



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΚΗΝΗΣ ΣΕ ΑΙΘΟΥΣΕΣ ΑΚΡΟΑΣΗΣ ΜΟΥΣΙΚΗΣ· διερεύνηση με τη χρήση ψηφιακής προσομοίωσης



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΜΙΧΑΛΗ Γ. ΓΕΩΡΓΙΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ
ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ ΕΜΠ
ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ ΣΩΤΗΡΟΠΟΥΛΟΥ

ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ
ΥΠ. ΔΙΔΑΚΤΟΡΑΣ ΕΜΠ
ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2015

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο: *Ακουστικός και Αρχιτεκτονικός Σχεδιασμός της σκηνής σε αίθουσες ακρόασης μουσικής: διερεύνηση με τη χρήση ψηφιακής προσομοίωσης*, εκπονήθηκε από τον φοιτητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, Γεωργίου Μιχάλη, από το Μάρτιο του 2015 έως το Νοέμβριο του 2015.

Η διεξαγωγή και η ολοκλήρωση της εργασίας δε θα ήταν δυνατή χωρίς τις πολύτιμες υποδείξεις, τη στήριξη και την καθοδήγηση της επιβλέπουσας Αν. Καθηγήτριας ΕΜΠ Αλεξάνδρας Σωτηροπούλου, στην οποία εκφράζονται ειλικρινείς ευχαριστίες.

Επιπρόσθετα, πολλές ευχαριστίες εκφράζονται στον Ομότιμο Καθηγητή ΕΜΠ, Γεώργιο Πουλλάκο για τις πολύτιμες υποδομές που μου παραχωρήθηκαν, με τις οποίες μου δόθηκε η ευκαιρία για την εκμάθηση του λογισμικού 'Odeon' και τη γενικότερη ενασχόληση μου με το ενδιαφέρον θέμα της ακουστικής.

Εν συνεχεία, εκφράζονται θερμές ευχαριστίες στον Ιωάννη Καραγιάννη (Υ.Δ. ΕΜΠ), η αρωγή του οποίου υπήρξε καθοριστική, στον Αντώνη Πάνο (Υ.Δ. ΕΜΠ) καθώς και στο Ειδικό Τεχνικό Επιστημονικό Προσωπικό (Ε.Τ.Ε.Π.) του Εργαστηρίου Ηχοτεχνίας, Σταμάτη Παναγιώτου, χωρίς τη συμβολή των οποίων δεν θα ήταν εφικτή η πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.

Ειλικρινείς ευχαριστίες εκφράζονται στους γονείς μου για την υποστήριξή τους και ιδιαιτέρως στον αδερφό μου Χρίστο Γεωργίου, στη γυναίκα του, Γαλάτεια, καθώς και στη μικρή Αλεξάνδρα, για τη δύναμη που μου προσέφεραν σε μια περίοδο μεγάλης πίεσης.

Τέλος, δε θα μπορούσα να παραβλέψω τη συνεισφορά των φίλων μου, Αντώνη Γιαννακού, Ευσταθία Γιαννακού και Στέλιο Στυλιανού, των οποίων η φιλοξενία στην Αθήνα και η υπομονή τους όλο αυτό το διάστημα ήταν καθοριστικοί παράγοντες για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα μεγάλο μέρος της παρούσας εργασίας αφιερώνεται στην καταγραφή των σημαντικότερων ευρημάτων προηγούμενων ερευνών όσον αφορά την ακουστική σκηνής. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται ένας αναλυτικός πίνακας, στον οποίο τα φυσικά κριτήρια που αφορούν την ακουστική σκηνής ταξινομούνται σε κατηγορίες και συσχετίζονται με τις αντιλήψεις των μουσικών. Επιπρόσθετα, στον πίνακα αυτό δίνονται οι ορισμοί των φυσικών κριτηρίων, καθώς και οι βέλτιστες τιμές τους οι οποίες καταγράφηκαν μέχρι σήμερα από διάφορους ερευνητές στη σχετική βιβλιογραφία.

Εν συνεχεία, στην παρούσα διπλωματική εργασία δίνεται μια ξεκάθαρη εικόνα των νομοτελειακών τάσεων των φυσικών κριτηρίων της ακουστικής σκηνής σε σχέση με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό της σκηνής, με τη χρήση ψηφιακής προσομοίωσης.

Συγκρίνοντας την υπάρχουσα αίθουσα 'Δημήτρης Μητρόπουλος' που βρίσκεται στο Μέγαρο Μουσικής στην Αθήνα, με το ψηφιακά προσομοιωμένο της μοντέλο, επιβεβαιώθηκε η λήψη αξιόπιστων αποτελεσμάτων στο φάσμα συχνοτήτων από 63-4000Hz.

Στην παρούσα εργασία βρέθηκε πως ο αρχικός αρχιτεκτονικός σχεδιασμός της σκηνής της πραγματικής αίθουσας 'Δημήτρης Μητρόπουλος' προσφέρει καλή ακουστική στους μουσικούς, όσον αφορά τις επιθυμητές τιμές της νωρίτερης και αργοπορημένης ενέργειας (early and late energy) που αναφέρονται στη βιβλιογραφία· αυτές οι δύο φυσικές παράμετροι προτείνονται στη βιβλιογραφία να υπολογίζονται για την αντίληψη του μουσικού συνόλου και της αντήχησης, και υιοθετήθηκαν στην παρούσα έρευνα.

Αλλάζοντας τη γεωμετρία της σκηνής στον ψηφιακό χώρο, παρατηρήθηκαν οι ακόλουθες τάσεις:

Πρώτα· μειώνοντας το εύρος και το ύψος της σκηνής, δηλαδή μειώνοντας τον όγκο της σκηνής (από τα 730m^3 στα 290m^3) παρατηρήθηκε μια ανεπιθύμητη αύξηση της νωρίτερης ενέργειας, ενώ η αργοπορημένη ενέργεια βρέθηκε να είναι ανεξάρτητη από τον όγκο της σκηνής. Το παραπάνω επιβεβαιώνει ευρήματα προηγούμενων ερευνών, στις οποίες έγινε χρήση ψηφιακής προσομοίωσης.

Κατά δεύτερο· οι τιμές της νωρίτερης και της αργοπορημένης ενέργειας βρέθηκαν να βελτιστοποιούνται κατά τις ακόλουθες γεωμετρίες της σκηνής:

- Μια μικρή κλίση των πλαϊνών τοίχων της σκηνής (24°) φάνηκε να είναι ικανοποιητική για σχετικά ευρεία σκηνή (14m). Η κλίση που δίνει τις επιθυμητές τιμές αυξήθηκε (στις 35°) με την μείωση του εύρους της σκηνής (12m). Το παραπάνω εύρημα επιβεβαιώνει τα συμπεράσματα του Chiang.

- Μια μικρή κλίση στην οροφή (6°) φάνηκε να είναι ικανοποιητική για σχετικά ψηλή σκηνή (7m). Η κλίση που δίνει τις επιθυμητές τιμές αυξήθηκε (στις 20°) με την μείωση του ύψους της σκηνής (5m).

Συμπερασματικά, βρέθηκε ότι ένα σφηνοειδές σχήμα σκηνής με όγκο της τάξης των 800m^3 δίνει τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων ST_{early} και ST_{late} , οι οποίες εισηγήθηκαν από τον Gade. Τα παραπάνω αποτελέσματα επιβεβαιώνουν σε μεγάλο βαθμό, ευρήματα από μία προηγούμενη έρευνα ενός άλλου ερευνητή, ο οποίος επίσης χρησιμοποίησε ψηφιακή προσομοίωση.

Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας έρευνας, μπορούν να συμβάλουν σε εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού μιας σκηνής μεγάλου ή μικρότερου μεγέθους, καθώς στη συγκεκριμένη προσομοιωμένη αίθουσα διερευνήθηκαν 28 διαφορετικές γεωμετρικά σκηνές.

ABSTRACT

Physical criteria of stage acoustics which reported in the relevant literature, were classified. Criteria were then chosen in the present analysis, so as to be representative of each classified category and easy to measure. Also, for each selected criterion, there are given optimal values, preferred values and ranges.

The present work attempted to contribute, using computer simulation, to the question of how the geometry of the stage influences stage acoustics.

A comparison of the computer modelling hall to the existing hall of 'Dimitris Mitropoulos' in Athens confirm reliability of the simulated data over the frequency range from 63-4000Hz.

The initial architectural data of 'Dimitris Mitropoulos' hall was found to be associated with literature's desired values of early and late energy; these two physical parameters are proposed in literature to account for ensemble and reverberance on stage, and they were adopted in the present investigation.

While altering the geometry of stage in digital space, the following trends were observed:

First; reducing the stage width and height, i.e. reducing the stage volume (from 730m³ down to 290m³), an undesirable increase of ST_{early} was observed, whereas the ST_{late} was found to be independent of the stage volume. This confirms findings of earlier studies employing computer simulation.

Secondly; the ST_{early} and ST_{late} were found to be optimized under the following stage geometries:

- A small splay of side walls (24°) was satisfactory for relatively wide stage (14m). The desired splay increased (to 35°) with stage width decreasing (12m). This finding confirms Chiang's conclusion.
- A small canopy tilt (6°) was satisfactory for relatively high stage (7m). The desired tilt increased (to 20°) with height decreasing (5m).

In conclusion a wedge shaped stage with volume of the order of 800m³ was found to give optimal ST_{early} and ST_{late} values as suggested by Gade. The above results, by and large, confirm findings from an earlier study by another author, employing also computer simulation.

Overall, the results of the present experiment could provide alternative ways for designing of either big or small size stages, as 28 geometrical transformations on stage were investigated in a single simulated hall.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ | 1 |
| 2 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ | 2 |
| 3 | ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ | 14 |
| 3.1 | Επιλογή φυσικών κριτηρίων | 14 |
| 3.2 | Το προσομοιωμένο ηχητικό πεδίο..... | 14 |
| 4 | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 26 |
| 4.1 | Εύρος σκηνής..... | 26 |
| 4.2 | Ύψος οροφής σκηνής | 31 |
| 4.3 | Γωνία πλαϊνών τοίχων σκηνής | 36 |
| 4.4 | Κλίση ανακλαστήρα οροφής | 42 |
| 4.5 | Κλίση πίσω τοίχου σκηνής | 48 |
| 5 | ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ | 55 |
| 6 | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 62 |
| 7 | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 63 |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α

ODEON ROOM ACOUSTICS SOFTWARE

| | | |
|--------|-------------------------------|-----|
| A.1. | Σχετικά με το Odeon | A-1 |
| A.2. | Η προέλευση του Odeon | A-2 |
| A.3. | Μέθοδοι Υπολογισμού | A-2 |
| A.3.1. | Αλγόριθμοι και Εφαρμογές..... | A-2 |
| A.4. | Χρήσεις και Λειτουργίες | A-3 |

Παράρτημα Β

ΑΙΘΟΥΣΑ ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΜΗΤΡΟΠΟΥΛΟΣ

| | | |
|--------|---|-----|
| B.1. | Σχετικά με την Αίθουσα Δημήτρης Μητρόπουλος | B-1 |
| B.1.1. | Κάτοψη αίθουσας | B-2 |
| B.2.2. | Τομή αίθουσας | B-3 |

Παράρτημα Γ

ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ «ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ»

| | | |
|--------|--|-----|
| Γ.1. | Ανάλυση σε παράγοντες | Γ-1 |
| Γ.1.1. | Θεωρία της μεθόδου | Γ-1 |
| Γ.1.2. | Εξαγωγή των αρχικών παραγόντων | Γ-2 |
| Γ.1.3. | Περιστροφή των παραγόντων | Γ-3 |
| Γ.1.4. | Υπολογισμός του τυπικού σφάλματος φόρτισης | Γ-4 |

Παράρτημα Δ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΡΙΩΝ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ

| | | |
|--------|--|-----|
| Δ.1. | Γενικά στοιχεία Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών | Δ-1 |
| Δ.2. | Παρουσίαση Αποτελεσμάτων | Δ-2 |
| Δ.2.1. | Πίνακας Συσχετίσεων | Δ-2 |
| Δ.2.2. | Ερμηνεία Συνολικής Διακύμανσης | Δ-3 |
| Δ.2.3. | Πίνακας Συνιστωσών | Δ-5 |
| Δ.2.4. | Περιστρεμμένος Πίνακας Συνιστωσών | Δ-6 |
| Δ.2.5. | Τιμές Συνιστωσών | Δ-7 |

Παράρτημα Ε

ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΑ 1000 ΗΖ

| | | |
|------|--------------------------|-----|
| E.1. | Εύρος σκηνής | E-1 |
| E.2. | Ύψος οροφής σκηνής | E-4 |

| | | |
|------|-----------------------------------|------|
| E.3. | Γωνία πλαϊνών τοίχων σκηνής | E-7 |
| E.4. | Κλίση ανακλαστήρα οροφής | E-10 |
| E.5. | Κλίση πίσω τοίχου σκηνής | E-13 |

Παράρτημα ΣΤ

ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ 63-4000 Hz

| | | |
|-------|-----------------------------------|-------|
| ΣΤ.1. | Εύρος σκηνής | ΣΤ-1 |
| ΣΤ.2. | Ύψος οροφής σκηνής | ΣΤ-16 |
| ΣΤ.3. | Κλίση πλαϊνών τοίχων σκηνής | ΣΤ-28 |
| ΣΤ.4. | Κλίση ανακλαστήρα οροφής | ΣΤ-46 |
| ΣΤ.5. | Κλίση πίσω τοίχου σκηνής | ΣΤ-64 |

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 2.1 7

Πίνακας Ταξινόμησης των Φυσικών Κριτηρίων που αφορούν την ακουστική σκηνης για αίθουσες κονσέρτων

Πίνακας 3.2.1 17

Πίνακας ακουστικών παραμέτρων με τα αντίστοιχά τους όρια αντιληπτής διαφοράς

ΓΡΑΦΗΜΑΤΑ

| | |
|--|----|
| Γράφημα 3.2.1 Μετρήσεις T_{30} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) στη θέση της σκηνής. Σύγκριση υπάρχων αίθουσας με το ψηφιακά προσομοιωμένο της μοντέλο | 20 |
| Γράφημα 3.2.2 Μετρήσεις T_{30} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) στη θέση του ακροατηρίου. Σύγκριση υπάρχων αίθουσας με το ψηφιακά προσομοιωμένο της μοντέλο | 20 |
| Γράφημα 4.1.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 14m..... | 26 |
| Γράφημα 4.1.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 14m..... | 27 |
| Γράφημα 4.1.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 12m..... | 27 |
| Γράφημα 4.1.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 12m..... | 27 |
| Γράφημα 4.1.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 10m..... | 28 |
| Γράφημα 4.1.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 10m..... | 28 |
| Γράφημα 4.1.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 8m..... | 29 |
| Γράφημα 4.1.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 8m..... | 29 |
| Γράφημα 4.1.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 6m..... | 30 |
| Γράφημα 4.1.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 6m. | 30 |

| | |
|---|----|
| Γράφημα 4.2.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 7m. | 31 |
| Γράφημα 4.2.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 7m. | 31 |
| Γράφημα 4.2.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 6m. | 32 |
| Γράφημα 4.2.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 6m. | 32 |
| Γράφημα 4.2.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 5m. | 33 |
| Γράφημα 4.2.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 5m. | 33 |
| Γράφημα 4.2.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 4m. | 34 |
| Γράφημα 4.2.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 4m. | 34 |
| Γράφημα 4.2.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 3m. | 35 |
| Γράφημα 4.2.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 3m. | 35 |
| Γράφημα 4.3.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 35°. | 36 |
| Γράφημα 4.3.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 35°. | 36 |
| Γράφημα 4.3.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 24°. | 37 |
| Γράφημα 4.3.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 24°. | 37 |

| | |
|--|----|
| Γράφημα 4.3.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις 15° . | 38 |
| Γράφημα 4.3.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις 15° . | 38 |
| Γράφημα 4.3.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις 0° . | 39 |
| Γράφημα 4.3.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις 0° . | 39 |
| Γράφημα 4.3.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις -15° . | 40 |
| Γράφημα 4.3.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις -15° . | 40 |
| Γράφημα 4.3.11 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις -25° . | 41 |
| Γράφημα 4.3.12 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις -25° . | 41 |
| Γράφημα 4.4.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνης ορίστηκε στις 20° . | 42 |
| Γράφημα 4.4.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνης ορίστηκε στις 20° . | 42 |
| Γράφημα 4.4.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνης ορίστηκε στις 15° . | 43 |
| Γράφημα 4.4.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνης ορίστηκε στις 15° . | 43 |
| Γράφημα 4.4.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνης ορίστηκε στις 10° . | 44 |
| Γράφημα 4.4.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνης ορίστηκε στις 10° . | 44 |

| | |
|--|----|
| Γράφημα 4.4.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 0° . | 45 |
| Γράφημα 4.4.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 0° . | 45 |
| Γράφημα 4.4.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -10° . | 46 |
| Γράφημα 4.4.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -10° . | 46 |
| Γράφημα 4.4.11 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -15° . | 47 |
| Γράφημα 4.4.12 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -15° . | 47 |
| Γράφημα 4.5.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 30° . | 48 |
| Γράφημα 4.5.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 30° . | 48 |
| Γράφημα 4.5.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 20° . | 49 |
| Γράφημα 4.5.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 20° . | 49 |
| Γράφημα 4.5.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 10° . | 50 |
| Γράφημα 4.5.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 10° . | 50 |
| Γράφημα 4.5.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 0° . | 51 |
| Γράφημα 4.5.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 0° . | 51 |

| | |
|---|----|
| Γράφημα 4.5.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -10° | 52 |
| Γράφημα 4.5.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -10° | 52 |
| Γράφημα 4.5.11 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -20° | 53 |
| Γράφημα 4.5.12 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -20° | 53 |
| Γράφημα 4.5.13 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -30° | 54 |
| Γράφημα 4.5.14 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -30° | 54 |
| Γράφημα 5.1 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του εύρους της σκηνης | 55 |
| Γράφημα 5.2 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του εύρους της σκηνης | 55 |
| Γράφημα 5.3 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του ύψους της οροφής της σκηνης | 56 |
| Γράφημα 5.4 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του ύψους της οροφής της σκηνης | 56 |
| Γράφημα 5.5 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης των πλαϊνών τόχων της σκηνης | 57 |
| Γράφημα 5.6 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης των πλαϊνών τόχων της σκηνης | 57 |
| Γράφημα 5.7 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του ανακλαστήρα οροφής της σκηνης | 58 |
| Γράφημα 5.8 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του ανακλαστήρα οροφής της σκηνης | 58 |

Γράφημα 5.9 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του τοίχου πίσω από τη σκηνή 59

Γράφημα 5.10 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000Hz σε σχέση με τις μεταβολές του τοίχου πίσω από τη σκηνή 59

ΕΙΚΟΝΕΣ

| | |
|--|----|
| Εικόνα 3.2.1 Αίθουσα ‘Δημήτρης Μητρόπουλος’ | 15 |
| Εικόνα 3.2.2 Αίθουσα ‘Δημήτρης Μητρόπουλος’ | 15 |
| Εικόνα 3.2.3 Αίθουσα ‘Δημήτρης Μητρόπουλος’. Βασικές διαστάσεις της σκηνής (τομή)..... | 16 |
| Εικόνα 3.2.4 Αίθουσα ‘Δημήτρης Μητρόπουλος’. Βασικές διαστάσεις της σκηνής (κάτοψη)..... | 16 |
| Εικόνα 3.2.5 Θέση πηγής-παραλήπτη στη σκηνή | 18 |
| Εικόνα 3.2.6 Μεταβολές του εύρους σκηνής (προοπτικό μοντέλο). | 21 |
| Εικόνα 3.2.7 Μεταβολές του εύρους σκηνής (κάτοψη). Το εύρος (W_{rs}) ορίστηκε στα 6m, 8m, 10m, 12m και 14m..... | 21 |
| Εικόνα 3.2.8 Μεταβολές στο ύψος οροφής (προοπτικό μοντέλο)..... | 22 |
| Εικόνα 3.2.9 Μεταβολές στο ύψος οροφής (τομή). Το ύψος (H) ορίστηκε στα 3m, 4m, 5m, 6m και 7m..... | 22 |
| Εικόνα 3.2.10 Μεταβολές στην κλίση των πλαϊνών τοίχων σκηνής (προοπτικό μοντέλο) | 23 |
| Εικόνα 3.2.11 Μεταβολές στην κλίση των πλαϊνών τοίχων σκηνής (κάτοψη). Η γωνία (Angle) ορίστηκε στις 35°, 24°, 15°, 0°, -15° και -25°. | 23 |
| Εικόνα 3.2.12 Μεταβολές στην κλίση του ανακλαστήρα οροφής (προοπτικό μοντέλο) | 24 |
| Εικόνα 3.2.13 Μεταβολές στην κλίση του ανακλαστήρα οροφής (τομή). Η γωνία (Tilt) ορίστηκε στις 20°, 15°, 10°, 0°, -10° and -15°. | 24 |
| Εικόνα 3.2.14 Μεταβολές στην κλίση του τοίχου πίσω από τη σκηνή (προοπτικό μοντέλο)..... | 25 |
| Εικόνα 3.2.15 Μεταβολές στην κλίση του τοίχου πίσω από τη σκηνή (τομή). Η γωνία (Tilt) ορίστηκε στις 30°, 20°, 10°, 5°, 0°, -10°, -20° and -30°. | 25 |

1 *Introduction*

Stage acoustics design is a fairly new area of auditorium acoustics. A comprehensive work in which main results are outlined was published in year 2010 by Gade [1]. Various stage acoustics criteria have been proposed, from either, laboratory studies employing synthetic sound fields, or field studies in existing auditoria. Nevertheless, subjective evaluation tests have also been carried out with music performers. Some relationships between stage acoustics criteria and subjective evaluation tests have been proposed. The subjectively significant stage acoustics criteria, which are reported in the literature need be associated with the design of stage in a systematic way. Investigation of this question has been the object of one study [2], which employs computer simulation.

This work aims to test a number of stage acoustics criteria against geometry of small size stages, employing an existing auditorium which is computer simulated.

2 Review of past work

Physical criteria for stage acoustics have been developed since the late 1970s [3]; these concern classical concert repertoire. A list of some of these criteria is shown in Table 2.1.

Amongst the earliest attempts to propose physical criteria of stage acoustics is the work of Gade [4], [5], [6]. That author interviewed 32 prominent performers of classical music in Scandinavia (singers, pianists, conductors and players of various orchestral instruments) in order to describe different aspects of stage acoustic conditions, in terms of 'good' or 'bad'. From these interviews a number of different aspects were derived, which Gade called "Subjective Parameters" and they are: *Reverberance*, *Support* (including *hearing oneself*), *Timbre*, *Dynamics*, *Hearing Each Other* and *Time Delay*. In 1989, Gade proposed ST (Support) as a stage parameter for the acoustic support of an individual musician and EEL (Early Ensemble Level) as a stage parameter for ensemble conditions, based on questionnaires and interviews amongst musicians as well as on field experiments and laboratory simulations. Later, Gade [7] suggested three revised versions of ST: ST_{early} (to measure ensemble), ST_{late} (for impression of reverberation) and ST_{total} (for acoustic support). From his laboratory experiments, he found that the delay of direct sound within the orchestra should not exceed 20ms for good listener conditions. Also, Gade found that different instruments cause different thresholds of perception of early reflected sound from one's own instrument. For flute players, the threshold corresponded to ST_{early} values no lower than -15dB, and for strings (violin and cello) no higher than -9dB. So, Gade concluded that strings are likely not to benefit from early reflections (between 20 and 100ms) in halls with low ST_{early} ; they most likely benefit from the reflection from the floor, and from the wall, if they are placed fairly close to it. Flute players, and perhaps players of other wind instruments, are more likely to benefit from early reflections [4]. Both Gade and Marshall found that reverberation is not important for ensemble, but preferable amongst soloists [3], [4].

On his field experiments [5], Gade found that only ST_{early} correlated with subjective judgements of 'support' and 'ensemble', although EEL correlated with perceived ensemble. He also found that early reflections are critical for achieving support. Furthermore, stage occupancy is important for the measurements according to Gade [7].

Gade's recommendations for measuring ST are listed below [7]:

- the platform should be occupied with chairs and music stands
- all objects in a 2 meters radius from the transducers should be removed
- the transducers must be placed at least 4 meters from reflecting stage surfaces to make sure these surfaces are include beyond the 20 ms integration limit
- for relatively small stages, the 20 ms limit must be reduced and all furniture removed (since many reflections will arrive before 20 ms)

- distance from sound source to microphone set to 1 meter and the height of both set to 1 meter above the stage floor
- calibration is needed for the frequency bands where the sound source is not adequately omnidirectional (see [7] for more details)

Contrary to the view of Gade, Dammerud in his PhD work [8], identified a high correlation of both G_{early} (early strength) and G_{late} (late strength) with perceived reverberation (slightly higher correlation than ST_{late}). Dammerud's study involved physical measurements and calculations in symphony orchestra platforms using real halls and scale and computer models. That work also involved subjective evaluation tests through questionnaires amongst orchestra musicians.

Dammerud based on his theoretical calculations and on results from his scale models, he built a digital 'model orchestra', which he used with computer models to investigate several parameters, namely: stage width and ceiling height, reflector shape and side wall diffusion. It was found that narrow stages with splayed side walls and high ceilings provide good listening conditions; namely, they provide balance (in time and level) amongst early reflections from different instrument groups, as well as balance between early and late reflections; also reverberation on stage is benefitted from the above geometry, so that sufficient clarity is achieved.

Regarding subjective evaluation tests, Dammerud sent questionnaires to musicians-members of eight symphony orchestras (two in Norway and six in the UK); 180 out of those musicians responded. Questionnaires referred to the acoustics on stage of 45 concert halls. Dammerud concluded that a certain amount of reverberance is important for stage acoustics. It was also found that string players preferred curved risers, (probably because curved risers allow for cross stage communication, according to Dammerud) and some musicians preferred overhead reflectors. Also halls with low ceilings were found to be disliked. Out of the 45 halls, Dammerud selected subjective data from 12 halls and investigated correlations between the OAI and available objective data. No significant correlation was found with physical acoustic parameters. Nevertheless a positive correlation of the OAI was identified with narrow stages and high ceilings. This finding was also confirmed in a subsequent study of Dammerud [8], in which same type of questionnaires were sent to members of a regional orchestra, in order evaluate eight concert halls in the UK.

In another study Dammerud [9] proposes physical acoustics parameters, namely: ST , RT , G , C_{80} , G_{early} and G_{late} both for stage and for audience acoustics.

According to Dammerud's results, Gade [1] attempted to reanalyse his own data [5]. Gade concluded that the significant geometric parameters of Dammerud's studies, namely stage height and width, were not identified as important in Gade's study; furthermore, subjectively significant physical parameters which were identified in Dammerud's stage acoustics tests, were not confirmed as important in Gade's studies.

Other representative studies which investigates stage acoustics employing either the laboratory approach (synthetic sound fields), or field experiments are outlined below.

Meyer and Biassoni de Serra [10] based on laboratory experiments published results on the direction dependent threshold of perception of sound for musicians playing various instruments. Meyer used the results to suggest a configuration of overhead reflectors to better consider the balance between the weak string instruments and the loud wind instruments sitting further back on the stage.

One very important contribution was made by Naylor [11]. From laboratory experiments, he found that both sound level of “one’s own instrument” and sound level of “the other player(s)” could be heard sufficiently, if the level of “the other player(s)” was in the range -15dB to -8dB relative to “one’s own instrument”.

One of the most innovative work is the work by Ueno [12] [13]. She used a 6-channel sound simulation system in order to evaluate stage acoustics by the musicians. Ueno found that for soloists the early energy is often masked by the direct sound. She also found that a very high level of early energy (corresponding to ST_{early} in the range -7dB to -10dB) was disliked by most musicians because it masked the reverberation. For ensembles (two players), she found that the highest level of early energy did not always promote easy ensemble. A long reverberation time was liked because it helped “making music”.

Despite its merits, a drawback of the laboratory approach, is that it fails to represent the complexity of the real stage situation. To cope with this a number of authors worked with field experiments in real halls with musicians on stage. For example Chiang [14] made field experiments with chamber groups playing in five different halls. The results of the experiments showed high correlation between all the response scales, as Gade found in his studies. Chiang also found moderate correlations between the subjective responses of hearing oneself/overall impression and the early reflection parameters ST_{early} , T_{20} and ED_{100} . The correlation with the early reflection measures was negative. Last, he found that the optimum value of ST_{early} is around -12dB, as Gade found for full orchestras in his studies.

Cederlöf [15] sent questionnaires to five orchestras in Sweden and asked them about their preferences on the acoustics in their home hall only. The preferable hall had highest ST_{early} , and it is worth saying that the best liked halls were those with small stages and high ceilings or substantial reflectors high above the stage.

In New Zealand, Sanders [16] found high correlation between the subjective responses. The highest correlation was found between support (for chamber music) and overall impression. Besides, the halls with low reverberation time values and low reverberation levels were poorly rated.

A new objective parameter, LQ_{7-40} suggested by Luxembourg et al [17]. LQ_{7-40} describes a kind of clarity excluding the direct sound. However, the subjective response he derived from a university orchestra touring in 7 halls in the Netherlands didn’t correlate well neither with LQ_{7-40} nor with any other measure, including both ST_{early} and ST_{late} . In a further analysis [18], they have not been reported any improvements in correlation with subjective data.

In Italy, Giovannini [19] after investigating 5 concert hall stages visited by 4 different orchestras and after deriving subjective responses, he found that *Reverberance* related to T_{20} (seems logic), but the paradox is that both T_{20} and ST_{early}

were negatively correlated with *Envelopment*. Also ST_{early} was positively correlated with *Timbre*. Furthermore, Giovannini found that the best liked of the five halls had a rather narrow stage of 18m and reflectors situated about 10m above the stage. Last, he has reported that the activated tilted side wall reflectors in the Queens Hall in Denmark, cause an increase in ST_{early} [20].

Concerning stage acoustics and architectural data, Dammerud [21] suggested the Height/Width ratio (H/W ratio). The importance of this ratio was also found in previous studies. As Gade mentioned [1], high and narrow stages reduce reflection delays from side walls and allow remote strings on stage sides, to hear each other. Gade also mentioned that high ceilings allow for subjective reverberation which improves support and balance between musicians.

Generally there is a preference for a higher H/W ratio. This requirement is supported by several researchers. It is important to mention that Barron [22] and Jaffe [23] found a preference for ceiling/canopy reflectors height within 7-10m, while Gade suggested 6-8m height if possible [4], [5]. Meyer [24] on his studies found that high ceilings preferred by conductors. Also, in simulations with soloists, this requirement of high H/W ratio has been found to be preferred [25]. Dammerud explained that high and narrow stages doesn't allow to the brass to mask the strings as much as on stages with low H/W ratio. And that's why there is a preference for high H/W ratio by orchestras.

As Gade reminds on his study [1], early reflections influence *ensemble* and late reflections influence *support* and *reverberance*. For this reason, he suggested a practical solution of installing moving canopies or an array of smaller reflectors above the stage, which can be adjusted depending on the repertoire of each orchestra.

It is well documented that too much reverberation means lack of Clarity. On concert hall stages, several investigations indicate that too much reverberation could be a problem. Gade [1] mentioned that in small rehearsal halls with volume less than 6000 m³, reverberation time above 1.6-1.8s could be a problem. In bigger concert halls, for example in new concert hall Aarhus with volume about 15000 m³, reverberation time above 2 seconds had reported to be slightly problematic.

With the onset of advances in digital technology, the synthetic sound field approach tends to be superseded by computer simulation experiments; the latter, apparently, offer the advantage over synthetic sound fields, that the experimenter can vary the stage configuration and perform acoustic measurements respectively, in an easy and cost free way. Furthermore, advanced digital technology has allowed for quality auralised signal; the latter can be used as an alternative to live concerts in subjective evaluation tests, apparently with comparative versatility.

Over the last decade or so, amongst the fewest studies which investigate the significance of stage acoustics criteria, using digital simulation, is the work of Chiang and Shu [2]. Those authors investigated the dependence of early and late energy on musicians' positioning and on stage geometry. Their experiments were carried out in one virtual auditorium of which the reverberation time varied between 0.9 and 1.9s throughout the 72 configurations tested. The physical characteristics which were varied concerned, stage geometry, stage materials and the introduction of detached

reflectors. In addition 2 distinct source locations and 2 receiver's positions were employed throughout the virtual stage among 2 orientations at each location. Chiang's results are outlined below.

The early energy was found to correlate with the stage volume, the splay angle of stage envelope, the moving of the source towards the back of stage and the introduction of detached reflector for the octave bands of 1 and 2 kHz.

The late energy was found to correlate mainly with the materials and the shape envelope for the octave bands of 1 and 2 kHz.

Chiang's study is based on a virtual auditorium, which compared with a scale model; testing stage variations of an existing auditorium using computer simulation could be more realistic.

