μετρήθηκε, τόσο με στάθμιση Z όσο και A . Επίσης, επιλέχθηκαν οι οκτάβες των 125. 1000, και 8000 Hz (ως δείγματα των χαμηλων, μεσαίων και υψηλών συχνοτήτων), για τις οποίες έγινε η ίδια σχηματική απεικόνιση.

Τέλος, έγινε οκταβική ανάλυση κι εξήχθησαν διαγράμματα για 8 διαφορετικές ομάδες θέσεων (5 στην πλατεία, 3 στον εξώστη), με σκοπό την καλύτερη εποπτεία του SPL σε διάφορες περιοχές της αίθουσας.

Αριθμός Θέσης	L _{Zeq} (dB)	L _{Aeq} (dB)
<u>01</u>	79.9	75.1
02	79.2	75.7
<u>03</u>	79.0	75.9
04	78.0	74.9
05	78.1	74.9
06	77.2	74.0
07	77.0	74.3
08	77.6	74.9

09	76.8	74.3
10	77.8	74.7
11	76.4	72.8
12	75.2	72.6
13	75.8	72.8
14	75.1	72.4
15	75.8	72.7
16	76.3	72.6
<u>17</u>	73.3	71.0
18	73.9	70.5
19	73.7	71.4
20	73.9	71.1
21	74.3	69.0
22	77.1	73.3
23	77.5	75.1
24	74.1	70.4
25	74.2	70.1
26	74.4	70.6
<u>27</u>	74.2	68.3
28	73.9	69.2
29	75.8	69.8
30	73.8	69.4

31	76.7	73.3
32	74.8	71.6
33	74.3	68.7
34	73.6	68.9
35	74.5	70.7
36	74.5	70.1
37	74.6	71.4
38	77.2	74.0
39	76.7	73.2
40	75.2	69.4

Πίνακας 3.1: Μετρήσεις SPL (Α και Ζ στάθμιση) σε 40 επιλεγμένες θέσεις.

3.3. Σχολιασμός μετρήσεων

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη στάθμη ακουστικής πίεσης **χωρίς** στάθμιση, εμφανίζεται στη θέση 1, με τιμή 79.9 dB.

Χρησιμοποιώντας ωστόσο **στάθμιση Α**, η μέγιστη στάθμη ακουστικής πίεσης παρατηρείται στη θέση 3, με τιμή 75.9 dB.

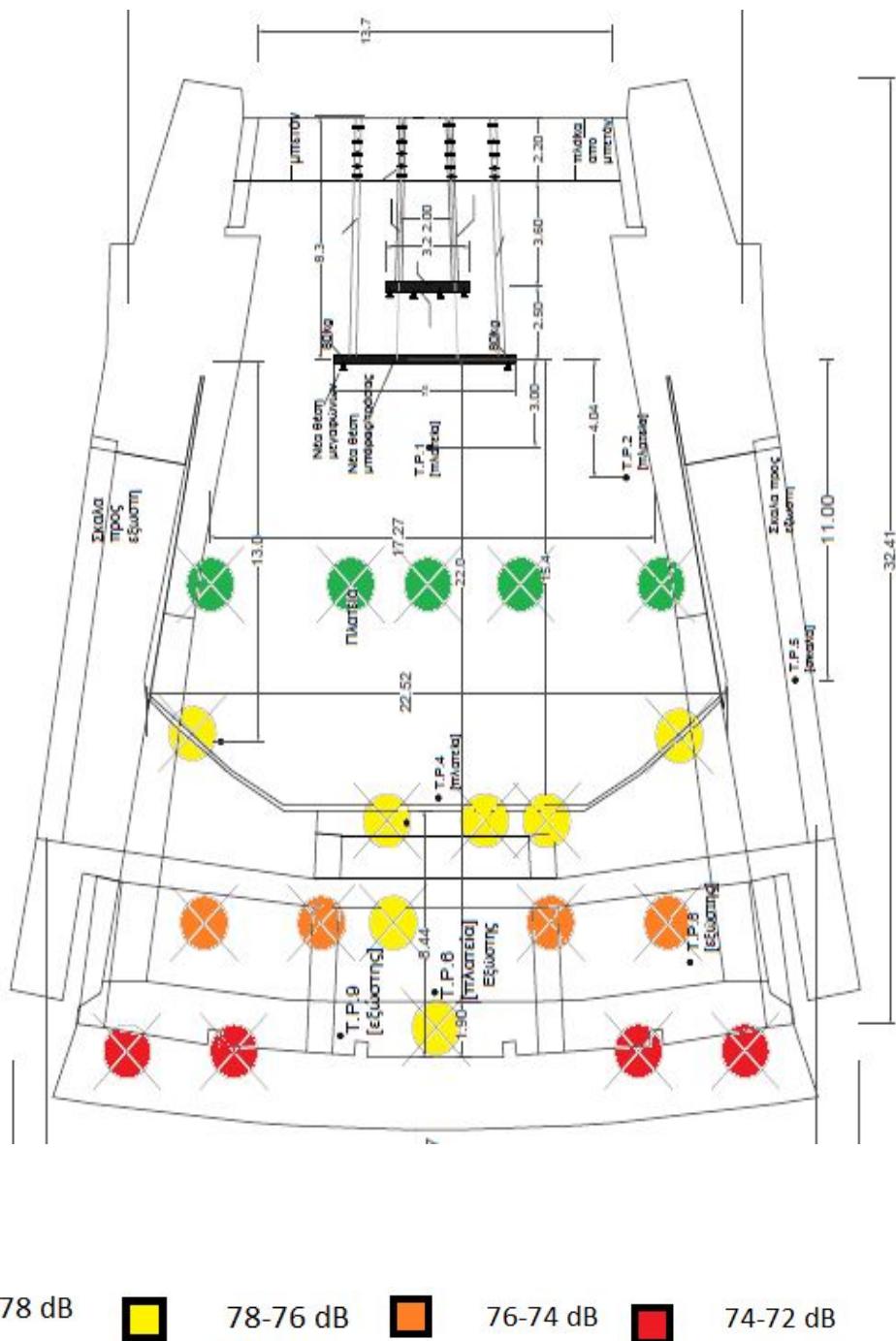
Η διαφορά αυτή μπορεί να εξηγηθεί, εάν ληφθεί υπόψη η κατευθυντικότητα των υψηλών συχνοτήτων.

Αντίστοιχα, η **ελάχιστη** στάθμη ακουστικής πίεσης **χωρίς** στάθμιση, εμφανίζεται στη θέση 17, με τιμή 73.3 dB.

Εφαρμόζοντας τη στάθμιση Α, η ελάχιστη τιμή των 68.3 dB μετρήθηκε στη θέση 27, η οποία βρίσκεται στον εξώστη.

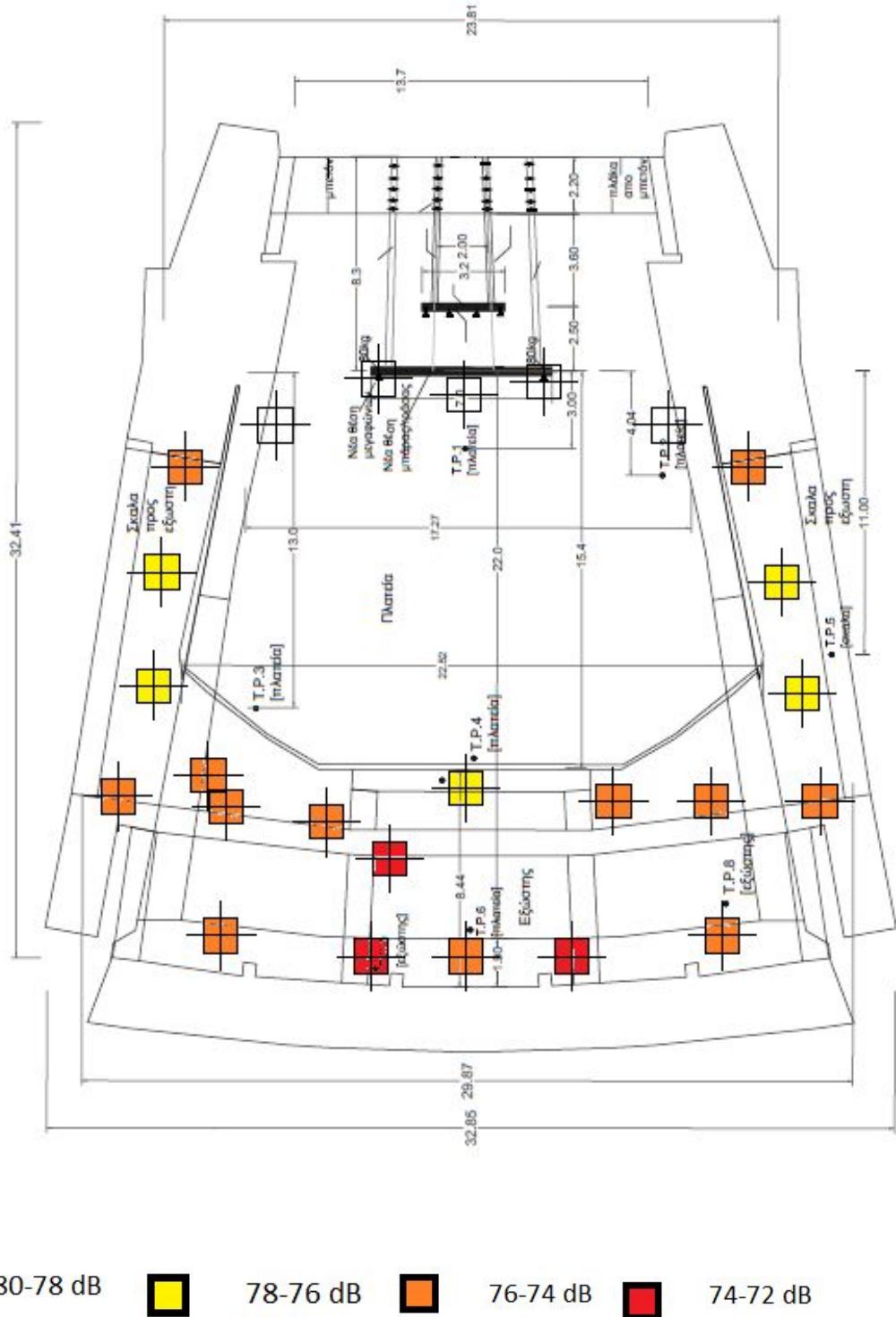
3.4. Σκαριφήματα για L_{Zeq} και L_{Aeq}

A) Πλατεία



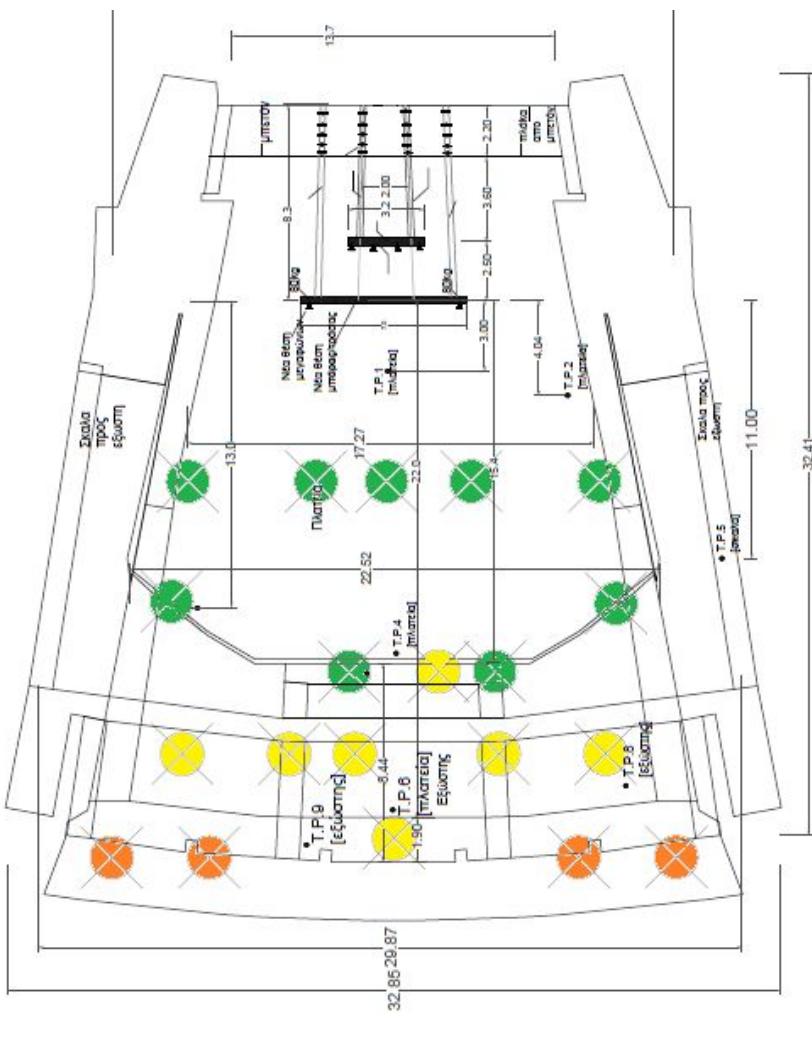
Εικόνα 3.1: Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση στις θέσεις της πλατείας που μετρήσαμε (L_{Zeq})

B) Εξώστης



Εικόνα 3.2: Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση στις θέσεις του εξώστη που μετρήσαμε (L_{Zeq})

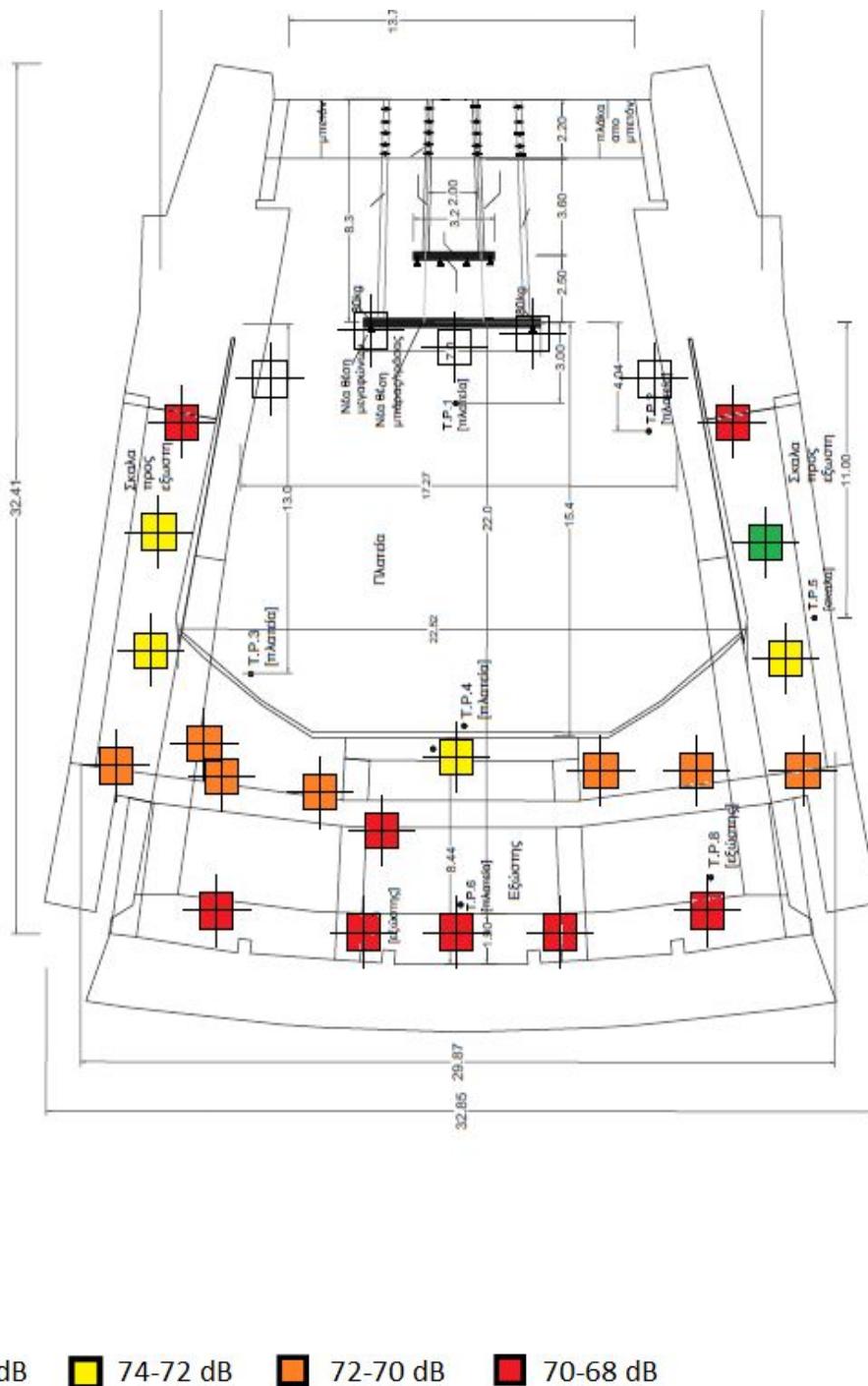
A) Πλατεία



■ 76-74 dB ■ 74-72 dB ■ 72-70 dB ■ 70-68 dB

Εικόνα 3.3: Στάθμη ηχητικής πίεσης με συχνοτική στάθμιση A στις θέσεις της πλατείας που μετρήσαμε (LAeq)