TABLE 2.1: CLASSIFICATION OF SOME PUBLISHED PHYSICAL CRITERIA OF STAGE ACOUSTICS FOR CONCERT AUDITORIA

| CATEGORY | ASSOCIATED SUBJECTIVE EFFECT | DEFINITION OF CRITERION | | | | REFERENCES | COMMENTS |
|---|------------------------------|-------------------------|---------------|--------------|--|---|--|
| | | No. | Name | Symbol | Definition | | |
| 1. IMPULSE RESPONSE STRUCTURE 1.1. ENERGY BALANCE CRITERIA | PERCEIVED SUPPORT | i. | Early Support | ST_{early} | $10 \log \frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{\int_0^{10} p^2(t) dt} [dB]$ <p>Where: $t_1 = 20 \text{ ms}$ $t_2 = 100 \text{ ms}$</p> | Gade (1989) [5] Gade (1992) [7] ISO 3382-1-2009 (2009) [26] | <ul style="list-style-type: none"> ○ ST_{early} has been included in the annex of the standard ISO 3382-1 [26] ○ Optimal range: A preference for ST_{early} within -11 to -13 dB [7] ○ Preferred values: > -10dB ○ Desired range for Large Orchestra: > -14dB [27] |
| | | ii. | Late Support | ST_{late} | $10 \log \frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{\int_0^{10} p^2(t) dt} [dB]$ <p>Where: $t_1 = 100 \text{ ms}$ $t_2 = 1000 \text{ ms}$</p> | Gade (1989) [5] Gade (1992) [7] ISO 3382-1-2009 (2009) [26] | <ul style="list-style-type: none"> ○ ST_{late} has been included in the annex of the standard ISO 3382-1 [26] ○ Desired Range for Large Orchestra: -15 dB – $ST_{early} + 1 \text{ dB}$ [27] ○ The Early-to-Late energy balance should not exceed $ST_{early} - ST_{late} = 3 \text{ dB}$ [28] |

TABLE 2.1: CLASSIFICATION OF SOME PUBLISHED PHYSICAL CRITERIA OF STAGE ACOUSTICS FOR CONCERT AUDITORIA

| CATEGORY | ACCOCIATED SUBJECTIVE EFFECT | DEFINITION OF CRITERION | | | | REFERENCES | COMMENTS |
|----------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|----------------|--|------------------------------------|----------|
| | | No. | Name | Symbol | Definition | | |
| | | iii. | Total Support | ST_{total} | $10 \log \frac{\int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{\int_0^{10} p^2(t) dt} [dB]$ <p>Where: $t_1 = 20 \text{ ms}$ $t_2 = 1000 \text{ ms}$</p> | Gade (1989) [5] Gade (1992) [7] | |
| | | iv. | Early Support at distance d | $ST_{early,d}$ | $10 \log \frac{\int_{10}^{103-delay} p_d^2(t) dt}{\int_0^{10} p_{1m}^2(t) dt} [dB]$ <p>Where: p_d = Sound pressure measured at distance d [Pa] p_{1m} = Sound pressure measured at 1 m distance [Pa] delay = S-R distance divided by the speed of sound [ms].</p> | Wenmaekers et al (2012) [29] | |

| CATEGORY | ACCOCIATED SUBJECTIVE EFFECT | DEFINITION OF CRITERION | | | | REFERENCES | COMMENTS |
|----------|------------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------|--|------------------------------|--|
| | | No. | Name | Symbol | Definition | | |
| | PERCEIVED ENSEMBLE | v. | Late Support at distance d | $ST_{late,d}$ | $10 \log \frac{\int_{103-delay}^{\infty} p^2_d(t) dt}{\int_0^{10} p^2_{1m}(t) dt} [dB]$ <p>Where: p_d = Sound pressure measured at distance d [Pa] p_{1m} = Sound pressure measured at 1 m distance [Pa] delay = S-R distance divided by the speed of sound [ms].</p> | Wenmaekers et al (2012) [29] | |
| | | i. | Early Ensemble Level | EEL | $10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_0^{10} p^2(t) dt} [dB]$ <p>t=0 ms: represents the time of emission from the source</p> | Gade (1989) [5] | <ul style="list-style-type: none"> ○ EEL has not proved correlate well with subjective measures of either ensemble or support [5] ○ Preferred values: High values of high-frequency early energy |

| CATEGORY | ACCOCIATED SUBJECTIVE EFFECT | DEFINITION OF CRITERION | | | | REFERENCES | COMMENTS |
|----------|------------------------------|-------------------------|------------------|--------------|---|---------------------------------|--|
| | | No. | Name | Symbol | Definition | | |
| | PERCEIVED ENSEMBLE BALANCE | ii. | Early Support | ST_{early} | - | - | <ul style="list-style-type: none"> ○ For definition and references see i above in subjective effect of Perceived Support ○ It was found to correlate quite well with judgments of ensemble [5] ○ Desired range for Large Orchestra: > -14dB [27] |
| | | i. | Ensemble Balance | EB | $10 \log \frac{E(20 - 100ms)_{one-self}}{E(t - 100ms)_{the others}} [dB]$ <p>t = 0 : the time of the direct sound from 'others' (a reasonable choice)</p> | Barron and Dammerud (2006) [30] | <ul style="list-style-type: none"> ○ The optimum start time for integration of sound from others, t, is left undecided [30] |

TABLE 2.1: CLASSIFICATION OF SOME PUBLISHED PHYSICAL CRITERIA OF STAGE ACOUSTICS FOR CONCERT AUDITORIA

| CATEGORY | ACCOCIATED SUBJECTIVE EFFECT | DEFINITION OF CRITERION | | | | REFERENCES | COMMENTS |
|-------------------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------|-------------|--|---|--|
| | | No. | Name | Symbol | Definition | | |
| 1.2. TIME STRUCTURE | | | | | | | |
| 1.2.1. EARLY ENERGY | PERCEIVED ENSEMBLE | i. | Stage Clarity | C_{80} | $10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt} [dB]$ <p>t = 0 : the arrival of the direct sound at listener's ears</p> | | <ul style="list-style-type: none"> ○ Preferred values: High values of high-frequency early energy and low values of reverberation preferred [7] |
| 2. TOTAL ENERGY OF IMPULSE RESPONSE | PERCEIVED STRENGTH | i. | Strength | G | $10 \log \frac{\int_0^{\infty} p^2(t) dt}{\frac{4\pi s^2}{[m^2]} \int_0^{\Delta t} p^2(s, t) dt}$ <p>p(s, t): sound pressure at s distance from source Δt : duration of the excitation signal [m²] : 1 m²</p> | Lehmann (1976) [31] ISO 3382-1-2009 (2009) | <ul style="list-style-type: none"> ○ G has been included in the annex of the standard ISO 3382-1 [26] ○ $ST_{early} = G_{20-100} - G_{0-10}$ (see 1.1 above) ○ Desired Range for Large Orchestra: < 6.5 dB [27] |
| | PERCEIVED REVERBERATION | i. | Early Strength | G_{early} | $10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2_{10}(t) dt} = G + 10 \log \frac{1}{1 + 10^{c_{80}/10}} [dB]$ <p>p₁₀ = sound pressure measured at distance 10m from source [Pa]</p> | Dammerud (2011) [21] | |

| CATEGORY | ASSOCIATED SUBJECTIVE EFFECT | DEFINITION OF CRITERION | | | | REFERENCES | COMMENTS |
|----------|------------------------------|-------------------------|----------------|-------------|--|----------------------|--|
| | | No. | Name | Symbol | Definition | | |
| | | ii. | Late Strength | G_{late} | $10 \log \frac{\int_{80}^{\infty} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2_{10}(t) dt} = G + 10 \log \frac{10^{c_{80}/10}}{1 + 10^{c_{80}/10}} [dB]$ | Dammerud (2011) [21] | <ul style="list-style-type: none"> ○ G_{early} and G_{late} were found to have better correlation with perceived reverberation than ST_{late} [21] |
| | PERCEIVED SUPPORT | i. | Early Strength | G_{early} | - | - | <ul style="list-style-type: none"> ○ For definition and references see i above for G_{early} ○ Desired Range for Large Orchestra: > 3 dB [27] |
| | | ii. | Late Strength | G_{late} | - | - | <ul style="list-style-type: none"> ○ For definition and references see ii above for G_{late} ○ Desired Range for Large Orchestra: 0 dB -- G_{early} [27] |
| | PERCEIVED BLENDING | i. | Late Strength | G_{late} | - | - | <ul style="list-style-type: none"> ○ For definition and references see ii above for G_{late} |

TABLE 2.1: CLASSIFICATION OF SOME PUBLISHED PHYSICAL CRITERIA OF STAGE ACOUSTICS FOR CONCERT AUDITORIA

| CATEGORY | ASSOCIATED SUBJECTIVE EFFECT | DEFINITION OF CRITERION | | | | REFERENCES | COMMENTS |
|------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------|---------------|--|--|
| | | No. | Name | Symbol | Definition | | |
| 3. DECAY TIME CRITERIA | | | | | | | |
| 3.1. INITIAL DECAY | PERCEIVED REVERBERATION | i. | Early Decay Time | EDT ₁₀ | (0 ~ -10 dB) | Jordan (1968) [32] Eysholdt (1976) [33] | <ul style="list-style-type: none"> ○ Desired Range for Large Orchestra: > 0 dB [27] |
| 3.2. OVERALL DECAY | PERCEIVED REVERBERATION | i. | Classical Reverberation Time | RT | (-5 ~ -35 dB) | Sabine (1922) [34] | <ul style="list-style-type: none"> ○ Desired Range for Large Orchestra: > 1.5 s [27] ○ It is common view that RT is a criteria for audience as well as for stage acoustics ○ Another symbol (T₃₀) |

3 *Experimental design and methods of analysis*

3.1 Selection of physical criteria

Physical criteria of stage acoustics reported in the relevant literature, were first classified (Table 2.1). Criteria were then chosen in the present analysis, so as to be representative of each classified category and easy to measure. Also, for each selected criterion in Table 2.1, there are given optimal values, preferred values and ranges.

3.2 The simulated sound field

Computer simulation of stage geometry is adopted in the present study. This method has the advantage over any other similar method, in that it allows for quick and costs free variability of stage. A limitation of any simulation method is that the complexity of the real sound field cannot fully represented; therefore results from studies using acoustic simulation remain to be confirmed in the real situation. The Odeon Room Acoustics software, (see Appendix A) was employed in the present investigation.

The present virtual measurements on stage, employed only a single source and measuring location respectively. The assumption was made that this is reasonable, as only stages of small size were considered.

Stages of small size accommodate small musical ensembles such as chamber orchestra which use conductors, but also ensembles without conductor, such as jazz ensembles etc. The latter makes the role of stage enclosure important, because this enclosure is called to coordinate the musical sounds in the ensemble between each other.

Acoustical analysis was performed using Odeon 10.1 software package which was released by National Technical University of Denmark (see Appendix A). The geometrical shape of an existing hall, i.e. 'Dimitris Mitropoulos' hall (Figure 3.2.1, Figure 3.2.2) (see Appendix B), which is located in 'MEGARON-THE ATHENS CONCERT HALL' in Athens was simulated in the present study. Figure 3.2.3 and Figure 3.2.4 show the initial basic architectural data of hall's simulated stage.



Figure 3.2.1 Dimitris Mitropoulos hall in Athens.



Figure 3.2.2 Dimitris Mitropoulos hall in Athens.

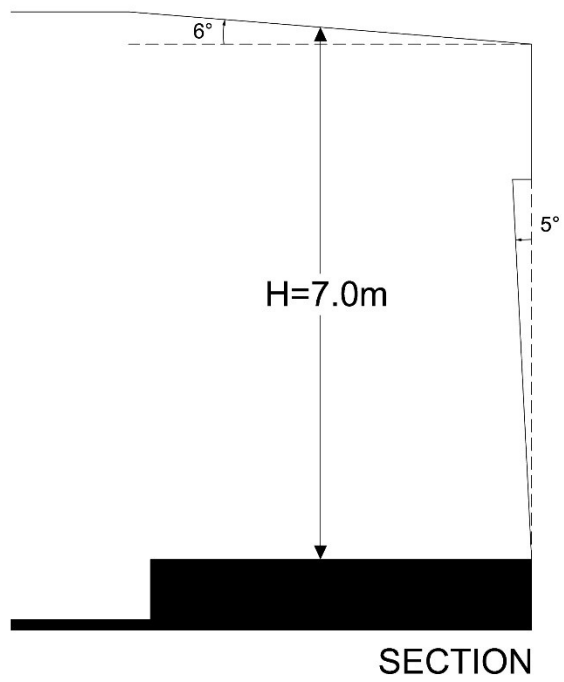


Figure 3.2.3 'Dimitris Mitropoulos' hall. Basic architectural data of stage (section).

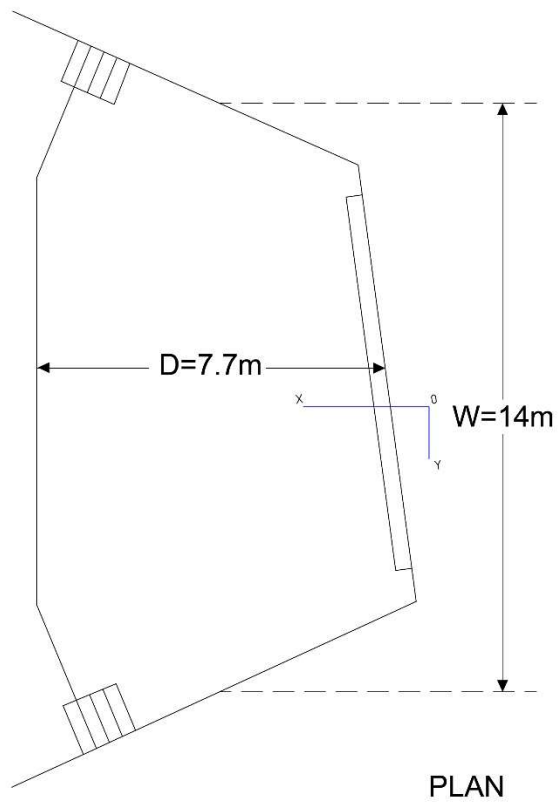


Figure 3.2.4 'Dimitris Mitropoulos' hall. Basic architectural data of stage (plan).

All measurements were made with the receiver 1m away from the source in a single location at a center point of stage, as it is shown in Figure 3.2.5. Most of the acoustical objective parameters that were provided by Odeon software were used. They included ST_{early} (early support), ST_{late} (late support), G (strength), C_{80} (clarity stage), T_{30} (classical reverberation time), and EDT (Early Decay Time). Two additional parameters were also measured. G_{early} (early strength) and G_{late} (late strength) were calculated based on G and C_{80} (Table 2.1). The addition of these specific two parameters was made in order to satisfy the suggestions of Dammerud [9]. That author found that G_{early} and G_{late} had better correlation with the subjective evaluations than Support parameters did. Below, Table 3.2.1 shows the room acoustical parameters and their subjective limen as given by Bork [35] and Bradley [36]. If the difference of two values are less than a subjective limen, then there is no perceivable difference.

| Parameter | Subj. limen |
|------------------|-------------|
| $T_{30} (s)$ | 5 % |
| $EDT (s)$ | 5 % |
| $D_{50} (\%)$ | 5 % |
| $C_{80} (dB)$ | 1 dB |
| $T_s [ms]$ | 10 ms |
| $G (dB)$ | 1 dB |
| $LF (\%)$ | 5 % |

Table 3.2.1 Room acoustical parameters and their subjective limen as given by Bork [35] and Bradley [36].

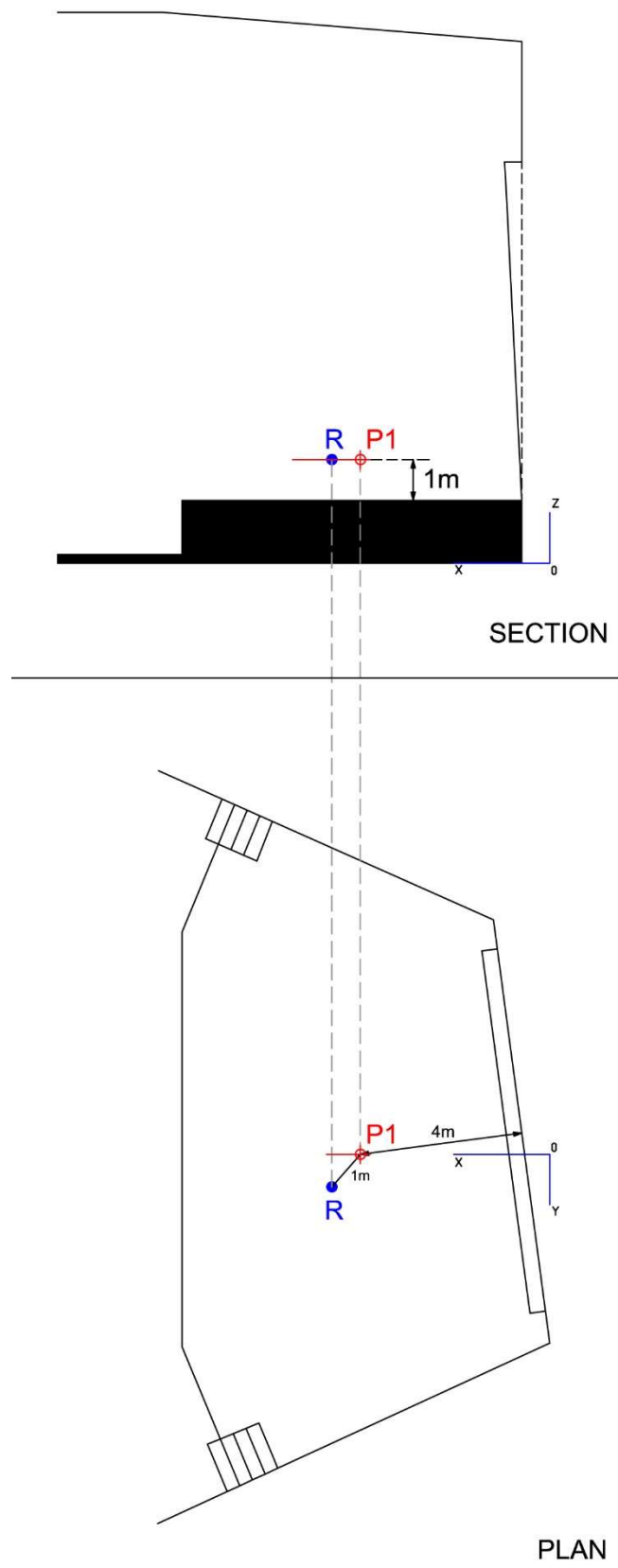


Figure 3.2.5 Source-Receiver's position on stage.

A factor analysis was made in order to describe variability among observed, correlated variables (eight acoustical parameters) in terms of a potentially lower number of unobserved variables called factors. The Principal Component Analysis (PCA), based on data acquired from various transformations on stage showed only two common factors among all the acoustical parameters that mentioned above (see *Appendix C and Appendix D*).

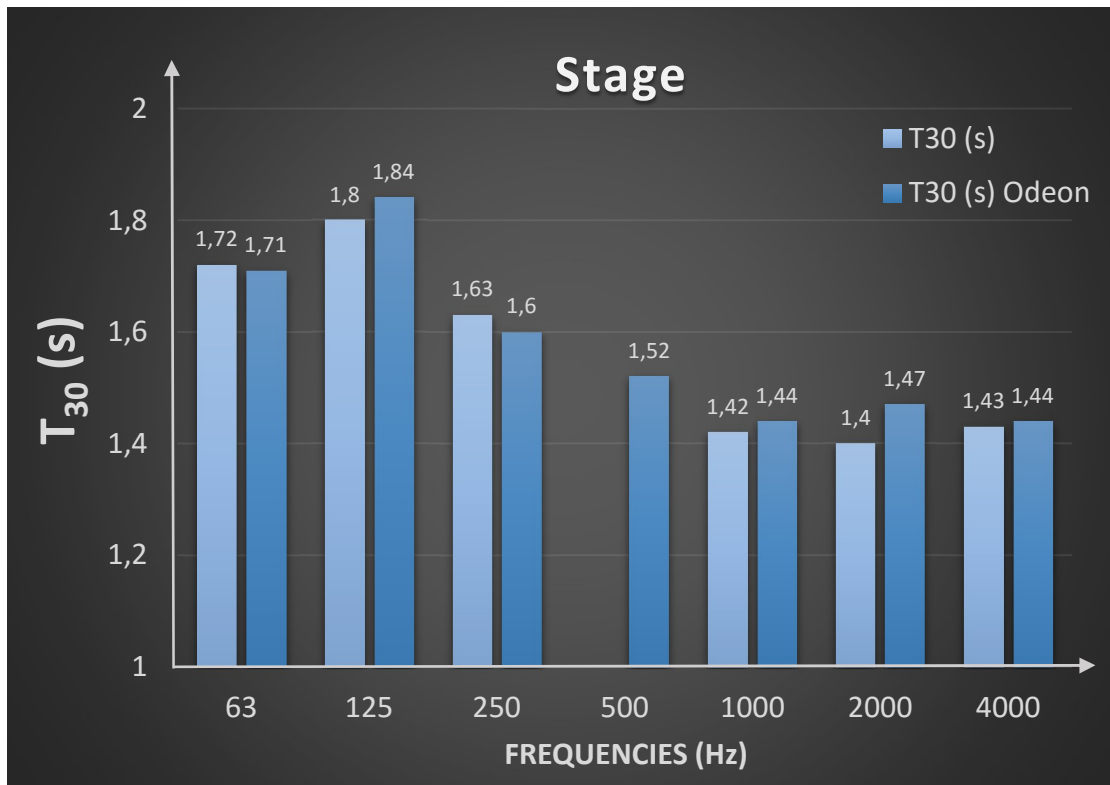
Due to limitation of time, in the present dissertation have been analysed the results of support parameters, ST_{early} and ST_{late} . The choice is reasonable, as these two parameters could describe the two factors (early energy and late energy respectively) that were derived from Principal Components Analysis. For the rest of the acoustical measures see *Appendix E and Appendix F*.

The cut off frequency (Schroeder frequency) above which room acoustic measurements are considered reliable, for the present test auditorium is 45Hz ($f_c = 2000 * \sqrt{T/V}$, where V: volume of the room and T: reverberation time).

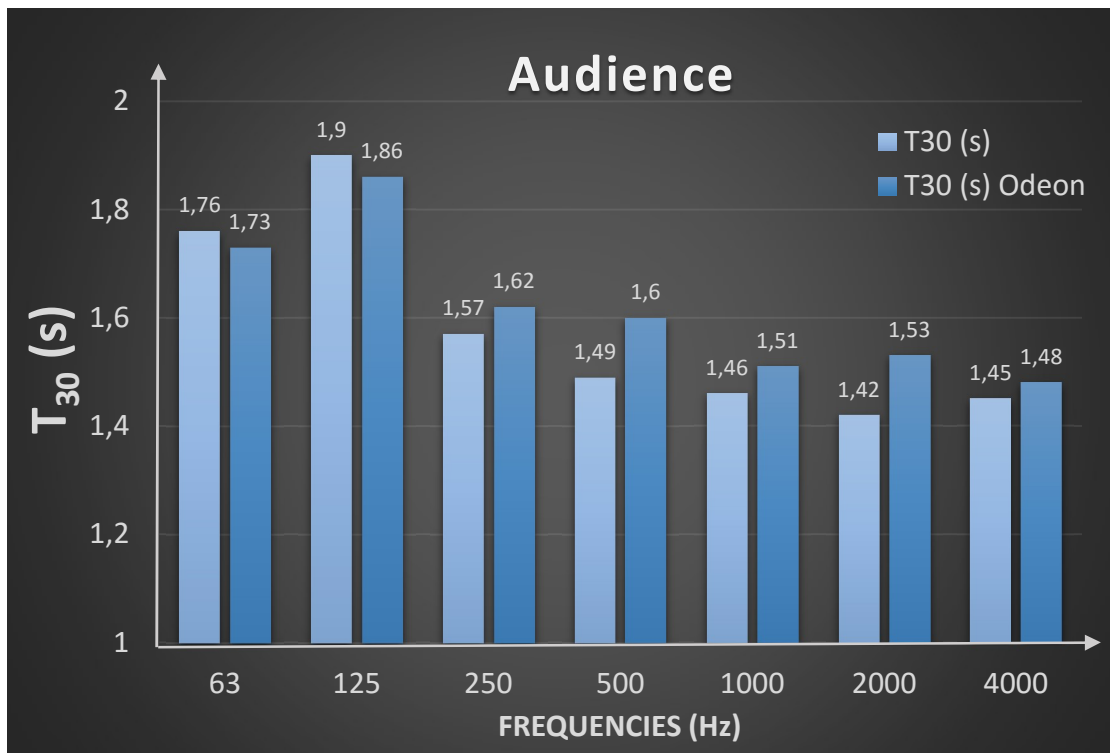
A comparison of the computer simulation to the existing hall was made to confirm the computer simulated modelling of the hall. For the computer model, the scatter of the audience was set to 0.7 as manual of Odeon suggests. All surfaces were plane and relatively large and the study was based on specular reflections. Small amount of diffusion (0.05) was allowed in the simulated sound field.

Good agreements were found between the classical reverberation time (T_{30}) of the computer model and the existing 'Dimitris Mitropoulos' hall on both audience and stage position for the frequency spectrum (63-4000Hz) (*Graph 3.2.1, Graph 3.2.2*).

The effects of five geometrical parameters, namely stage width, stage height, angle of splayed side walls, canopy tilt and tilt of stage back wall were investigated in the present dissertation. The transformations that made in each geometrical parameter in the simulated model are shown in Figures 3.2.6, 3.2.7, 3.2.8, 3.2.9, 3.2.10, 3.2.11, 3.2.12, 3.2.13, 3.2.14 and 3.2.15. The results are presented in *section* The key findings of the undertaken research were summarized in the last section of Conclusion.



Graph 3.2.1 Measurements T30 vs Frequency spectrum (63-4000Hz) on stage position. Comparing the existing hall to the computer model.



Graph 3.2.2 Measurements T30 vs Frequency spectrum (63-4000Hz) on audience position. Comparing the existing hall to the computer model.

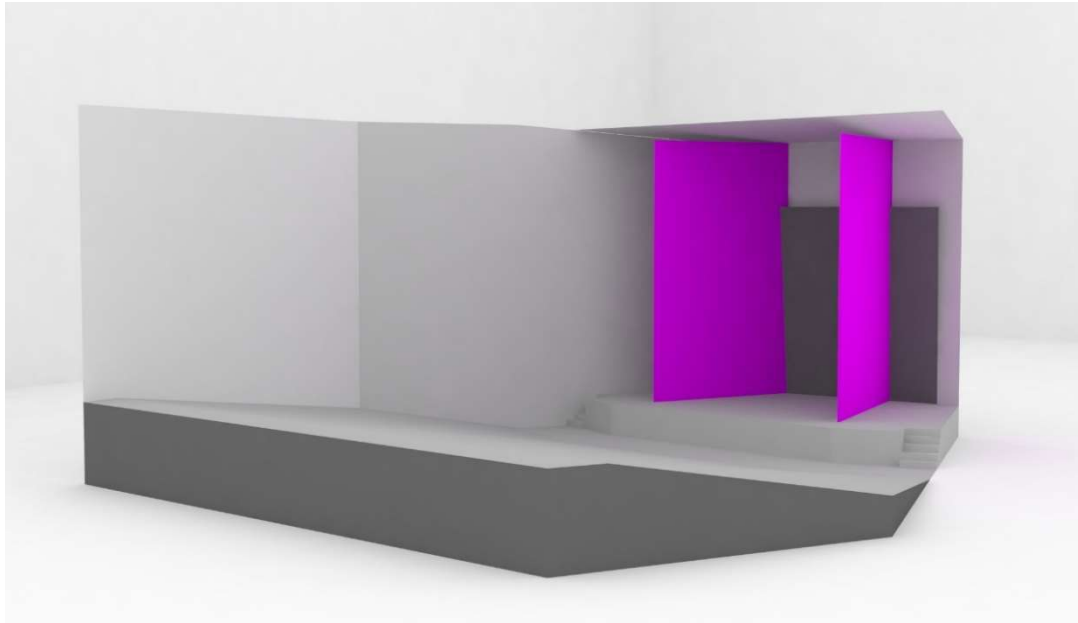


Figure 3.2.6 Transformations on stage width (3D Model).

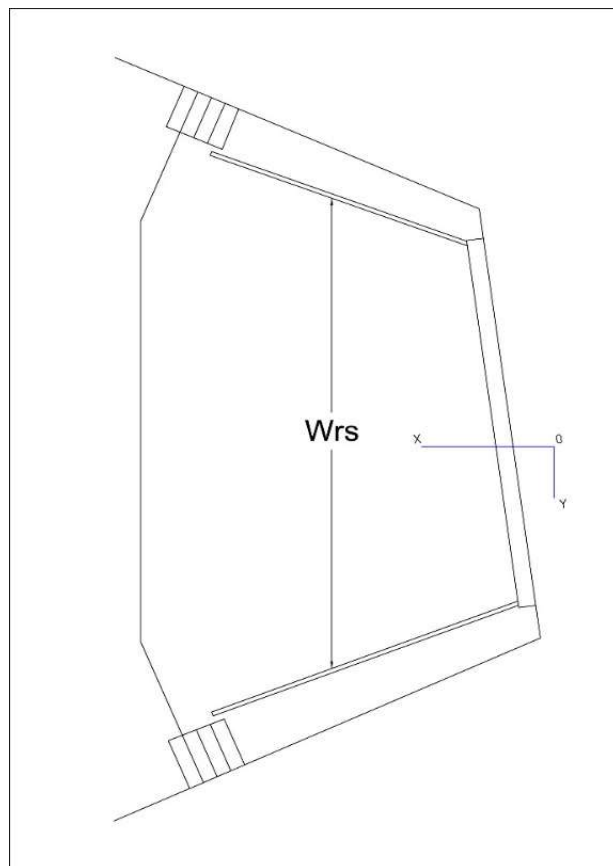


Figure 3.2.7 Transformations on stage width (Plan). Stage width (W_{rs}) was set to 6m, 8m, 10m, 12m and 14m.

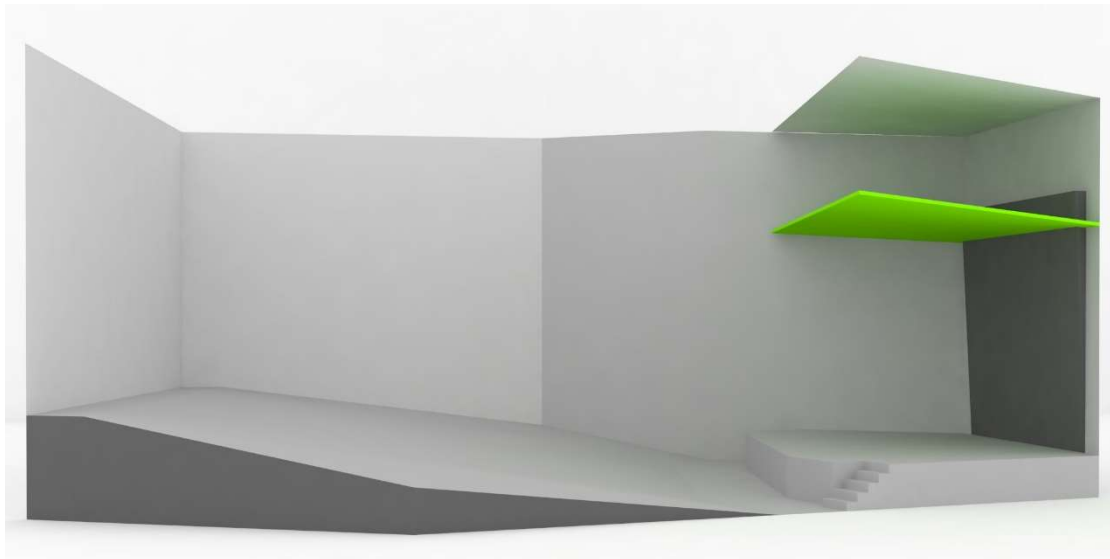


Figure 3.2.8 Transformations on stage height (3D Model).

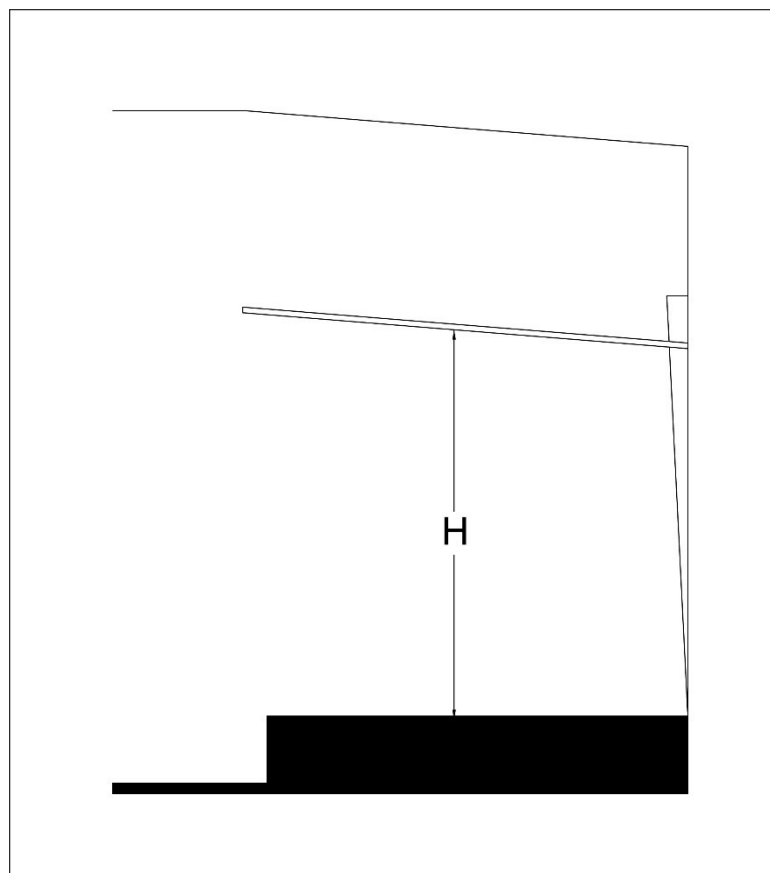


Figure 3.2.9 Transformations on stage height (Section). Stage height (H) was set to 3m, 4m, 5m, 6m and 7m.

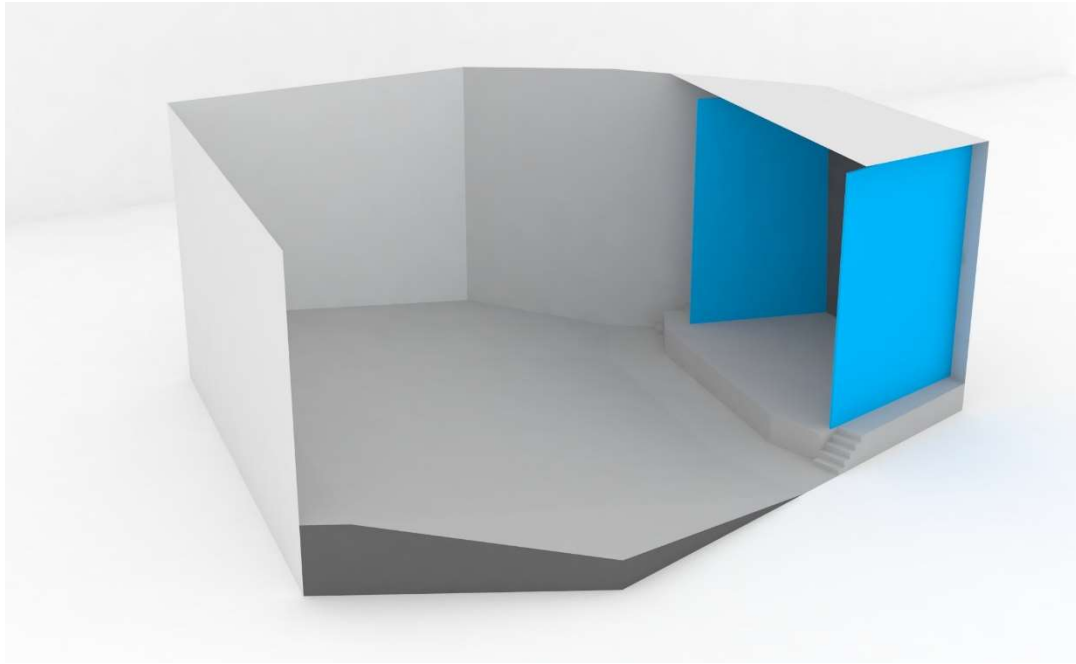


Figure 3.2.10 Transformations on angle of splayed side walls (3D Model).

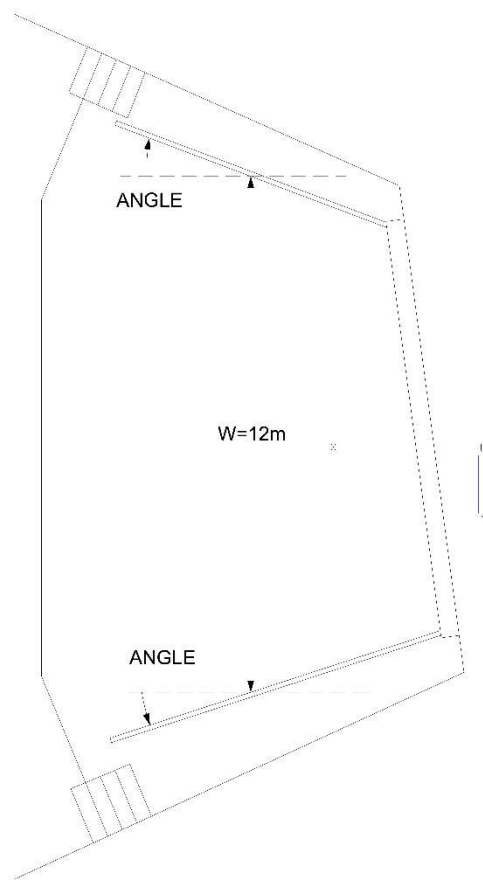


Figure 3.2.11 Transformations on angle of splayed side walls (Plan). Angle of splayed side walls (Angle) was set to 35°, 24°, 15°, 0°, -15° and -25°.

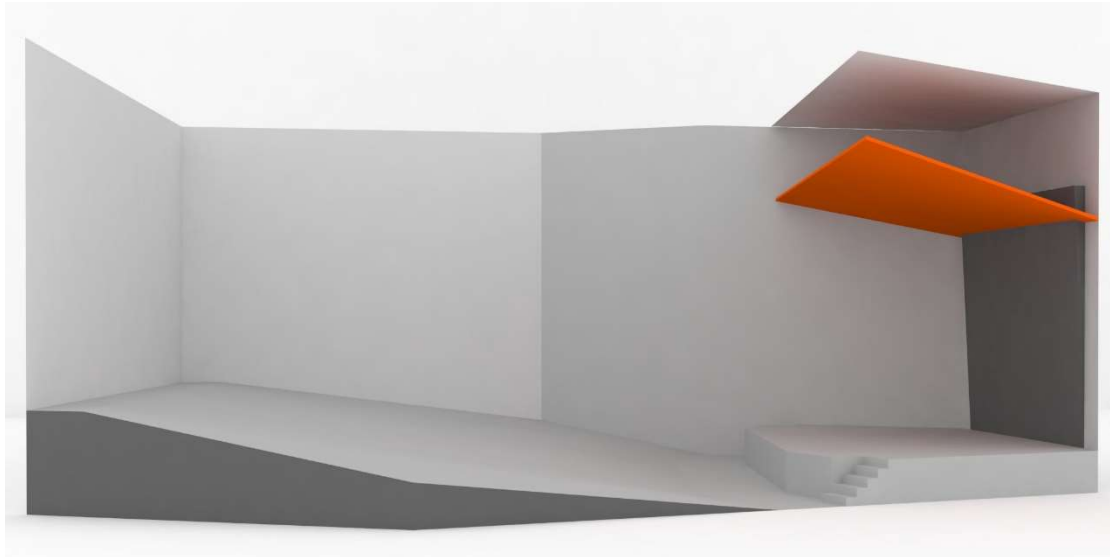


Figure 3.2.12 Transformations on canopy tilt (3D Model).

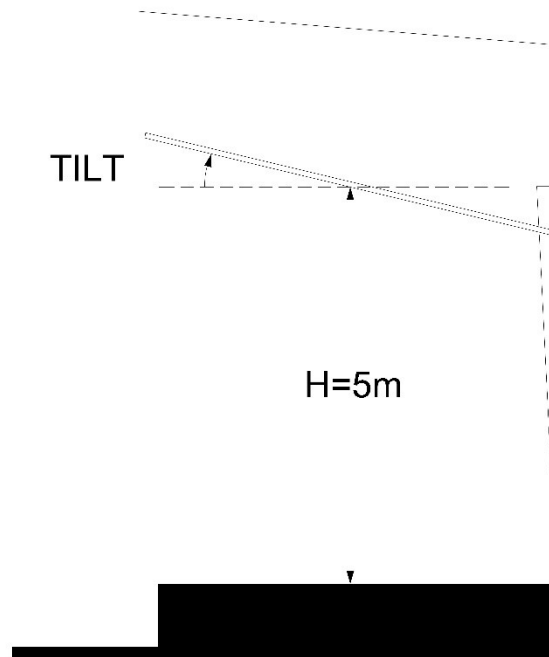


Figure 3.2.13 Transformations on canopy tilt (Section). Canopy tilt was set to 20° , 15° , 10° , 0° , -10° and -15° .

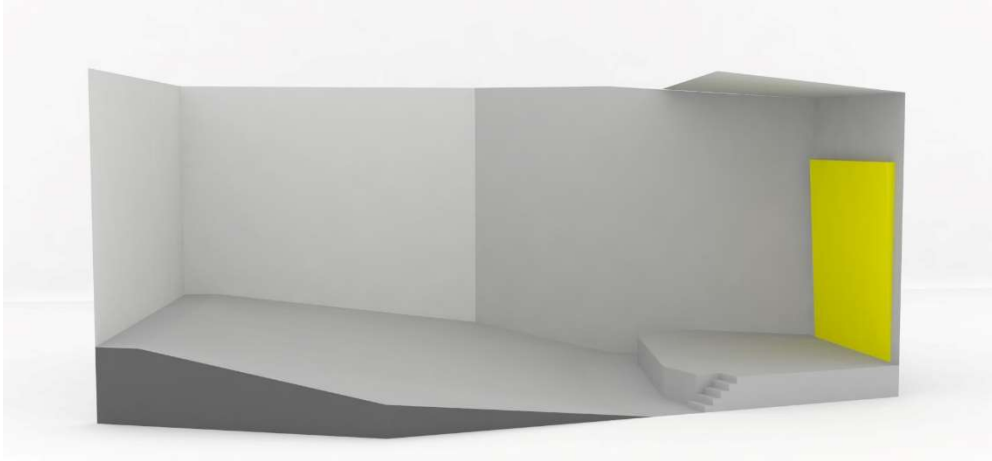


Figure 3.2.14 Transformations on tilt of back wall (3D Model)

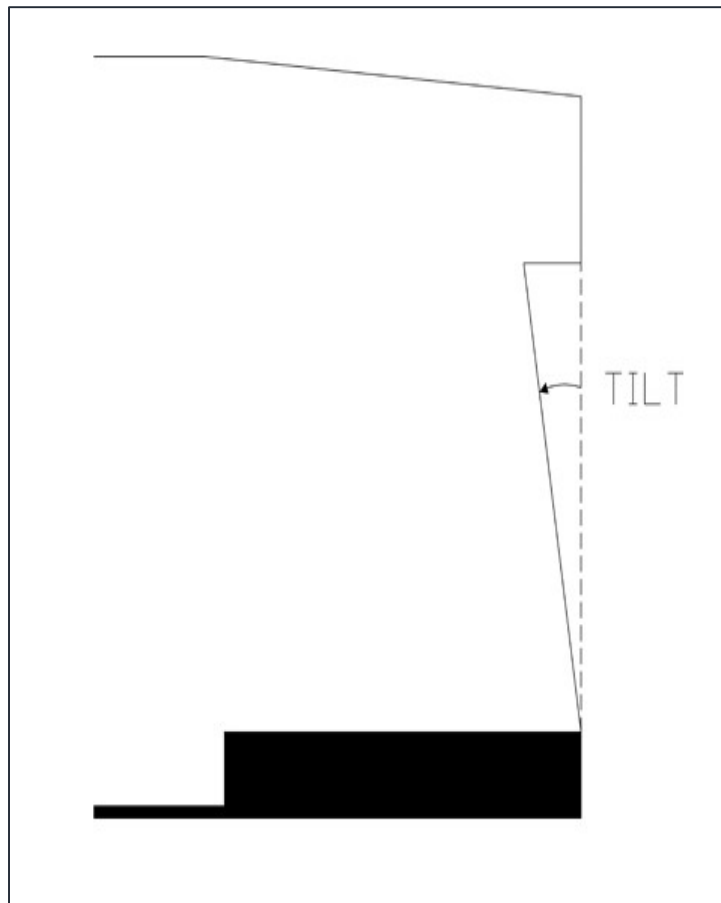
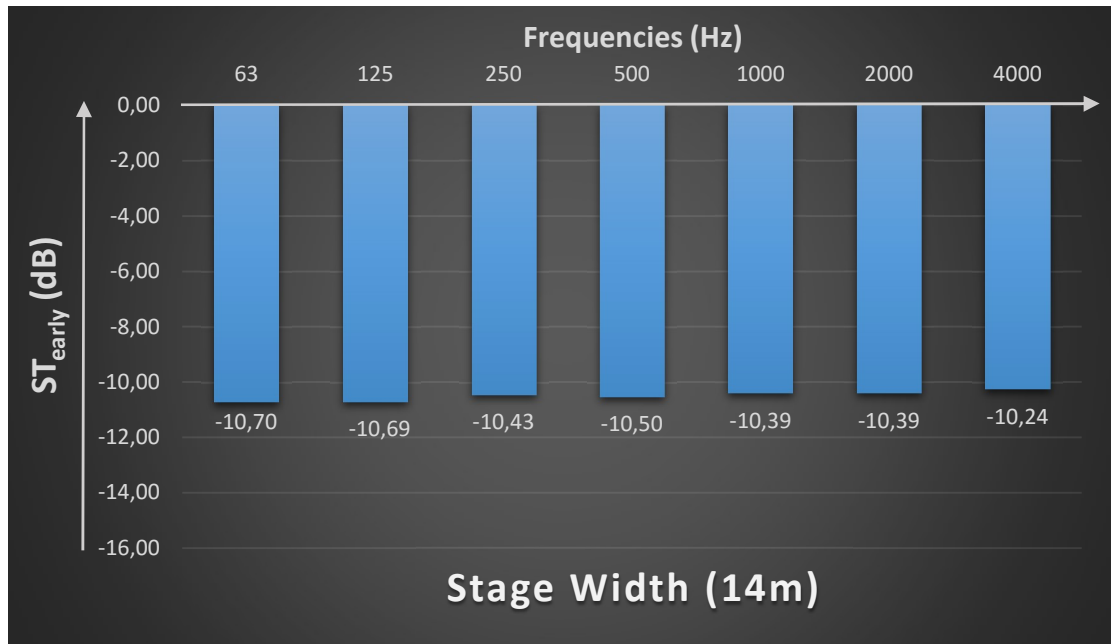


Figure 3.2.15 Transformations on tilt of back wall (Section). Tilt of back wall was set to 30° , 20° , 10° , 5° , 0° , -10° , -20° and -30° .

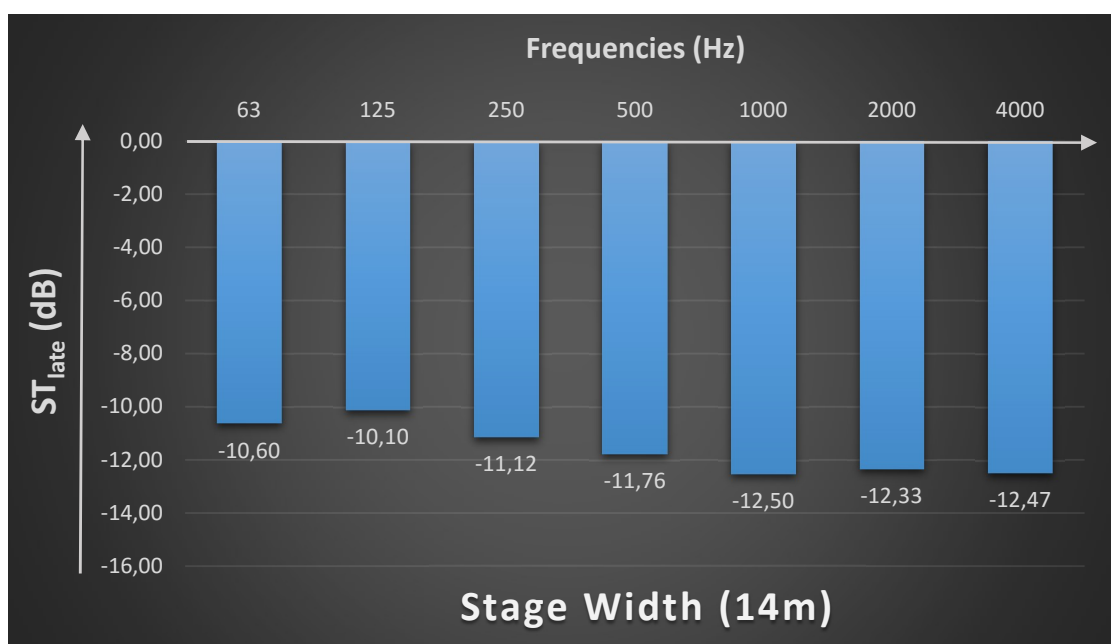
4 Results

4.1 Stage Width

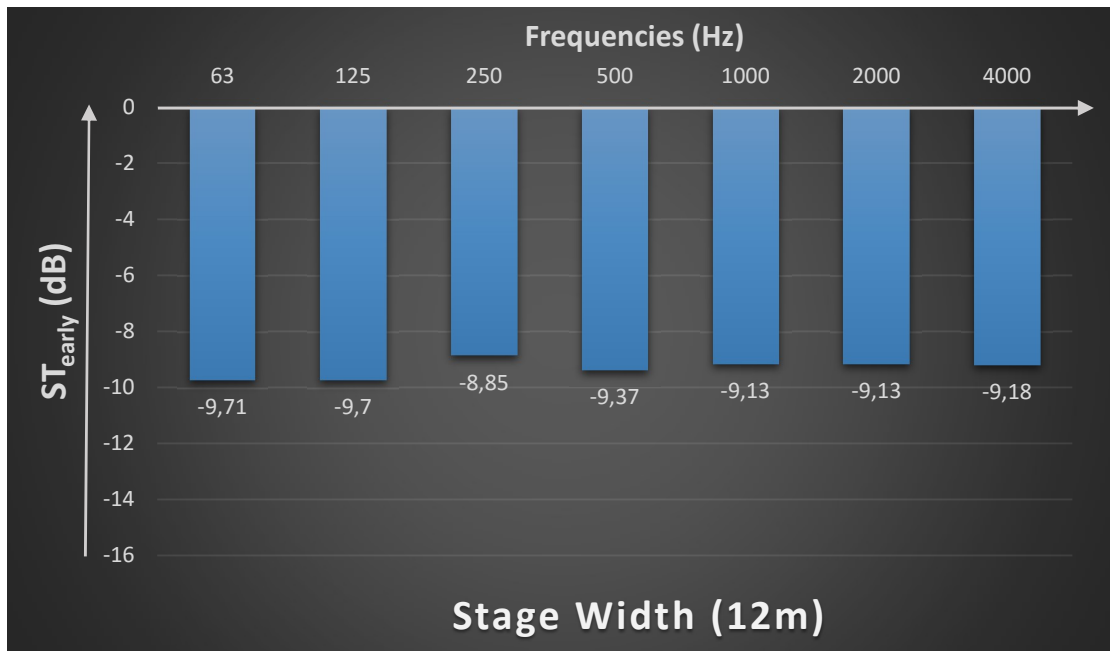
The results of ST_{early} and ST_{late} among the transformations on stage width in the frequency spectrum (63-4000Hz) are shown in Graphs 4.1.1 – 4.1.10 below.



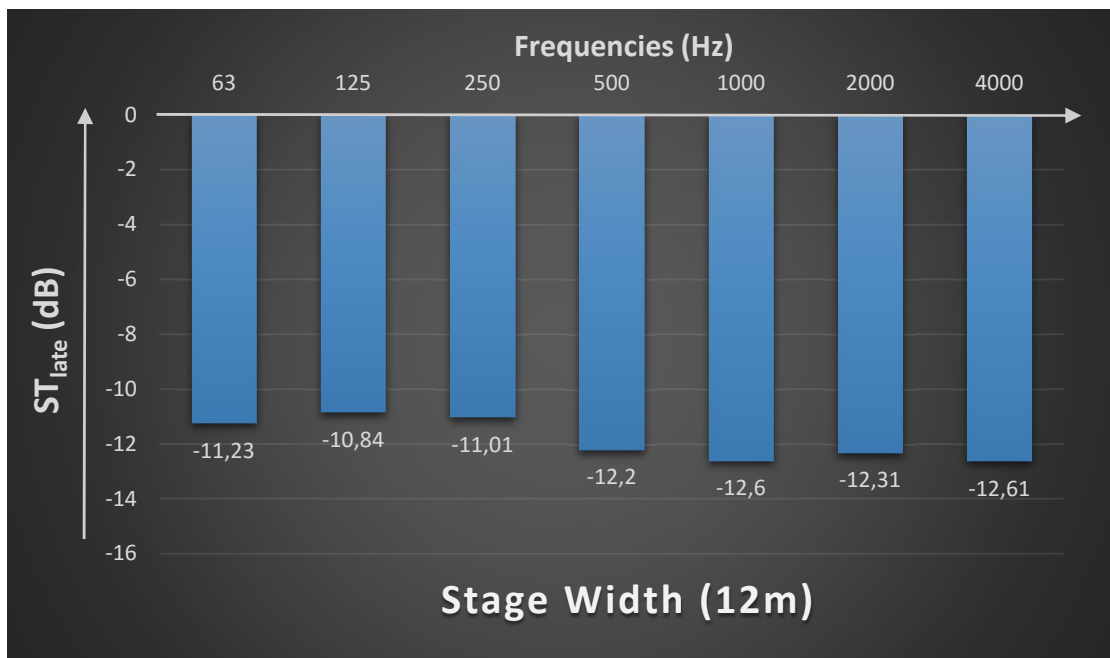
Graph 4.1.1 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the stage width was set to 14m.



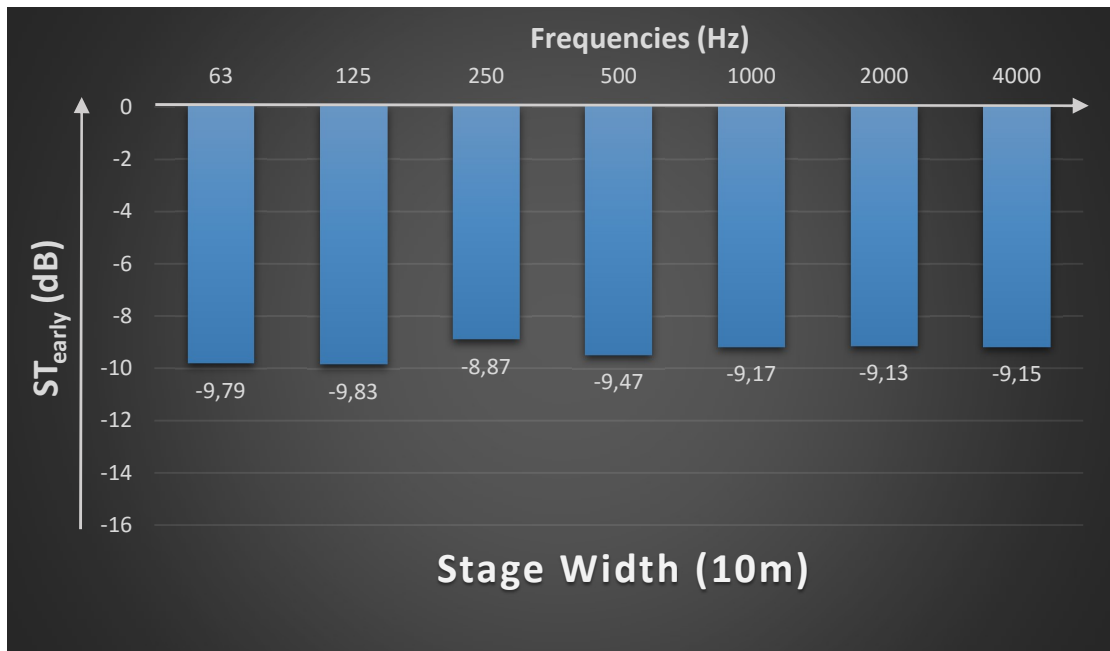
Graph 4.1.2 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the stage width was set to 14m.



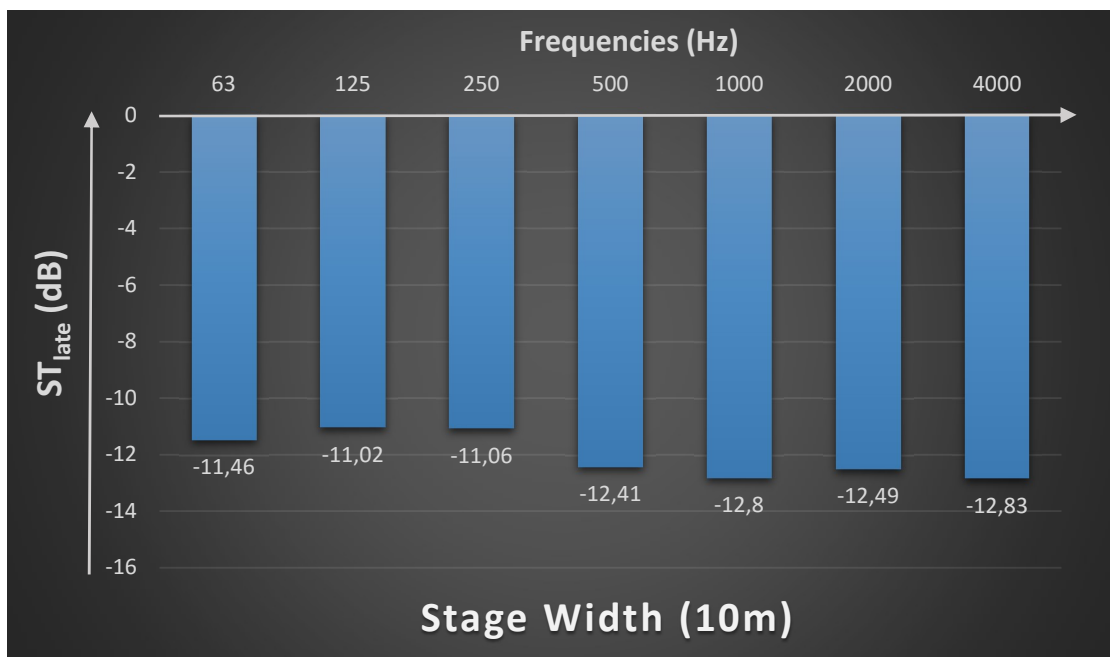
Graph 4.1.3 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the stage width was set to 12m.



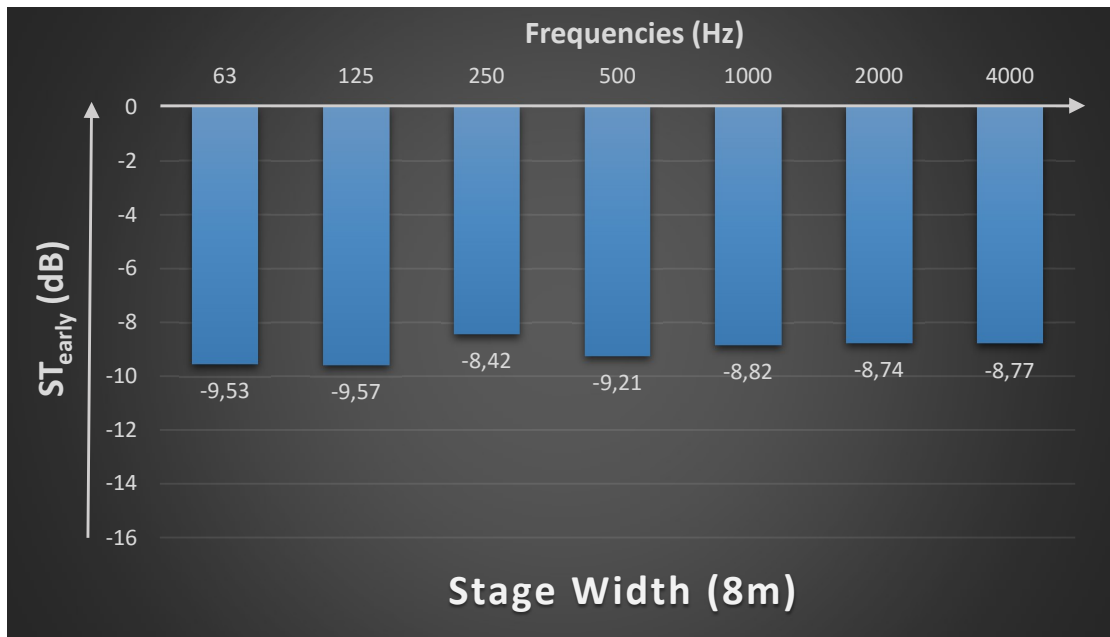
Graph 4.1.4 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the stage width was set to 12m.



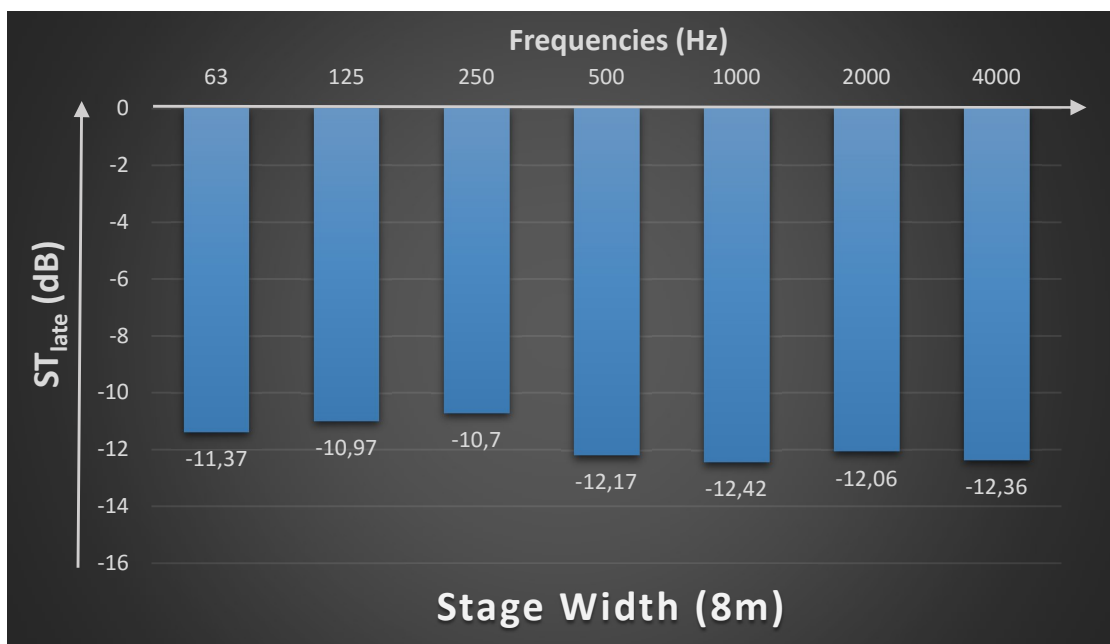
Graph 4.1.5 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the stage width was set to 10m.



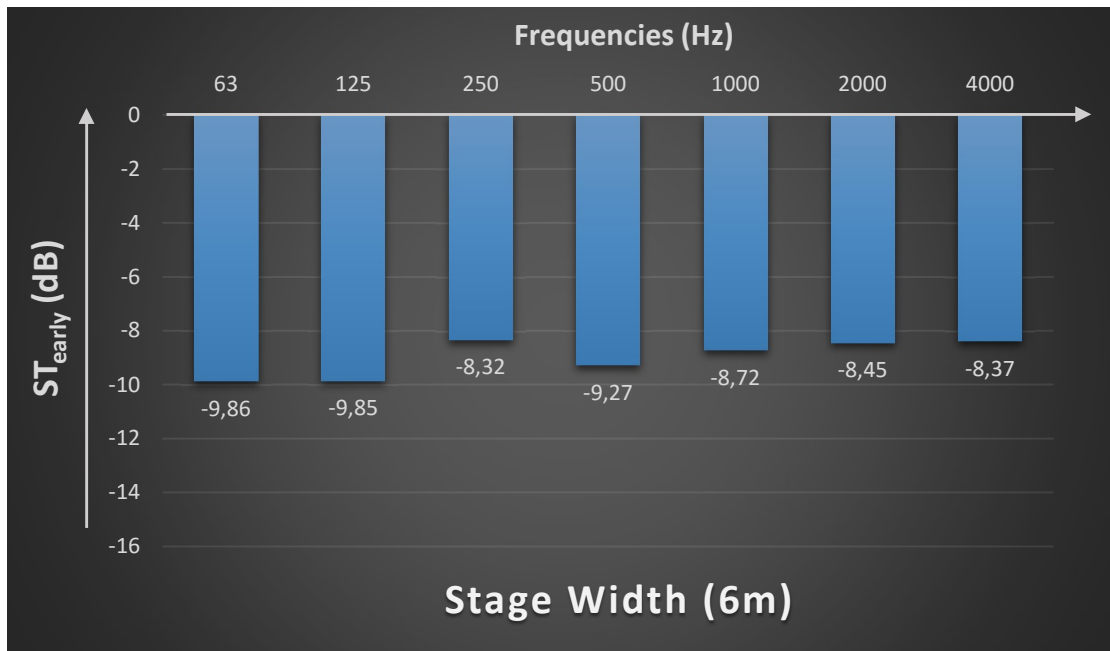
Graph 4.1.6 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the stage width was set to 10m.



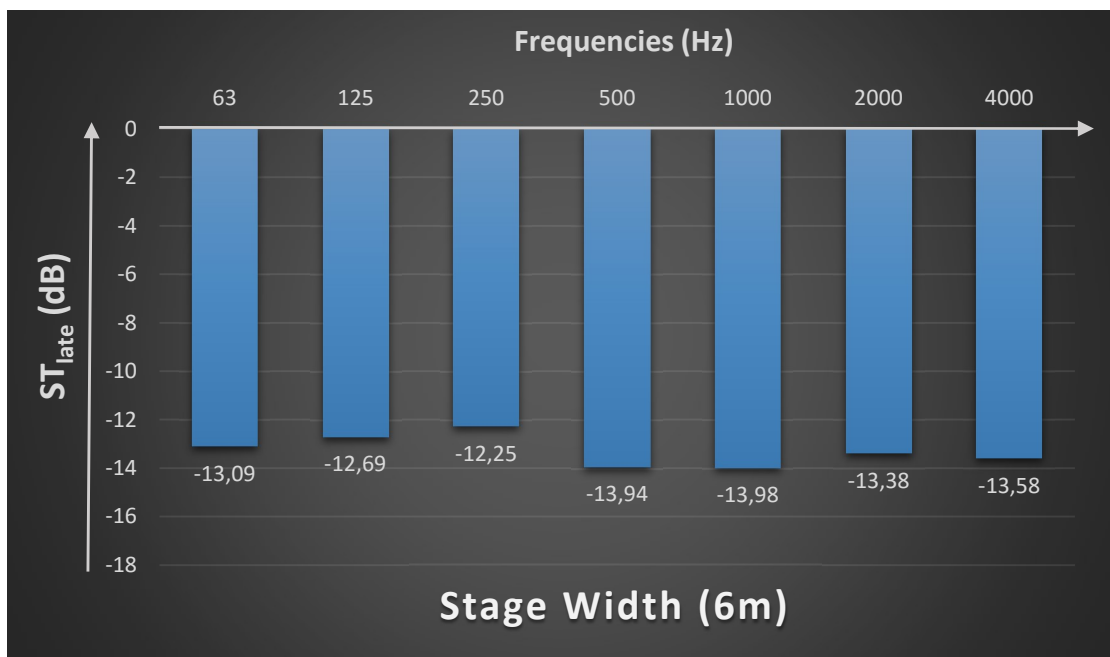
Graph 4.1.7 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the stage width was set to 8m.



Graph 4.1.8 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the stage width was set to 8m.



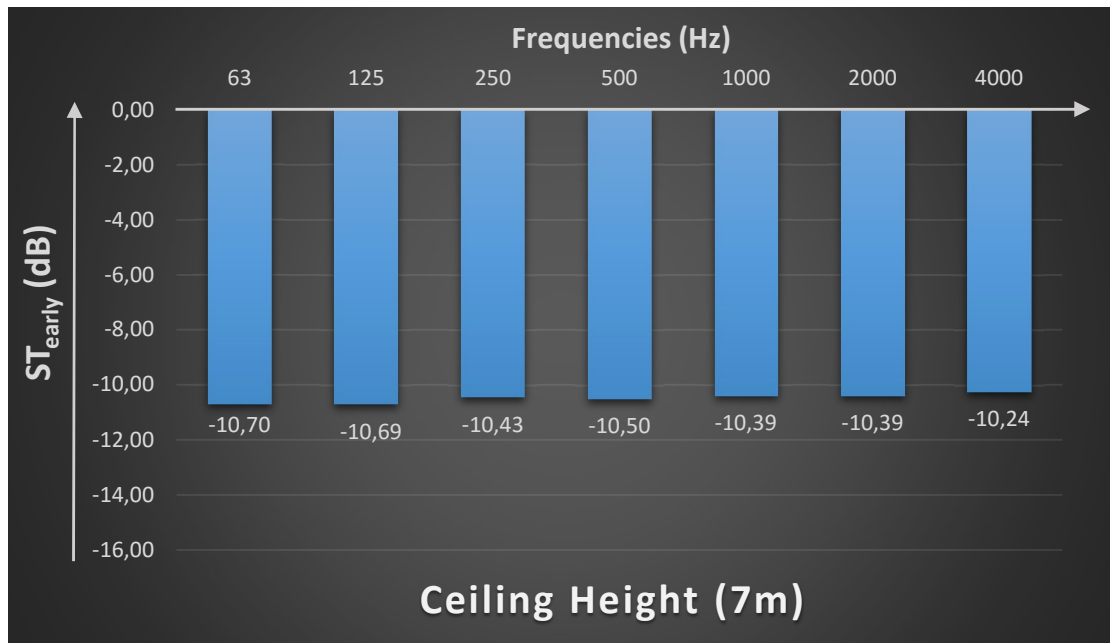
Graph 4.1.9 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the stage width was set to 6m.



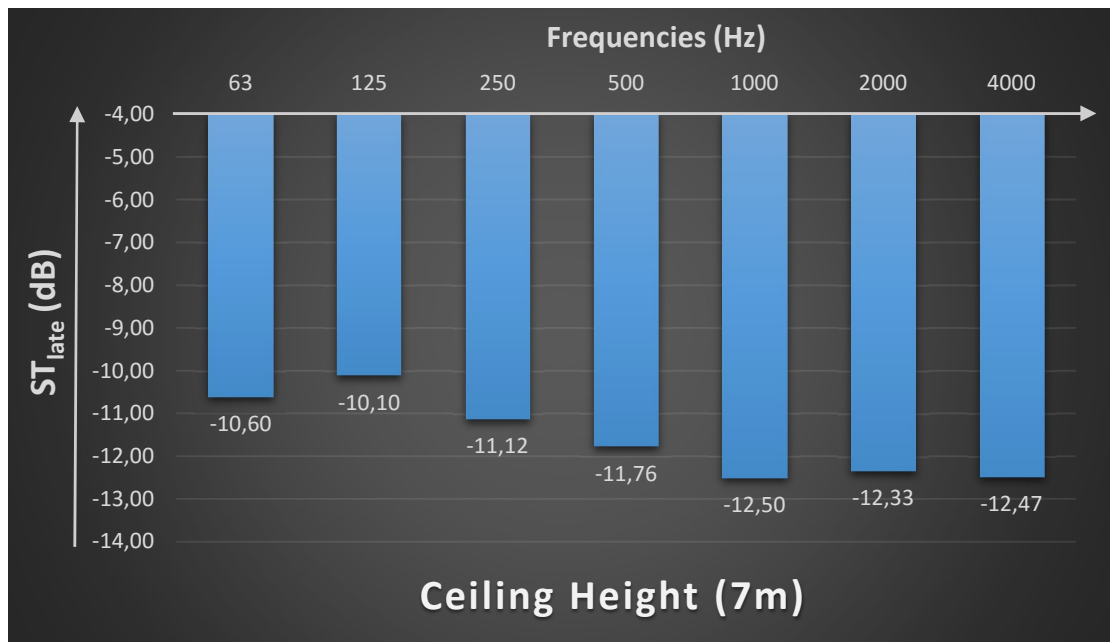
Graph 4.1.10 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the stage width was set to 6m.