B) Εξώστης



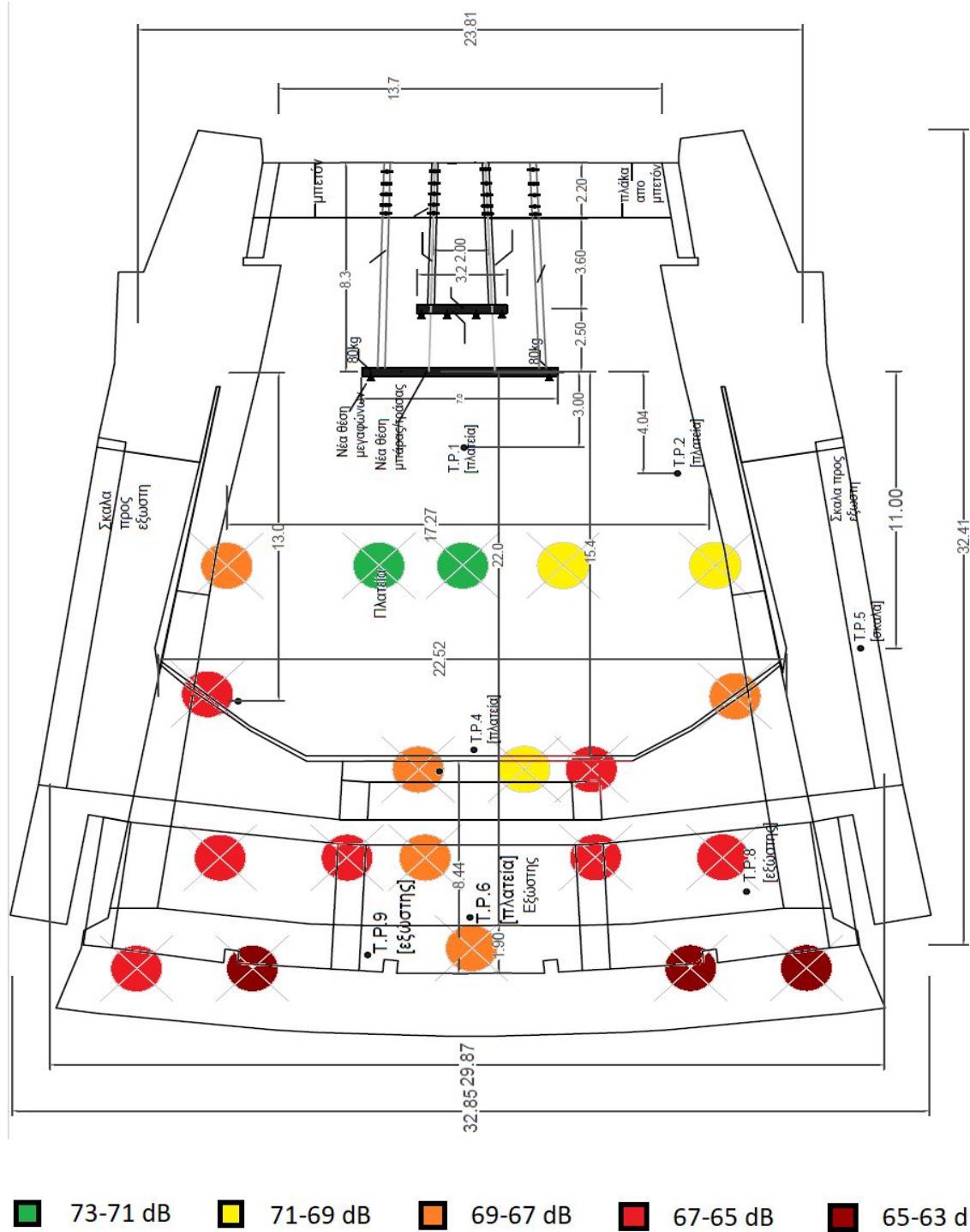
Εικόνα 3.4: Στάθμη ηχητικής πίεσης με συχνοτική στάθμιση Α στις θέσεις του εξώστη που μετρήσαμε (L_{Aeq})

Θέση	SPL	Θέση	SPL
1	72,4 dB	21	68 dB
2	71,1 dB	22	68,9 dB
3	70,3 dB	23	68,4 dB
4	70 dB	24	67,4 dB
5	68,9 dB	25	67,5 dB
6	70,1 dB	26	67,3 dB
7	68,1 dB	27	65,4 dB
8	66,9 dB	28	65,4 dB
9	66,5 dB	29	69,7 dB
10	68,3 dB	30	66,9 dB
11	68 dB	31	70,2 dB
12	66,7 dB	32	67,2 dB
13	65,1 dB	33	66,4 dB
14	66,5 dB	34	65,5 dB
15	65,1 dB	35	67,7 dB
16	68,5 dB	36	69,5 dB
17	63,8 dB	37	67,1 dB
18	65,5 dB	38	68,8 dB
19	63,9 dB	39	68,9 dB
20	64,5 dB	40	69,8 dB

Πίνακας 3.2: Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση για την οκτάβα

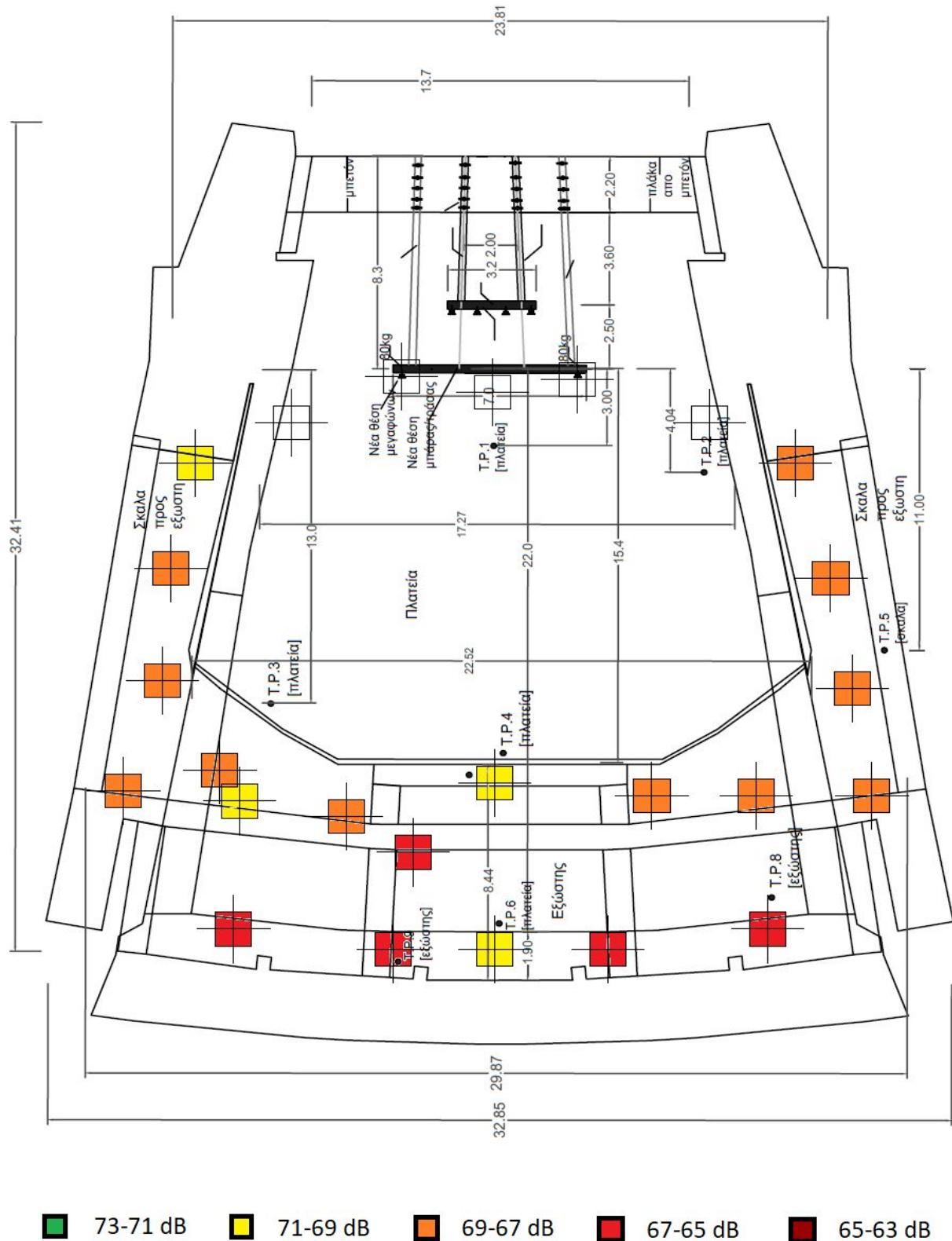
κεντραρισμένη στα 125Hz στις θέσεις που μετρήσαμε (L_{Zeq})

A) Πλατεία



Εικόνα 3.5: Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση για την οκτάβα κεντραρισμένη στα 125Hz στις θέσεις της πλατείας που μετρήσαμε (L_{eq})

B) Εξώστης



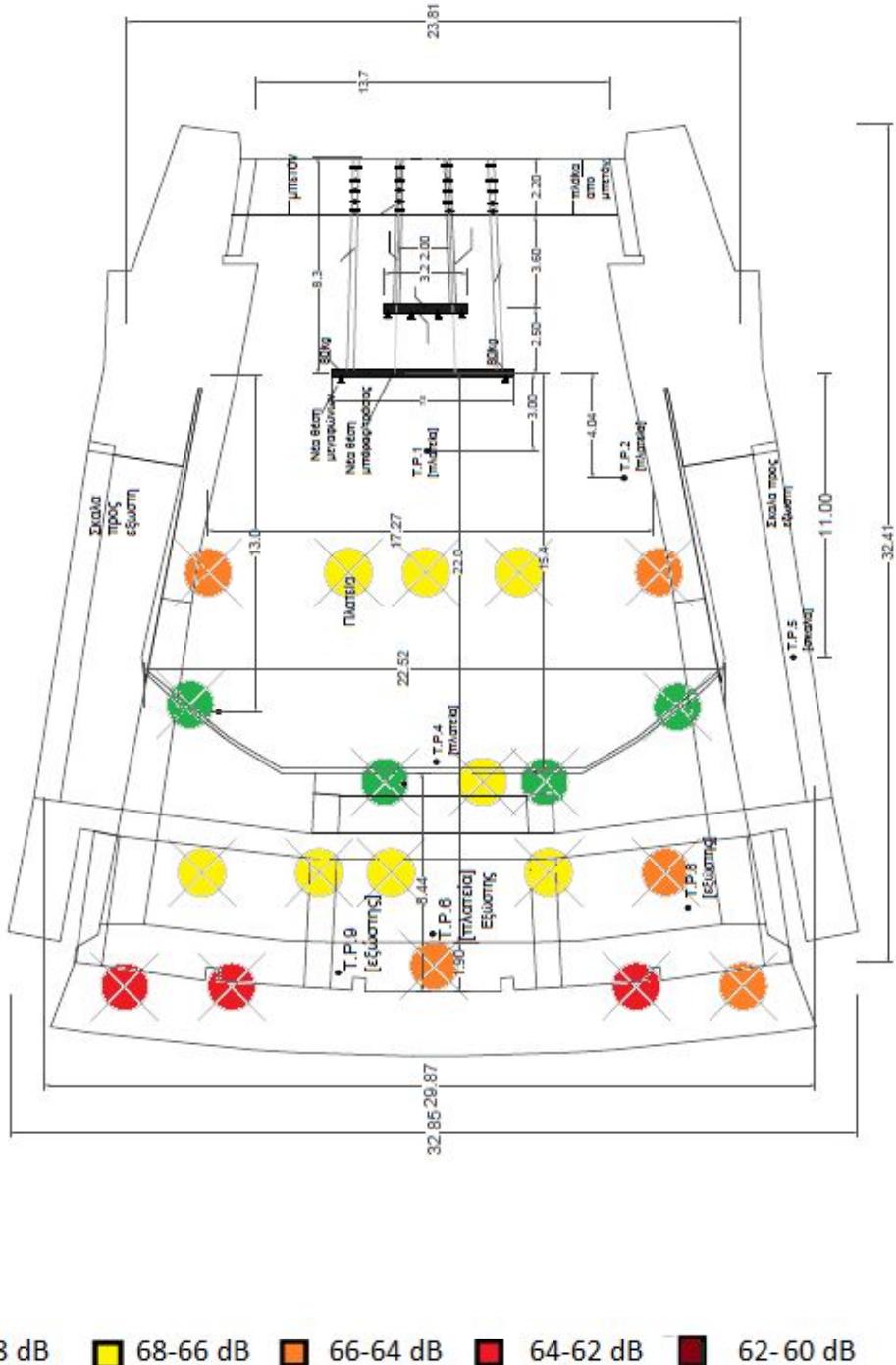
Εικόνα 3.6: Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση για την οκτάβα κεντραρισμένη στα 125Hz στις θέσεις του εξώστη που μετρήσαμε (L_{Zeq})

Θέση	SPL	Θέση	SPL
1	67,1 dB	21	60,7 dB
2	67,3 dB	22	66,1 dB
3	67,8 dB	23	65,6 dB
4	65,2 dB	24	62,7 dB
5	65,9 dB	25	63,0 dB
6	66,5 dB	26	62,4 dB
7	68,2 dB	27	60,8 dB
8	69,1 dB	28	63,2 dB
9	68,4 dB	29	61,6 dB
10	68,6 dB	30	62,7 dB
11	67,8 dB	31	66,2 dB
12	66,5 dB	32	63,6 dB
13	66,1 dB	33	61,8 dB
14	67,0 dB	34	62,4 dB
15	65,2 dB	35	63,5 dB
16	65,7 dB	36	63,1 dB
17	62,4 dB	37	63,0 dB
18	63,1 dB	38	65,8 dB
19	63,1 dB	39	65,7 dB
20	64,59dB	40	62,0 dB

Πίνακας 3.3 Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση για την οκτάβα

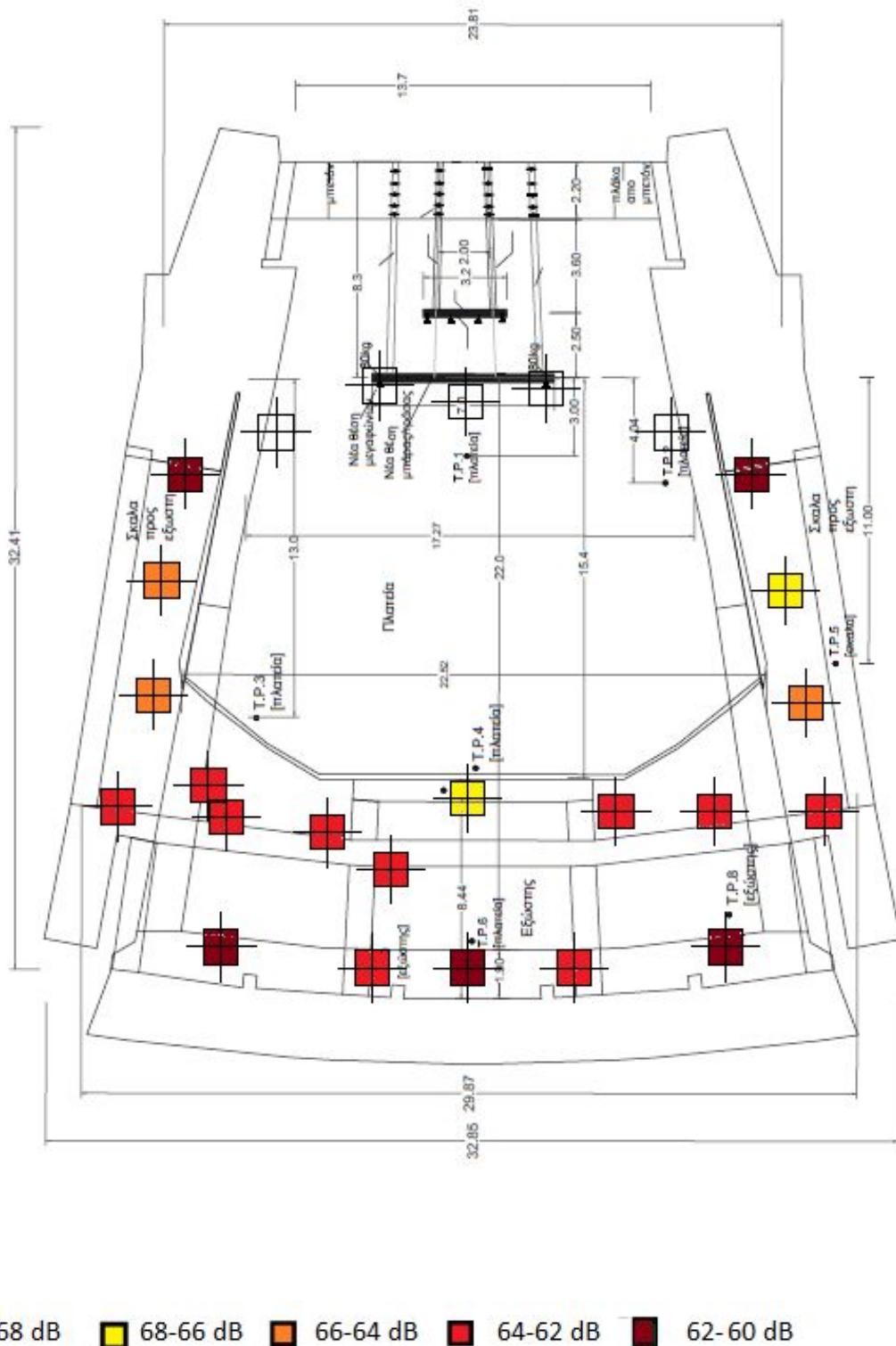
κεντραρισμένη στα 1000Hz στις θέσεις που μετρήσαμε

A) Πλατεία



Εικόνα 3.7: Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση για την οκτάβα κεντραρισμένη στα 1000 Hz στις θέσεις της πλατείας που μετρήσαμε (L_{eq})

B) Εξώστης



Εικόνα 3.8: Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση για την οκτάβα κεντραρισμένη στα 1000 Hz στις θέσεις του εξώστη που μετρήσαμε (L_{Zeq})

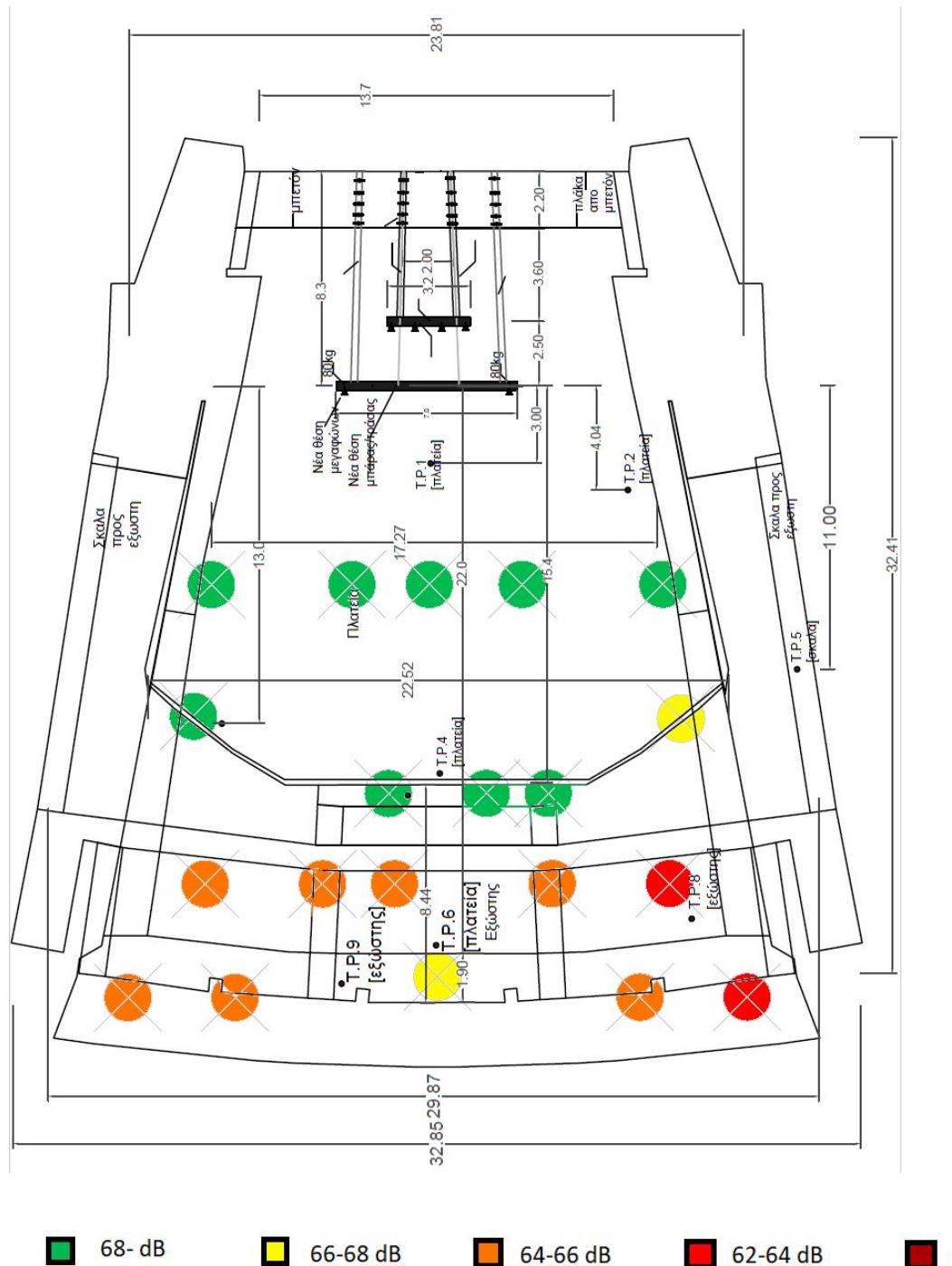
Θέση	SPL	Θέση	SPL
1	69.7 dB	21	61.4 dB
2	70.8 dB	22	66.1 dB
3	71.6 dB	23	71.1 dB
4	70.2 dB	24	64.0 dB
5	69.9 dB	25	63.3 dB
6	69.8 dB	26	63.5 dB
7	69.5 dB	27	60.2 dB
8	68.1 dB	28	60.5 dB
9	69.4 dB	29	61.6 dB
10	67.8 dB	30	63.4 dB
11	64.5 dB	31	68.5 dB
12	64.0 dB	32	67.0 dB
13	64.6 dB	33	60.2 dB
14	64.0 dB	34	60.6 dB
15	63.4 dB	35	62.7 dB
16	66.0 dB	36	63.1 dB
17	64.9 dB	37	63.6 dB
18	64.0 dB	38	69.5 dB
19	65.1 dB	39	65.8 dB
20	63.7 dB	40	60.4 dB