4.2 Ceiling height

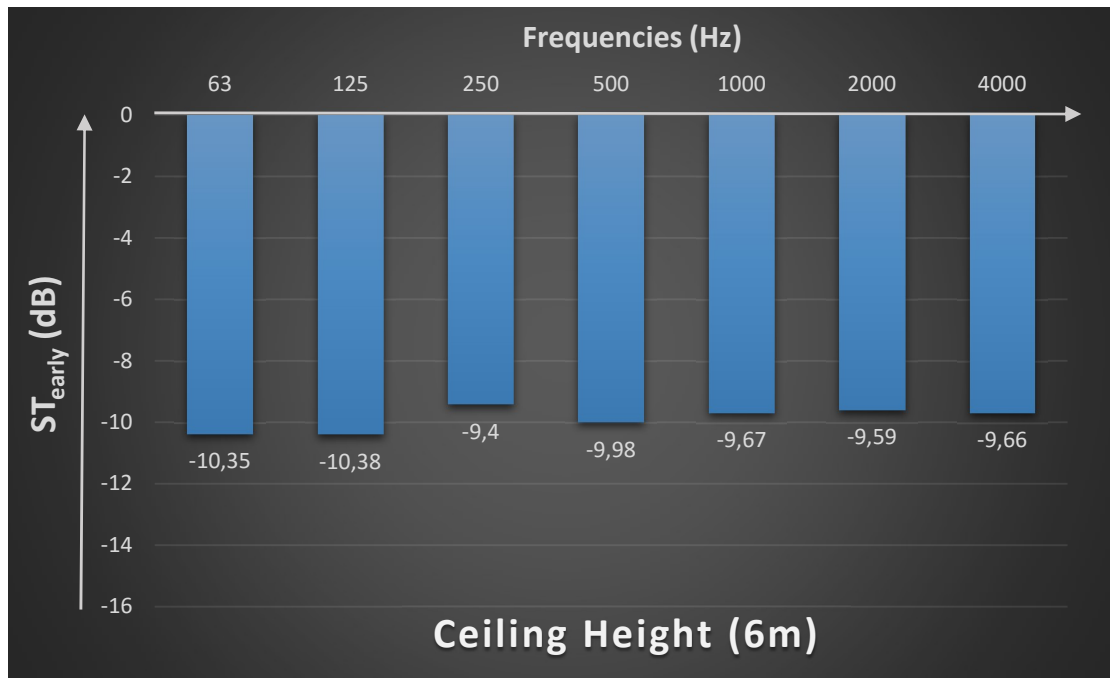
The results of ST_{early} and ST_{late} among the transformations on ceiling height above the stage in the frequency spectrum (63-4000Hz) are shown in Graphs 4.2.1 – 4.2.10 below.



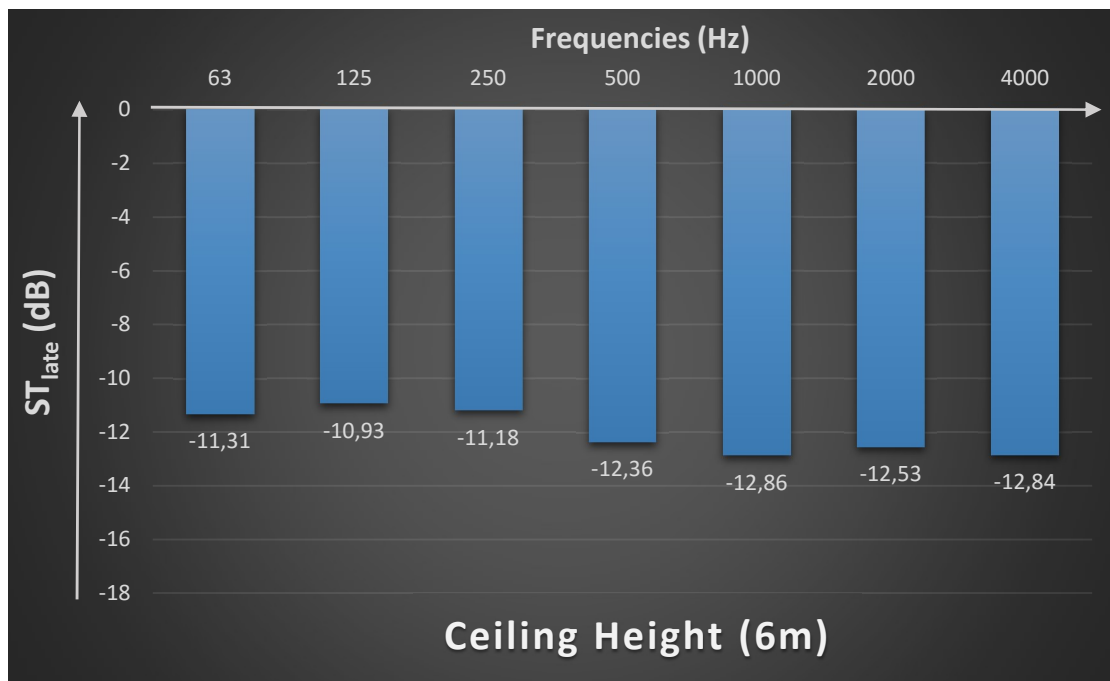
Graph 4.2.1 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the ceiling height was set to 7m.



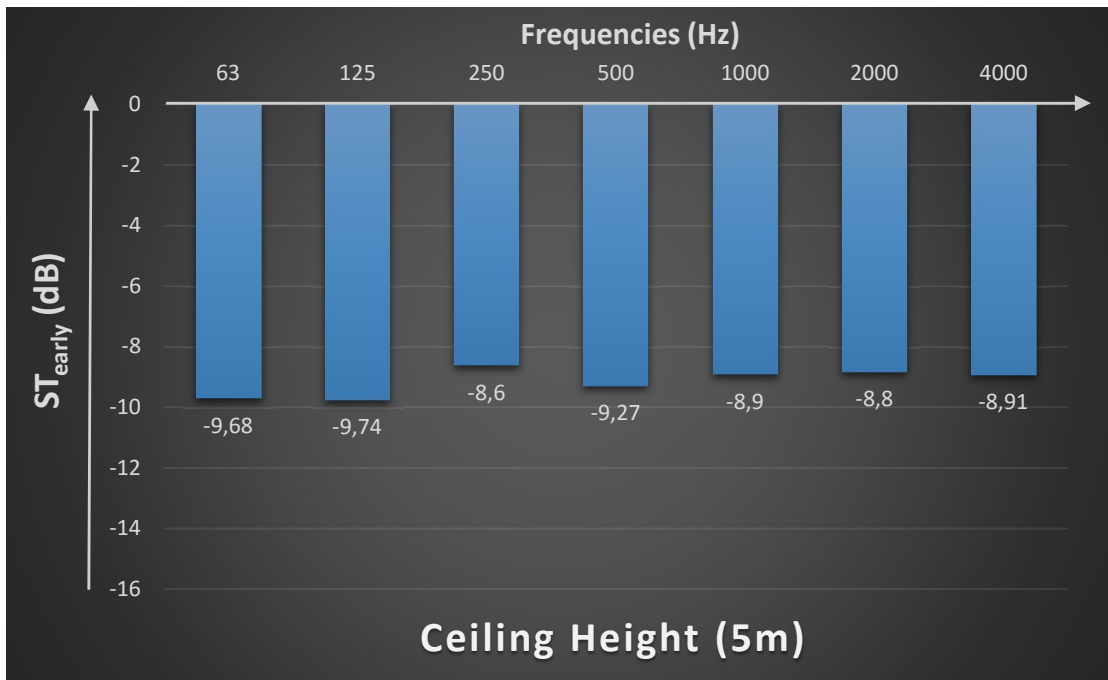
Graph 4.2.2 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the ceiling height was set to 7m.



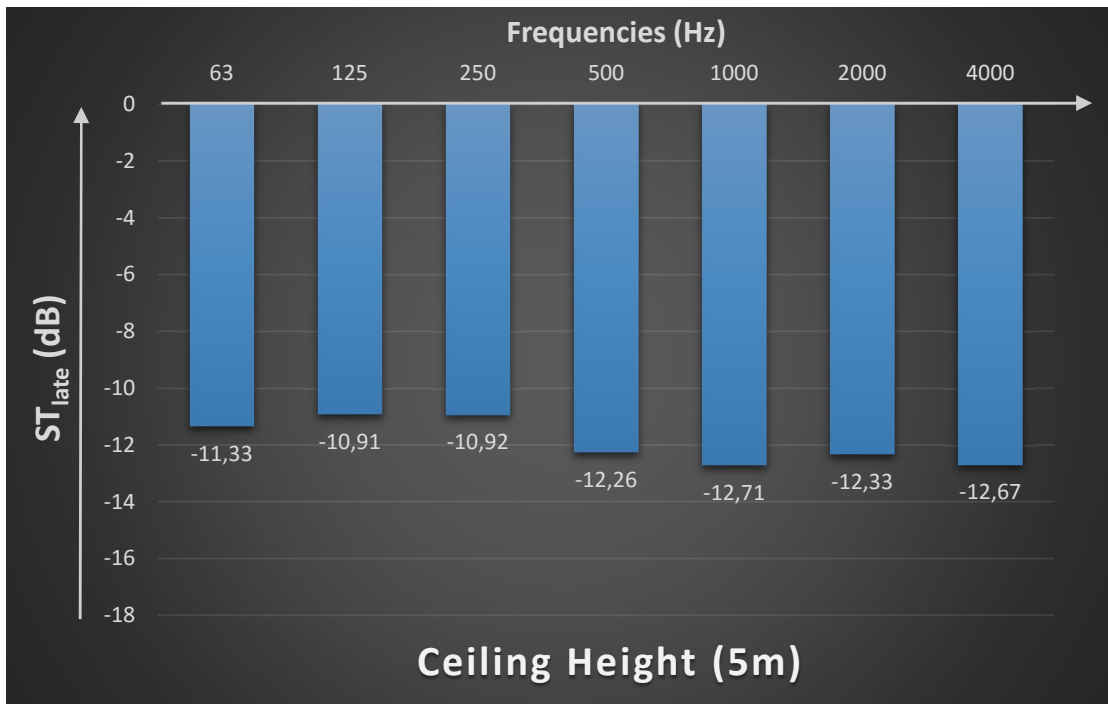
Graph 4.2.3 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the ceiling height was set to 6m.



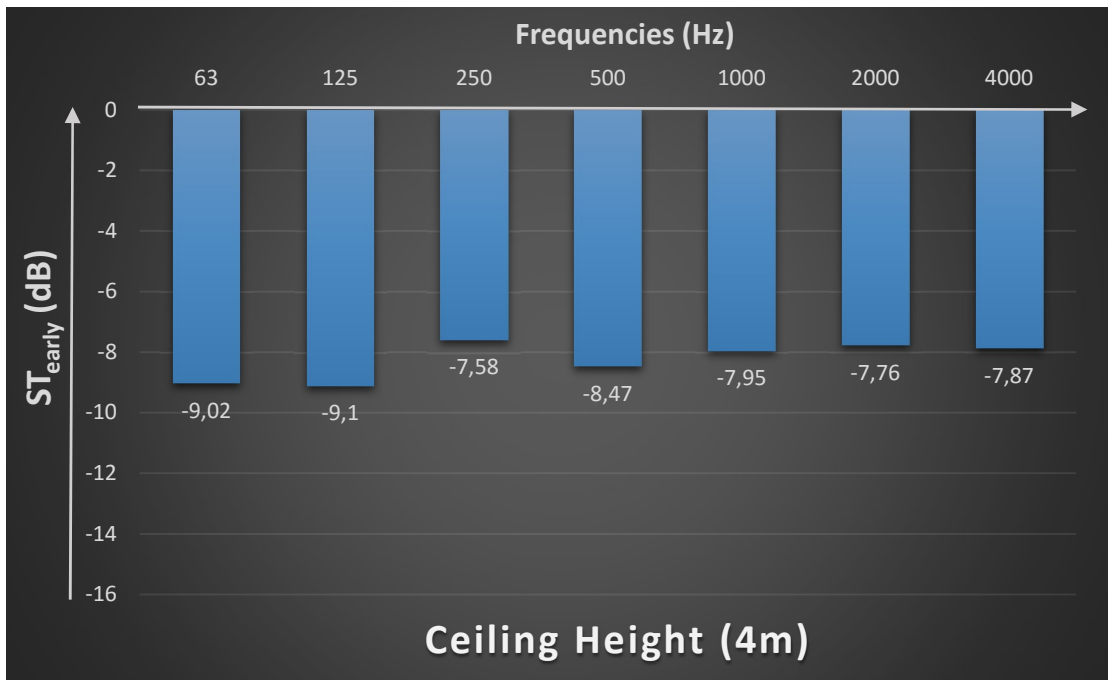
Graph 4.2.4 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the ceiling height was set to 6m.



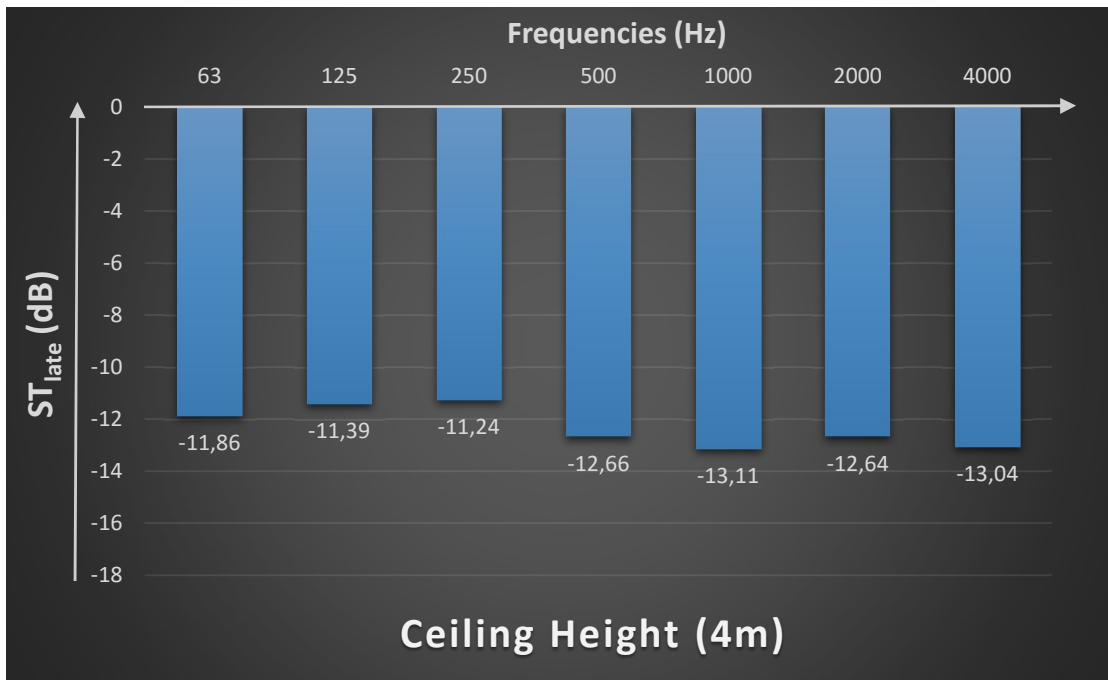
Graph 4.2.5 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the ceiling height was set to 5m.



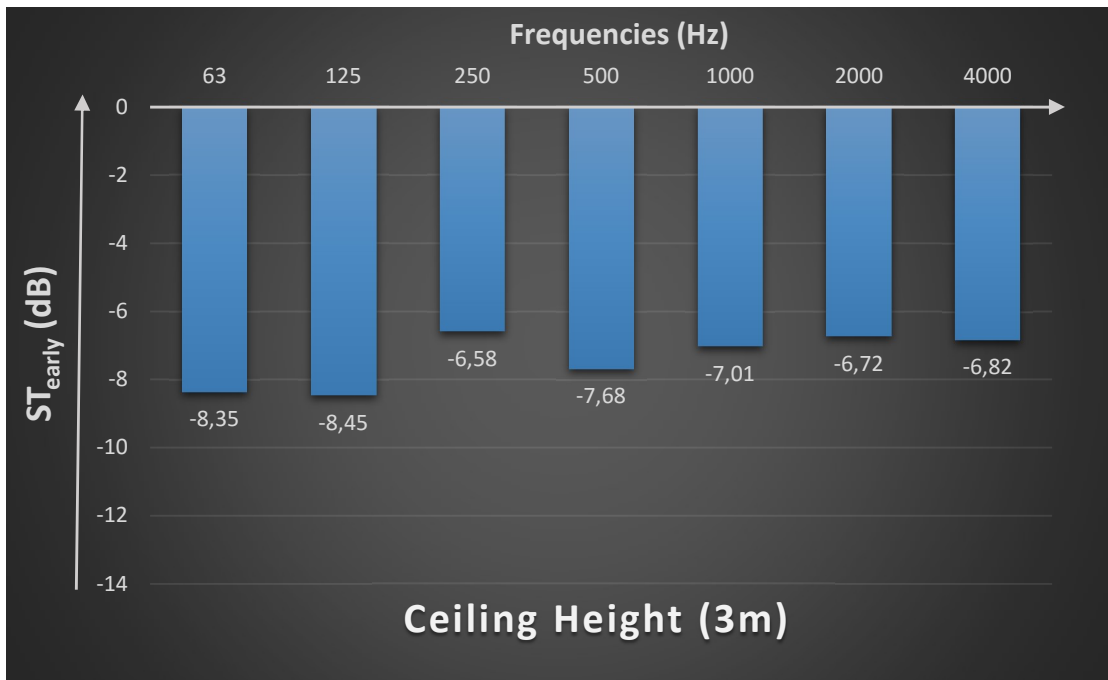
Graph 4.2.6 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the ceiling height was set to 5m.



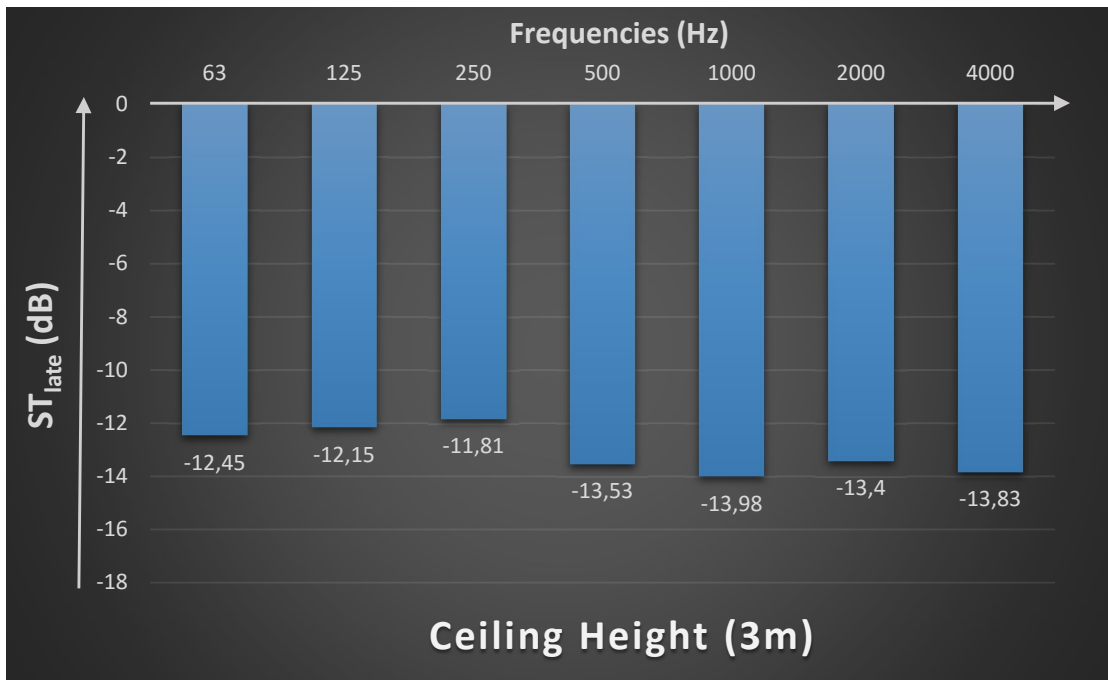
Graph 4.2.7 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the ceiling height was set to 4m.



Graph 4.2.8 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the ceiling height was set to 4m.



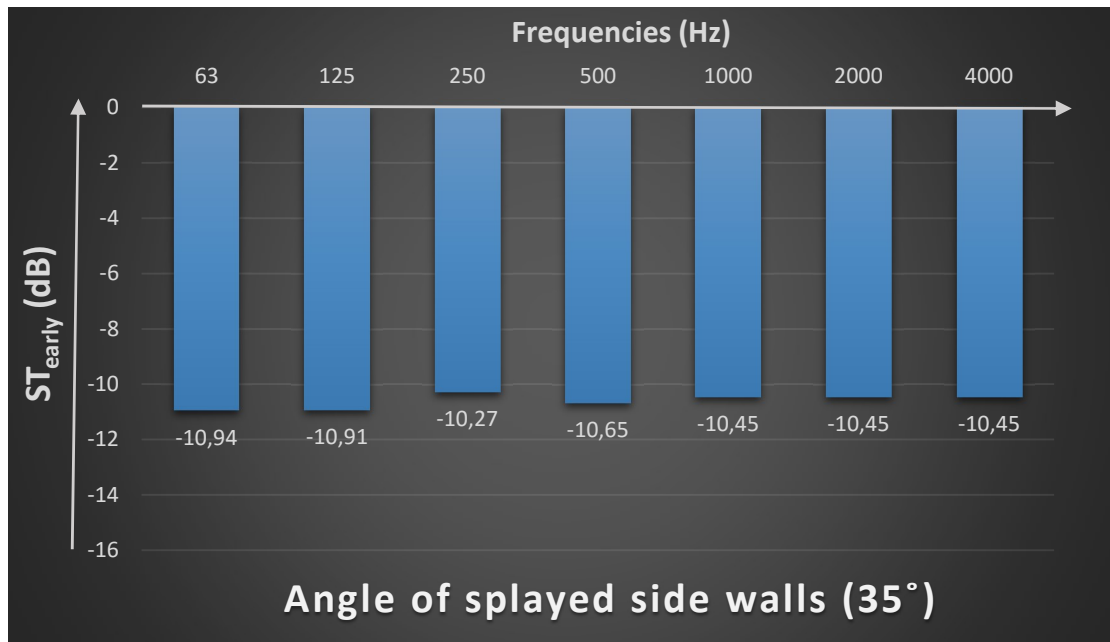
Graph 4.2.9 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the ceiling height was set to 3m.



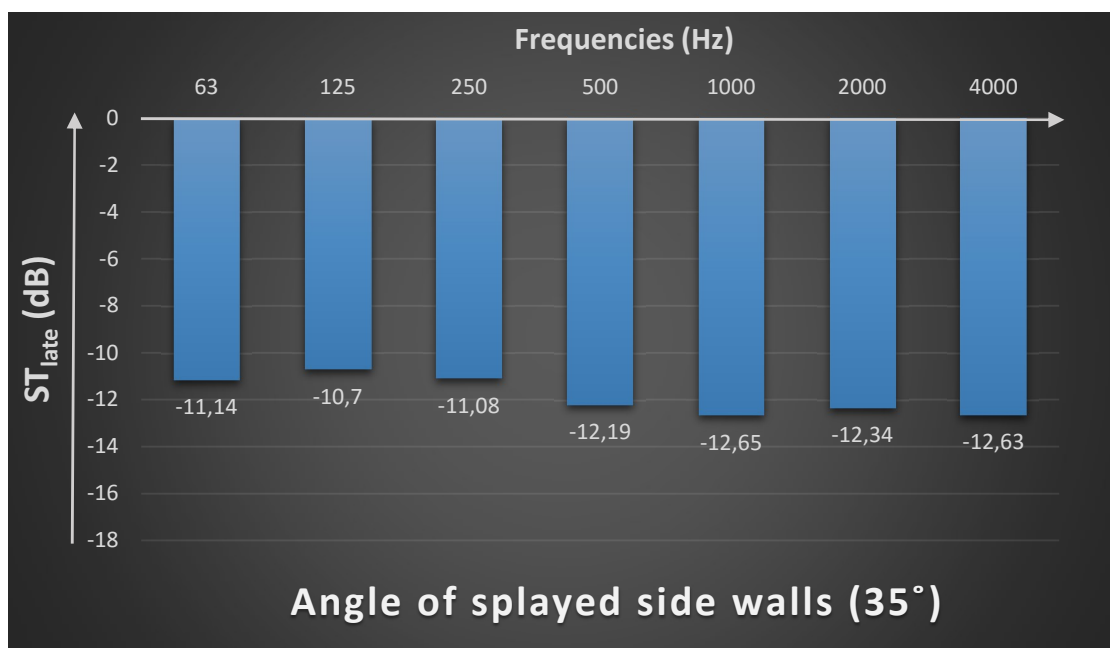
Graph 4.2.10 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the ceiling height was set to 3m.

4.3 Angle of splayed side walls

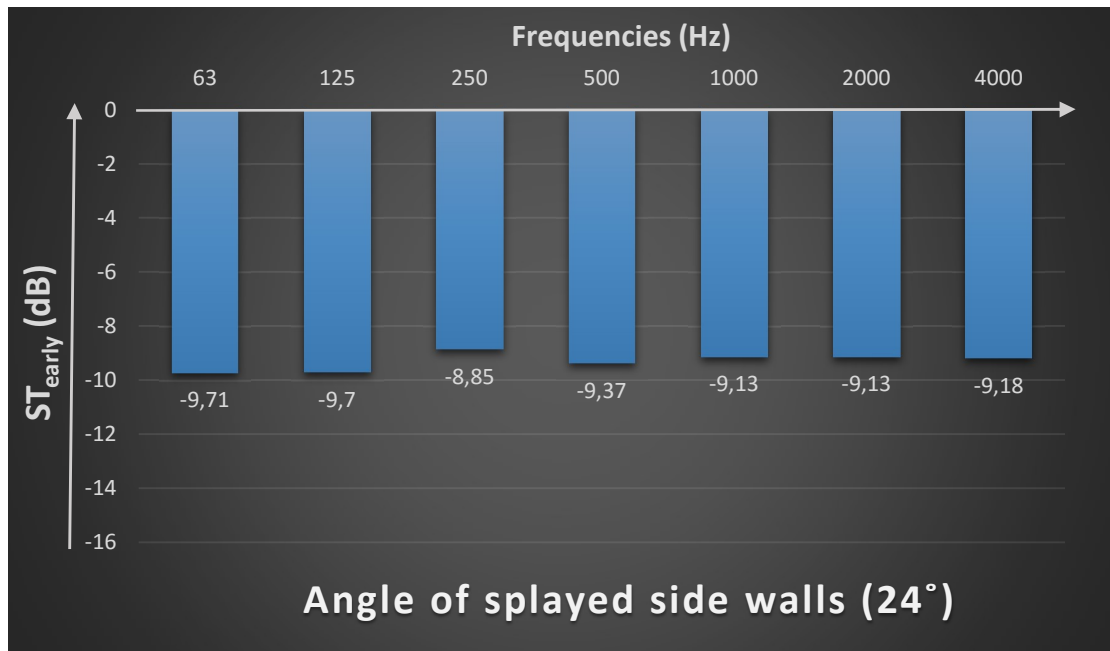
The results of ST_{early} and ST_{late} among the transformations on angle of splayed side walls in the frequency spectrum (63-4000Hz) are shown in Graphs 4.3.1 – 4.3.12 below.



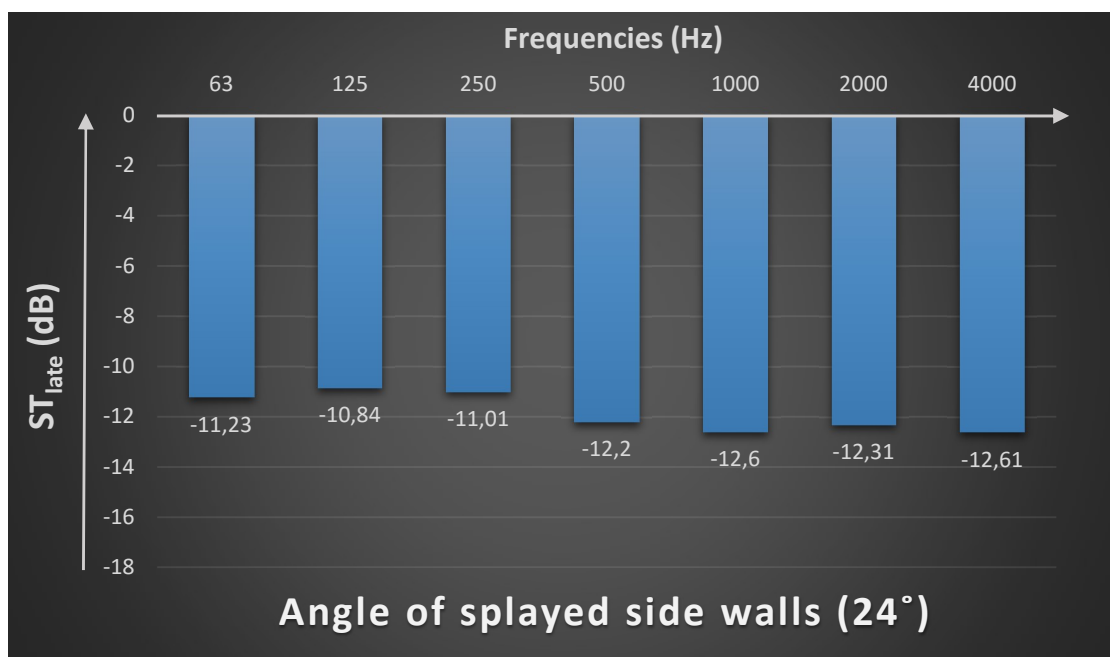
Graph 4.3.1 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to 35°.



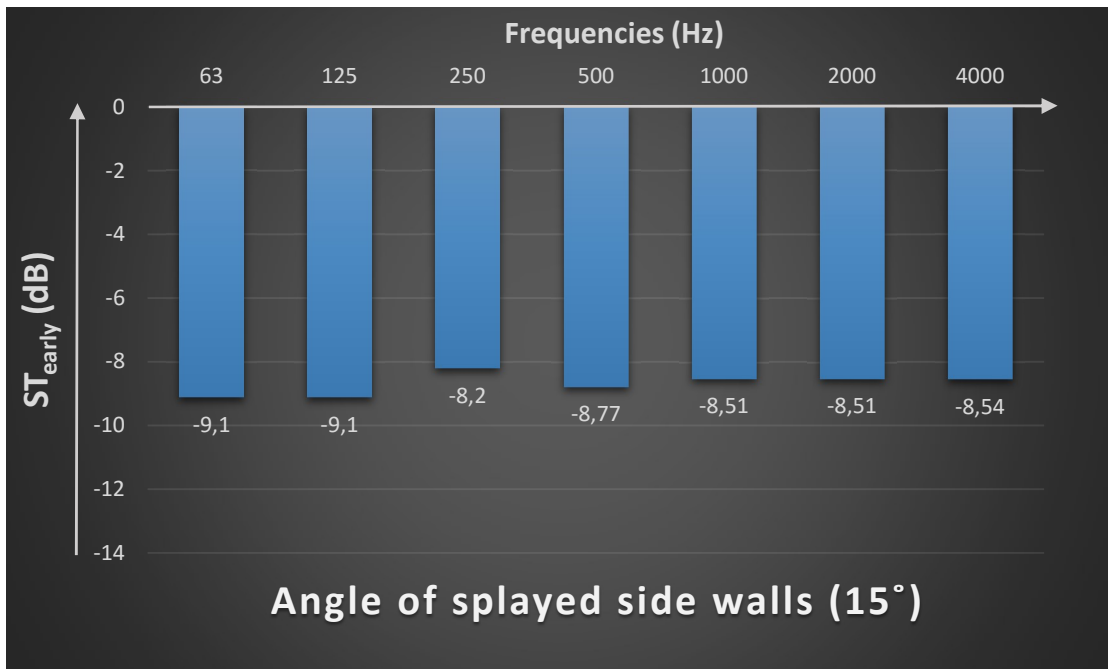
Graph 4.3.2 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to 35°.



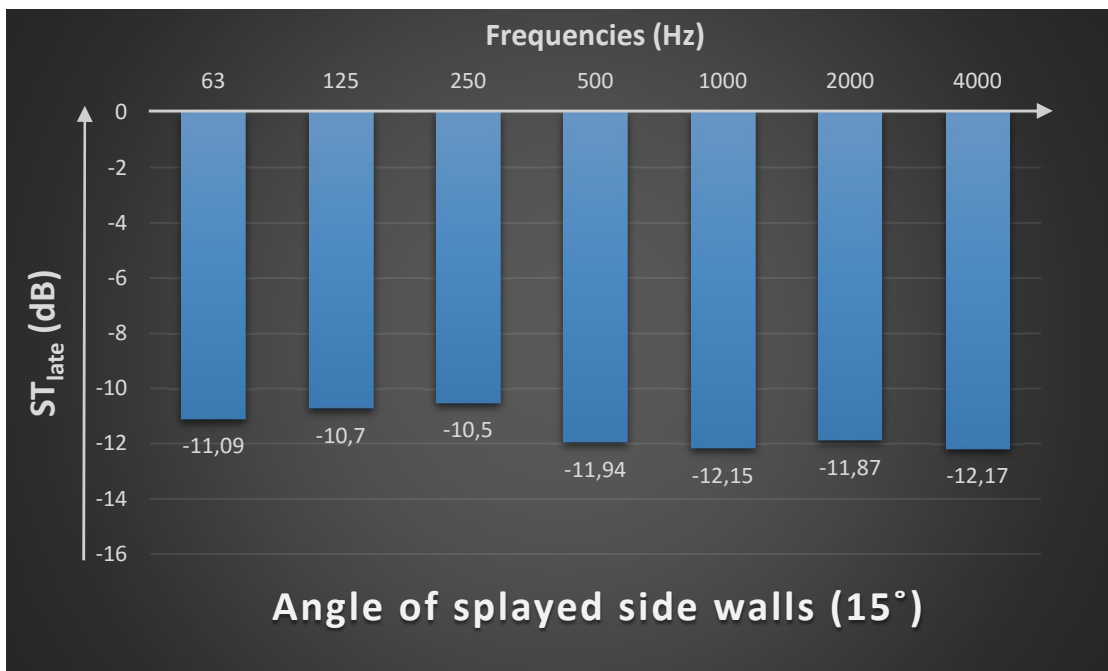
Graph 4.3.3 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to 24°.



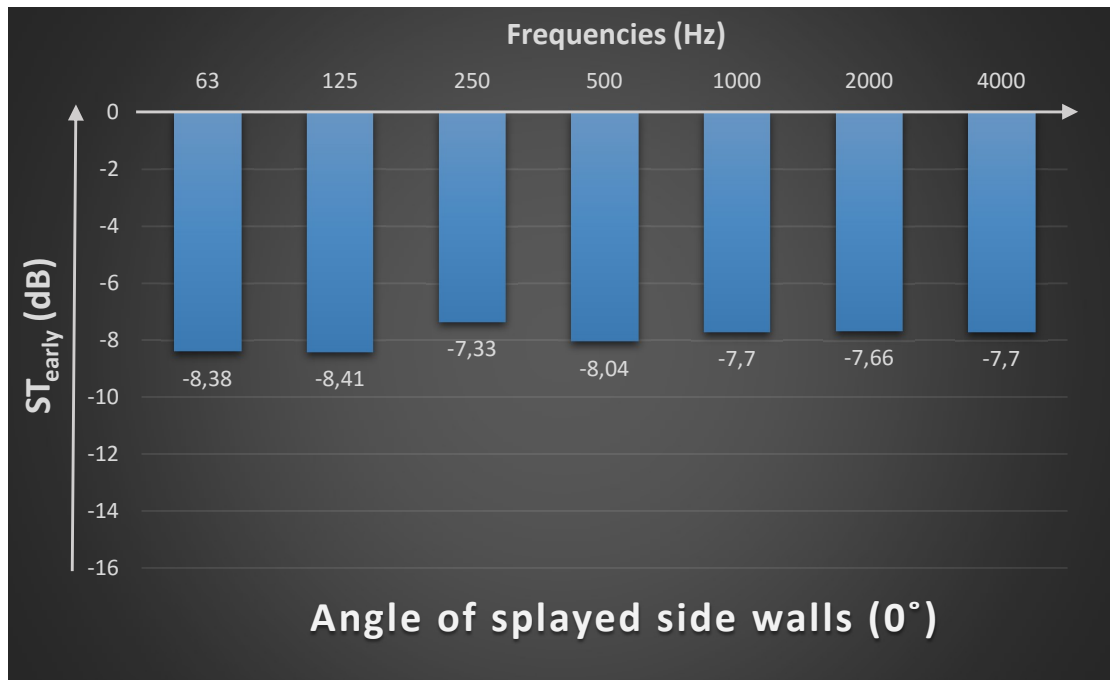
Graph 4.3.4 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to 24°.



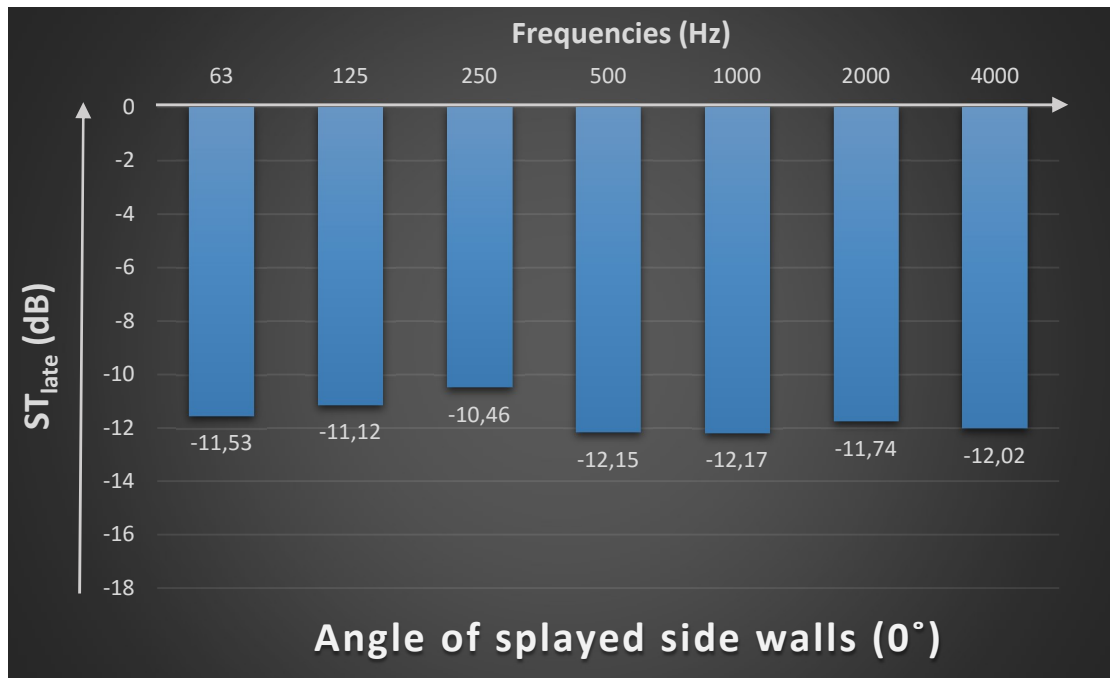
Graph 4.3.5 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to 15°.



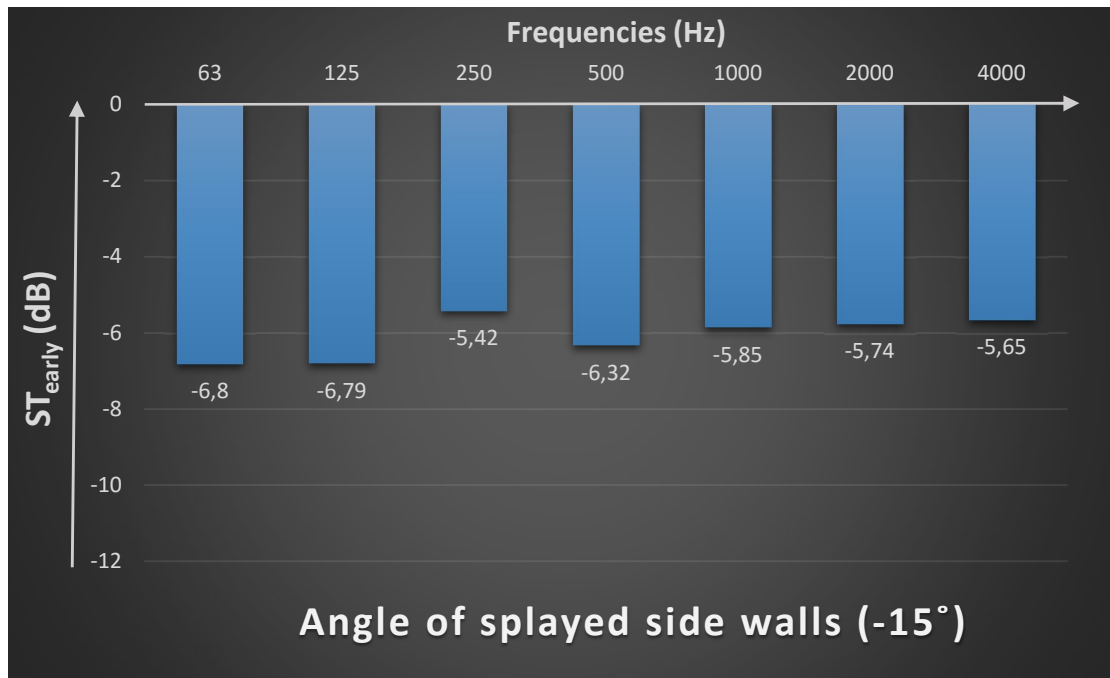
Graph 4.3.6 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to 15°.



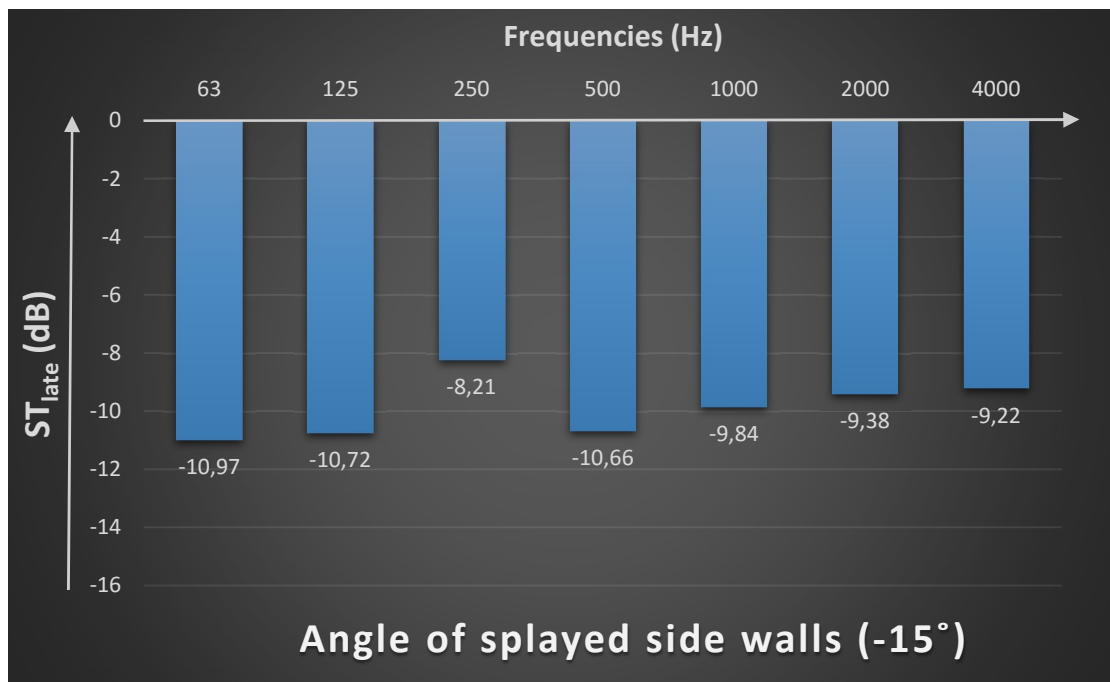
Graph 4.3.7 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to 0°.



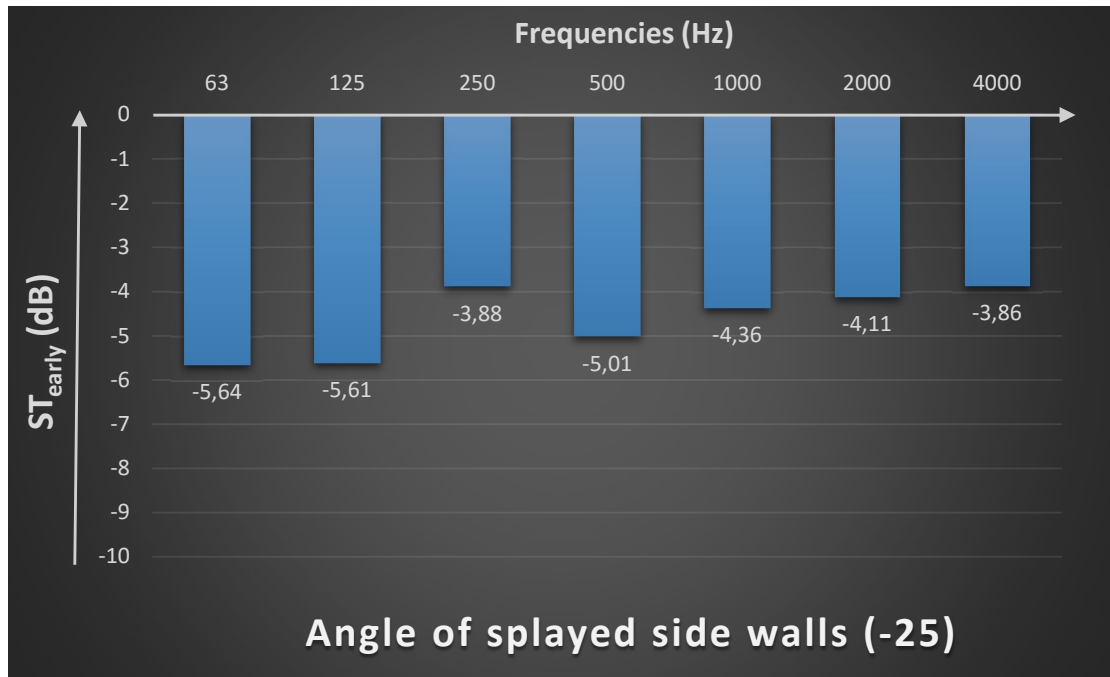
Graph 4.3.8 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to 0°.



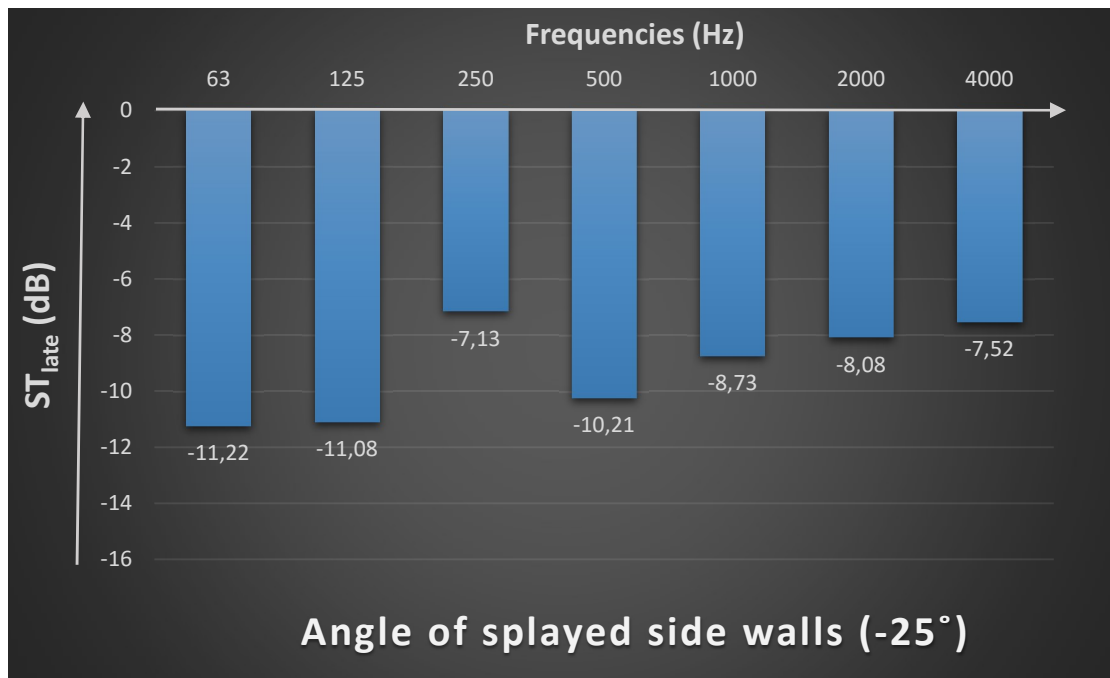
Graph 4.3.9 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to -15°.



Graph 4.3.10 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to -15°.



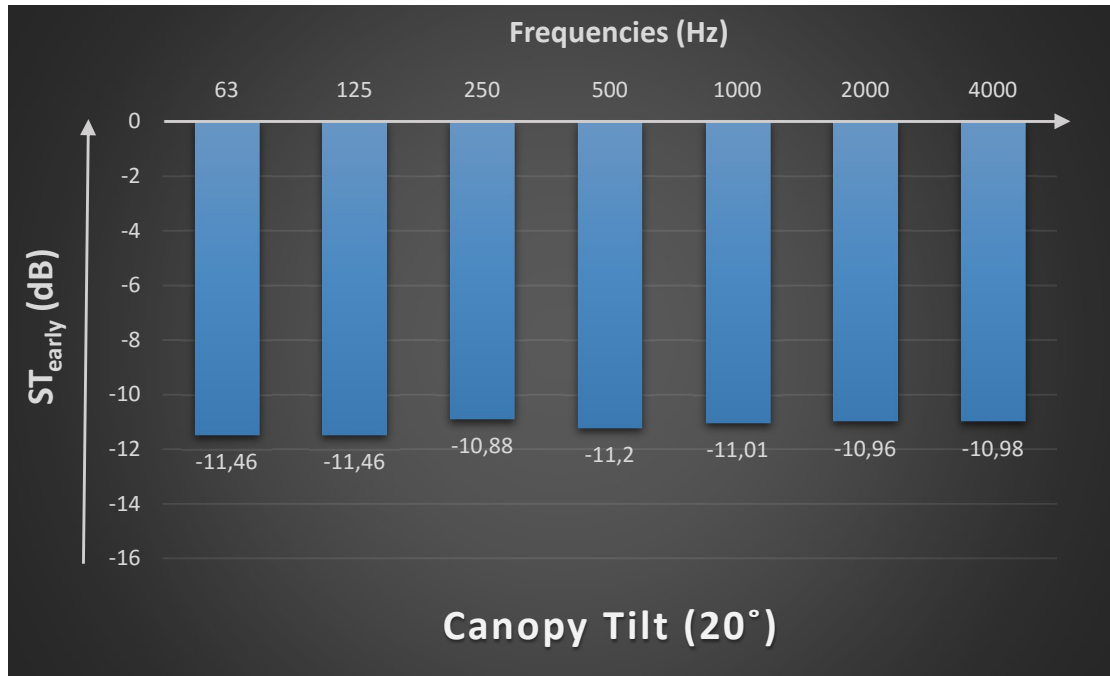
Graph 4.3.11 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to -25°.



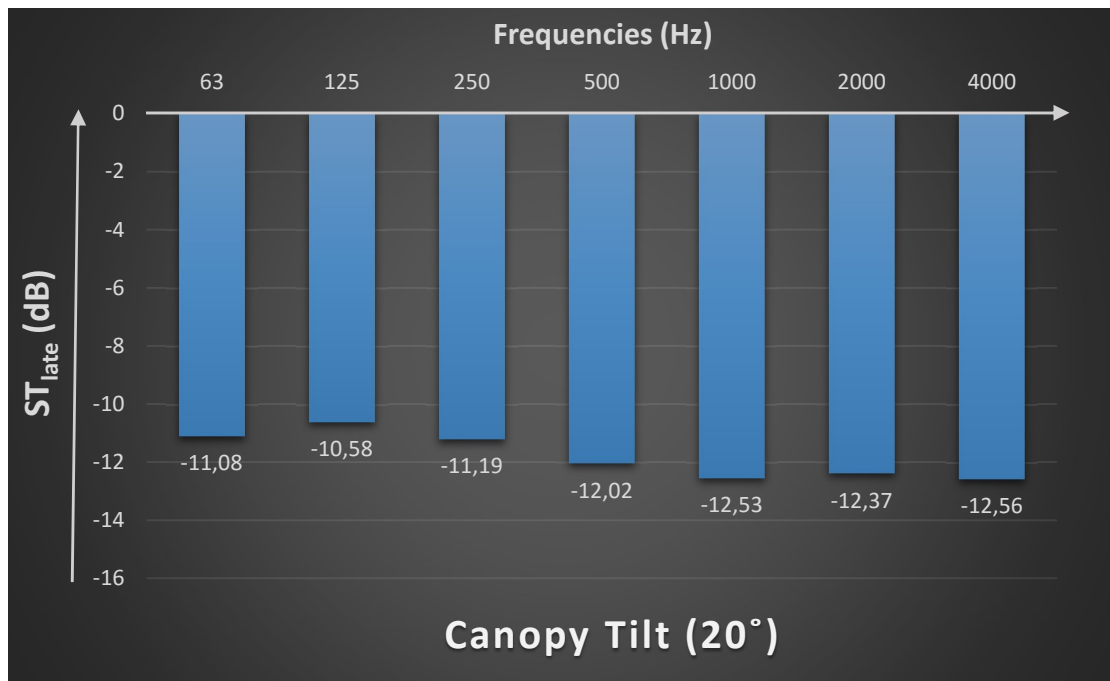
Graph 4.3.12 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the angle of splayed side walls was set to -25°.

4.4 Canopy tilt

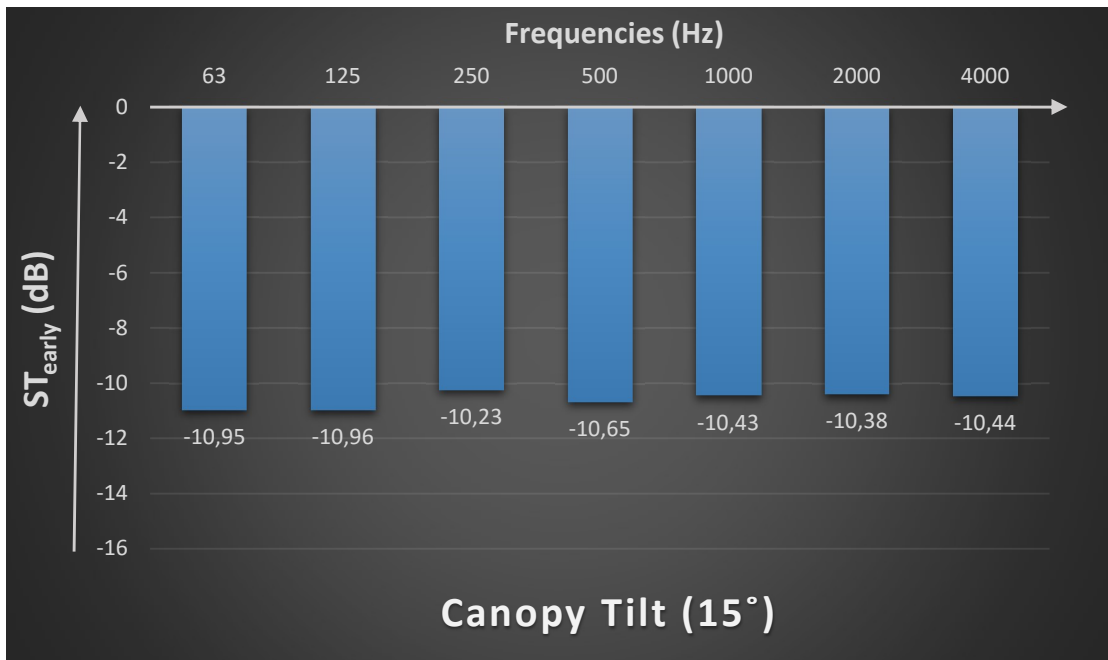
The results of ST_{early} and ST_{late} among the transformations on canopy tilt in the frequency spectrum (63-4000Hz) are shown in Graphs 4.4.1 – 4.4.12 below.



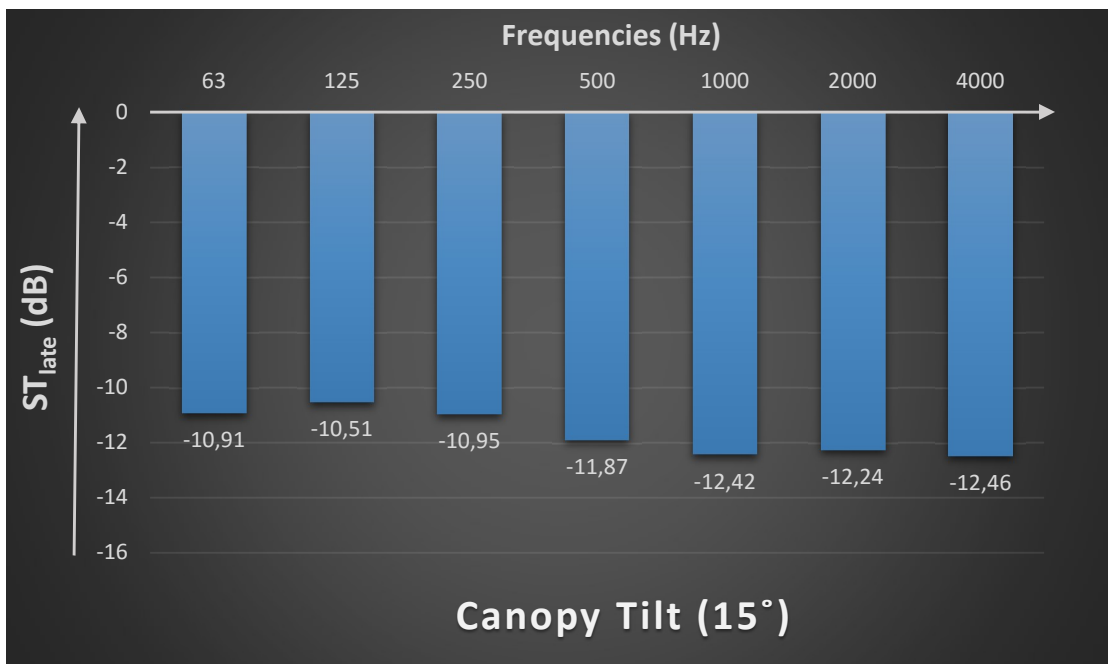
Graph 4.4.1 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to 20°.



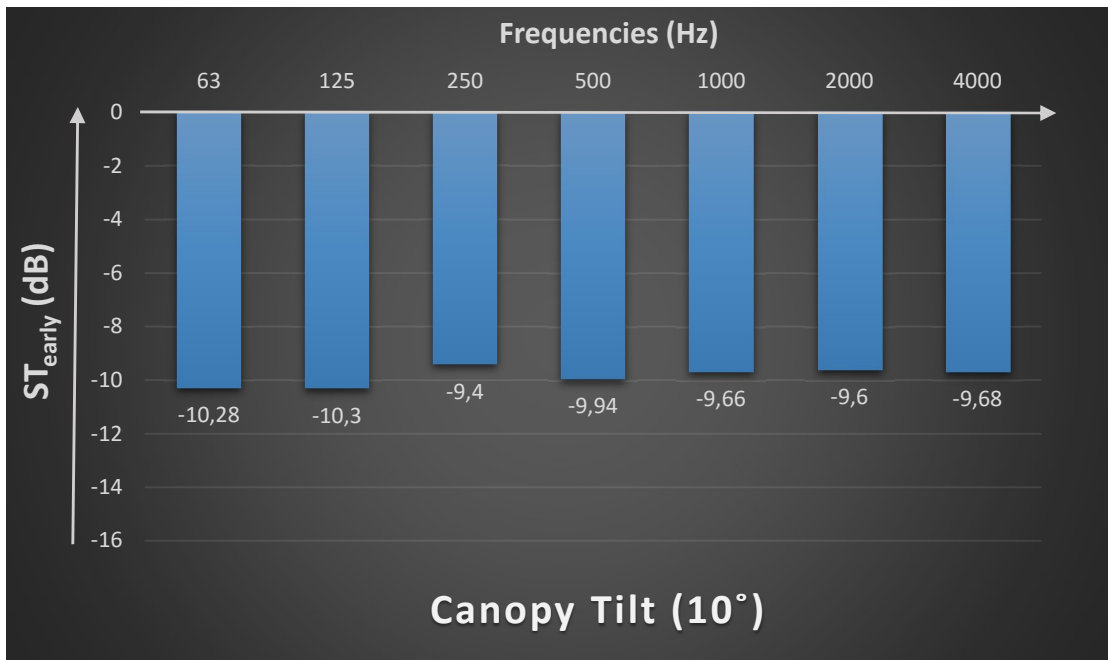
Graph 4.4.2 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to 20°.



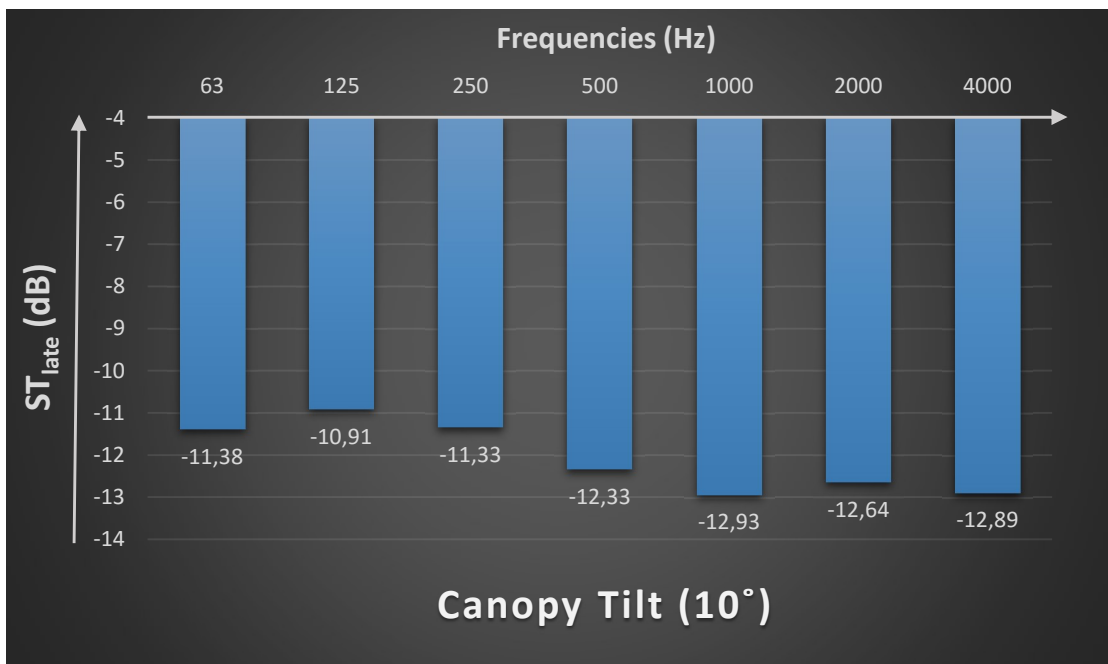
Graph 4.4.3 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to 15°.



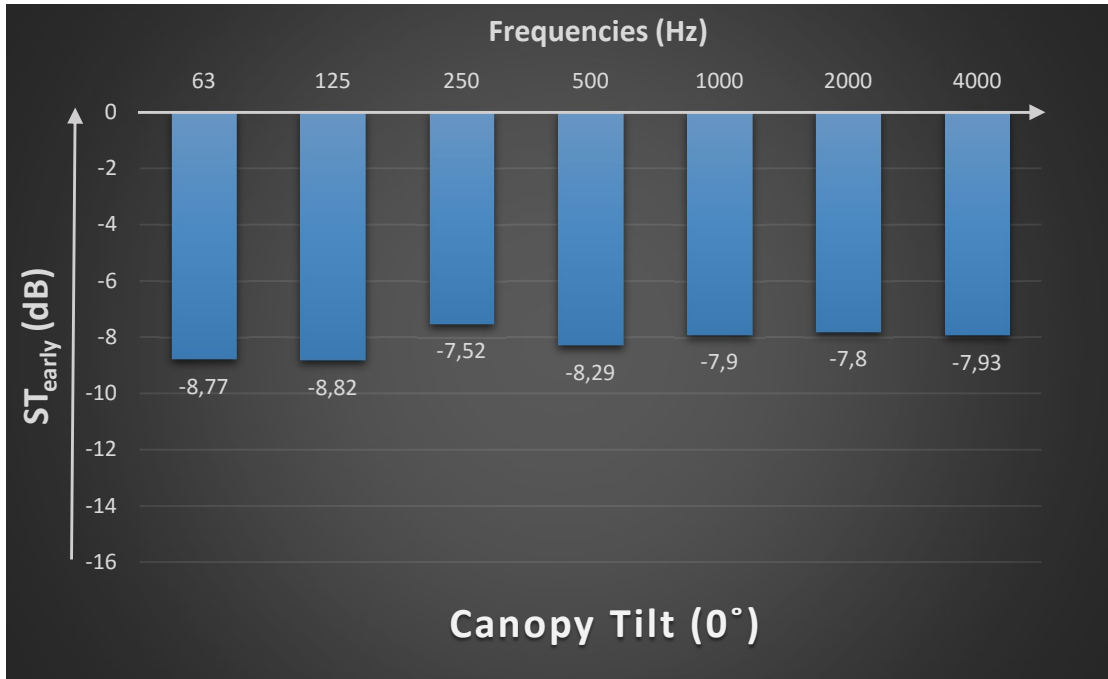
Graph 4.4.4 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to 15°.



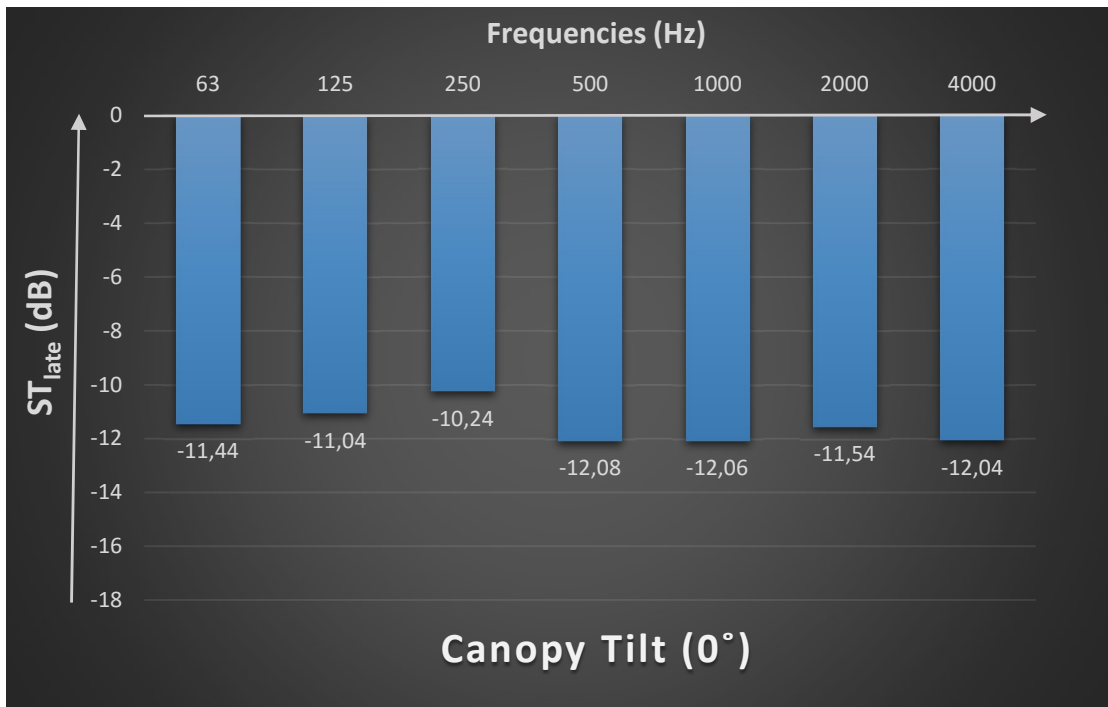
Graph 4.4.5 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to 10° .



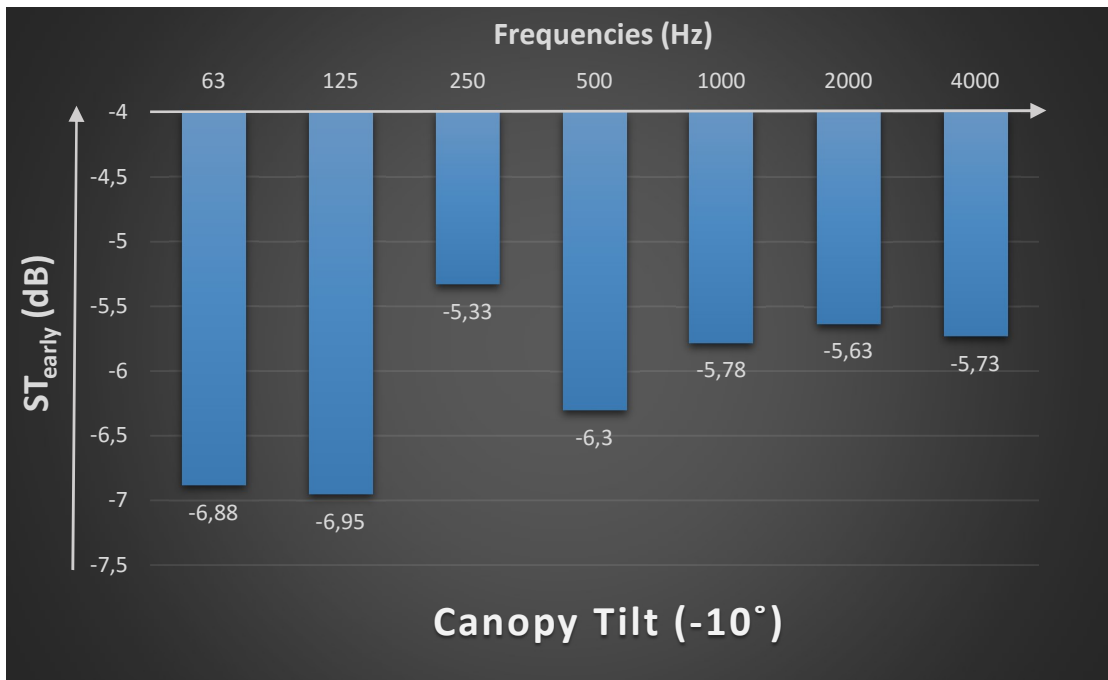
Graph 4.4.6 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to 10° .