Πίνακας 3.4: Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση για την οκτάβα

κεντραρισμένη στα 8000 Hz στις θέσεις που μετρήσαμε (L_{Zeq})

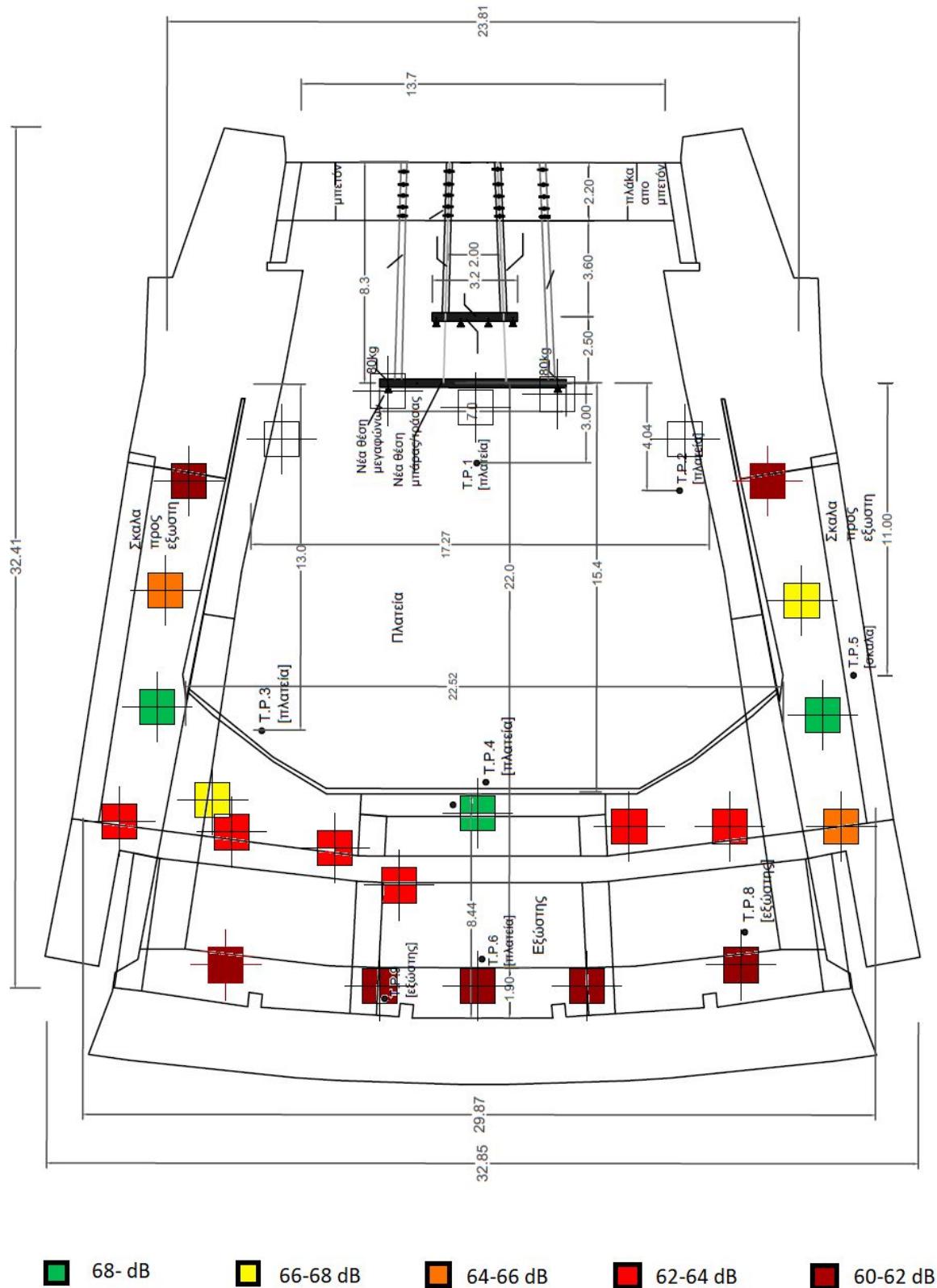
Στα ακόλουθα σκαριφήματα επισημαίνονται οι μετρήσεις των θέσεων, στην κάτωψη της πλατείας και του εξώστη αντίστοιχα:

A) Πλατεία



Εικόνα 3.9: Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση για την οκτάβα κεντραρισμένη στα 8000 Hz στις θέσεις της πλατείας που μετρήσαμε (L_{Zeq})

B) Εξώστης

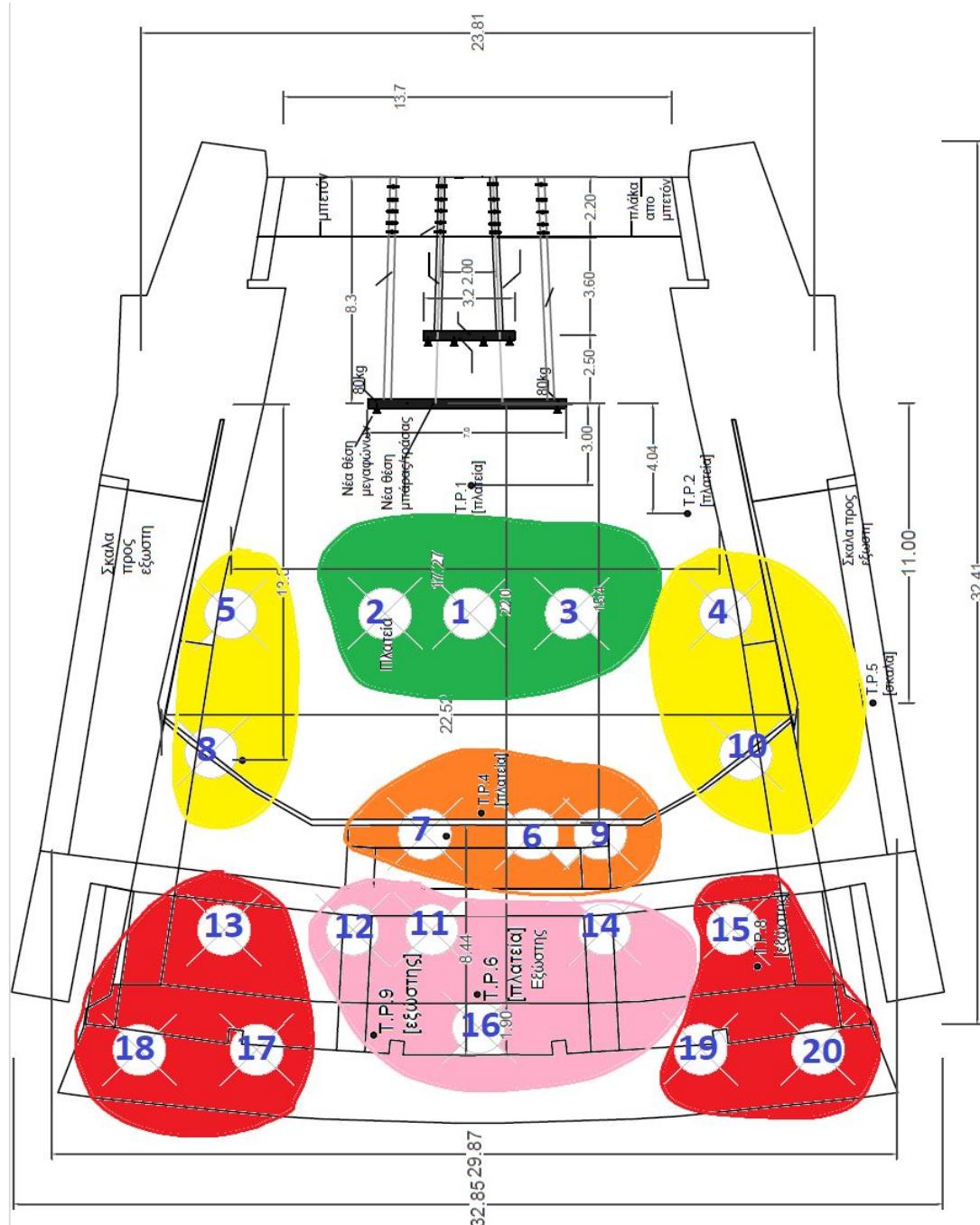


Εικόνα 3.10: Στάθμη ηχητικής πίεσης χωρίς συχνοτική στάθμιση για την οκτάβα κεντραρισμένη στα 8000 Hz στις θέσεις του εξώστη που μετρήσαμε (L_{Zeq})

3.5. Οκταβική ανάλυση σε συγκεκριμένες ομάδες θέσεων

A) Πλατεία

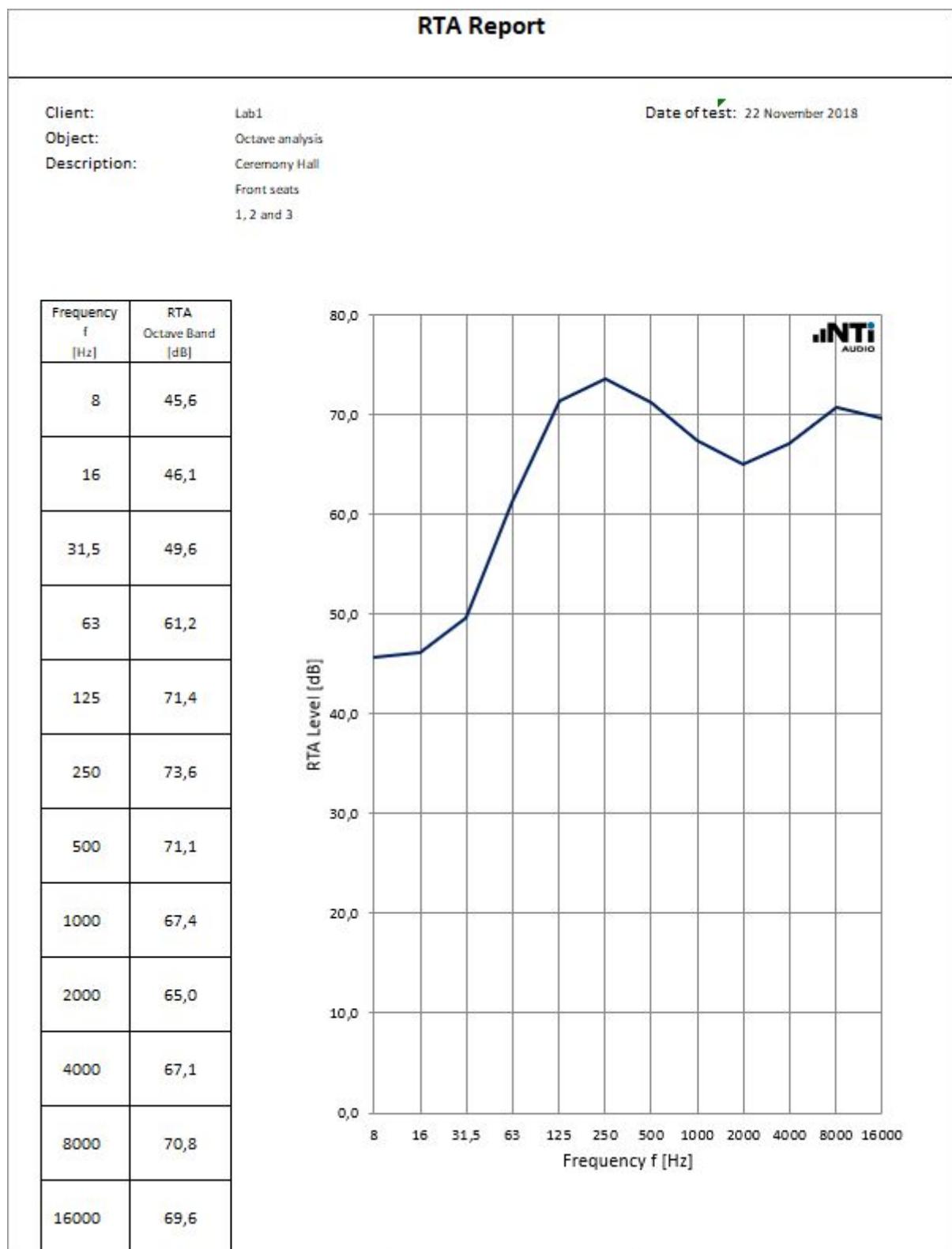
Οι θέσεις μας στην πλατεία χωρίστηκαν ως εξής:



Εικόνα 3.11 Περιοχές θέσεων στην πλατεία για οκταβική ανάλυση

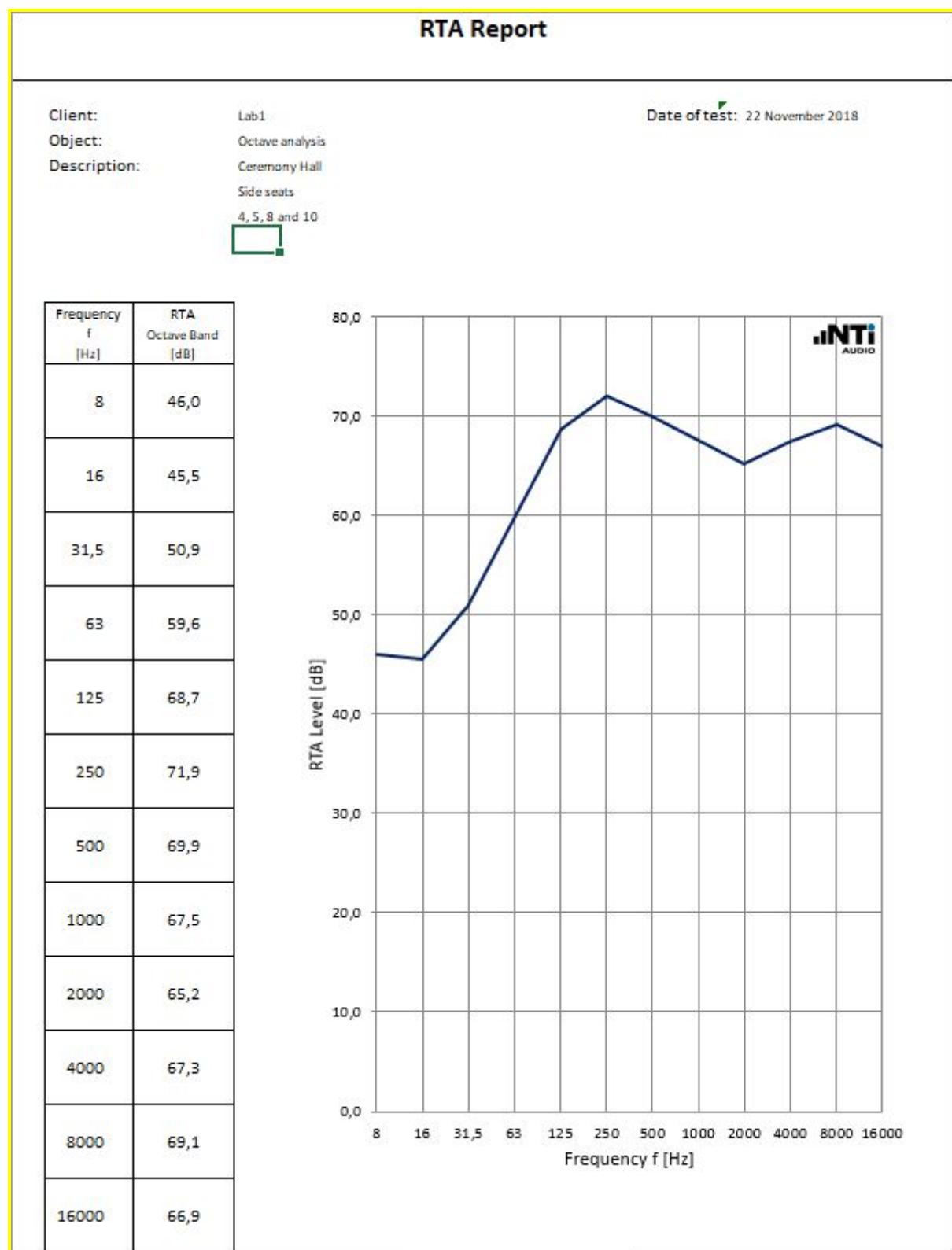
Τα διαγράμματα για την κάθε περιοχή της πλατείας έχουν ως εξής:

ΠΕΡΙΟΧΗ 1



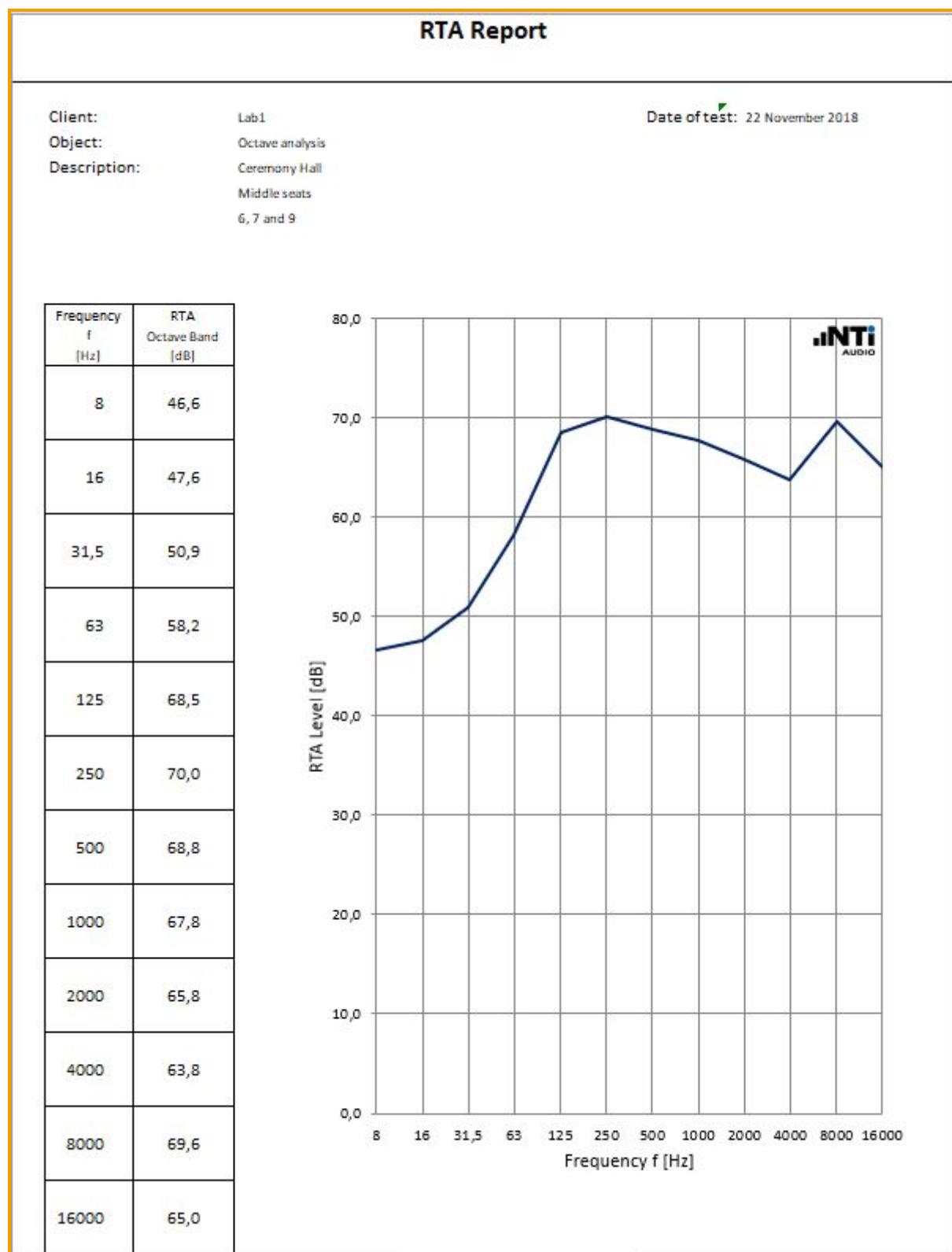
Πίνακας 3.5 Οκταβική ανάλυση για την περιοχή 1 της πλατείας

ΠΕΡΙΟΧΗ 2



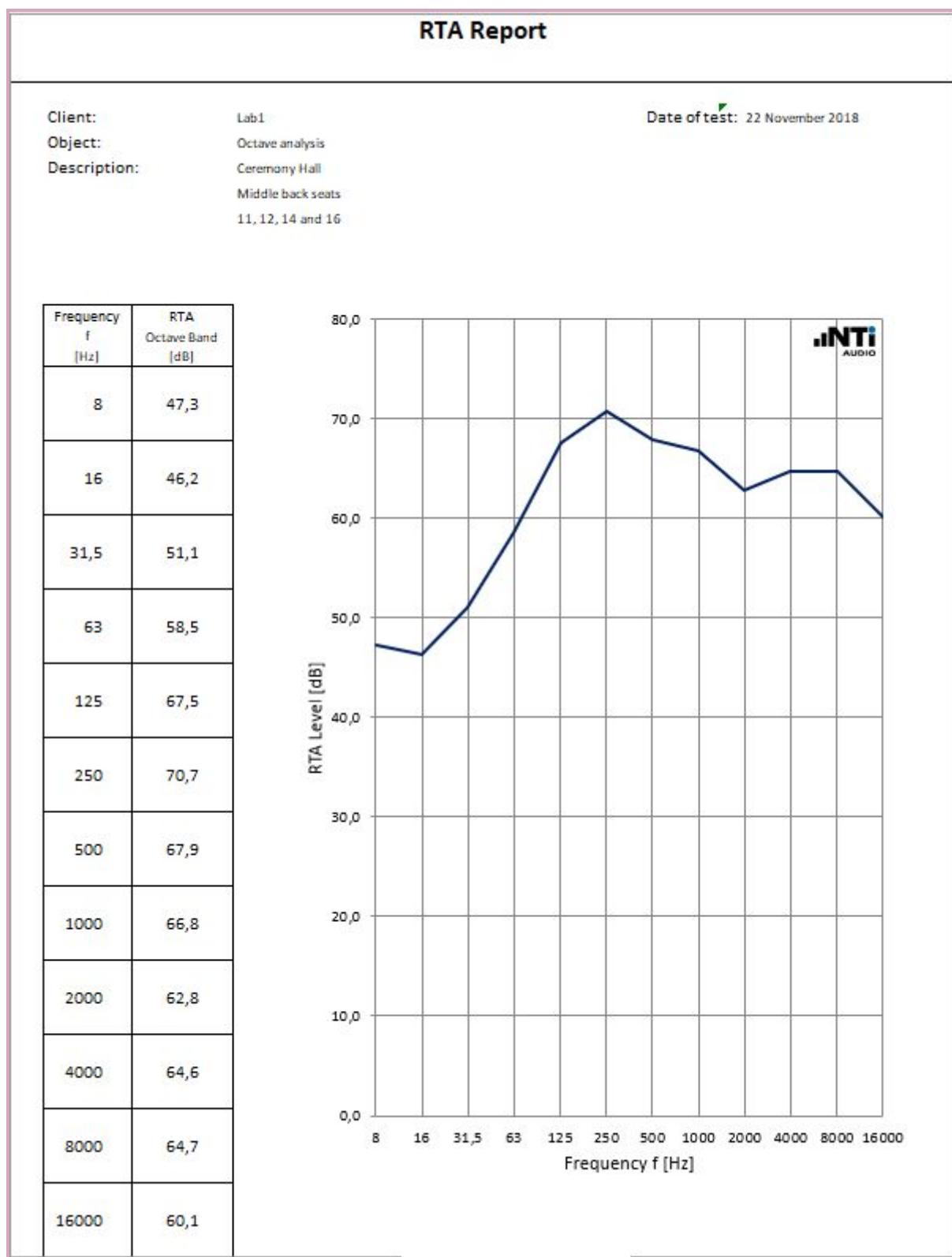
Πίνακας 3.6 Οκταβική ανάλυση για την περιοχή 2 της πλατείας

ΠΕΡΙΟΧΗ 3



Πίνακας 3.7 Οκταβική ανάλυση για τη περιοχή 3 της πλατείας

ΠΕΡΙΟΧΗ 4



Πίνακας 3.8 Οκταβική ανάλυση για την περιοχή 4 της πλατείας

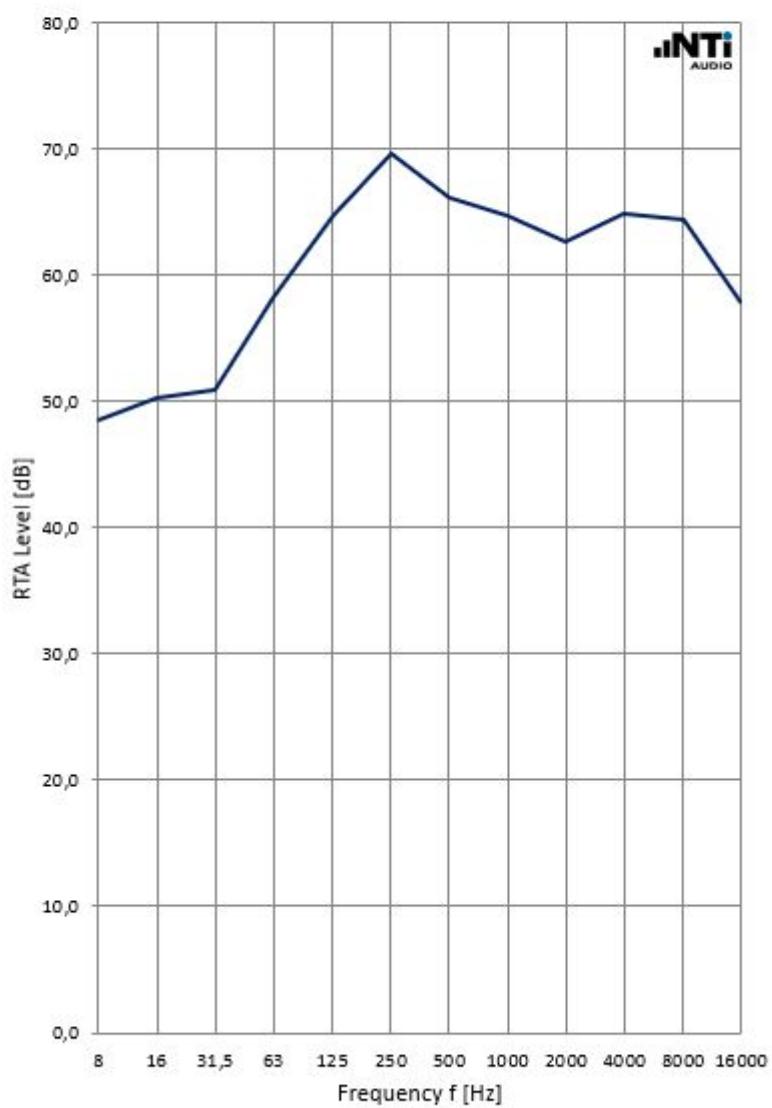
ΠΕΡΙΟΧΗ 5

RTA Report

Client: Lab1
Object: Octave analysis
Description: Ceremony Hall
Side back seats
13, 15, 17, 18, 19 and 20

Date of test: 22 November 2018

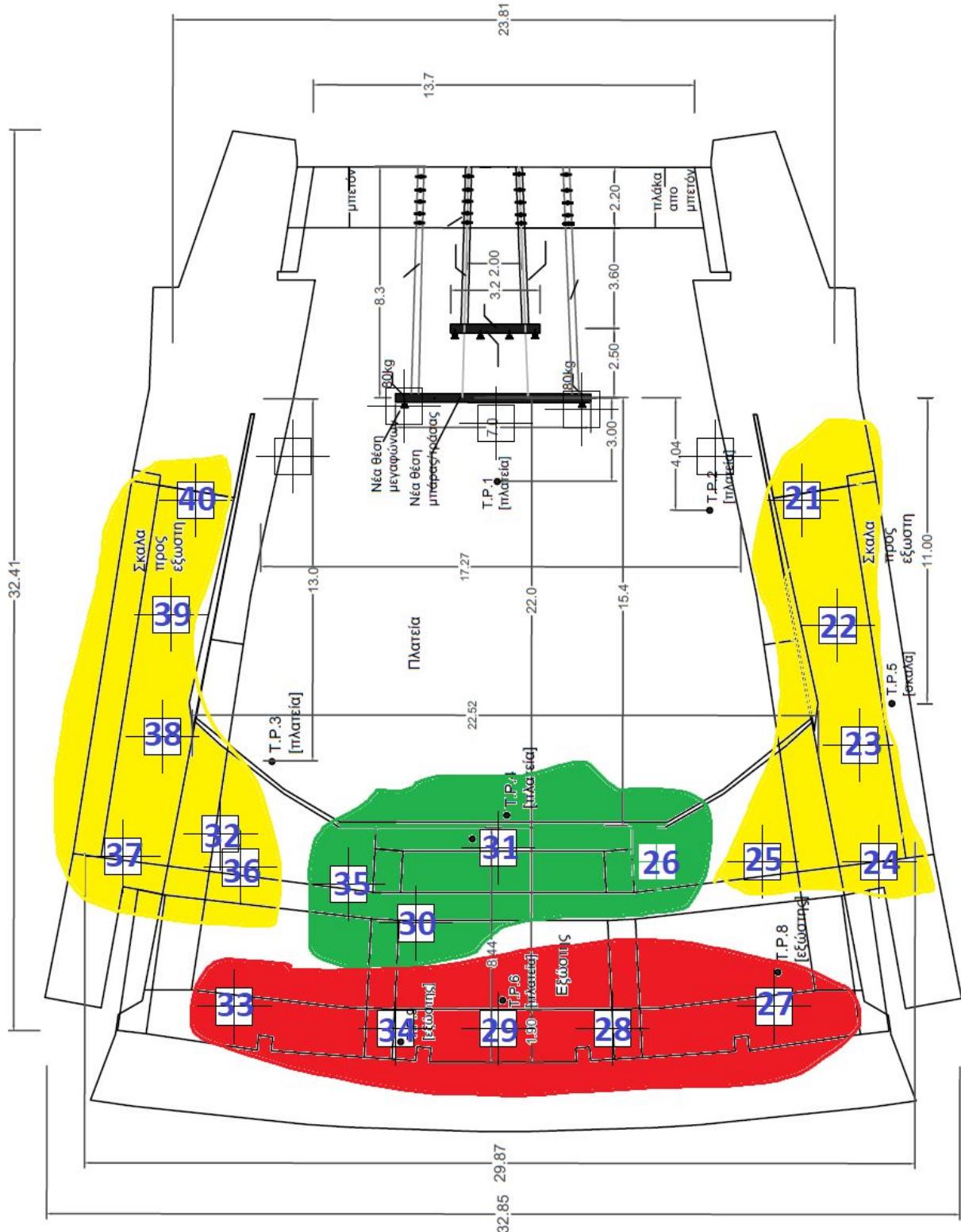
Frequency f [Hz]	RTA Octave Band [dB]
8	48,5
16	50,2
31,5	50,9
63	58,1
125	64,7
250	69,6
500	66,1
1000	64,7
2000	62,6
4000	64,8
8000	64,3
16000	57,7



Πίνακας 3.9 Οκταβική ανάλυση για την περιοχή 5 της πλατείας

B) Εξώστης

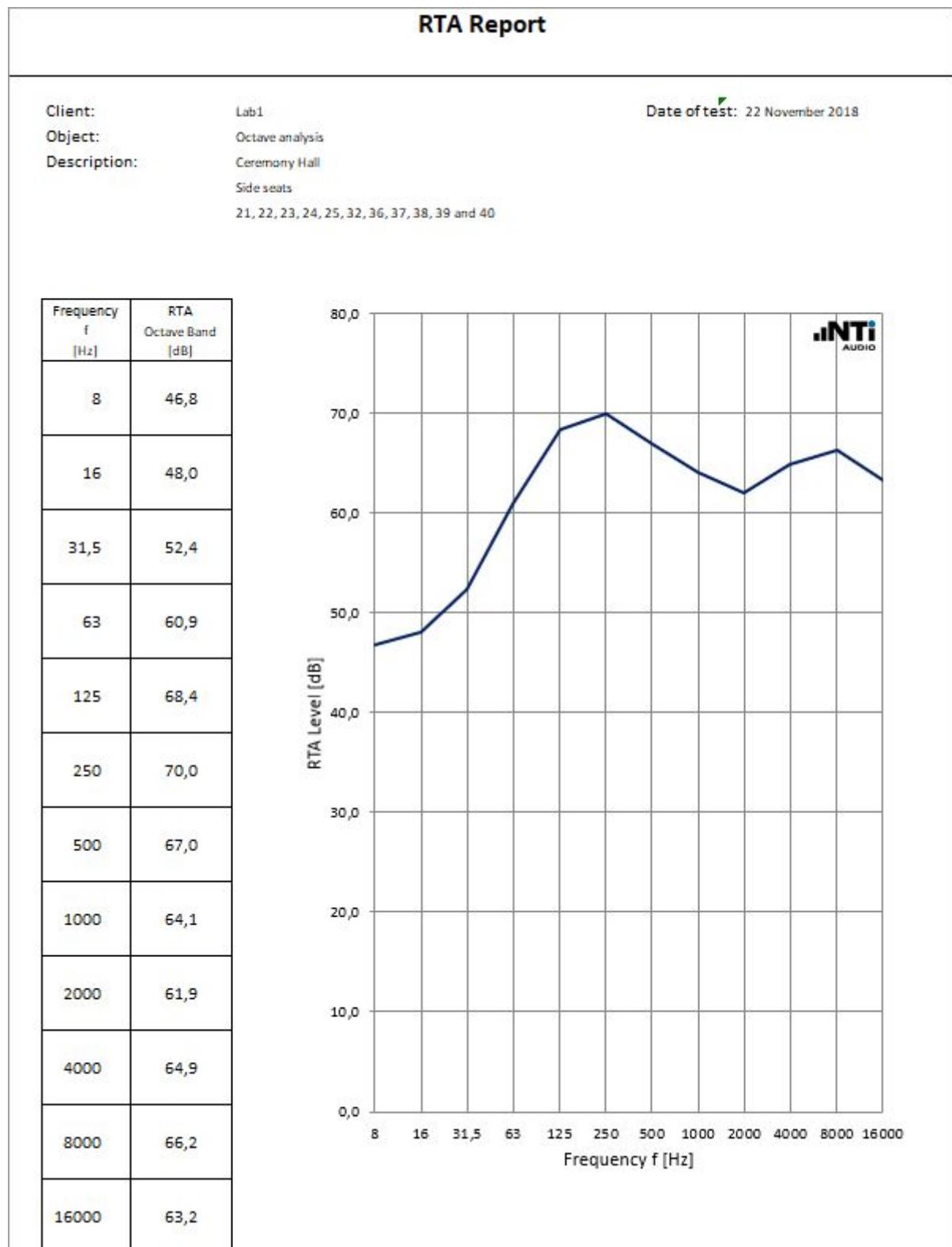
Οι θέσεις μας στον εξώστη χωρίστηκαν ως εξής:



Εικόνα 3.12 Περιοχές θέσεων στον εξώστη για οκταβική ανάλυση

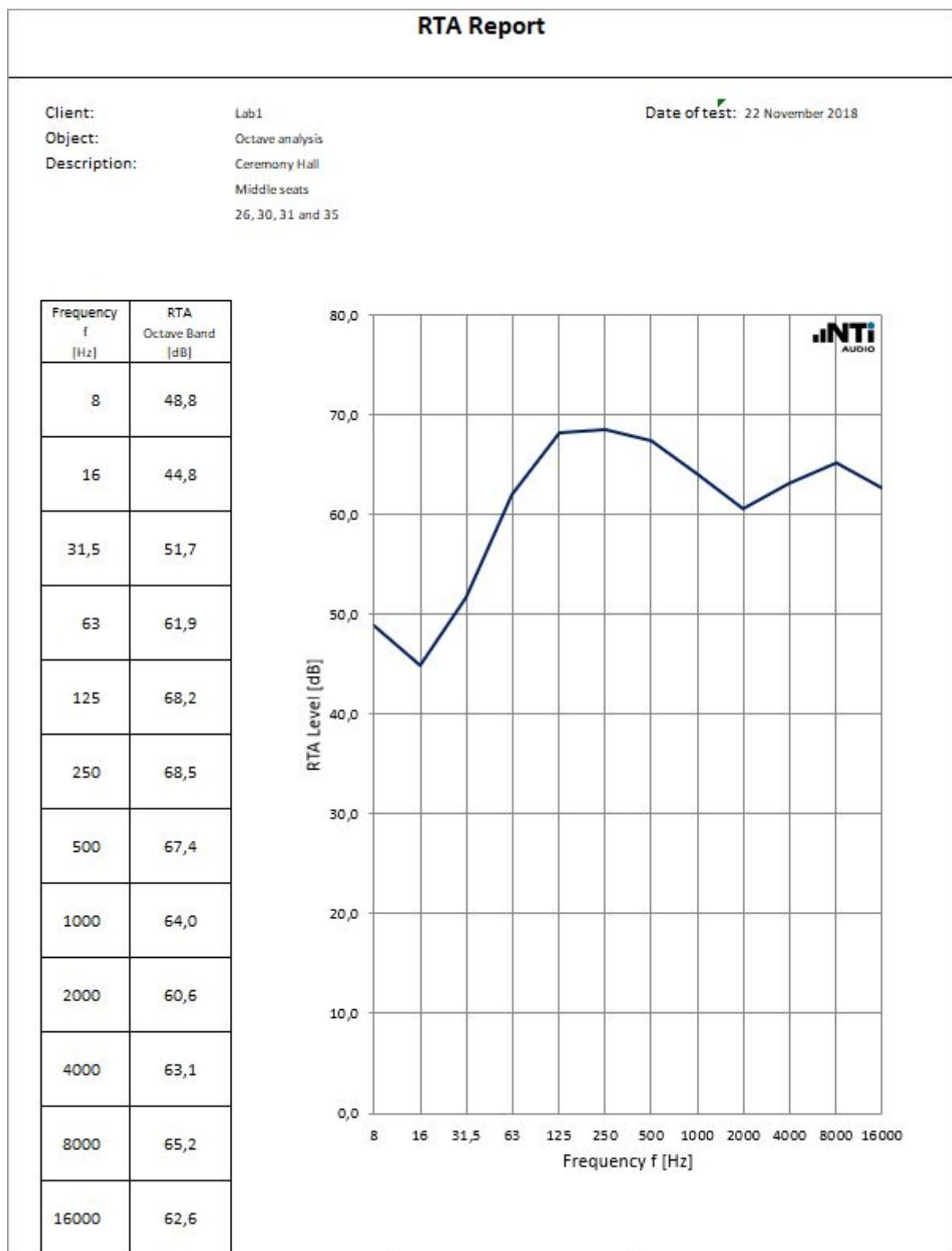
Τα διαγράμματα για την κάθε περιοχή του εξώστη έχουν ως εξής:

ΠΕΡΙΟΧΗ 1



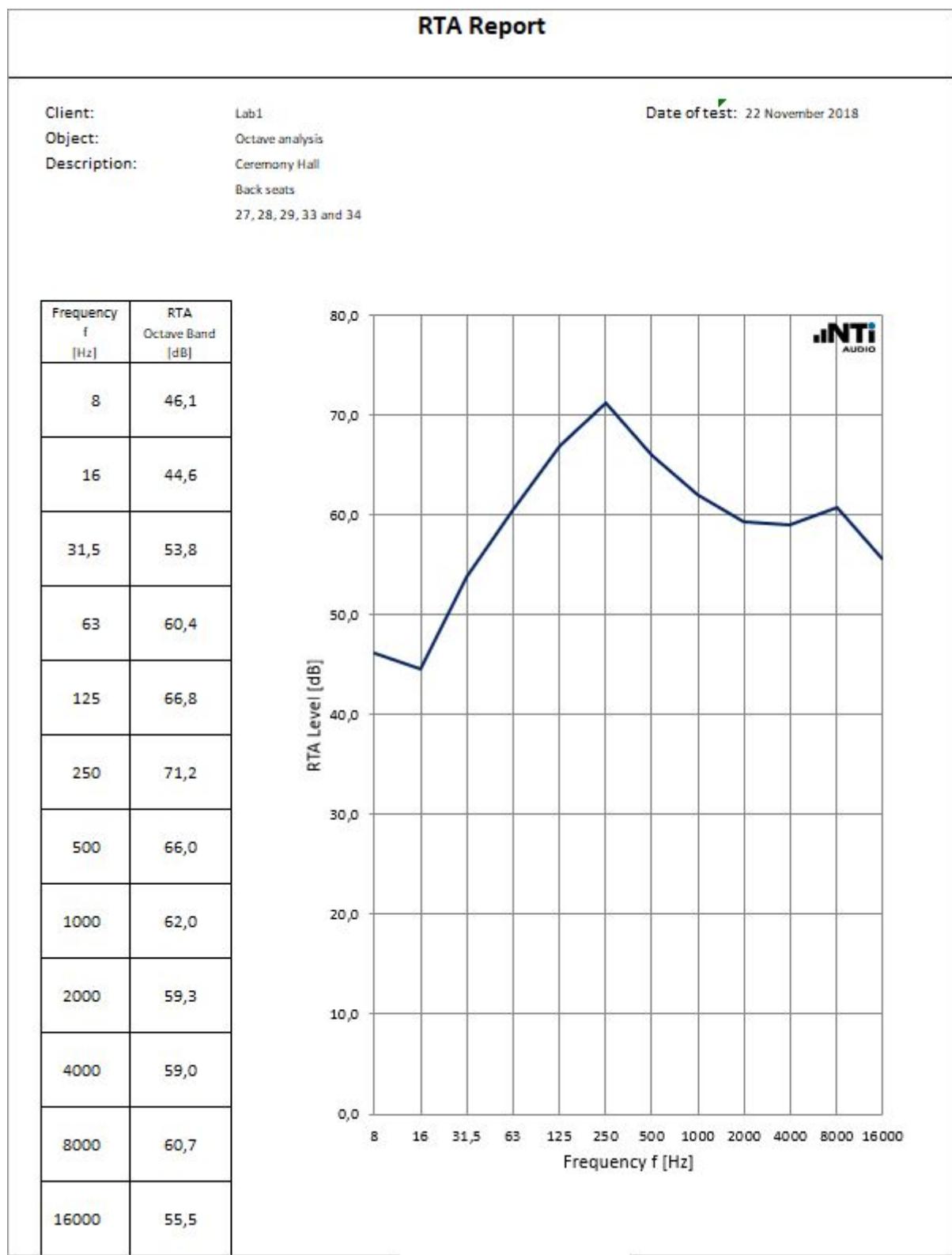
Πίνακας 3.10 Οκταβική ανάλυση για την περιοχή 1 του εξώστη

ΠΕΡΙΟΧΗ 2



Πίνακας 3.11 Οκταβική ανάλυση για την περιοχή 2 του εξώστη

ΠΕΡΙΟΧΗ 3



Πίνακας 3.12 Οκταβική ανάλυση για την περιοχή 3 του εξώστη

3.6. Συμπεράσματα

Παρατηρούμε πως στις περισσότερες περιπτώσεις, συμμετρικές θέσεις στην αίθουσα (όπως π.χ οι θέσεις 04 και 05) έχουν και παρόμοιες μετρήσεις στάθμης.

Επίσης παρατηρούμε πως σε γενικές γραμμές χαμηλότερες στάθμες μετρούνται στις θέσεις που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από τα μεγάφωνα, ενώ οι υψηλότερες στις θέσεις που βρίσκονται κοντά στα μεγάφωνα. Αυτό είναι εύκολα κατανοητό καθώς η ένταση του ήχου μειώνεται σύμφωνα με το νόμο του αντιστρόφου τετραγώνου

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

Σε ό,τι αφορά την οκταβική ανάλυση, παρατηρούμε πως οι χαμηλές συχνότητες έχουν ελαφρώς υψηλότερες μετρήσεις έντασης από τις υψηλές, ειδικά στις απομακρυσμένες θέσεις από τα μεγάφωνα. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι οι υψηλές συχνότητες απορροφώνται πιο εύκολα από τις χαμηλές (λόγω μικρότερου μήκους κύματος).

Ένας τρόπος αντιμετώπισης είναι η χρήση επιπρόσθετων HF μεγαφώνων στα τοιχώματα, με την εισαγωγή κατάλληλης χρονικής διαφοράς, ώστε να ενισχύονται οι υψηλές συχνότητες στις θέσεις αυτές.

3.7. Υπολογισμός SPL μέσω κώδικα

Ο αλγόριθμος που δημιουργήθηκε σε MATLAB επεξεργάζεται κατάλληλα τις ηχογραφήσεις του ροζ θορύβου, καθώς και την ηχογράφηση calibration που λήφθηκε στο δεύτερο εργαστήριο, και εξάγει μέσω αυτών την dB SPL τιμή στις θέσεις ηχογράφησης, τόσο σε κάθε οκτάβα, όσο και συνολικά μέσω της λογαριθμικής πρόσθεσης των οκταβικών τιμών. (ο κώδικας παρατίθεται σαν αρχείο .zip)

Παρατίθενται παρακάτω τα αποτελέσματα:

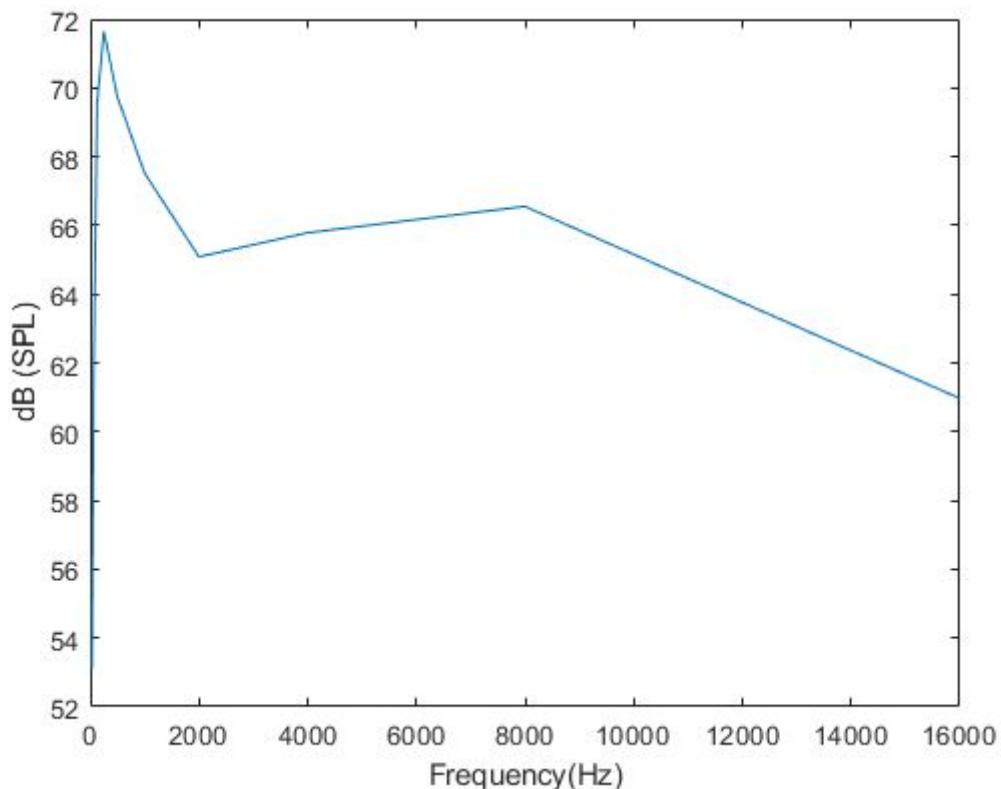
Αριθμός Θέσης	L _{eq} (dB) μέσω κώδικα	L _{eq} (dB) μέσω ηχομέτρου
01	79.1	79.9
07	78.5373	77
08	79.1	77.6
14	77.2	75.1
17	75.6	73.3
21	78.02	74.3
24	76.89	74.1
31	76.51	76.7
33	75.88	74.3

Πίνακας 3.13: Σύγκριση αποτελεσμάτων ηχομέτρου και ηχογραφήσεων + κώδικα

Παρατηρούμε πως σε κάποιες θέσεις οι μετρήσεις είναι πολύ κοντά με αυτά που υπολογίσαμε, ενώ σε κάποιες άλλες διαφέρουν περισσότερο.

Αυτό πιθανώς συμβαίνει διότι οι μετρήσεις και οι ηχογραφήσεις έγιναν σε διαφορετικές ημέρες, οπότε ενδέχεται να μην επικρατούσαν οι ίδιες συνθήκες κατά την ηχογράφηση. Σε κάθε περίπτωση, τα αποτελέσματα είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, οπότε συμπεραίνουμε πως οι υπολογισμοί μας είναι ορθοί.

Παρακάτω παρατίθεται και ένα οκταβικό διάγραμμα που δημιουργήθηκε μέσω MATLAB, για το μέσο όρο όλων των θέσεων.



Εικόνα 3.13: Οκταβικό διάγραμμα *SPL*

Παρατηρούμε πως το διάγραμμα είναι της ίδιας μορφής με αυτό που παρήχθησε με τη χρήση του εργαλείου της NTi Audio, **RTA reporting tool**.

Επομένως, συμπεραίνουμε πως τα αποτελέσματα που υπολογίσαμε μέσω του ηχομέτρου, μπορούν κάλλιστα να υπολογιστούν και μέσω ηχογραφήσεων και επεξεργασία αυτών μέσω MATLAB ή παρόμοιου πακέτου λογισμικού.

4. Χρόνος αντήχησης (T_{30} και T_{20})

Η δεύτερη εργαστηριακή άσκηση αφορά τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης μέσω T_{30} , και όπου αυτό δεν είναι εφικτό μέσω T_{20} , σε ενδεικτικές θέσεις της αίθουσας τελετών, και την εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων. Συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας ως ηχητική διέγερση ένα σήμα ροζ θορύβου, καταγράφηκαν οι χρόνοι αντήχησης σε συγκεκριμένες θέσεις της αίθουσας, οι οποίες είχαν επιλεγεί μέσω των σχετικών συμπερασμάτων που προέκυψαν από την προηγούμενη εργαστηριακή άσκηση (Μέτρηση SPL).

4.1. Η Διαδικασία (Κλασική μέθοδος)

Το σήμα θορύβου έπαιζε διακοπτόμενα (4s θόρυβος, 4s ησυχία), για αρκετούς κύκλους, μέχρι να ληφθούν ικανοποιητικά ποσοστά αβεβαιότητας στις μετρήσεις (<10%).

Για τις υψηλές και μεσαίες συχνότητες αυτό προέκυπτε εύκολα, σε λιγότερο από 5 κύκλους συνήθως. Αντίθετα, για τις χαμηλές συχνότητες απαιτούνταν κατά μέσο όρο 9 με 10 κύκλοι για ικανοποιητικά ποσοστά αβεβαιότητας.

Αυτό συμβαίνει διότι οι υψηλές και οι μεσαίες συχνότητες έχουν υψηλή κατευθυντικότητα, ενώ αυτό δεν ισχύει για τις χαμηλές. Επομένως, είναι πιο δύσκολο για το ηχόμετρο να καταγράψει με ακρίβεια τον χρόνο αντήχησης στις χαμηλές.

Στην αρχή θα παρουσιαστεί η μέτρηση του χρόνου αντήχησης μέσω παραγωγής ροζ θορύβου από τη γραμμική συστοιχία της αίθουσας.

Έπομενα θα παρουσιάσουμε τη μέτρηση του χρόνου αντήχησης μέσω παραγωγής ροζ θορύβου από την πανκατευθυντική πηγή.

Υπενθυμίζεται πως όλες οι θέσεις είναι οι εξής:

α/α	Επίπεδο	Σειρά	Θέση	(x,y)
1	Πλατεία	1	14	(-0.3,-16)
2	Πλατεία	1	9	(-3.3,-16)
3	Πλατεία	1	20	(3.3,-16)
4	Πλατεία	1	28	(8.75,-16)
5	Πλατεία	1	1	(-8.75,-16)
6	Πλατεία	10	14	(-1.9,-24.1)
7	Πλατεία	10	9	(1.9,-24.1)
8	Πλατεία	7	1	(-9.45,-21.1)
9	Πλατεία	10	24	(4.3,-24.1)
10	Πλατεία	7	29	(9.45,-21.1)
11	Πλατεία	14	17	(-1.6,-27.6)
12	Πλατεία	14	9	(-4.45,-27.6)
13	Πλατεία	14	1	(-9,-27.6)
14	Πλατεία	14	26	(4.45,-27.6)
15	Πλατεία	14	34	(9,-27.6)
16	Πλατεία	18	17	(0,31.2)
17	Πλατεία	19	8	(-7.85,-32)
18	Πλατεία	19	1	(-12,-32)
19	Πλατεία	19	23	(7.85,-32)
20	Πλατεία	19	31	(12,-32)
21	Εξώστης	1	3	(10.7,-12)
22	Εξώστης	6	5	(12,-16.5)
23	Εξώστης	11	5	(12.8,-20.8)
24	Εξώστης	16	46	(13.5,-25)
25	Εξώστης	16	38	(9.3,-25)
26	Εξώστης	16	31	(5.5,-25)
27	Εξώστης	21	37	(9.7,-30.2)
28	Εξώστης	21	27	(3.9,-31)
29	Εξώστης	21	20	(-0.2,-31)
30	Εξώστης	17	17	(-3.2,-27.2)
31	Εξώστης	14	23	(-0.2,-24.5)
32	Εξώστης	14	8	(-10.2,-24)
33	Εξώστης	21	1	(-9.7,-30.2)
34	Εξώστης	21	11	(-3.9,-31)
35	Εξώστης	16	16	(-5.6,-25.8)
36	Εξώστης	16	9	(-9.5,-25.2)
37	Εξώστης	16	1	(-13.5,-25)
38	Εξώστης	11	4	(-12.3,-20.5)
39	Εξώστης	6	6	(-12,-16.1)
40	Εξώστης	1	6	(-11.1,-12)

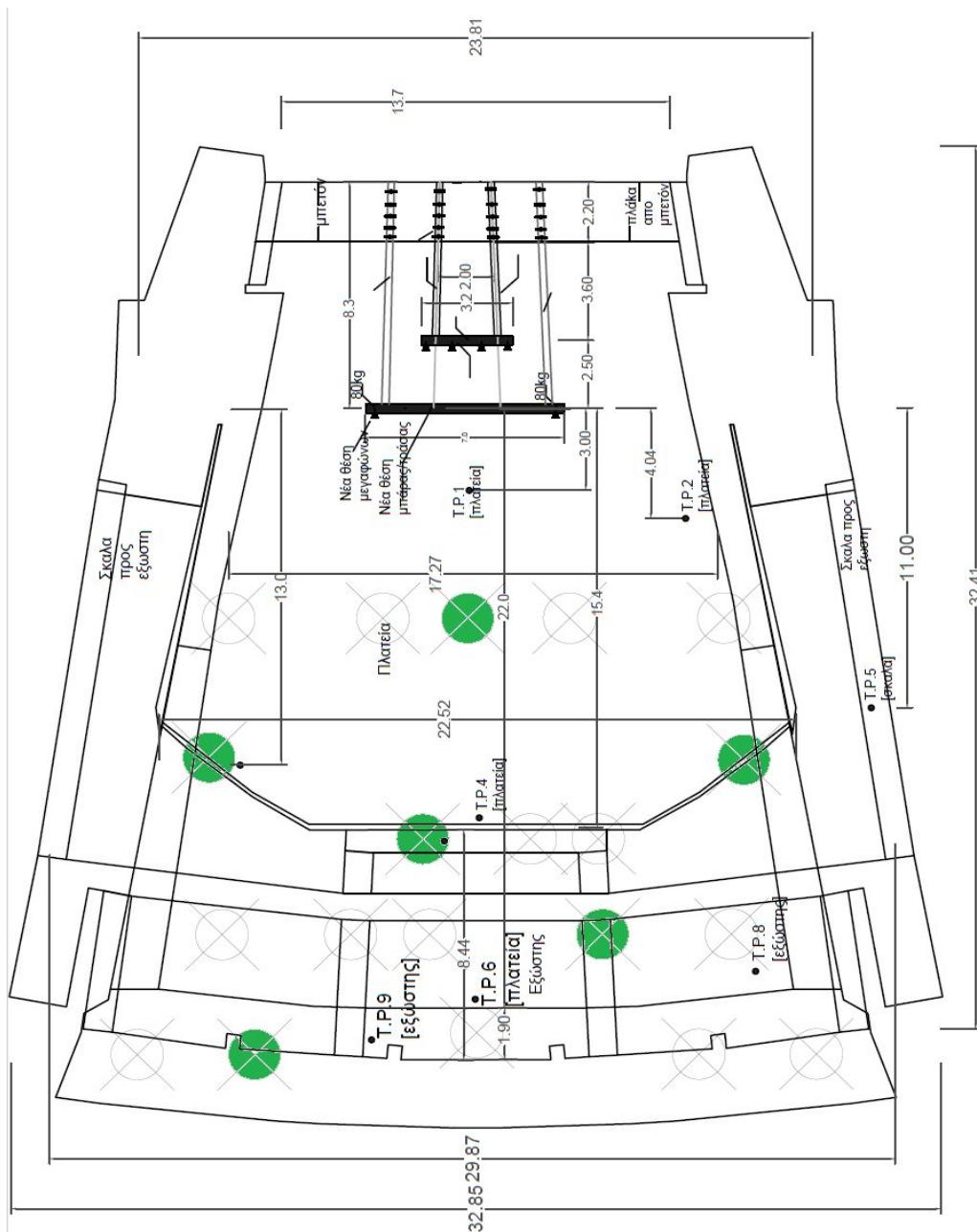
4.2. Μετρήσεις

4.2.1. Διέγερση μέσω της γραμμικής συστοιχίας μεγαφώνων

Για τις μετρήσεις αυτές επιλέχθηκαν τις θέσεις 1, 7, 8, 10, 14, 17, 21, 24, 31, 33 και 37.