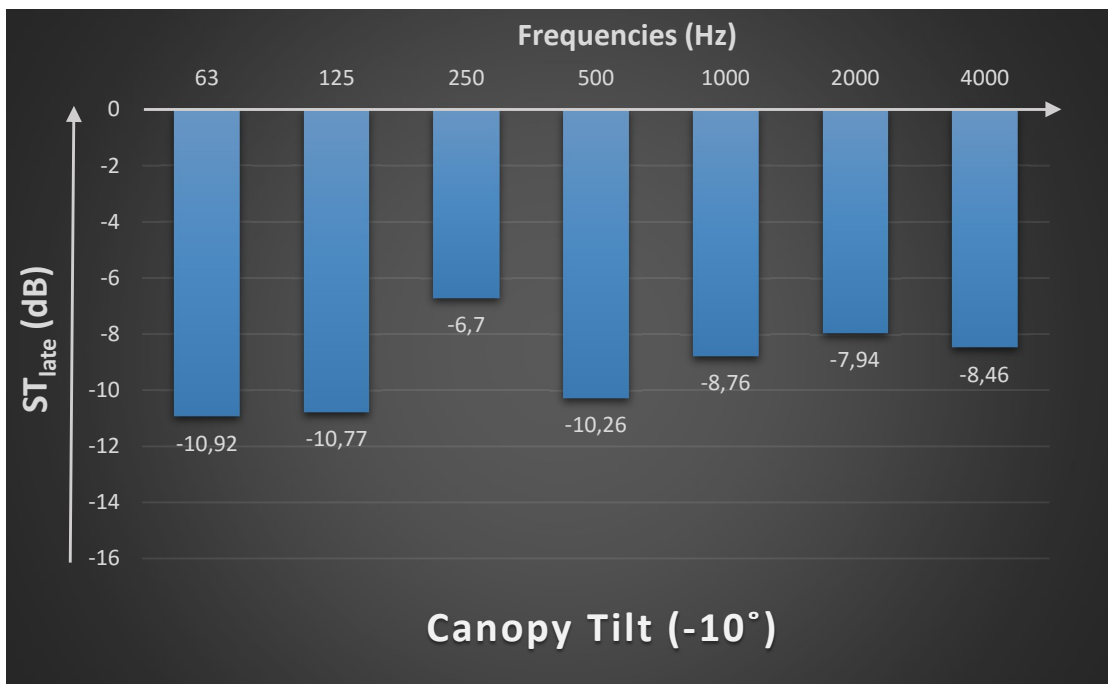
Graph 4.4.7 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to 0° .



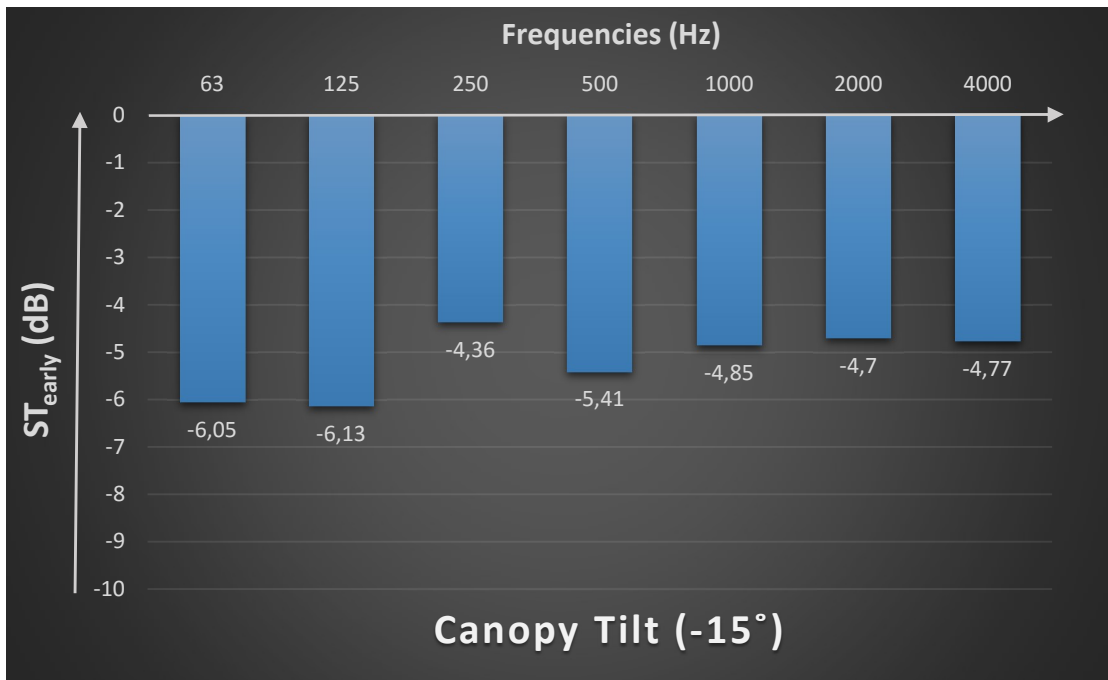
Graph 4.4.8 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to 0° .



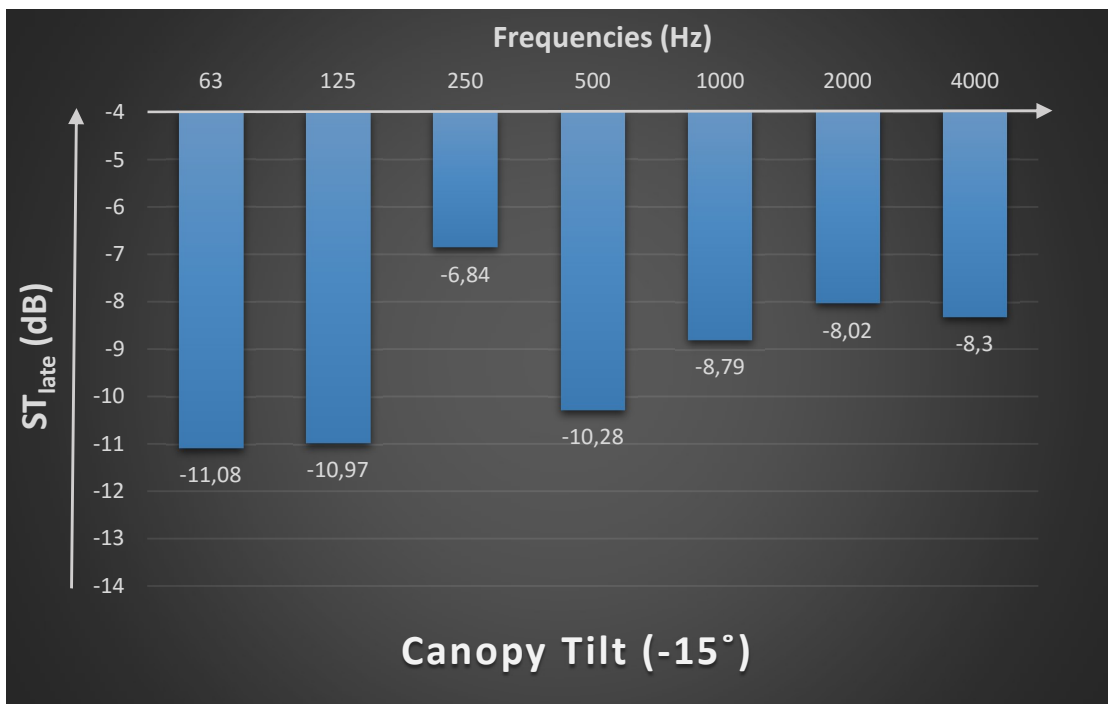
Graph 4.4.9 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to -10° .



Graph 4.4.10 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to -10° .



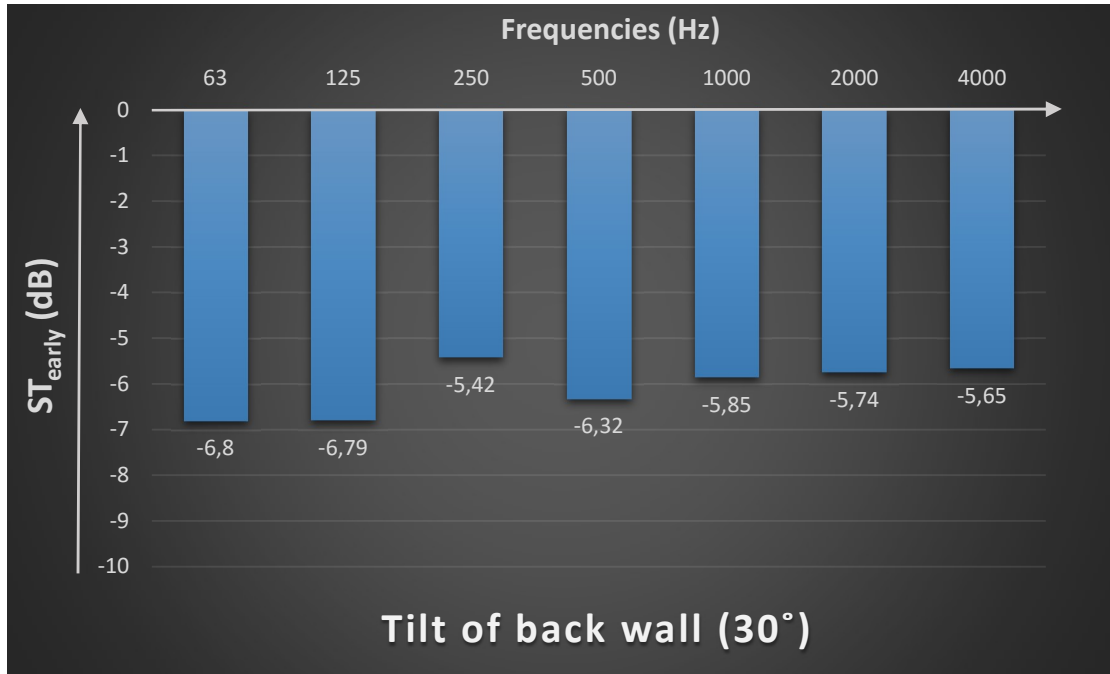
Graph 4.4.11 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to -15°.



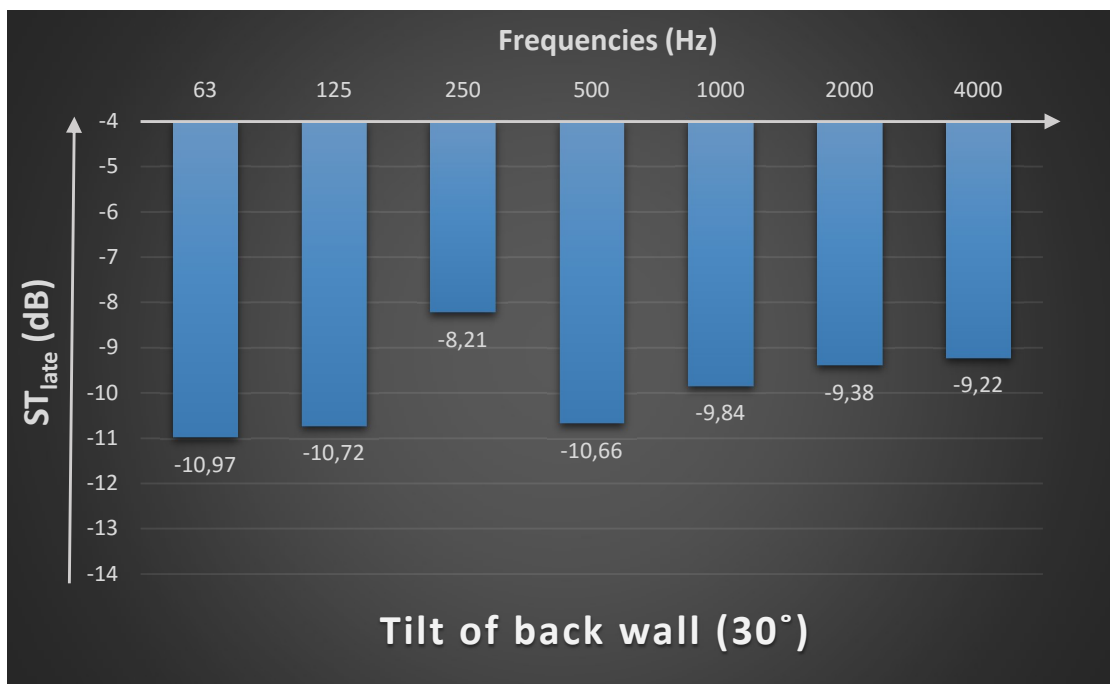
Graph 4.4.12 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the canopy tilt was set to -15°.

4.5 Tilt of back wall

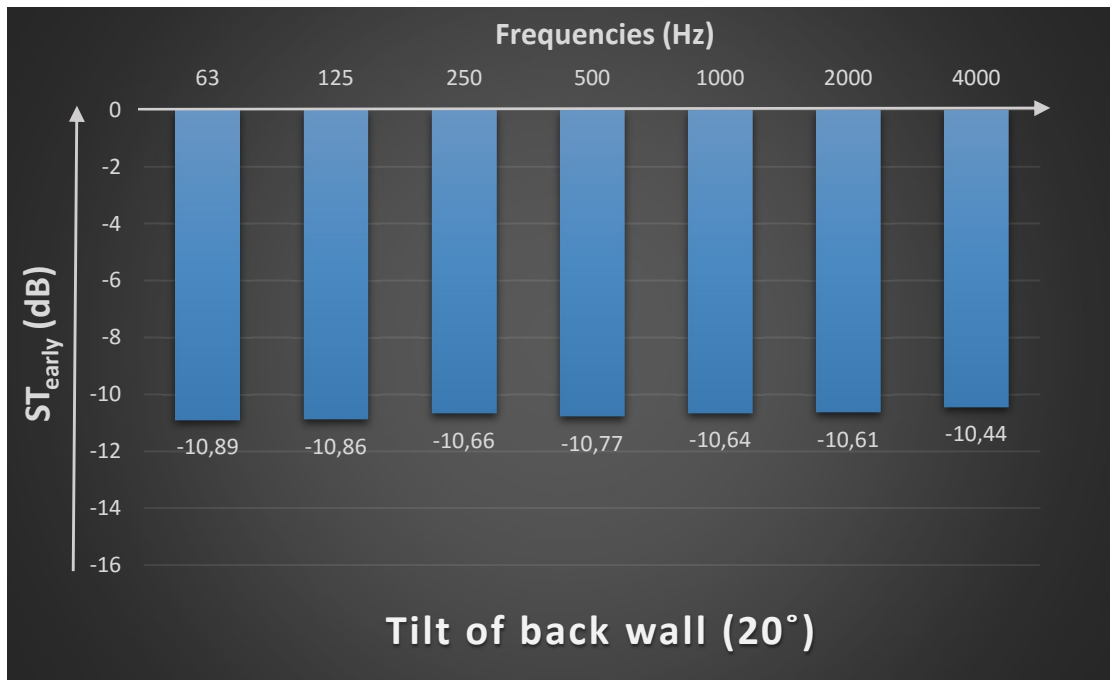
The results of ST_{early} and ST_{late} among the transformations on tilt of back wall in the frequency spectrum (63-4000Hz) are shown in Graphs 4.5.1 – 4.5.14 below.



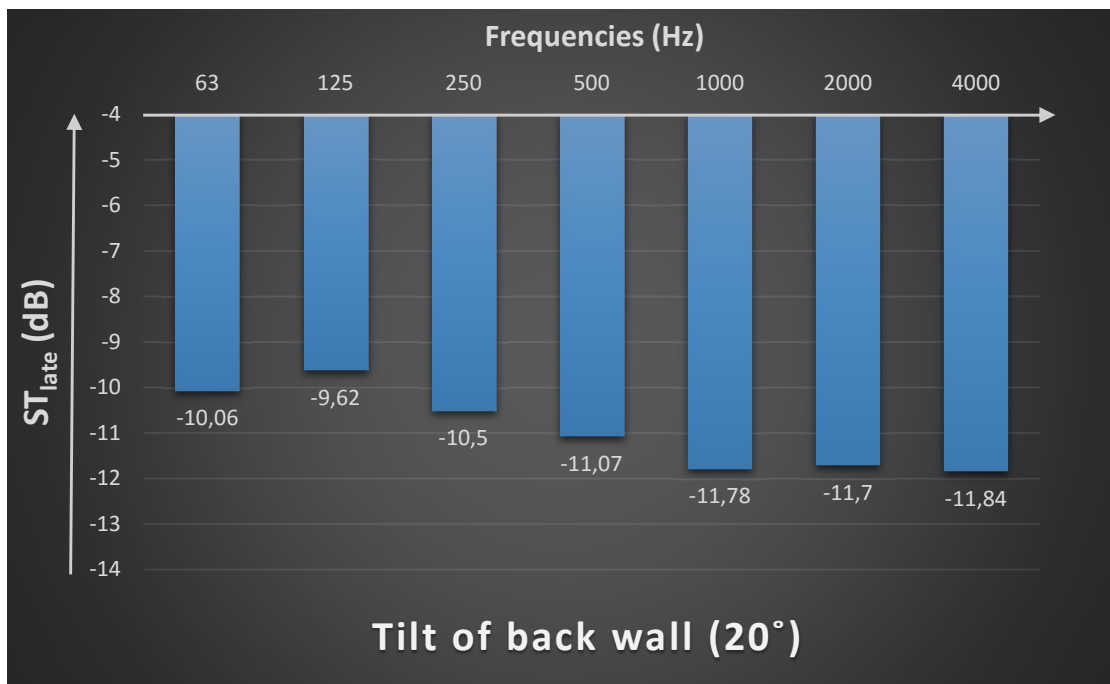
Graph 4.5.1 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to 30°.



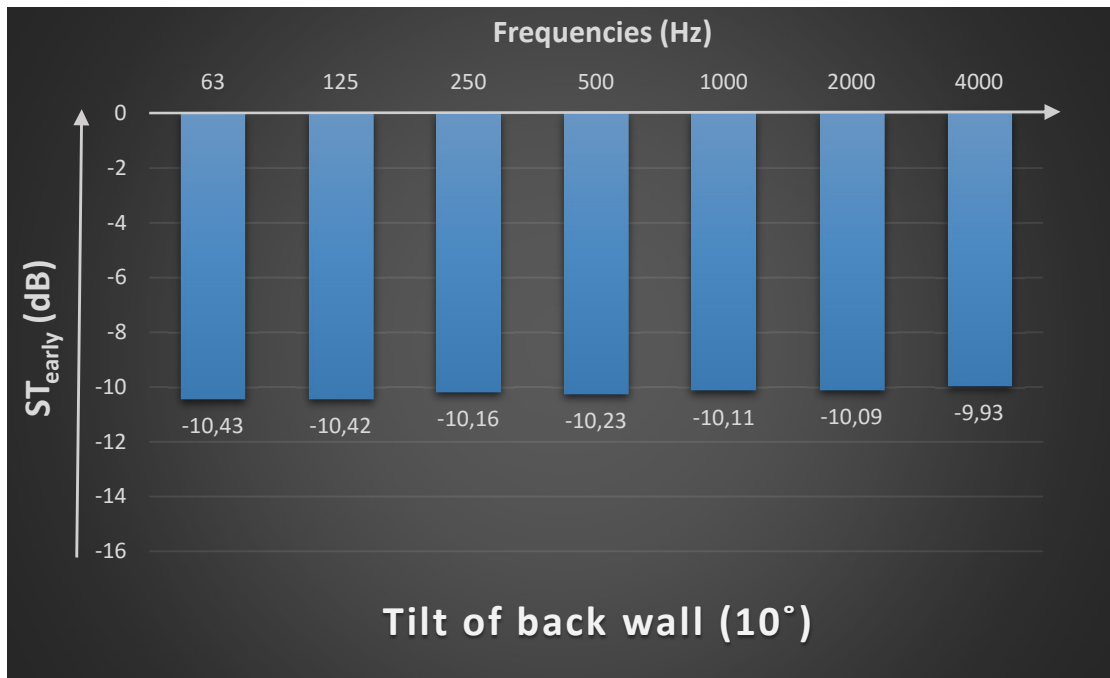
Graph 4.5.2 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to 30°.



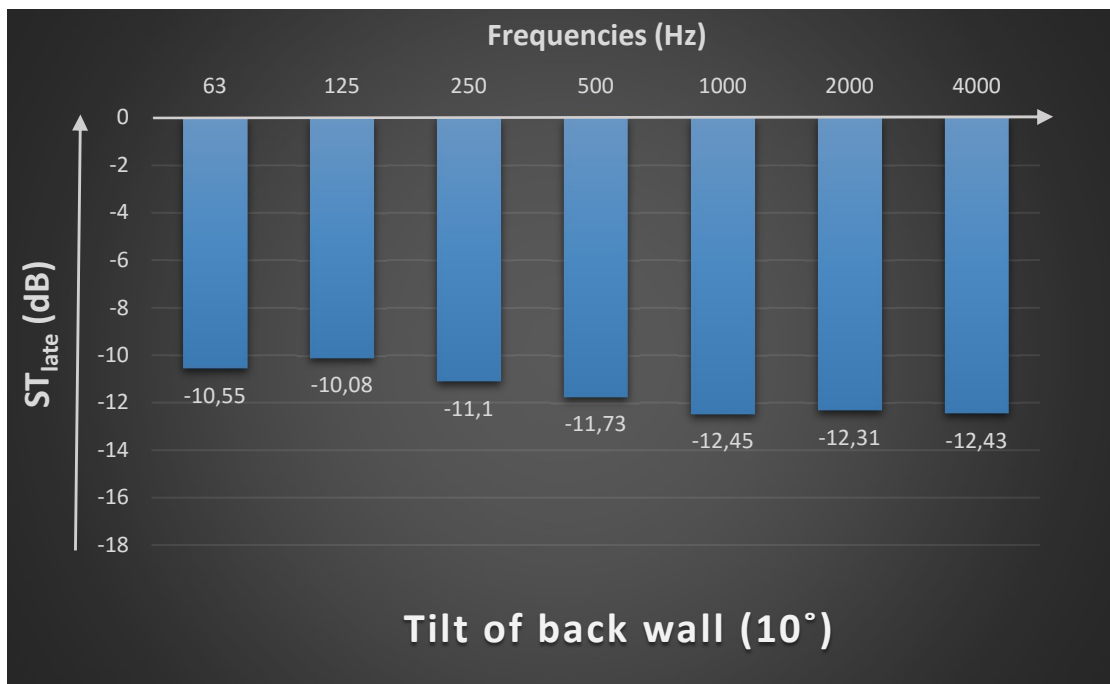
Graph 4.5.3 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to 20°.



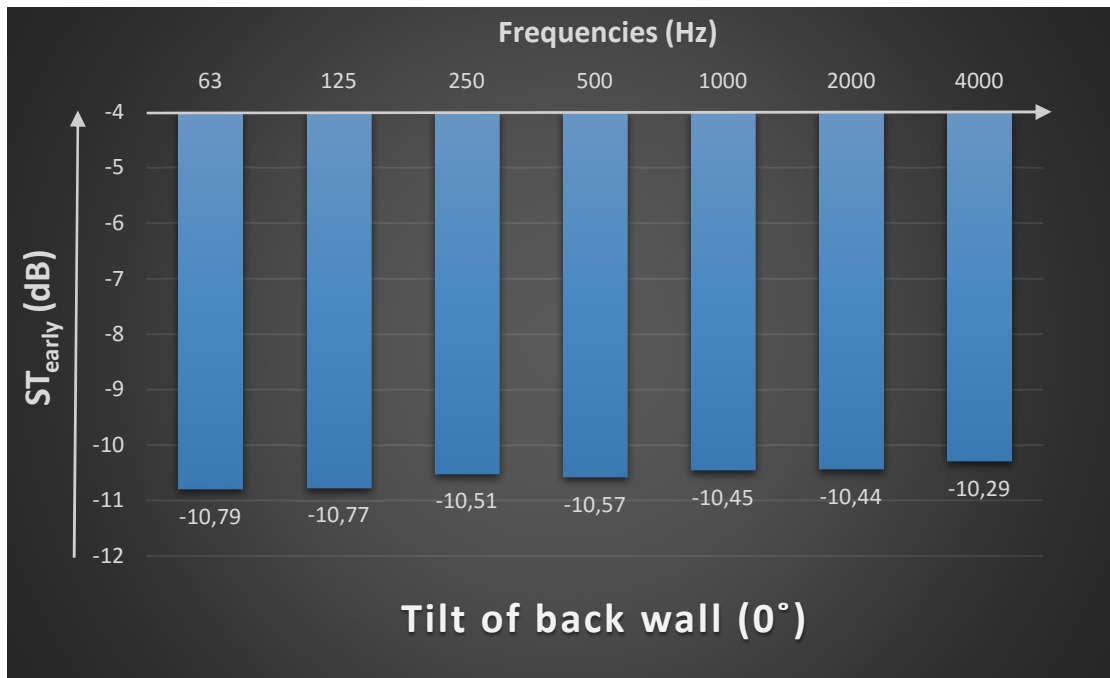
Graph 4.5.4 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to 20°.



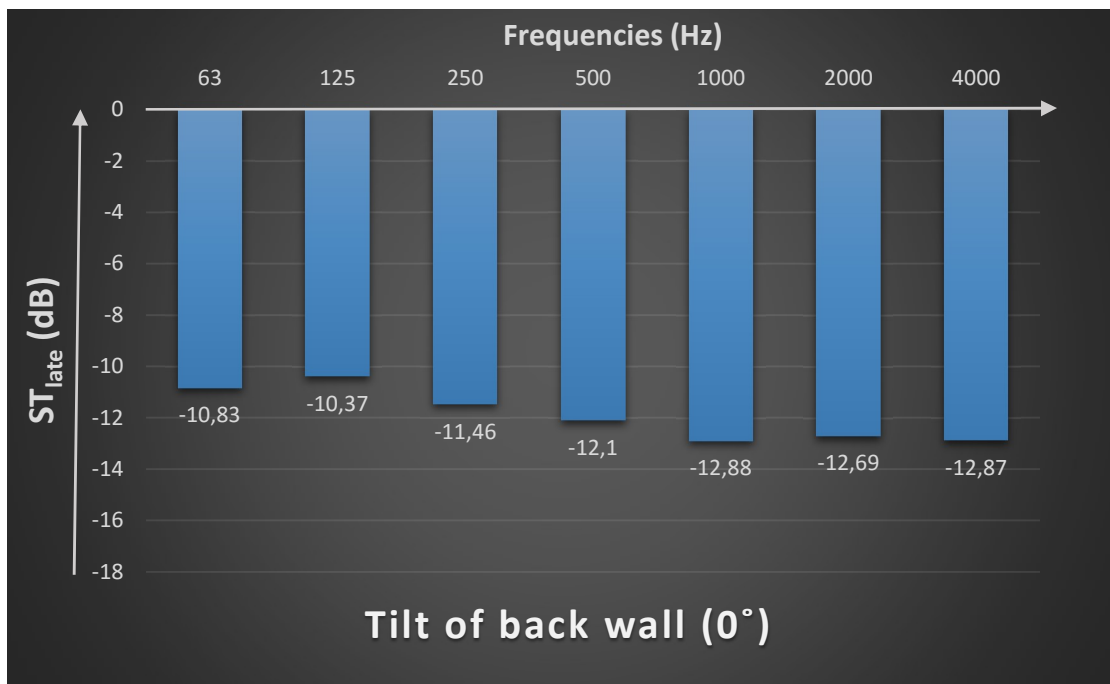
Graph 4.5.5 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to 10°.



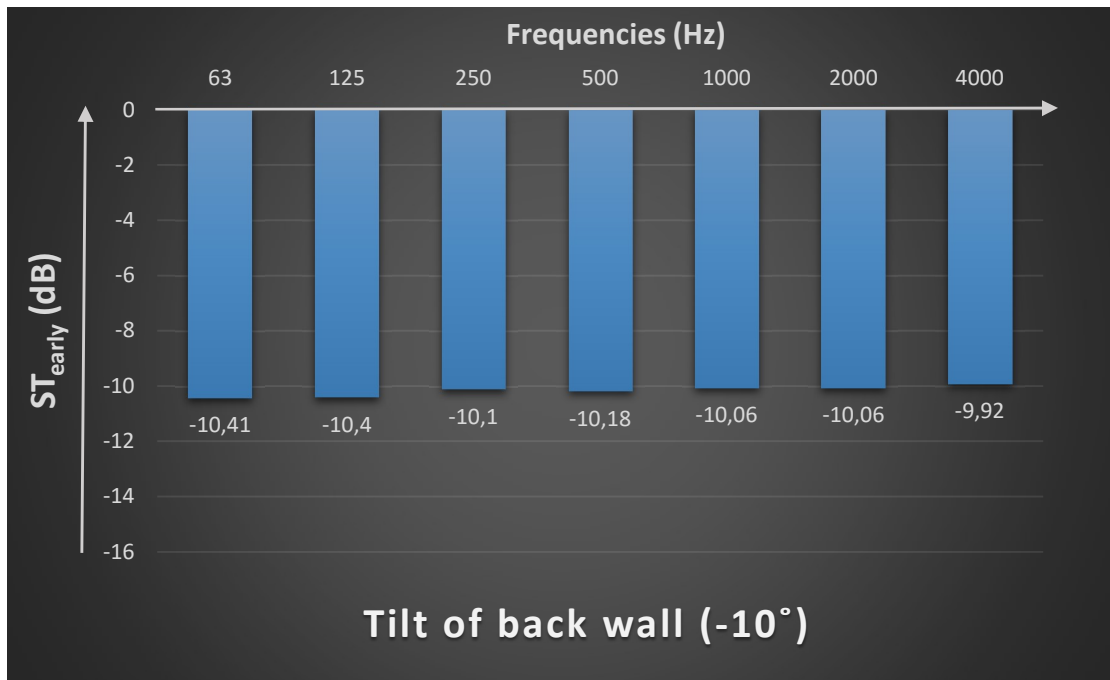
Graph 4.5.6 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to 10°.



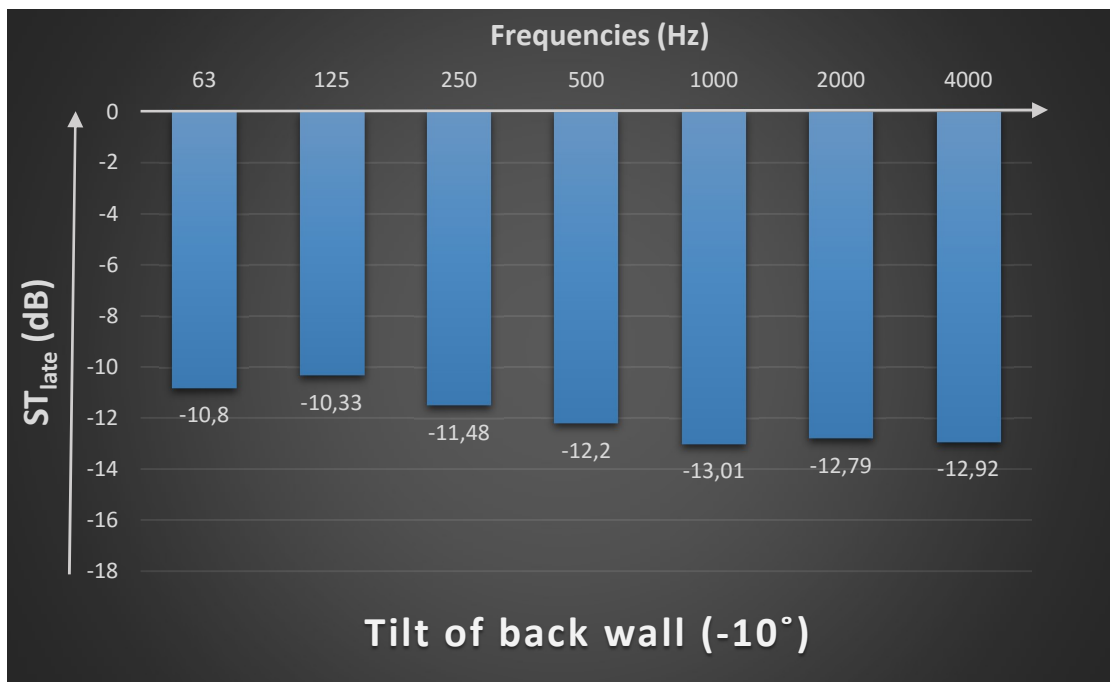
Graph 4.5.7 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to 0° .



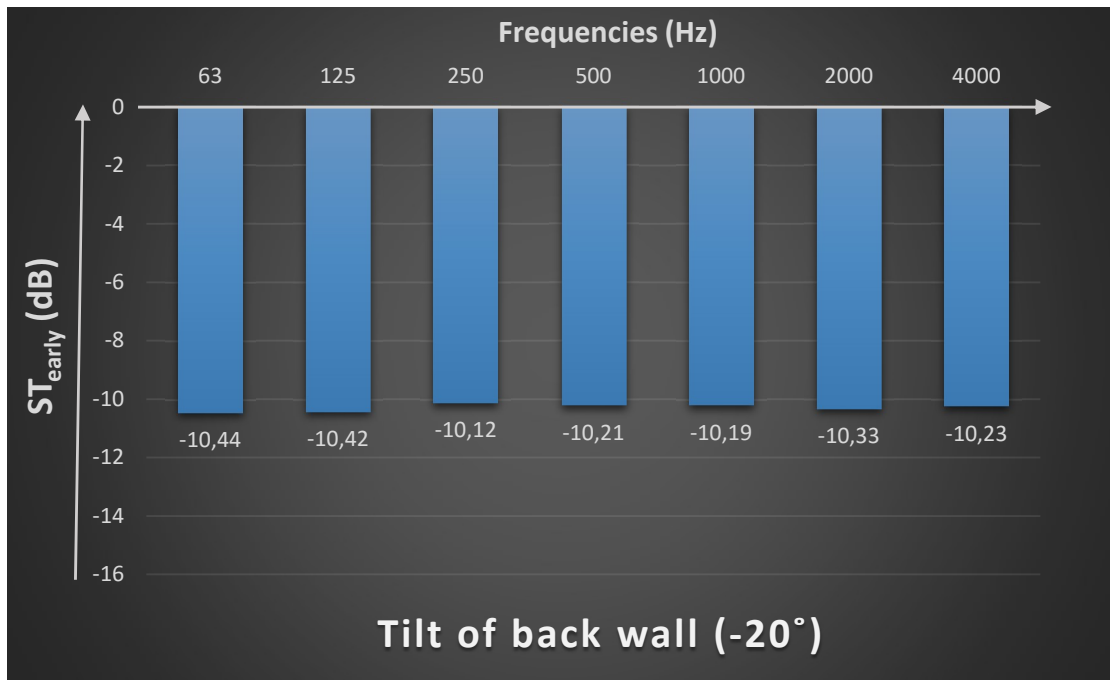
Graph 4.5.8 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to 0° .