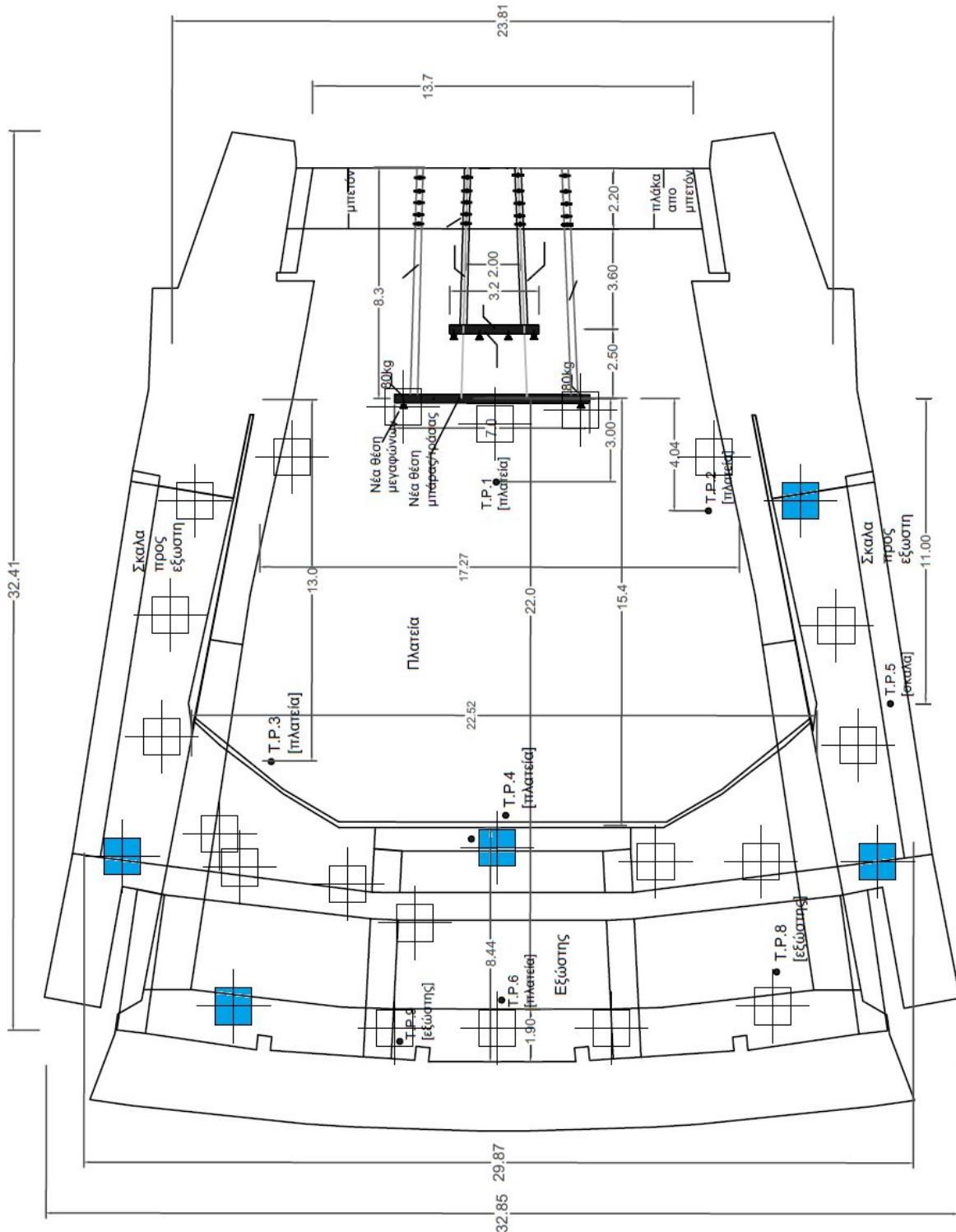
Οι θέσεις αυτές φαίνονται στο σκαρίφημα της αίθουσας παρακάτω:

A) Πλατεία



Εικόνα 4.1 Επιλεγμένες θέσεις μέτρησης στην πλατεία

B) Εξώστης



Εικόνα 4.2 Επιλεγμένες θέσεις μέτρησης στον εξώστη

Ο μέσος χρόνος αντήχησης για κάθε θέση προέκυψε κατά **ISO 3382 - 2009** [2] ως εξής:
Για την κάθε θέση, πήραμε τον μέσο όρο των έξι τριτοκτάβων από 400Hz έως 1250Hz,
όπως προτάσσει το πρότυπο.

Θέση	Χρόνος αντήχησης (T30)
1	1,28 s
7	1,26 s
8	1,25 s
10	1,28 s
14	1,21 s
17	1,27 s
21	1,30 s
24	1,27 s
31	1,26 s
33	1,27 s
37	1,24 s

Πίνακας 4.1 Χρόνος αντήχησης T30 σε κάθε επιλεγμένη θέση

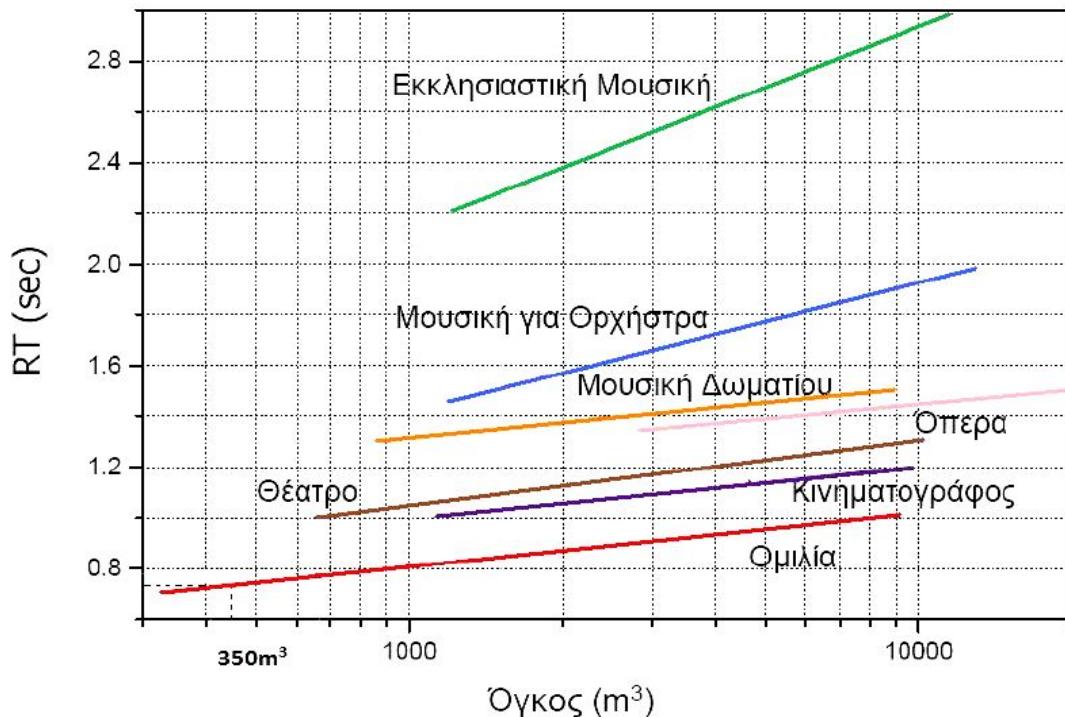
Παρατηρούμε πως από όποια θέση και αν μετρήσουμε, οι χρόνοι αντήχησης βγαίνουν σχετικά όμοιοι μεταξύ τους.

Πράγματι, παίρνοντας τον μέσο όρο των παραπάνω τιμών, σύμφωνα με το πρότυπο (Ενότητα 8 Spatial averaging), καταλήγουμε στην τιμή του χρόνου αντήχησης:

$$RT_{60} = 1,262 \text{ s}$$

για όλη την αίθουσα.

Γνωρίζουμε πως ο όγκος της αίθουσας είναι 5955 κυβικά μέτρα, οπότε για χρόνο αντήχησης 1,262 s μπορούμε να συμπεράνουμε, από την εικόνα που παρατίθεται παρακάτω, πως η πιο κατάλληλη χρήση για την αίθουσα είναι για **όπερα** ή **μουσική δωματίου**.



Εικόνα 4.3 Βέλτιστοι χρόνοι αντήχησης για καλή ακουστική διαφόρων χώρων [3]

Τέλος, παρατίθενται οι χρόνοι αντήχησης ανά τριτοκτάβα για όλη την αίθουσα, τόσο σε μορφή πίνακα όσο και σε μορφή διαγράμματος.

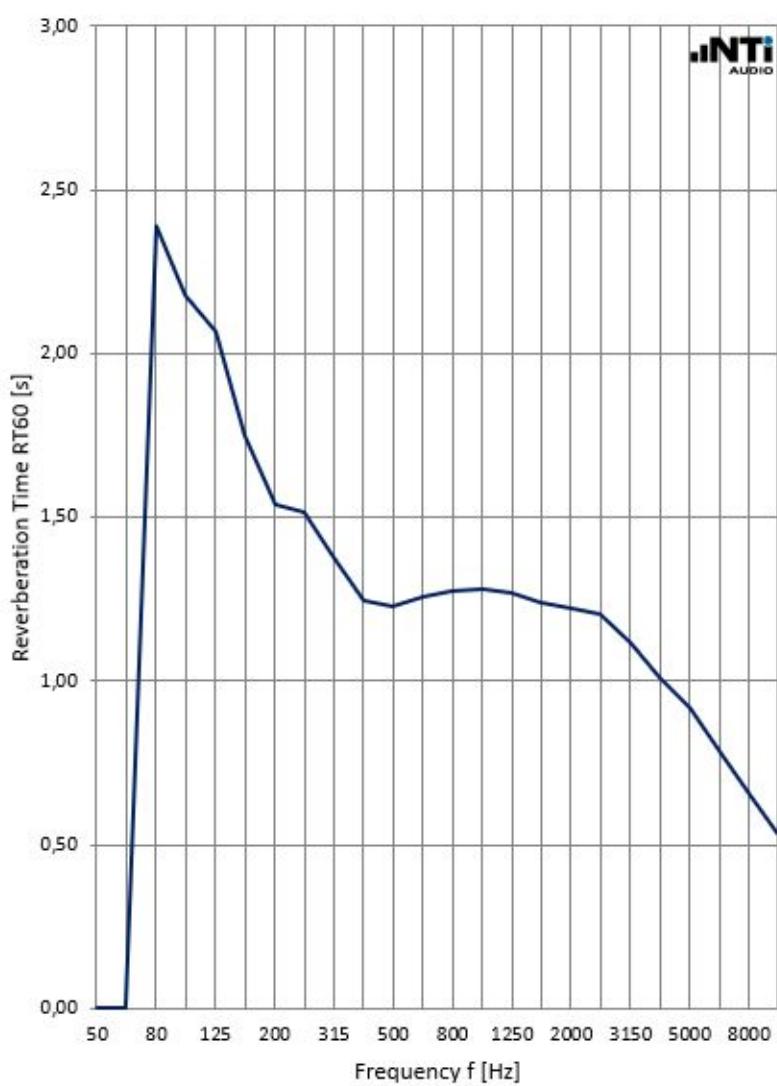
Τα παρακάτω παρήχθησαν αυτόματα με το εργαλείο **RT60 Reporting tool for XL2** της NTi Audio.

Reverberation Time in accordance with ISO 3382-2
Measurement of reverberation time in ordinary rooms

Client: Lab2
 Object: RT60
 Description: Ceremony Hall
 Linear arrays
 T30

Date of test: 29 November 2018

Frequency f [Hz]	RT60 Third-Octave Band [s]
50	
63	
80	2,39
100	2,18
125	2,06
160	1,75
200	1,54
250	1,52
315	1,38
400	1,25
500	1,23
630	1,26
800	1,28
1000	1,28
1250	1,27
1600	1,24
2000	1,22
2500	1,20
3150	1,12
4000	1,01
5000	0,92
6300	0,79
8000	0,65
10000	0,53



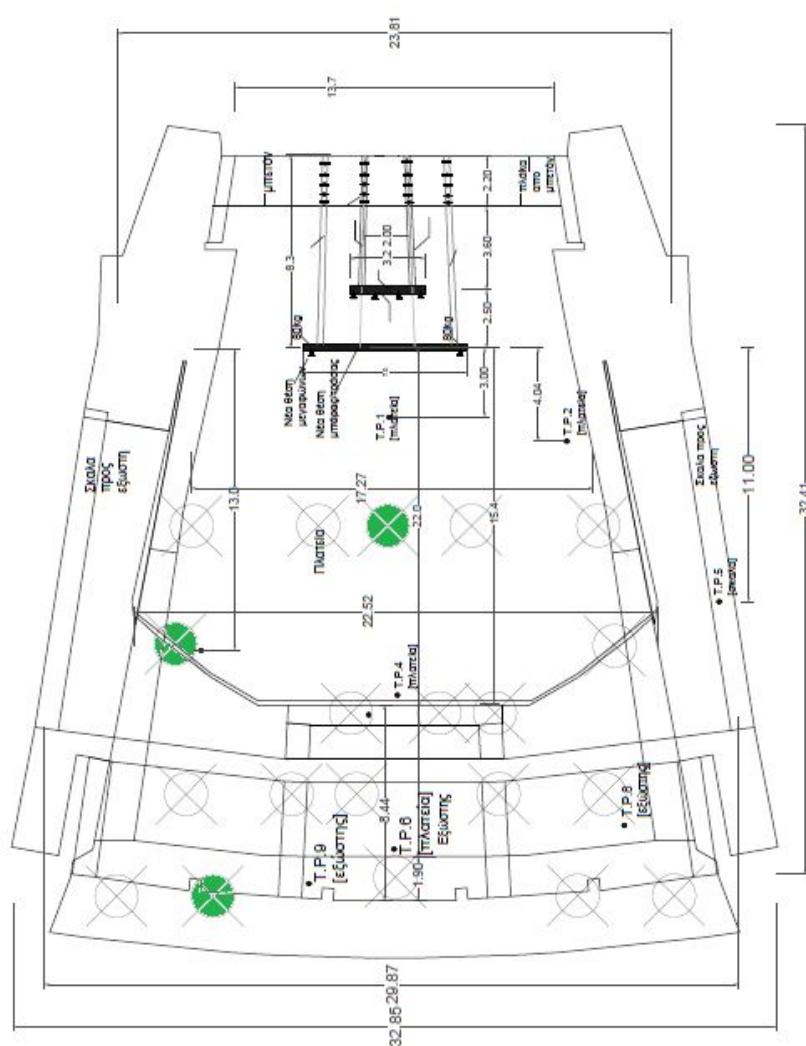
Πίνακας 4.2: Χρόνος αντήχησης ανά τριτοκτάβα, με διέγερση από το σύστημα ηχοτροφοδοσίας, σύμφωνα με το ISO 3382

Παρατηρούμε πως οι χαμηλές συχνότητες αντηχούν για περισσότερο χρόνο, διότι διαθέτουν περισσότερη ενέργεια.

4.2.2. Μετρήσεις μέσω της πανκατευθυντικής πηγής

Για τις μετρήσεις μέσω της πανκατευθυντικής πηγής επιλέχθηκαν μόνο οι θέσεις 1, 8 και 17, διότι η πηγή δεν είναι αρκετά ισχυρή για το μέγεθος της αίθουσας. Για αυτό, εξάλλου, χρησιμοποιήθηκε T20 για τη μέτρηση και όχι T30 όπως προηγουμένως.

Οι θέσεις εμφανίζονται στο σκαρίφημα της πλατείας παρακάτω:



Εικόνα 4.4 Θέσεις που επιλέχθηκαν για λήψη μετρήσεων με πανκατευθυντική πηγή

Ο μέσος χρόνος αντήχησης κάθε θέσης προέκυψε κατά ISO 3382 - 2009 ως προέκυψε ως μέσος όρος των έξι τριτοκτάβων από 400Hz έως 1250Hz, όπως προτάσσει το πρότυπο.

Θέση	Χρόνος αντήχησης (T20)
1	1.31 s
8	1.18 s
17	1.26 s

Πίνακας 4.3: Χρόνος αντήχησης T20 σε κάθε επιλεγμένη θέση

Παίρνοντας το μέσο όρο των τιμών αυτών, καταλήγουμε σε μέσο χρόνο αντήχησης:

$$RT_{60} = 1,25 \text{ s}$$

για όλη την αίθουσα. Σημειώνεται ότι 3 δείγματα δεν είναι αρκετά για να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα.

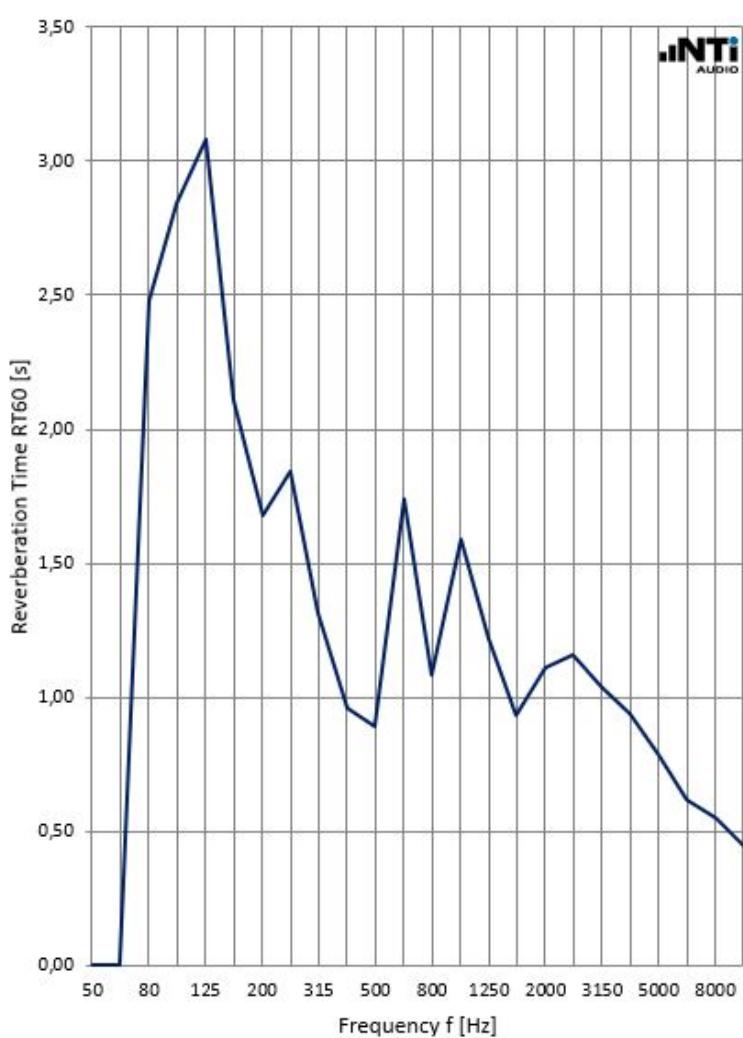
Τέλος, παρατίθενται οι χρόνοι αντήχησης ανά τριτοκτάβα για όλη την αίθουσα, όπως και για τη γραμμική συστοιχία μεγαφώνων.

Τα παρακάτω παρήχθησαν αυτόματα με το εργαλείο **RT60 Reporting tool for XL2** της NTi Audio.

Reverberation Time in accordance with ISO 3382-2
Measurement of reverberation time in ordinary rooms

Client:	Lab2	Date of test:	29 November 2018
Object:	RT60		
Description:	Ceremony Hall		
	Unidirectional source		
	T20		

Frequency f [Hz]	RT60 Third-Octave Band [s]
50	
63	
80	2,48
100	2,84
125	3,08
160	2,11
200	1,68
250	1,85
315	1,31
400	0,96
500	0,89
630	1,74
800	1,08
1000	1,59
1250	1,22
1600	0,94
2000	1,11
2500	1,16
3150	1,04
4000	0,94
5000	0,78
6300	0,62
8000	0,55
10000	0,45



Πίνακας 4.4: Χρόνος αντήχησης ανά τριτοκτάβα, με διέγερση από την πανκατευθυντική πηγή,
σύμφωνα με το ISO 3382

Παρατηρούμε πως το διάγραμμα αυτό έχει πολύ περισσότερες διακυμάνσεις σε σχέση με το προηγούμενο. Αυτό οφείλεται τόσο στον μικρό αριθμό θέσεων που μετρήθηκαν, όσο και στη

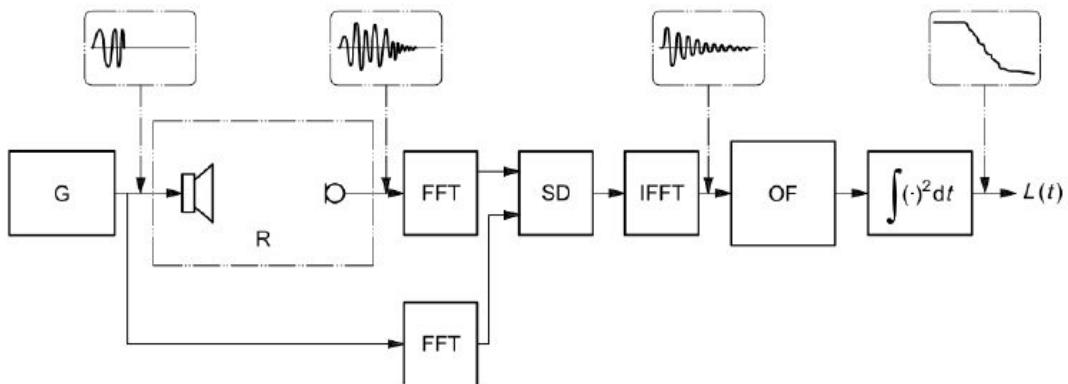
χαμηλή ισχύ της πανκατευθυντικής πηγής, η οποία δεν επέτρεπε να πάρουμε κατάλληλη ακρίβεια με χαμηλά ποσοστά αβεβαιότητας στις μετρήσεις.

4.3. Υπολογισμός RT60 μέσω κώδικα

Για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης δημιουργήθηκαν δύο αλγόριθμοι σε λογισμικό MATLAB.

Ο πρώτος επεξεργάζεται κατάλληλα τις ηχογραφήσεις του διακοπτόμενου ροζ θορύβου, καθώς και την ηχογράφηση calibration, που πήραμε στο τρίτο εργαστήριο και εξάγει μέσω αυτών τον χρόνο αντήχησης κατά T30, με την κλασική μέθοδο, στις θέσεις ηχογράφησης, τόσο σε κάθε τριτοκτάβα, όσο και συνολικά μέσω του averaging των τριτοκτάβων 400 έως 1250 Hz, όπως προστάζει το πρότυπο **ISO 3382 - 2009** [2] .

Ο δεύτερος αλγόριθμος λειτουργεί εξάγοντας την κρουστική απόκριση του δωματίου από τις ηχογραφήσεις σαρωτικού ημιτόνου σε κάθε θέση, και ύστερα υπολογίζει με τον ακόλουθο τρόπο το χρόνο αντήχησης, σύμφωνα με το πρότυπο **ISO 18233 - 2006** [4] :



Key

- G sweep generator
- R room
- FFT Fast Fourier Transformation
- SD spectral division
- IFFT Inverse Fast Fourier Transformation
- OF fractional-octave filter

Figure B.3 — Spectral division

Έτσι, μέσω της κρουστικής απόκρισης, υπολογίζεται με τη σύγχρονη μέθοδο ο χρόνος αντήχησης τόσο σε κάθε τριτοκτάβα, όσο και συνολικά μέσω του averaging των τριτοκτάβων 400 έως 1250 Hz, όπως προστάζει το πρότυπο **ISO 3382 - 2009**. Ο κώδικας παρατίθεται σε αρχείο .zip

Παραθέτουμε παρακάτω τα αποτελέσματα:

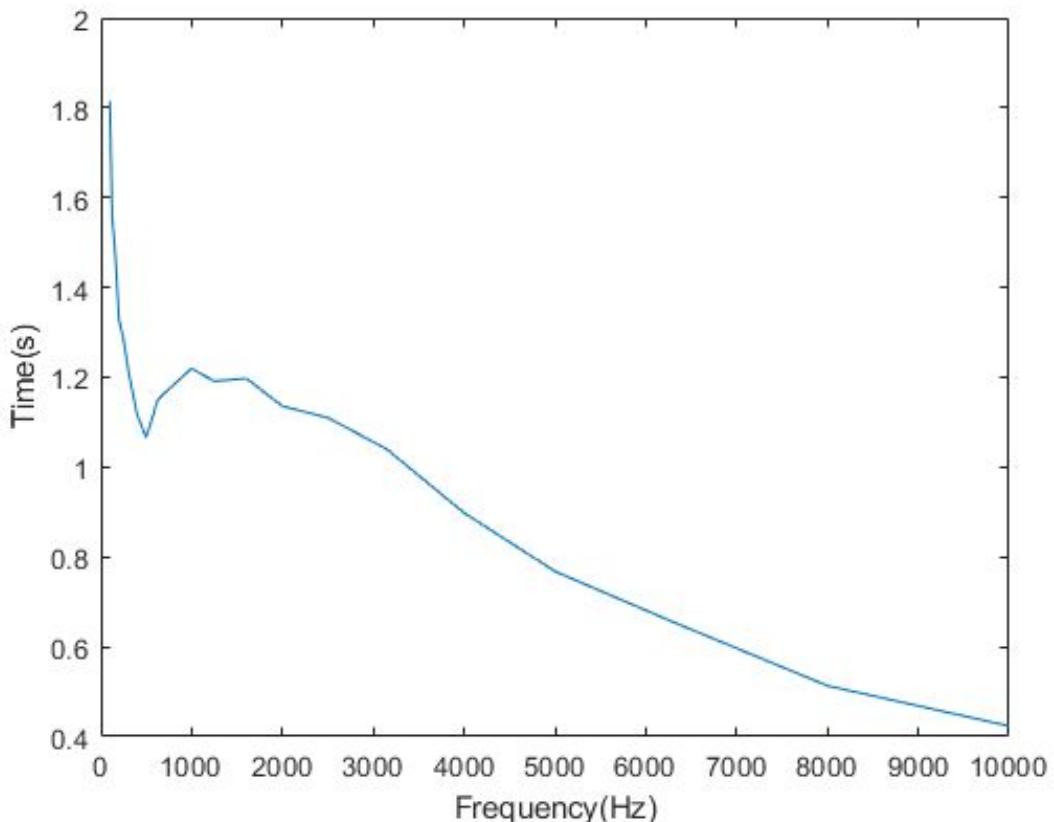
Θέση	Χρόνος αντήχησης (T30) μέσω ηχομέτρου	Χρόνος αντήχησης (T30) μέσω κώδικα - κλασσική μέθοδος	Χρόνος αντήχησης (T30) μέσω κώδικα - σύγχρονη μέθοδος
1	1,28 s	1,13 s	1,20 s
7	1,26 s	1,07 s	1,20 s
8	1,25 s	-	-
10	1,28 s	-	-
14	1,21 s	-	-
17	1,27 s	1,12 s	1,19 s
21	1,30 s	1,30 s	1,25 s
24	1,27 s	-	-
31	1,26 s	1,12 s	1,25 s
33	1,27 s	-	-
37	1,24 s	-	-
Αίθουσας	1,26 s	1,15 s	1,22 s

Πίνακας 4.5: Χρόνος αντήχησης T30 σε κάθε επιλεγμένη θέση με τον κάθε τρόπο υπολογισμού

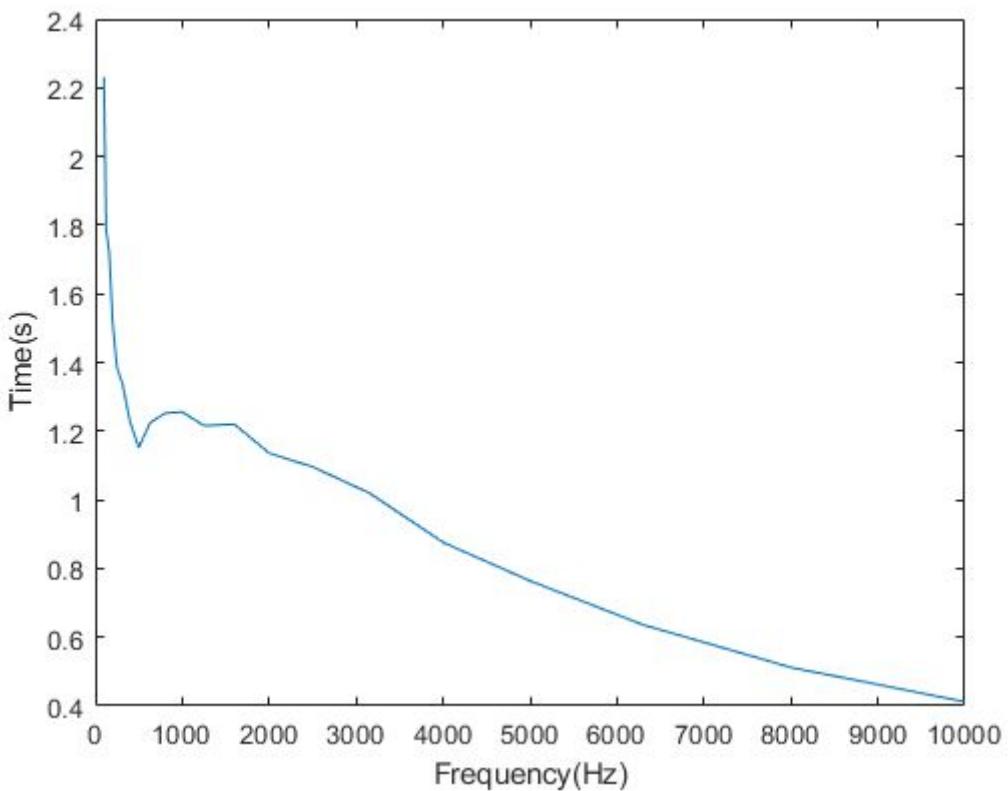
Διευκρινίζεται ότι όπου εμφανίζεται παύλα δεν κατέστη εφικτό να πραγματοποιηθούν ηχογραφήσεις λόγω χρονικής πίεσης.

Παρατηρούμε πως η σύγχρονη μέθοδος βγάζει πιο ακριβή αποτελέσματα, κάτι που είναι λογικό εφόσον δεν είναι τόσο ευάλωτη σε θόρυβο.

Παρακάτω παρατίθενται δύο οκταβικά διαγράμματα χρόνου αντήχησης που παρήχθησαν μέσω MATLAB, ένα για τον κάθε τρόπο υπολογισμού, για όλη την αίθουσα:



Εικόνα 4.5: Διάγραμμα χρόνου αντήχησης - κλασσική μέθοδος



Εικόνα 4.6: Διάγραμμα χρόνου αντήχησης - σύγχρονη μέθοδος

Παρατηρούμε πως τα παραπάνω διαγράμματα έχουν ακριβώς την ίδια μορφή με τα διαγράμματα που παρήχθησαν μέσω του εργαλείου της NTi Audio, **RT60 Reporting tool for XL2**.

Επιβεβαιώνεται έτσι η ορθότητα των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν.

5. Δείκτης Μετάδοσης Ομιλίας (STI κατά STIPA)

Η παρούσα εργαστηριακή ενότητα αφορά στη μέτρηση του δείκτη μετάδοσης ομιλίας (STI - Speech Transmission Index) μέσω STIPA (Speech Transmission Index Public Address), σε ενδεικτικές θέσεις της αίθουσας τελετών, και την εξαγωγή σχετικών συμπερασμάτων.

Σε πρώτη φάση εφαρμόστηκε η άμεση μέθοδος υπολογισμού, όπως αυτή υλοποιείται από το ηχόμετρο NTi Audio XL2. Στη συνέχεια, με τη δημιουργία κώδικα σε περιβάλλον MATLAB, οι ζητούμενες τιμές προσδιορίστηκαν ακολουθώντας την έμμεση μέθοδο, η οποία αξιοποιεί την κρουστική απόκριση των καναλιών μετάδοσης.

5.1. Η άμεση μέθοδος

5.1.1. Η διαδικασία

Για την άμεση μέθοδο χρησιμοποιήθηκε ως σήμα δοκιμής το STIPA_10minutes, το οποίο προέκυψε από ροζ θόρυβο. Κατά την αναπαραγωγή του σήματος από το σύστημα ηχοτροφοδοσίας, κάθε μια από 7 οκτάβες διεγείρεται ταυτόχρονα, με δυο συχνότητες διαμόρφωσης (modulation frequencies) σε κάθε οκτάβα.

Το σήμα αυτό, παρόλο που δεν είναι καταληπτό ως ομιλία, χρησιμοποιήθηκε διότι παρουσιάζει παρόμοια χαρακτηριστικά ως προς τη συχνότητα και τις αλλαγές της έντασης. Χρησιμοποιώντας το ηχόμετρο ελήφθησαν δύο μετρήσεις για κάθε θέση ενδιαφέροντος. Στα αποτελέσματα συμπεριελήφθη και ο θόρυβος υποβάθρου (background noise) που ηχογραφήθηκε αμέσως πριν τις μετρήσεις.