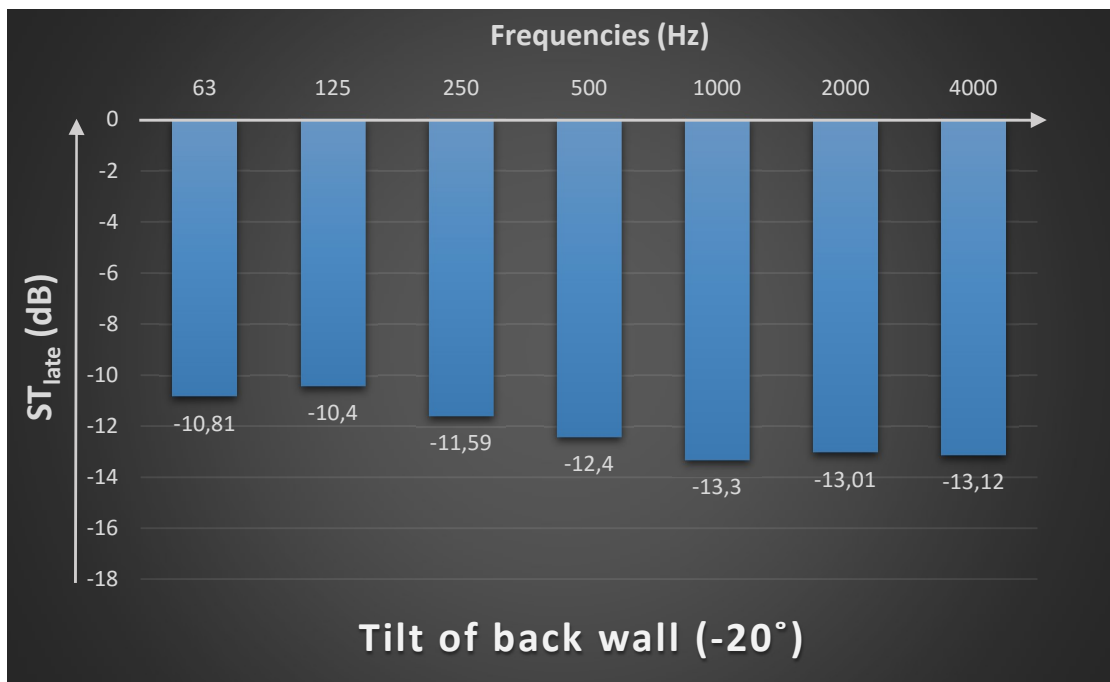
Graph 4.5.9 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to -10°.



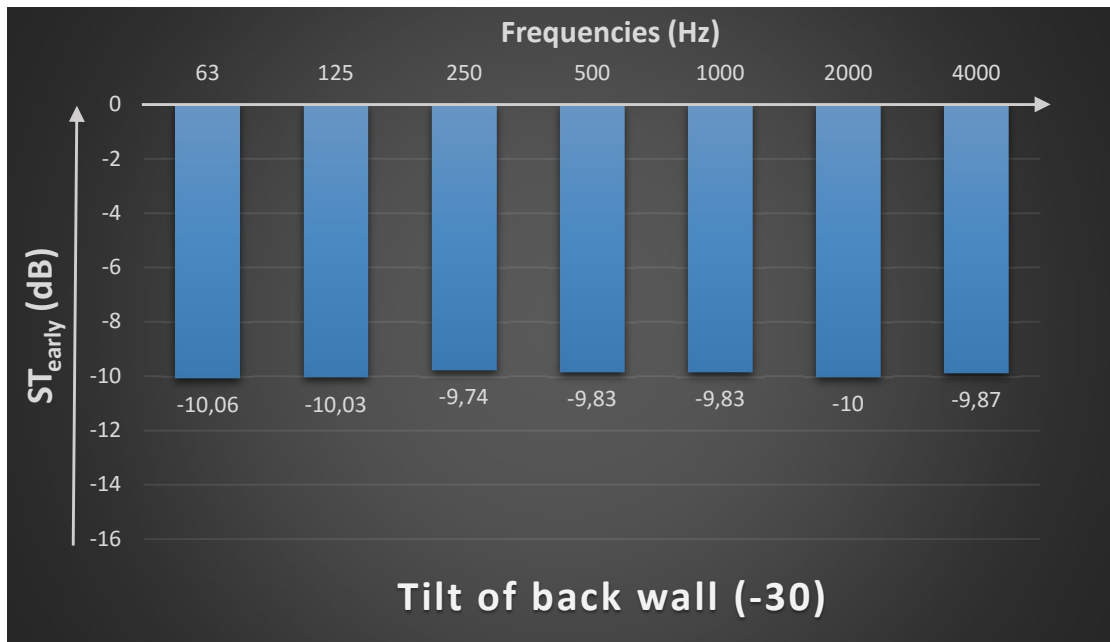
Graph 4.5.10 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to -10°.



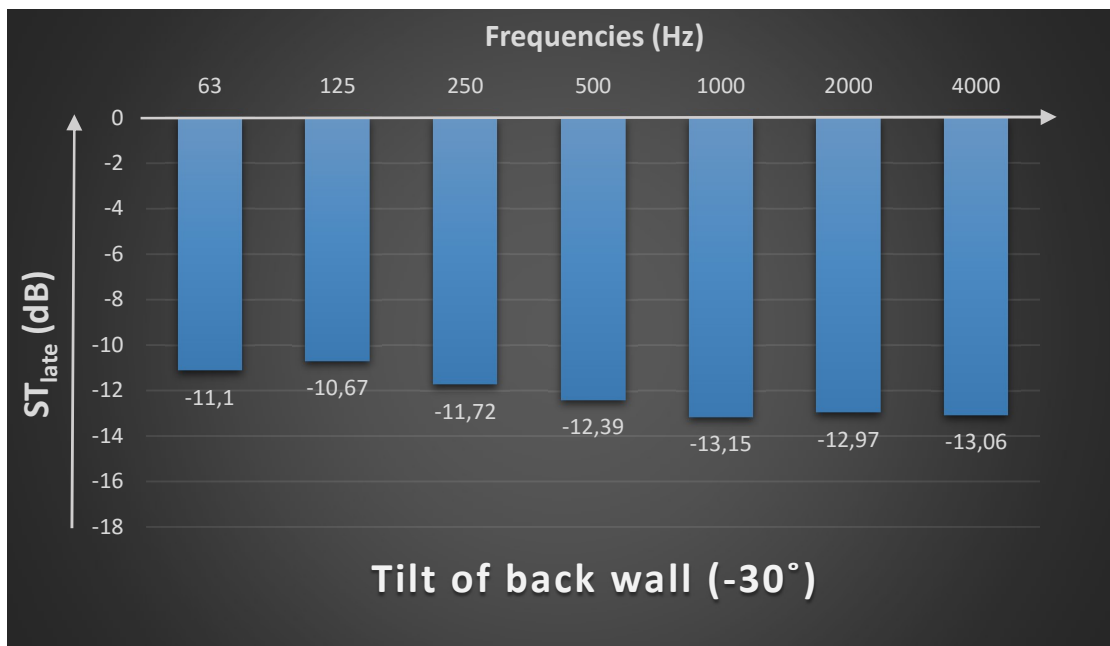
Graph 4.5.11 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to -20°.



Graph 4.5.12 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to -20°.



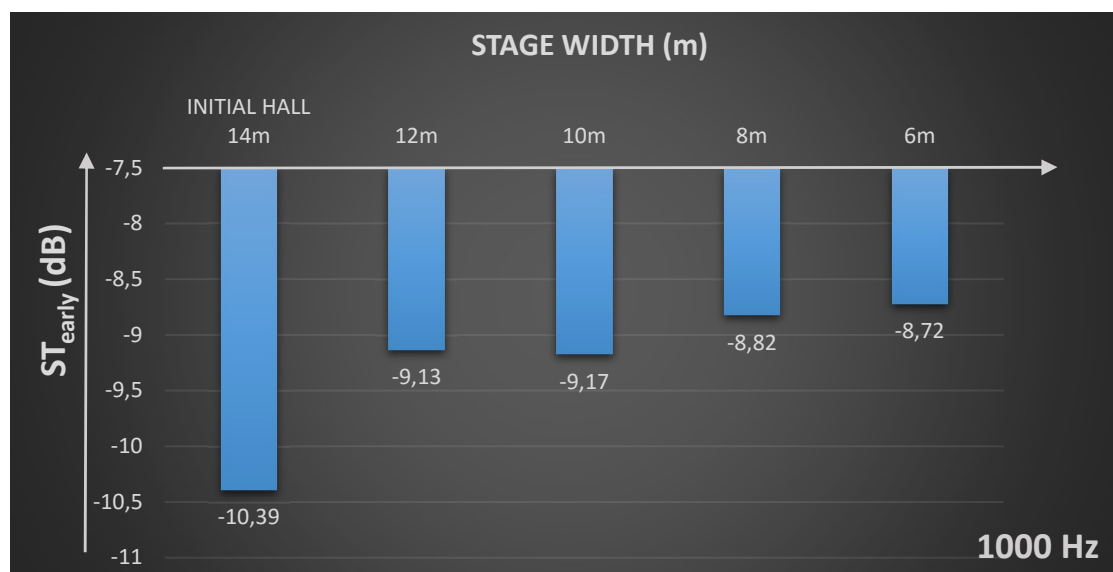
Graph 4.5.13 Measurements of ST_{early} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to -30° .



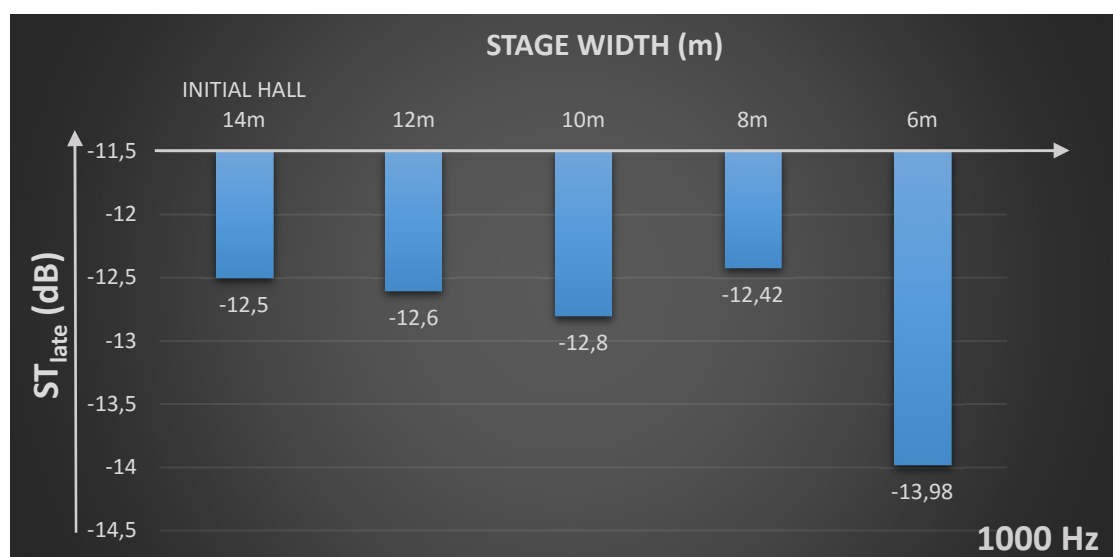
Graph 4.5.14 Measurements of ST_{late} vs frequency spectrum (63-4000Hz) when the tilt of back wall was set to -30° .

5 Discussion

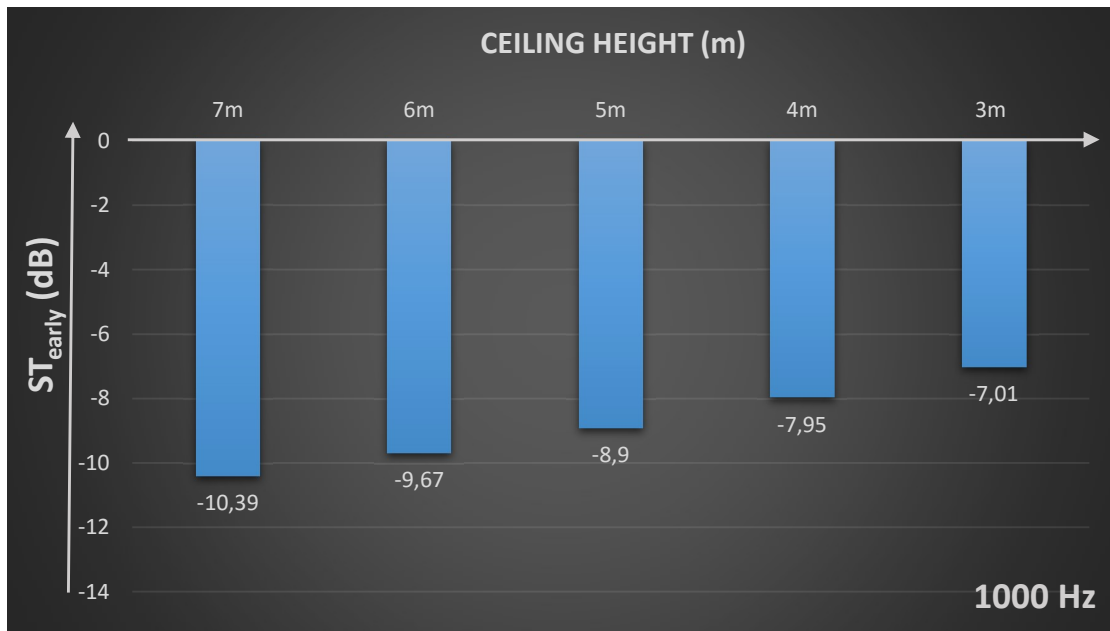
In previous section, the results of ST_{early} and ST_{late} among the transformations on five geometrical parameters in the frequency spectrum (63-4000Hz) were presented. In this section, the above parameters will be compared and discussed with past findings. In order to achieve a 'clearer' comparison, the previous results are presented only for the 1000Hz band among the transformations of each geometrical parameter, for a better comparable view. The choice of 1000Hz band is reasonable, as the Support parameters found to be affected proportionally in the frequency spectrum (63-4000Hz). Furthermore, 1000Hz band has been found to be subjectively important by Marshall et al [3].



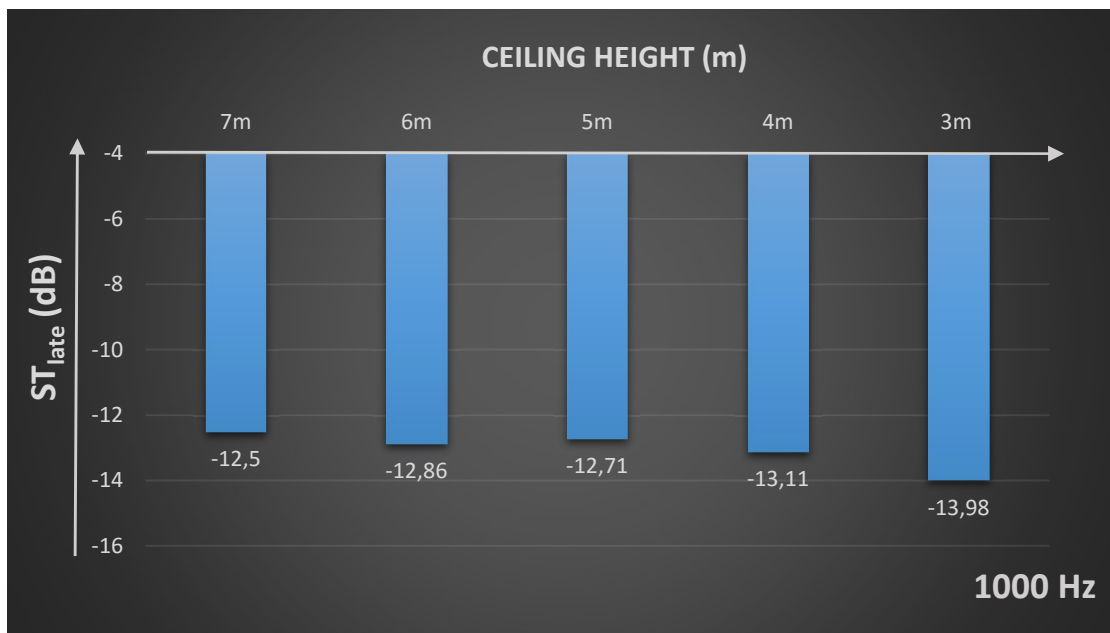
Graph 4.5.1 Measurements of ST_{early} vs stage width for the 1000Hz band.



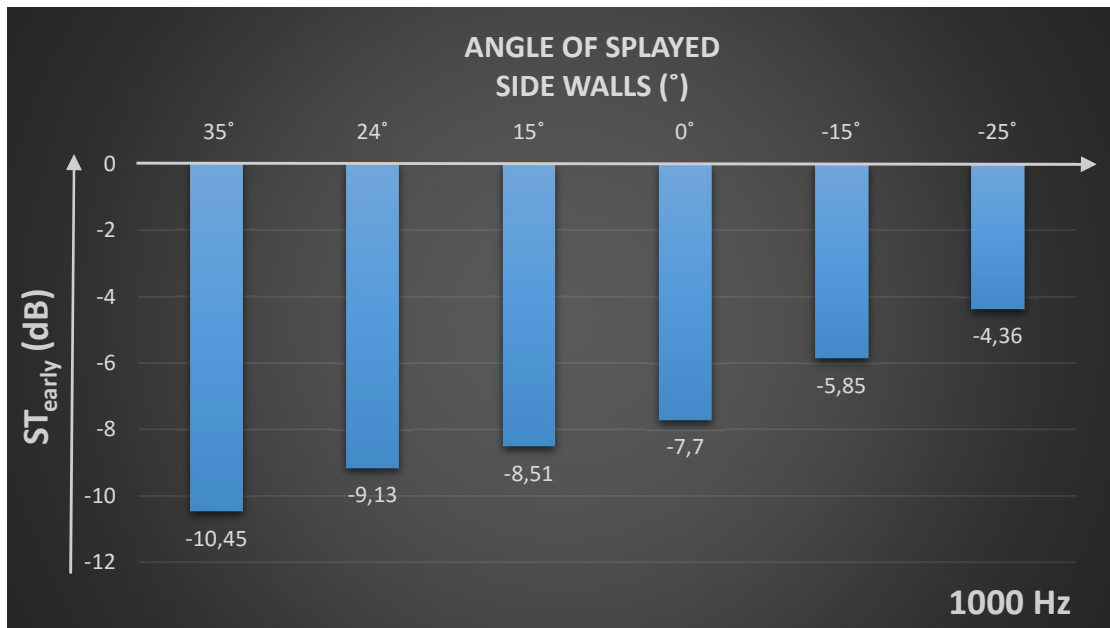
Graph 4.5.2 Measurements of ST_{late} vs stage width for the 1000Hz band.



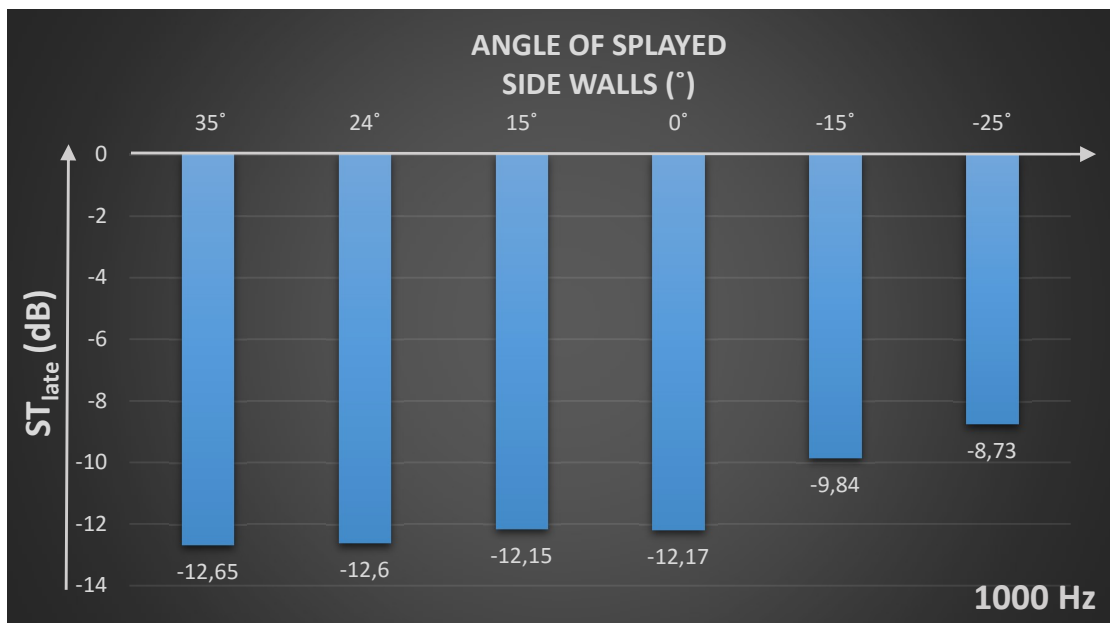
Graph 4.5.3 Measurements of ST_{early} vs ceiling height for the 1000Hz band.



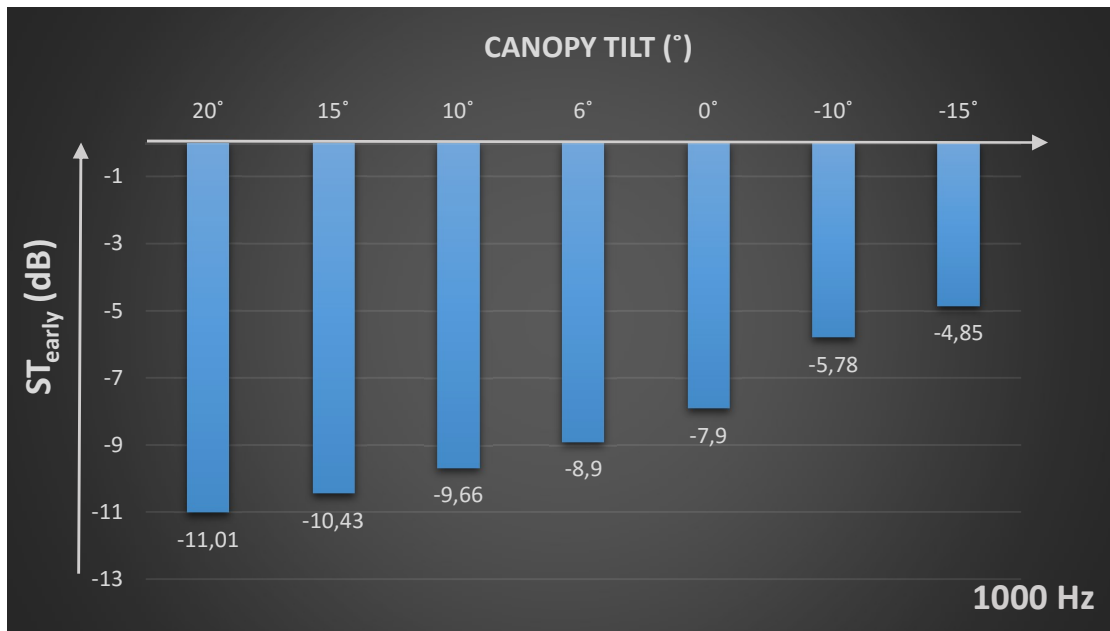
Graph 4.5.4 Measurements of ST_{late} vs ceiling height for the 1000Hz band.



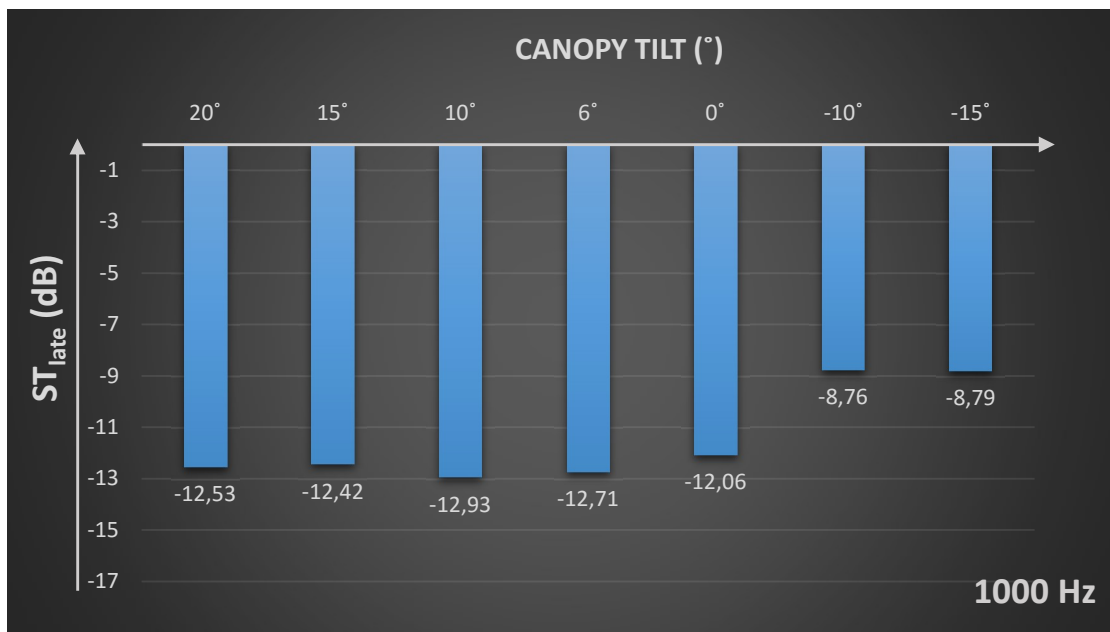
Graph 4.5.5 Measurements of ST_{early} vs angle of splayed side walls for the 1000Hz band.



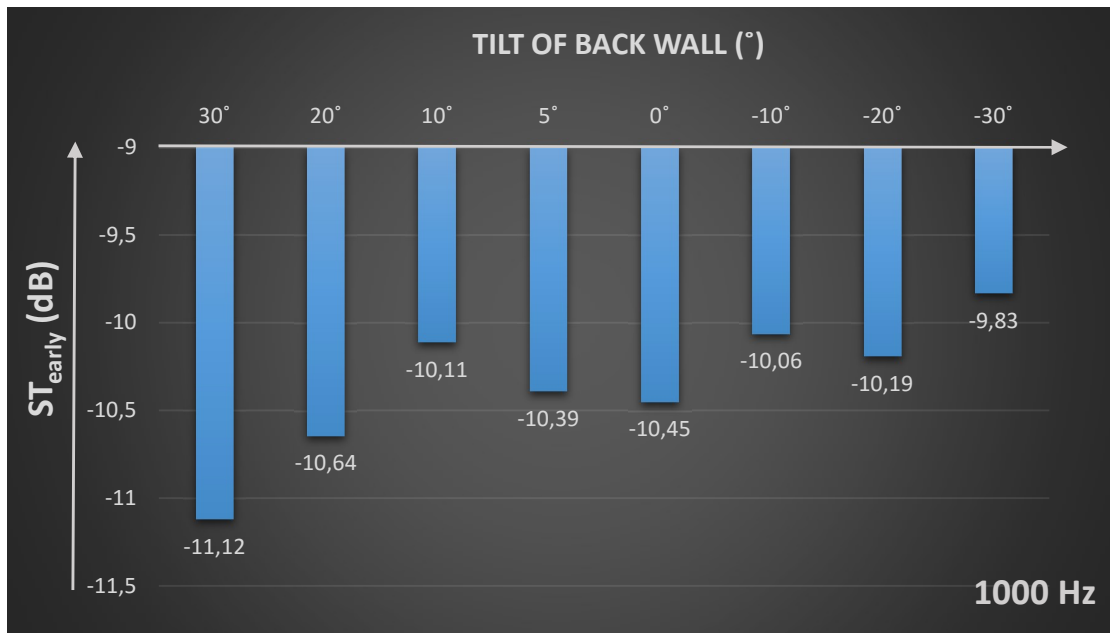
Graph 4.5.6 Measurements of ST_{late} vs angle of splayed side walls for the 1000Hz band.



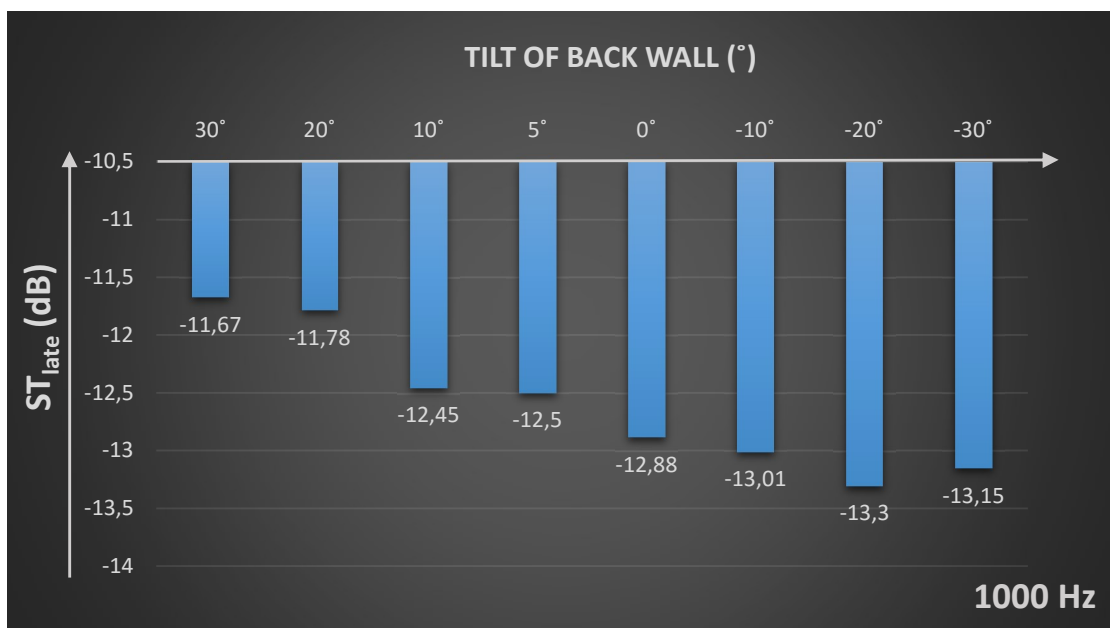
Graph 4.5.7 Measurements of ST_{early} vs canopy tilt for the 1000Hz band.



Graph 4.5.8 Measurements of ST_{late} vs canopy tilt for the 1000Hz band.



Graph 4.5.9 Measurements of ST_{early} vs tilt of back wall for the 1000Hz band.



Graph 4.5.10 Measurements of ST_{late} vs tilt of back wall for the 1000Hz band.

The present experiment confirmed findings from earliest studies, [1], [21], [24], [25], namely that a narrow stage cross section is preferred. In particular, desired values of the ST_{early} (-11dB) were found in the present study to be associated with relatively narrow stage cross section (H/W ratio of 0.6) (see *Figure 3.2.7, Graph 5.1, Figure 3.2.9 and Graph 5.3*). These findings are confirmed throughout the frequency spectrum. On the other, ST_{late} was found to be independent of the stage width, for relatively small size stages i.e. of width ranging between 14 and 6m (*Figure 3.2.7, Graph 5.2*). Similarly, ST_{late} was found to be independent of stage heights, i.e. of height ranging between 7 and 3m (*Figure 3.2.9, Graph 5.4*). The above imply that for small stages ST_{late} is independent of the stage cross section. H/W ratio above 0.7 didn't found to correspond to the desired values of ST_{early} and ST_{late} (Table 2.1).

The above findings confirm the results of Chiang and Shu's work [2], i.e. the early energy was affected to the transformations on the stage volume. Particularly, that authors found that reducing half of the stage volume caused 2-3 dB increase of early energy. Similarly, in the present study there was observed 1.5-2.5dB increase of ST_{early} when the volume of stage reduced from 730m³ to 400m³. Furthermore, Chiang and Shu found that late energy did not affected to the changes on stage volume. This finding has also confirmed in the present experiment; ST_{late} was found to be independent of the stage volume.

ST_{early} was found to be sensitive to the angle of the splayed side walls. In particular with this angle decreasing, i.e. when side walls tended to be parallel to each other, ST_{early} increased (see *Figure 3.2.11, Graph 5.5*). A splay of side walls of 24° and width of 14m (initial hall) was found to correspond to optimal ST_{early} i.e. -11dB; this optimal value is suggested in the literature [37] to be associated with a similar splay of side walls i.e. 16°. ST_{late} was found to be sensitive to the angle of the splayed side walls. In particular with this angle decreasing, i.e. when side walls tending to have an inverse (negative) splay, ST_{late} increased (see *Figure 3.2.11, Graph 5.6*). A splay of side walls of between 35° and 0° was found to correspond by and large to optimal ST_{late} i.e. -14dB. However, the requirement of Early-to-Late energy balance, i.e. to not exceed $ST_{\text{early}} - ST_{\text{late}} = 3\text{dB}$ (Table 2.1), was found to be associated with a splay of side walls ranging between 35° and 24° when the stage width was set to 12m.

So, the goodness of the side walls splay was found to be dependent on the stage width. In particular, for relatively large stage width (14m) a splay of 24° gave optimal ST_{early} and ST_{late} values. Nevertheless for relatively narrow stage (12m) a wider splay (35°) was required to satisfy the desired ST_{early} and ST_{late} criteria value. This implies that in relative small stages, a bigger splay of side walls than the suggested from literature 16° corresponds the above requirement.

Furthermore desired values of the ST_{early} (-11dB) were found in the present study to be associated with a stage canopy tilt of 20° (*Figure 3.2.13, Graph 5.7*) when the canopy height was set to 5m from stage level. This physical parameter increased i.e. it tended to be off optimal, with canopy tilt tending to horizontal. Also, desired values of the ST_{late} (-14dB) were found in the present experiment to be associated with a stage canopy tilt ranging between 20° to horizontal (*Figure 3.15, Graph 5.8*) when the canopy height was set to 5m. This physical parameter increased i.e. it tended to

be off optimal, with canopy tilt tending to negative angles. However, the suggested from literature requirement of Early-to-Late energy balance was found to be associated with a canopy tilt ranging between 20° to 15° when the canopy height was set to 5m from stage level.

So, the goodness of the canopy tilt found to be sensitive (dependent) on the stage height for relatively high stage (7m) a tilt of 6° gave optimal ST_{early} and ST_{late} values; for relatively low ceiling stage (5m) a larger tilt (15° and 20°) was required to satisfy the desired ST_{early} and ST_{late} criteria value.

Last, concerning the tilt of stage back wall, desired values of the ST_{early} (-11dB) were found in the present study to be independent (*Figure 3.15, Graph 3.9*). However, desired values of Early-to-Late energy balance were found in the present study to be associated with tilt of stage back wall ranging between 10° to -20° (*Figure 3.15, Graph 5.10*).

6 Conclusion

The present work attempted to contribute, using computer simulation, to the question of how the geometry of the stage influences stage acoustics.

A comparison of the computer modelling hall to the existing hall of 'Dimitris Mitropoulos' in Athens confirm reliability of the simulated data over the frequency range from 63-4000Hz.

The initial architectural data of 'Dimitris Mitropoulos' hall was found to be associated with literature's desired values of early and late energy; these two physical parameters are proposed in literature to account for ensemble and reverberance on stage, and they were adopted in the present investigation.

While altering the geometry of stage in digital space, the following trends were observed:

First; reducing the stage width and height, i.e. reducing the stage volume (from 730m³ down to 290m³), an undesirable increase of ST_{early} was observed, whereas the ST_{late} was found to be independent of the stage volume. This confirms findings of earlier studies employing computer simulation.

Secondly; the ST_{early} and ST_{late} were found to be optimized under the following stage geometries:

- i. A small splay of side walls (24°) was satisfactory for relatively wide stage (14m). The desired splay increased (to 35°) with stage width decreasing (12m). This finding confirms Chiang's conclusion.
- ii. A small canopy tilt (6°) was satisfactory for relatively high stage (7m). The desired tilt increased (to 20°) with height decreasing (5m).

In conclusion a wedge shaped stage with volume of the order of 800m³ was found to give optimal ST_{early} and ST_{late} values as suggested by Gade. The above results, by and large, confirm findings from an earlier study by another author, employing also computer simulation.