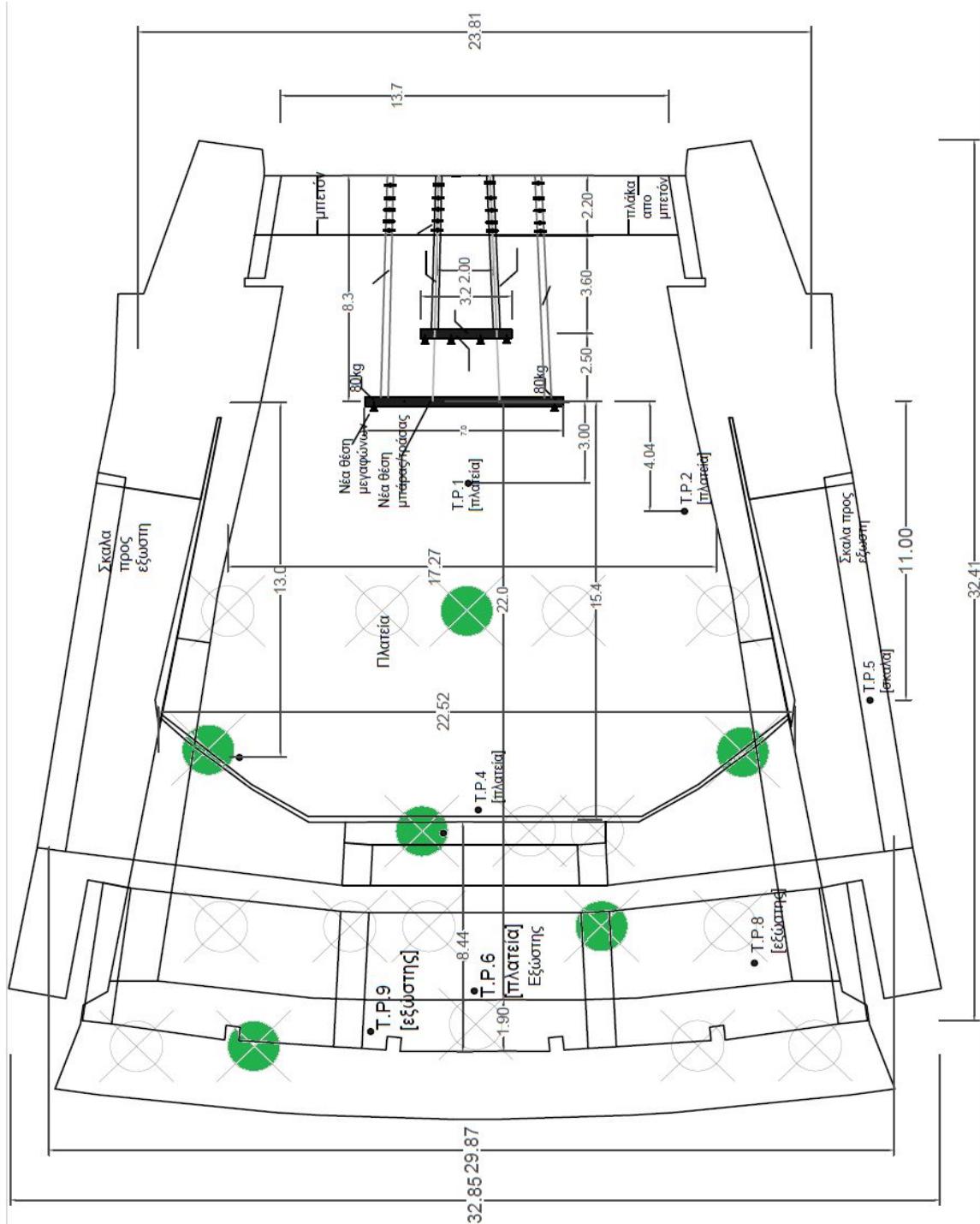
Η στάθμη του θορύβου σε κάθε οκτάβα είναι η εξης:

L _{Aeq} (dB)	31.9						
Band (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
L _{Zeq} (dB)	42.8	31.8	27.2	24.1	21.7	19.1	18.6

Πίνακας 5.1 Οκταβική ανάλυση θορύβου υποβάθρου

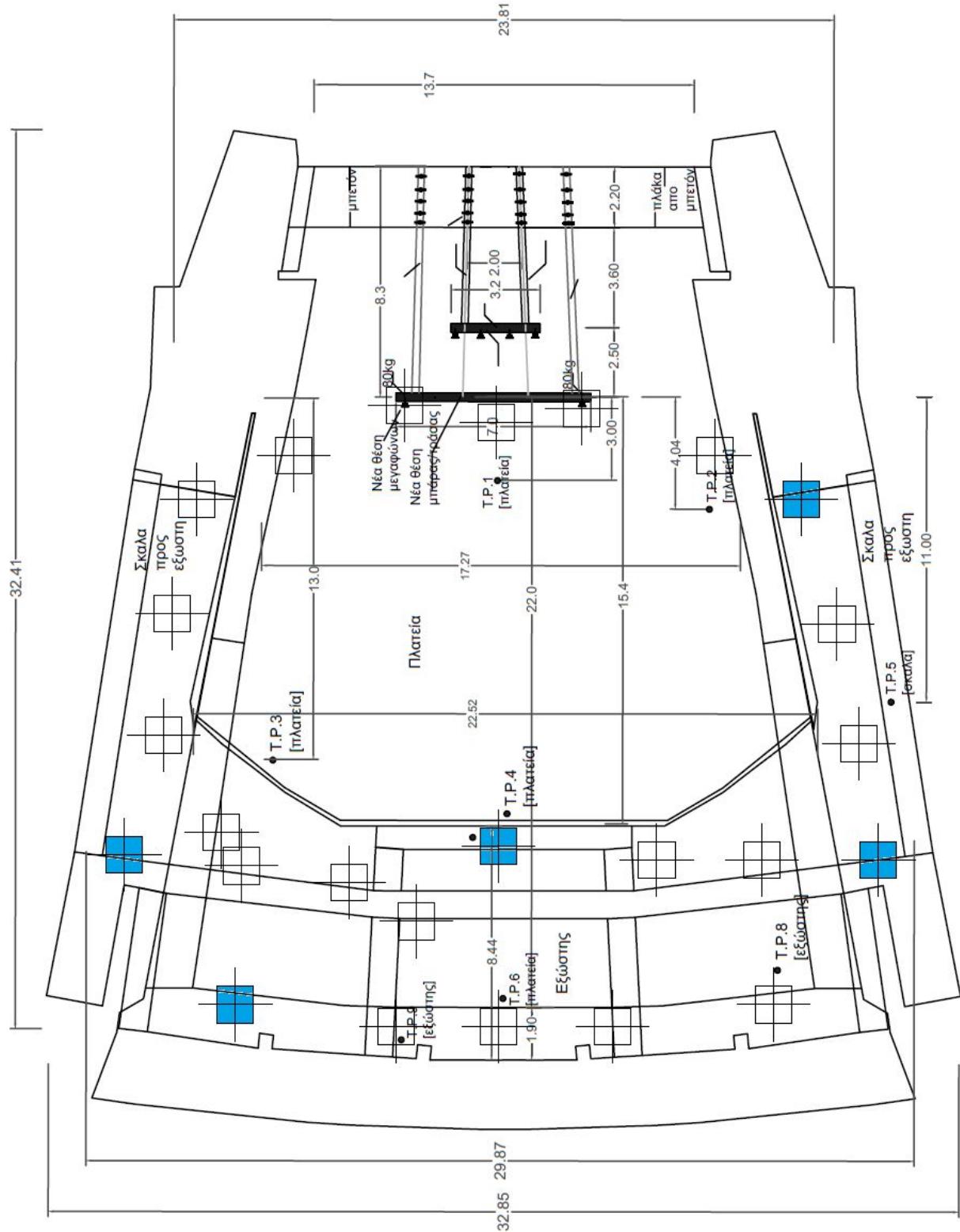
Υπενθυμίζεται πως οι θέσεις ενδιαφέροντος που επιλέχθηκαν είναι οι 1, 7, 8, 10, 14, 17, 21, 24, 31, 33, και 37, και αντιστοιχούν στις παρακάτω θέσεις στο σκαρίφημα της αίθουσας:

A) Πλατεία



Εικόνα 5.1 Επιλεγμένες θέσεις μέτρησης στην πλατεία

B) Εξώστης



Εικόνα 5.2 Επιλεγμένες θέσεις μέτρησης στον εξώστη

5.1.2. Μετρήσεις STIPA

Θέση	STIPA
1	0.68
7	0.72
8	0.74
10	0.74
14	0.74
17	0.76
21	0.5
24	0.69
31	0.69
33	0.6
37	0.69

Πίνακας 5.2: Μέτρηση STIPA για κάθε επιλεγμένη θέση

Η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των μετρήσεων υπολογίστηκε με το **NTi Audio STI Reporting Tool**.

STI Summary Report

Report according to IEC 60268-16{ed4}, chapter 7.6.4

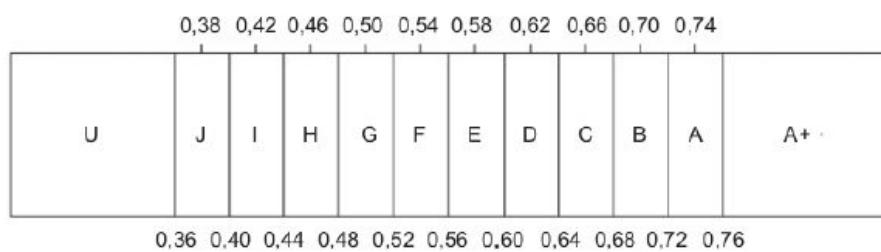


Project	AUTH Ceremony Hall									
Description	Group E positions of interest STI through STIPA									
Standard	IEC 60268-16 ed4.0 2011									
All	<table><tr><td>Arithmetic mean \bar{I}_{av}</td><td>0,69 STI</td><td>B</td></tr><tr><td>Standard deviation σ</td><td>0,08 STI</td><td></td></tr><tr><td>Total Result: $\bar{I}_{av} - \sigma$</td><td>0,61 STI</td><td>D</td></tr></table>	Arithmetic mean \bar{I}_{av}	0,69 STI	B	Standard deviation σ	0,08 STI		Total Result: $\bar{I}_{av} - \sigma$	0,61 STI	D
Arithmetic mean \bar{I}_{av}	0,69 STI	B								
Standard deviation σ	0,08 STI									
Total Result: $\bar{I}_{av} - \sigma$	0,61 STI	D								

Εικόνα 5.3 Μέση τιμή και τυπική απόκλιση του STI των θέσεων μέσω STIPA, υπολογισμένα από το NTi Audio STI reporting tool

5.1.3. Συμπεράσματα

Σύμφωνα με το πρότυπο **IEC 60268-16 ed4 2011** οι διαφορετικές τιμές του STI αξιολογούνται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα:



IEC 1157/11

Key

Upper row of numbers: STI values at the centre of the bands;

Row of letters: band designations;

Lower row of numbers: STI values at the edges of the bands.

Εικόνα 5.4 Ζώνες αξιλόγησης για το STI σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60268-16 ed4 2011 [5]

Table G.1 – Examples between STI qualification bands and typical applications

Category	Nominal STI value	Type of message information	Examples of typical uses (for natural or reproduced voice)	Comment
A+	>0,76		Recording studios	Excellent intelligibility but rarely achievable in most environments
A	0,74	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, parliaments, courts, Assistive Hearing Systems (AHS)	High speech intelligibility
B	0,7	Complex messages, unfamiliar words	Theatres, speech auditoria, teleconferencing, parliaments, courts	High speech intelligibility
C	0,66	Complex messages, unfamiliar words	Lecture theatres, classrooms, concert halls	Good speech intelligibility
E	0,58	Complex messages, familiar context	Concert halls, modern churches	High quality PA systems
F	0,54	Complex messages, familiar context	PA systems in shopping malls, public buildings' offices, VA systems, cathedrals	Good quality PA systems
G	0,5	Complex messages, familiar context	Shopping malls, public buildings' offices, VA systems	Target value for VA systems
H	0,46	Simple messages, familiar words	VA and PA systems in difficult acoustic environments	Normal lower limit for VA systems
I	0,42	Simple messages, familiar context	VA and PA systems in very difficult spaces	
J	0,38		Not suitable for PA systems	
U	<0,36		Not suitable for PA systems	

NOTE 1 These values should be regarded as minimum target values.

NOTE 2 Perceived intelligibility relating to each category will also depend on the frequency response at each listening position.

NOTE 3 The STI values refer to measured values in sample listening positions or as required by specific application standards.

Εικόνα 5.5 Παραδείγματα ζωνών αξιολόγησης STI και τυπικές εφαρμογές [5]

Οι περισσότερες τιμές STI που μετρήθηκαν είναι αρκετά υψηλές και βρίσκονται στις κατηγορίες A και B. Κρίνονται κατάλληλες για θέατρα, σινεμά, αμφιθέατρα κλπ, επομένως είναι καλές τιμές για την κύρια χρήση της αίθουσας.

Στις θέσεις 21 (εξώστης σ.1 θ.3) και 33 (εξώστης σ.21 θ.1) παρουσιάζονται δύο χαμηλότερες τιμές, 0,5 και 0,6 αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές οφείλονται σε ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν οι θέσεις αυτές. Συγκεκριμένα η θέση 21 βρίσκεται κοντά στον τοίχο της αίθουσας και σε γωνία σχεδόν 90 μοιρών με τον άξονα των μεγαφώνων, με αποτέλεσμα να μην βρίσκεται στο πεδίο

διασποράς τους, και η θέση 33 είναι μια από τις πιο απομακρυσμένες θέσεις της αίθουσας από τα μεγάφωνα.

Ο STI στις θέσεις αυτές μπορεί να αυξηθεί με τη χρήση δευτερευόντων HF μεγαφώνων στα τοιχώματα της αίθουσας, ώστε να ακούγονται καλύτερα οι υψηλές συχνότητες στις θέσεις που χάνονται λόγω κατευθυντικότητας.

5.2. Υπολογισμός του STIPA με την έμμεση μέθοδο

Στην προηγούμενη παράγραφο καταγράφηκαν και αξιολογήθηκαν οι τιμές του δείκτη μετάδοσης ομιλίας STI κατά STIPA, όπως αυτές υπολογίστηκαν από το ηχόμετρο για τις επιλεγμένες θέσεις της αίθουσας τελετών. Το NTi Audio XL2 ακολουθεί την άμεση μέθοδο υπολογισμού της καταληπτότητας, στην οποία χρησιμοποιούνται διαμορφωμένα σήματα δοκιμής.

Η έμμεση μέθοδος (*indirect*) υπολογισμού του STIPA, αντίθετα, συνίσταται στη διαμόρφωση και ολοκλήρωση της κρουστικής απόκρισης του εκάστοτε καναλιού, βάσει της οποίας προσδιορίζεται η συνάρτηση μεταφοράς διαμόρφωσης.

Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να υπολογιστούν οι τιμές του δείκτη μετάδοσης ομιλίας ακολουθώντας την έμμεση μέθοδο, έτσι ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων και να ληφθούν συμπεράσματα σχετικά με την καταληλότητα της κάθε μίας.

Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB η εφαρμογή **indirect_STIPA** καθώς και οι δύο βιοθητικές συναρτήσεις *getMTF_indirect* και *STIPAcalc*, των οποίων η λειτουργία περιγράφεται συνοπτικά παρακάτω.

5.2.1. Περιγραφή Υλοποίησης μέσω Κώδικα

Το πρόγραμμα λαμβάνει ως είσοδο τις ηχογραφήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις θέσεις ενδιαφέροντος, για διέγερση του συστήματος ηχοτροφοδοσίας με το σαρωτικό ημίτονο (swept sine). Χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Fast Fourier Transform και τον αντίστροφό του υπολογίζεται η κρουστικές απόκριση για κάθε κανάλι μετάδοσης (ηχοτροφοδοσία-θέση ακρόασης). Οι κρουστικές αποκρίσεις διέρχονται από 7 ψηφιακά οκταβικά φίλτρα, με κεντρικές συχνότητες τις αντίστοιχες κάθε οκτάβας από 125 μέχρι 2000 Hz.

Στη συνέχεια με επαναληπτικές κλήσεις της συνάρτησης `getMTF_indirect()` κατασκευάζονται για κάθε θέση επτά Συναρτήσεις Μεταφοράς Διαμόρφωσης (Modulation Transfer Functions, MTF). Κάθε μία από αυτές τις συναρτήσεις προκύπτει με βάση την εξίσωση του Schroeder με όρισμα την αντίστοιχη κρουστική απόκριση.

Για τον υπολογισμό του δείκτη STIPA απαιτούνται οι τιμές των παραπάνω συναρτήσεων για καθορισμένες συχνότητες διαμόρφωσης. Οι συχνότητες αυτές είναι δύο ανά οκτάβα και περιλαμβάνονται στο διάνυσμα `mod_freqs`. Έτσι, η συνάρτηση `STIPACalc()`, αφού υπολογίσει τις παραπάνω τιμές με χρήση γραμμικής παρεμβολής, υπολογίζει το «εμφανιζόμενο» (apparent) σηματοθορυβικό λόγο SNR για κάθε τιμή `m`. Σημειώνεται ότι ο αλγόριθμος φροντίζει το εύρος να μην ξεπερνά τα 30dB, όπως αναφέρεται στο πρότυπο.

Τέλος, η συνάρτηση βρίσκει τη μέση τιμή SNR για κάθε οκτάβα, και βρίσκει το σταθμισμένο SNR πολλαπλασιάζοντας τη μέση τιμή κάθε οκτάβας με τον αντίστοιχο συντελεστή που επιβάλλει το πρότυπο. Η τιμή STIPA προσδιορίζεται απλά προσθέτοντας 15 στο σταθμισμένο SNR, και διαιρώντας με 30.

Η συνάρτηση καλείται επαναληπτικά για κάθε θέση ενδιαφέροντος. Κλείνοντας, υπολογίζεται η Απώλεια Συμφώνων (Articulation Loss) ως ποσοστό, με βάση τον τύπο:

$$ALcons = 170.5405 \cdot e^{-5.419 \cdot STIPA}$$

5.2.2. Αποτελέσματα και Σχολιασμός

Παρακάτω αναγράφονται οι τιμές του δείκτη μετάδοσης ομιλίας κατά STIPA και η απώλεια συμφώνων, όπως υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα:

Αριθμός Θέσης	Δείκτης STIPA	Απώλεια Συμφώνων (%)
1	0.6815	4.2459
7	0.7293	3.277
17	0.7563	2.8315
21	0.555	8.4252
31	0.6823	4.2268
1 πανκατευθυντική	0.6083	6.3131

Πίνακας 5.3: Δείκτης STIPA και Απώλεια Συμφώνων από έμμεση μέθοδο

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται προς σύγκριση οι τιμές STIPA που υπολογίστηκαν με την άμεση και την έμμεση μέθοδο αντίστοιχα:

Αριθμός Θέσης	Δείκτης STIPA (άμεση)	Δείκτης STIPA (έμμεση)
1	0.68	0.6815
7	0.72	0.7293
17	0.76	0.7563
21	0.5	0.555
31	0.69	0.6823
1 πανκατευθυντική	0.6083	0.6083

Πίνακας 5.4: Σύγκριση STIPA για άμεση και έμμεση μέθοδο

5.3. Σύγκριση των μεθόδων

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της έμμεσης μεθόδου με τα αντίστοιχα της άμεσης παρατηρούμε ότι:

- 1) Οι δύο υπολογιστικές προσεγγίσεις οδηγούν σε τιμές που βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους.
- 2) Η έμμεση μέθοδος υπό τις παρούσες συνθήκες εμφανίζει μεγαλύτερη ακρίβεια, η οποία εκτείνεται σε τέσσερα δεκαδικά ψηφία.

Κατά συνέπεια, μπορούμε να αναγνωρίσουμε ότι για τη μέτρηση του δείκτη μετάδοσης ομιλίας στην αίθουσα τελετών και οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν στην ακουστική μελέτη του χώρου. Η μικρή αλλά υφιστάμενη υπεροχή της έμμεσης μεθόδου, μπορεί να αιτιολογηθεί εάν ληφθεί υπόψη ότι εμφανίζει μικρότερα σφάλματα έναντι της άμεσης, εφόσον το σύστημα ικανοποιεί τις προϋποθέσεις για την εφαρμογή της.

Στην περίπτωση της Αίθουσας Τελετών, η χρήση της έμμεσης μεθόδου ενδείκνυται καθώς το σύστημα θεωρείται γραμμικό και αμετάβλητο κατά τη μετατόπιση. Επιπλέον, δεν υφίστανται χρονικές διακυμάνσεις π.χ. άνεμος και έχουμε απουσία παραμόρφωσης, η οποία και θα καθιστούσε την έμμεση μέθοδο αναξιόπιστη. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η χρονική διάρκεια των κρουστικών αποκρίσεων που λαμβάνονται είναι πολλαπλάσια των 1,6 δευτερολέπτων, που αποτελούν κατά το πρότυπο IEC 60268-16 την ελάχιστη αποδεκτή διάρκεια.

Βιβλιογραφία

1. Γιουβανάκης Μάριος, Παπανικολάου Γεώργιος, *Σχεδιασμός συστήματος ηχοτροφοδοσίας γραμμικής συστοιχίας σε αίθουσα πολλαπλών χρήσεων, με μετρήσεις εκθετικής σάρωσης ημιτόνου και προσομοιώσεις ακτινικής ανίχνευσης*, 2012
2. ISO 3382, *Acoustics - Measurement of room acoustic parameters*, 2009
3. Γεώργιος Παπανικολάου, *Ηλεκτρακουστική*, University Studio Press, Θεσσαλονίκη 2005
4. ISO 18233 - 2006, *Application of new measurement methods in building and room acoustics*, 2006
5. IEC 60268-16 ed4, *Sound System Equipment Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*, 2011

Διαδικτυακοί τόποι

<https://elearning.auth.gr/>

<https://en.wikipedia.org>