Overall, the results of the present experiment could provide alternative ways for designing of either big or small size stages, as 28 geometrical transformations on stage were investigated in a single simulated hall

7 References

- [1] A. C. Gade, "Acoustics for Symphony Orchestras; status after three decades of experimental research," in *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA*, Melbourne, Australia, 2010.
- [2] W. Chiang and Y.-k. Shu, "Acoustical design of stages with large plain surfaces in rectangular recital halls," *Applied Acoustics* 64, 2003, pp. 863-884.
- [3] A. H. Marshall, D. Gottlob and H. Alrutz, "Acoustical conditions preferred for ensemble," *J. Acoust. Soc. Am.*, no. 64, pp. 1437-1442, 1978.
- [4] A. C. Gade, "Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls. Part I: Methods and Laboratory Experiments," *Acustica*, no. 65, pp. 193-203, 1989.
- [5] A. C. Gade, "Investigations of Musicians' Room Acoustic Conditions in Concert Halls. Part II: Field experiments and synthesis of results," *Acta Acustica united with Acustica*, no. 65, pp. 249-262, 1989.
- [6] A. C. Gade, "Musicians' Ideas about Room Acoustic Qualities," Report No. 31, The Acoustics Laboratory, Technical University of Denmark, 1981.
- [7] A. C. Gade, "Practical aspects of room acoustic measurements on orchestra platforms," in *14th International Congress on Acoustics (ICA)*, Beijing, 1992.
- [8] J. J. Dammerud, "Stage Acoustics for Orchestras in Concert Halls," PhD Thesis, University of Bath, 2009.
- [9] J. J. Dammerud, "Details on G versus ST as a measure of absolute acoustic levels," <https://stageac.files.wordpress.com>, 2011.
- [10] J. Meyer and E. C. Biassoni de Serra, "Zum Verdeckungseffekt bei Instrumentalmusikern," *Acustica* 46, pp. 130-140, 1980.
- [11] G. M. Naylor and R. Craik, "Effects of Level Difference and Musical Texture on Ease of Ensemble," *Acustica* 65, pp. 95-100, 1988.
- [12] K. Ueno and H. Tachibana, "Experimental Study on the Evaluation of Stage Acoustics by Musicians using a 6-channel sound simulation system," *Acoust. Sci. & Tech.* 24, 3, pp. 130-138, 2003.
- [13] K. Ueno, H. Tachibana and T. Kanamori, "Experimental Study on Stage Acoustics for Ensemble Performance in Orchestra," in *Proceedings of 18th ICA*, Japan, 2004.
- [14] W. Chiang, S.-T. Chen and S.-T. Huang, "Subjective assessment of Stage acoustics for Solo and Chamber Music Performances," *Acustica* 89, no. 5, pp. 848-856, 2003.

- [15] M. Cederlöf, "Podium acoustics for the symphony orchestra," MSc thesis, Royal Institute of Technology, department of Speech, Music and Hearing, Stockholm, Sweden, 2006.
- [16] J. Sanders, "Suitability of New Zealand halls for chamber music," <http://www.marshallday.com/resources>, 2003.
- [17] R. van Luxemburg, C. Hak, P. Heijnen and M. Kivits, "Stage acoustics: experiments on 7 stages of concert halls in the Netherlands," in *Proceedings of Internoise Ottawa*, Canada, 2009.
- [18] R. van Luxemburg, R. Wenmaekers, C. Hak and M. Kivits, "Stage acoustics, further development of parameter LQ7-40," in *Proceedings of Internoise*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [19] M. Giovannini, *Measurement and Analysis Methodologies for Acoustical Characterization of Spaces for Classical Music Performers: Objective evaluations and Subjective Investigations*, PhD Thesis, Politecnico di Torino, Italy, 2008.
- [20] M. Giovannini and A. Gade, "Acoustical evaluation of different acoustic conditions in The Queen's Hall - The Royal Library, Copenhagen," in *Proceedings 19th ICA, Madrid, Spain, Paper RBA-06-028*, 2007.
- [21] J. J. Dammerud, "Suggested data collection for assessing the stage conditions on symphony," <http://stageac.wordpress.com/>, 2011.
- [22] M. Barron, "The Gulbenkian Great Hall, Lisbon, II: an acoustic study of a concert hall with variable stage," *J. Sound Vib.* 59, 1978, pp. 481-502.
- [23] C. Jaffe, "The orchestra platform - the last frontier to listen where few men or women have listened before," *Sabine Symposium 1994*, 1994, pp. 287-290.
- [24] J. Meyer, "Understanding the orchestral stage environment from the musician's, singer's and conductor's point of view," in *Proceedings of the Wallace Clement Sabine Centennial Symposium*, Cambridge, Massachusetts, USA, 1994.
- [25] D. S. Dominguez, *A Study of Musicians' Room Acoustic Conditions*, Master thesis, Acoustics Section, Technical University of Denmark, DTU, 2008.
- [26] ISO 3382-1-2009, *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces*, Geneva (CH): International Organisation for Standardisation (ISO), 2009.
- [27] Y. Jurkiewicz, "Investigation of Musicians' Conditions and Acoustical Environments on Orchestra Platforms," in *Master's Thesis in collaboration with Arup NY*, Ecole Centrale de Lyon, 2005.
- [28] M. Skalevic, "Orchestra Canopy Arrays - Some Significant Features," in *Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting*, Gothenburg, Sweden, 2006.

- [29] R. H. C. Wenmaekers, C. C. J. M. Hak and L. C. J. van Luxemburg, "On measurements of stage acoustic parameters: time interval limits and various source–receiver distances," *Acta Acustica united with Acustica* 98, 2012.
- [30] M. Barron and J. J. Dammerud, "Stage acoustics in concert halls-Early investigations," in *Institute of Acoustics*, 2006.
- [31] W. Reichardt and U. Lehmann, "Sind Raueindruck and Durchsichtigkeit des Horerlebnisses im Konzertsaal Gegensätze?," *Applied Acoustics*, no. 9, p. 139.
- [32] V. Jordan, "Einige Bemerkungen über Anhall und Anfangsnachhall in Musikräumen," *Applied Acoustics*, 1, p. 29, 1968.
- [33] U. Eysholdt, Subjective investigations and digital simulations of sound fields from concert halls, Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.
- [34] W. C. Sabine, *Collected Papers on Acoustics*, Dover Publ. (1964), first published 1922.
- [35] I. Bork, "A Comparison of Room Simulation Software – The 2nd Round Robin on Room," *Acta Acoustica*, vol. 86, pp. 943-956, 2000.
- [36] J. S. Bradley, "Predictors of speech intelligibility in rooms," *J. Acoust. Soc. Am*, vol. 80, no. 3, pp. 837-845, 1986.
- [37] S. Kan, K. Takaku and S. Nakamura, "A report on the relationship between orchestra shell design and musicians' acoustical impression," 15th ICA Trondheim, 1995, pp. 525-528.

Appendix A

Στο παρών παράρτημα γίνεται μια σύντομη επεξήγηση του λογισμικού προγράμματος 'Odeon Room Acoustics Software'.

ODEON Room Acoustics Modelling Software

A.1. About ODEON

ODEON is reliable, easy-to-use modelling software for simulating acoustics of closed rooms, open spaces, buildings and outdoor areas. It is a proven tool for predicting the acoustics of new buildings and for evaluating and recommending improvements in existing ones. The acoustics are calculated based on a room's geometry and surface properties. Graphs, 3D plots and 3D animations make it easy to interpret, explore and present results, and using auralisation you can experience the acoustics of the space as it would be after construction. ODEON's prediction algorithms (image-source method combined with ray tracing) allow reliable predictions in modest calculation times. With this, ODEON is ideal for the prediction of acoustics in concert halls, opera halls, auditoria, foyers, underground stations, airport terminals and industrial workrooms, as well as office environments, smaller lecture rooms, open-air venues, patios and atria. In large rooms and open spaces, PA systems may be necessary to support the acoustics. ODEON provides the tools to simulate such systems. For the prediction of noise levels from large machinery a special ray-tracing algorithm has been developed that allows the modelling of surface and line sources.

A.2. The origin of ODEON



Figure - Odeon of Herodes Atticus, Athens

The ODEON project was initiated as a cooperation between the Technical University of Denmark (Dpt. of Acoustic Technology) and a group of consulting companies in 1984 with the purpose of providing reliable prediction software for room acoustics. The years invested in the ODEON development has provided a reliable yet easy to use room acoustics prediction and measuring software. Today ODEON is used for a wide range of applications. The classic, greek odeon evolved from the development of the large, open-air theatre into a more intimate, roofed-over venue for music performance (a place to sing 'odes') and, as such, was the first known instance of the construction of concert halls. The first version of ODEON in 1991 was aimed at the prediction of auditorium acoustics. Since then, ODEON has been continually developed and refined, and is now available in three state-of-the-art editions: Industrial, Auditorium and Combined. All editions run on Microsoft® Windows® XP, Windows Vista® and Windows® 7.

A.3. Calculation Method

A.3.1. Algorithms and Applications

ODEON is based on prediction algorithms (image-source method and ray-tracing) allowing reliable predictions in modest calculation times. Scattering due to surface roughness and diffraction is taken into account using a method that accounts for frequency-dependent scattering: the reflection-based scattering method. It is ideal for the prediction of room acoustics in large and complex rooms.

A.4. Uses and Features

Uses

- Prediction and optimisation of room acoustics for planning or refurbishment of the interior of buildings
- Prediction of sound transmission through walls or through coupled rooms in entire buildings
- Prediction of acoustics in partly outdoor areas, such as city squares or railway stations
- Prediction and optimisation of the interaction between loudspeaker systems and room acoustics.
- Aural imitation of an acoustical environment by high-quality auralisation over headphones or loudspeakers
- Education and university projects

Features

- Fast modelling using the included tools: parametric room editor, graphic editor, import from CAD systems
- Numerous tools for model verification
- Extendable material library
- Modelling of transmission and diffraction phenomena
- Flexible choice of sources and receivers
- Modest calculation time
- Reflectograms, 3D reflection paths, 3D maps, graphs and various other means of visualising results
- High-quality binaural and surround auralisation
- Comprehensive library of anechoic recordings for auralisation
- Results easily copied and exported for project reports and presentations
- Direct comparison of measurements and ODEON simulations
- Near-field, far-field and direct coverage of array speakers
- Supports Common Loudspeaker Format (www.clfgroup.org)
- Effective project management

Appendix B

Στο παρών παράρτημα θα γίνει μια αναφορά στην αίθουσα Δημήτρης Μητρόπουλος που βρίσκεται στο Μέγαρο Μουσικής Αθηνών.

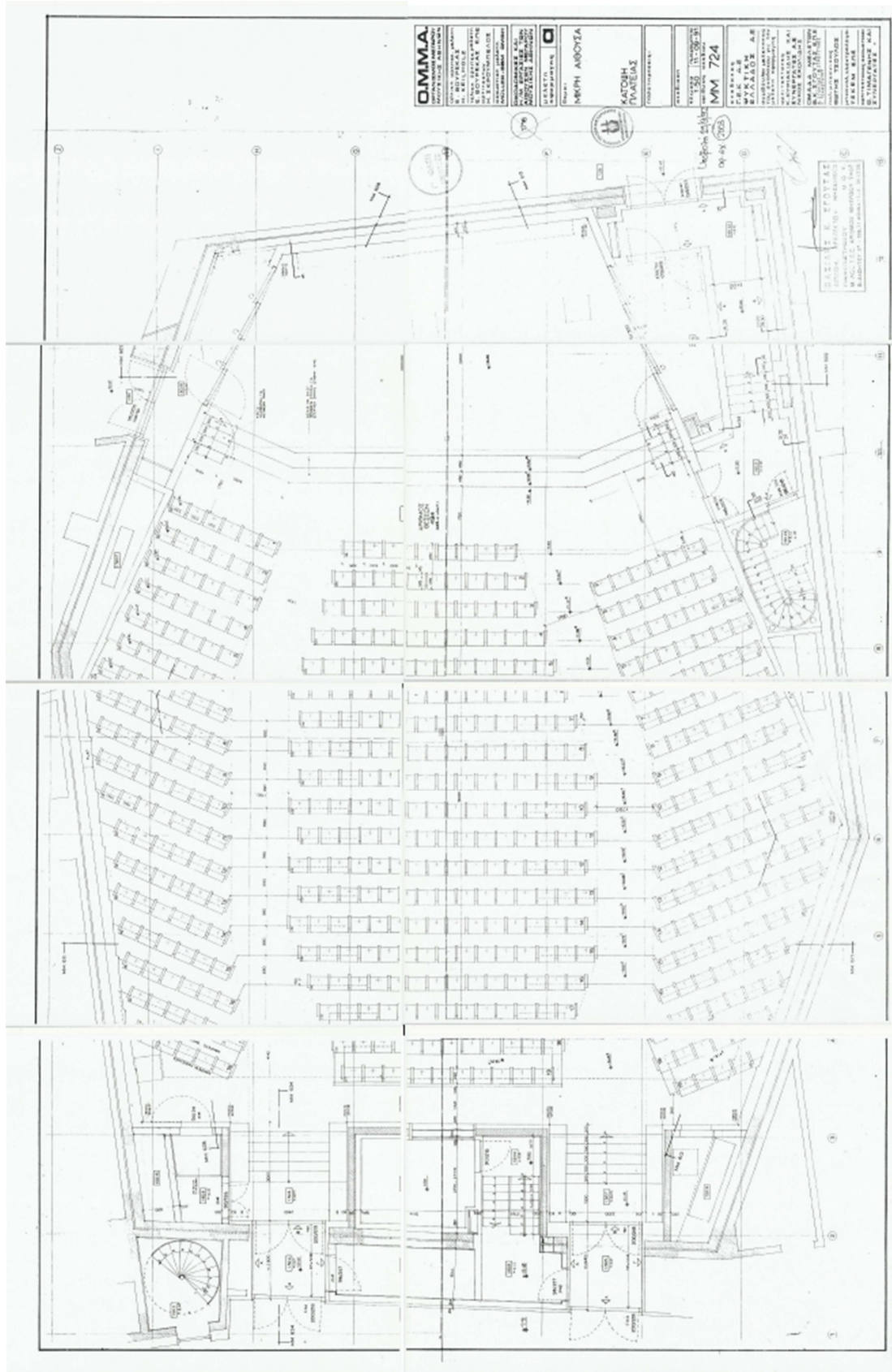
B.1. Σχετικά με την Αίθουσα Δημήτρης Μητρόπουλος



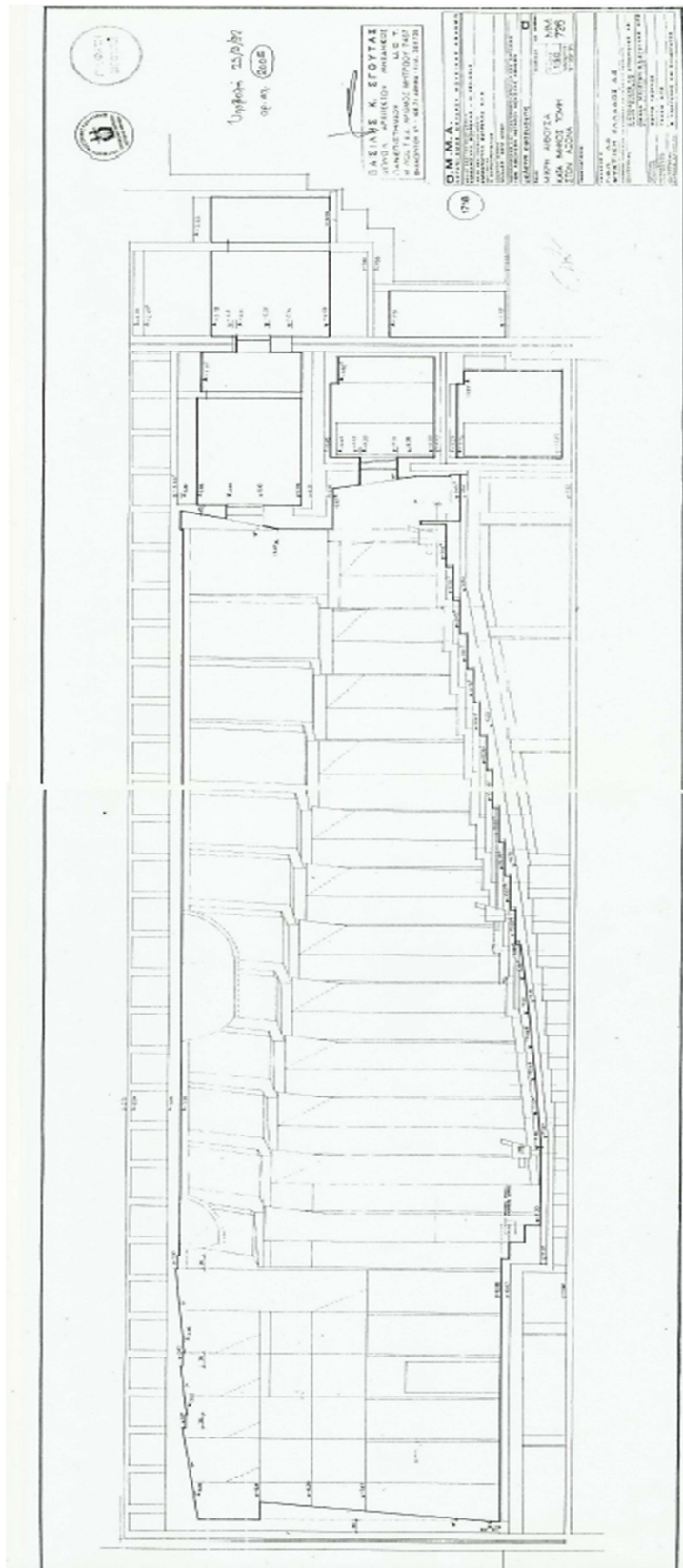
Η Αίθουσα Δημήτρη Μητρόπουλου έχει το όνομα του διάσημου Έλληνα αρχιμουσικού. Μπορεί να φιλοξενήσει 450 άτομα (αν και αυτό μεταβάλλεται ανάλογα με το είδος της παράστασης). Ο σχεδιασμός και ο τεχνολογικός της εξοπλισμός επιτρέπουν να μην περιορίζεται μονάχα σε εκδηλώσεις "μουσικής δωματίου", όπως συμβαίνει συχνά σε χώρους ανάλογου μεγέθους. Μπορεί να φιλοξενήσει ατομικά ρεσιτάλ, παραστάσεις χορού αλλά και όπερας. Κατασκευάστηκε με τεχνικές προδιαγραφές ενός υπερσύγχρονου στούντιο ηχογραφήσεων. Διαθέτει τον απαραίτητο τεχνικό εξοπλισμό ώστε να μπορεί να έχει και συνεδριακή χρήση. Διαθέτει τρεις μεταφραστικούς θαλάμους, σε συνδυασμό με ηλεκτροακουστικό σύστημα και οθόνη προβολών.

Κατά τη διάρκεια των συναυλιών δεν υπάρχει ενίσχυση του ήχου αλλά ο ήχος υποστηρίζεται αποκλειστικά από την αίθουσα, με φυσικό τρόπο. Θεωρείται μία από τις 5 καλύτερα σχεδιασμένες, από άποψη ακουστικής, αίθουσα στον κόσμο.

B.1.1. Κάτοψη Αίθουσας Δημήτρη Μητρόπουλου



B.1.2. Τομή Αίθουσας Δημήτρη Μητρόπουλου



Appendix C

Στο παρών παράρτημα θα γίνει επεξήγηση της μεθόδου «Ανάλυση σε Παράγοντες».

C.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ (Factor Analysis)

C.1.1. ΘΕΩΡΙΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Η παραγοντική ανάλυση είναι μια στατιστική μέθοδος που έχει σκοπό να βρει την ύπαρξη παραγόντων κοινών ανάμεσα σε μια ομάδα μεταβλητών. Έτσι εκφράζοντας αυτούς τους παράγοντες μπορούμε:

- Να μειώσουμε τις διαστάσεις του προβλήματος. Αντί να δουλεύουμε με τις αρχικές μεταβλητές να δουλέψουμε με λιγότερες αφού οι παράγοντες είναι έτσι κατασκευασμένοι ώστε να διατηρούν όσο γίνεται την πληροφορία που υπήρχε στις αρχικές μεταβλητές.
- Να δημιουργήσουμε νέες μεταβλητές, τους παράγοντες, στις οποίες μπορούμε με έναν υποκειμενικό τρόπο να αναγνωρίσουμε ως κάποιες μη μετρήσιμες μεταβλητές όπως η αντίληψη του ήχου από τον ακροατή.
- Να εξηγήσουμε τις συσχετίσεις που υπάρχουν στα δεδομένα, για τις οποίες έχουμε υποθέσει ότι οφείλονται αποκλειστικά στην ύπαρξη κάποιων παραγόντων που δημιούργησαν τα δεδομένα.

Αυτό που πρέπει να έχει κανείς υπόψη του είναι πως η παραγοντική ανάλυση προσπαθεί περισσότερο να ερμηνεύσει την δομή παρά την μεταβλητότητα.

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι της παραγοντικής ανάλυσης, η Ανάλυση σε Κύριες Συνιστώσες (principal component analysis) και η κλασική Ανάλυση Παραγόντων.

Το μοντέλο της ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες εκφράζεται ως:

$$x_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{in}F_n$$

Όπου: x_i : για $i=1\dots n$ είναι οι αρχικές μεταβλητές

F_j : για $i=1\dots n$ είναι οι παράγοντες

n : ο συνολικός αριθμός παραγόντων, που αντιστοιχεί στο σύνολο των μεταβλητών

Η κλασσική παραγοντική ανάλυση εκφράζεται ως:

$$x_i = a_{i1}F_1 + a_{i2}F_2 + \dots + a_{im}F_m + d_iU_i$$

Όπου: U_i : μοναδικός παράγοντας που αντιστοιχεί στην μεταβλητή για

$$i = 1 \dots m$$

d_j : γ

m : ο συνολικός αριθμός παραγόντων

Το μοντέλο της κλασσικής ανάλυσης παραγόντων υποθέτει την ύπαρξη της μοναδικής συσχέτισης που συνδέεται με κάθε μεταβλητή και την ύπαρξη κάποιας σχέσης μεταξύ των μεταβλητών. Η μοναδική συσχέτιση υπολογίζεται και εξάγεται από τις εξισώσεις έτσι ώστε η λύση των εξισώσεων να βασίζεται μόνο στην συνήθη συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

Και στα δύο μοντέλα οι συντελεστές a_{ij} επιλέγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούν τις ακόλουθες συνθήκες:

- 1) Οι παράγοντες είναι γραμμικοί συνδυασμοί των αρχικών μεταβλητών
- 2) Οι παράγοντες είναι ανεξάρτητοι μεταξύ τους και,
- 3) Οι παράγοντες έχουν εξαχθεί με μειούμενη σειρά ως προς την σημασία, για παράδειγμα ο πρώτος παράγοντας αντιστοιχεί στο μεγαλύτερο ποσοστό της συσχέτισης των αρχικών δεδομένων.

Ο υπολογισμός των συντελεστών a_{ij} αποκαλείται φόρτιση παραγόντων.

C.1.2. ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΑΡΧΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ

Ποικιλία μεθόδων είναι διαθέσιμες για την επίλυση μοντέλων της ανάλυσης παραγόντων. Αυτές οι μέθοδοι έχουν σκοπό να καταλήξουν σε αυτό που αποκαλείται αρχικός πίνακας παραγόντων. Αυτό που είναι κοινό σε όλες τις μεθόδους παραγόντων είναι ότι ο πρώτος παράγοντας που εξάγεται τείνει να είναι ένας γενικός

παράγοντας. Σχεδόν κάθε μεταβλητή παρουσιάζει σημαντική φόρτιση στο πρώτο παράγοντα.

Δεδομένου του αρχικού πίνακα παραγόντων είναι πιθανό να αποφασίσει κανείς τον αριθμό των παραγόντων που θα διατηρηθούν. Αν και για αυτή την απόφαση δεν υπάρχει κάποιο απόλυτο κριτήριο, η ανάλυση μπορεί να τερματιστεί όταν ο αριθμός των παραγόντων που έχουν διατηρηθεί ερμηνεύουν ένα σημαντικά υψηλό ποσοστό της συσχέτισης των αρχικών δεδομένων.

Πληθώρα κριτηρίων είναι διαθέσιμα για την απόφαση των παραγόντων που δεν θα ληφθούν υπόψη. Σύμφωνα με το κριτήριο του Kaiser, παράγοντες με ιδιοτιμή μικρότερη της μονάδας αγνοούνται. Αυτό επειδή τέτοιοι παράγοντες αποτελούνται από διακύμανση σφάλματος που είναι δύσκολο να ερμηνευτεί.

Ένα ακόμη κριτήριο είναι αυτό που βασίζεται στο γράφημα των ιδιοτιμών ως προς τον αύξοντα αριθμό των παραγόντων (scree plot). Το σημείο από το οποίο και μετά η καμπύλη έχει απότομη πτώση υποδεικνύει ότι μέχρι εκεί θα διατηρηθούν και εκτιμηθούν οι παράγοντες.

C.1.3. ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ

Μερικές φορές οι μεταβλητές και οι συνιστώσες-παράγοντες δεν φαίνονται να συσχετίζονται κατά τρόπο εύκολα ερμηνεύσιμο. Σε αυτήν την περίπτωση ακολουθείται η περιστροφή των κυρίων συνιστωσών (δηλ. των ορθογώνιων αξόνων) έτσι ώστε να γίνει ευκολότερη η ερμηνεία τους. Μετά την περιστροφή η καθεμιά από τις μεταβλητές θα έχει μη μηδενικές επιβαρύνσεις σε όσο το δυνατό λιγότερους παράγοντες, ή ακόμη και σε έναν μόνο παράγοντα. Το γεγονός αυτό βοηθάει στην ερμηνεία του παράγοντα. Δηλαδή, ο σκοπός της περιστροφής του αρχικού πίνακα παραγόντων είναι η εύρεση απλών και ερμηνεύσιμων παραγόντων.

Οι βασικές μέθοδοι περιστροφής είναι οι ακόλουθοι :

- Varimax : Προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των μεταβλητών που έχουν μεγάλες επιβαρύνσεις για κάθε παράγοντα
- Quartimax : Προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τον αριθμό των παραγόντων που εξηγούν μια μεταβλητή.
- Equimax : Συνδυασμός των varimax και quartimax

- Oblique : Μη ορθογώνια περιστροφή , οι άξονες που προκύπτουν δεν είναι πια ορθογώνιοι (και οι παράγοντες δεν είναι ανεξάρτητοι). Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι πιο δύσκολη.

C.1.4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΤΥΠΙΚΟΥ ΣΦΑΛΜΑΤΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Ο υπολογισμός του τυπικού σφάλματος της φόρτισης που επιδρά σ' ένα παράγοντα μπορεί να υπολογιστεί από τον ακόλουθη σχέση:

$$[\text{τυπικό σφάλμα φόρτισης}] = [\text{τυπικό σφάλμα συσχέτισης}] * \sqrt{\frac{n}{n+1-r}}$$

Όπου n: το πλήθος των μεταβλητών

r: η σειρά εξαγωγής του παράγοντα, π.χ. r=1,2,3 για τον πρώτο, δεύτερο και τρίτο παράγοντα αντιστοίχως

Το τυπικό σφάλμα της συσχέτισης για συγκεκριμένο επίπεδο σημαντικότητας (στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε επίπεδο σημαντικότητας 1%) είναι μία συνάρτηση του μεγέθους του δείγματος που χρησιμοποιείται στην ανάλυση και μπορεί να βρεθεί από τον παρακάτω πίνακα (Child 1970).

| Τιμές των συσχετίσεων που απαιτούνται | | |
|---------------------------------------|------------------------|-------|
| Μέγεθος του δείγματος | Επίπεδο σημαντικότητας | |
| | 5% | 1% |
| 5 | 0,755 | 0,875 |
| 10 | 0,576 | 0,714 |
| 15 | 0,483 | 0,605 |
| 20 | 0,425 | 0,538 |
| 25 | 0,380 | 0,488 |
| 30 | 0,338 | 0,440 |
| 35 | 0,320 | 0,417 |
| 40 | 0,300 | 0,394 |
| 45 | 0,280 | 0,370 |
| 50 | 0,262 | 0,346 |
| 60 | 0,248 | 0,328 |
| 70 | 0,233 | 0,308 |
| 80 | 0,220 | 0,290 |
| 90 | 0,206 | 0,272 |
| 100 | 0,194 | 0,255 |
| 150 | 0,158 | 0,209 |
| 200 | 0,137 | 0,182 |
| 250 | 0,125 | 0,163 |
| 500 | 0,088 | 0,115 |

Το συμπέρασμα που συνάγεται από την εκτίμηση του τυπικού σφάλματος της φόρτισης είναι ότι οι αριθμητικές τιμές της κάθε μεταβλητής ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Appendix D

Στο παρών παράρτημα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών (Principal Component Analysis).

D.1. Γενικά στοιχεία ανάλυσης κυρίων συνιστωσών

Η «ταυτότητα» της ανάλυσης κυρίων συνιστωσών - Principal Component Analysis (PCA):

- Είναι μια μαθηματική διαδικασία
- Στόχος της: ο εντοπισμός μη συσχετισμένων δεδομένων μέσα από ένα σύνολο συσχετισμένων δεδομένων.
- Πραγματοποιείται με τη μετατροπή πιθανώς συσχετισμένων δεδομένων σε μη συσχετισμένες μεταβλητές (κύριες συνιστώσες ή principal components).
- Ο αριθμός των κύριων συνιστωσών είναι μικρότερος ή το πολύ ίσος με τον αριθμό των αρχικών μεταβλητών.
- Ο μετασχηματισμός γίνεται ώστε η πρώτη κύρια συνιστώσα (PC1) να εμφανίζει τη μέγιστη διακύμανση (δηλαδή να αντιστοιχεί στη μέγιστη ποικιλία δεδομένων) και η κάθε επόμενη να εμφανίζει συνεχώς χαμηλότερη διακύμανση και ταυτόχρονα να μην εμφανίζει συσχέτιση με τις προηγούμενες της.

D.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

D.2.1. Correlation matrix (πίνακας συσχετίσεων):

Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται μεταβλητές που έχουν ισχυρή συσχέτιση.

Correlation Matrix^a

| Correlation | STearly | STlate | G | Gearly | Glate | C_80 | T_30 | EDT |
|-------------|---------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| STearly | 1,000 | ,698 | ,854 | ,786 | ,820 | -,661 | -,470 | ,877 |
| STlate | ,698 | 1,000 | ,658 | ,961 | ,553 | -,978 | -,491 | ,925 |
| G | ,854 | ,658 | 1,000 | ,802 | ,991 | -,615 | -,628 | ,806 |
| Gearly | ,786 | ,961 | ,802 | 1,000 | ,715 | -,964 | -,573 | ,961 |
| Glate | ,820 | ,553 | ,991 | ,715 | 1,000 | -,504 | -,615 | ,724 |
| C80 | -,661 | -,978 | -,615 | -,964 | -,504 | 1,000 | ,475 | -,912 |
| T30 | -,470 | -,491 | -,628 | -,573 | -,615 | ,475 | 1,000 | -,463 |
| EDT | ,877 | ,925 | ,806 | ,961 | ,724 | -,912 | -,463 | 1,000 |

a. This matrix is not positive definite.

D.2.2. Total Variance Explained (ερμηνεία συνολικής διακύμανσης):

Εδώ παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές και τα ποσοστά διακύμανσης των παραγόντων. Σημειώνεται ότι παράγοντες με ιδιοτιμή μικρότερη της μονάδας αγνοούνται καθώς αποτελούνται από διακύμανση σφάλματος που είναι δύσκολο να ερμηνευθεί. Όπως είναι φανερό και στον παρακάτω πίνακα, η διακύμανση εξηγείται σε ποσοστό 89,82% από τις δύο πρώτες συνιστώσες.

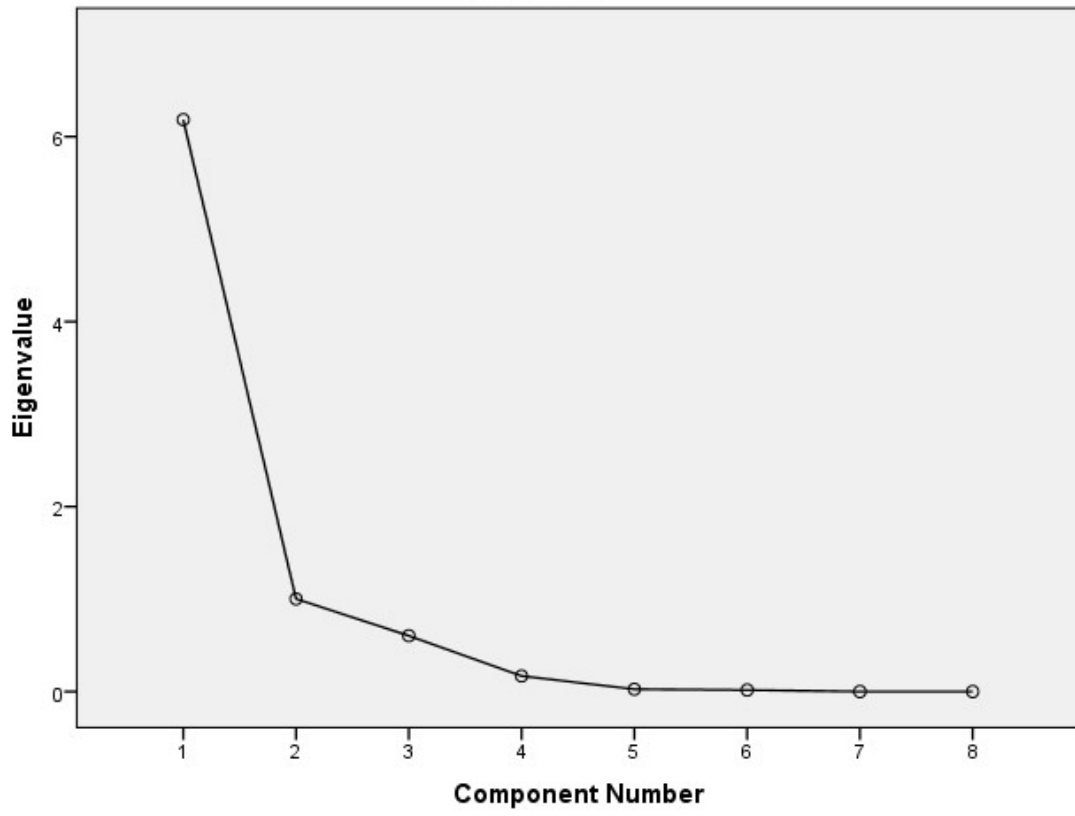
Total Variance Explained

| Component | Initial Eigenvalues | | | Extraction Sums of Squared Loadings | | |
|-----------|---------------------|---------------|--------------|-------------------------------------|---------------|--------------|
| | Total | % of Variance | Cumulative % | Total | % of Variance | Cumulative % |
| 1 | 6,184 | 77,295 | 77,295 | 6,184 | 77,295 | 77,295 |
| 2 | 1,002 | 12,525 | 89,820 | 1,002 | 12,525 | 89,820 |
| 3 | ,604 | 7,547 | 97,367 | | | |
| 4 | ,168 | 2,103 | 99,470 | | | |
| 5 | ,026 | ,319 | 99,789 | | | |
| 6 | ,017 | ,211 | 100,000 | | | |
| 7 | 3,033E-005 | ,000 | 100,000 | | | |
| 8 | 1,001E-013 | 1,007E-013 | 100,000 | | | |

Total Variance Explained

| Component | Rotation Sums of Squared Loadings | | |
|-----------|-----------------------------------|---------------|--------------|
| | Total | % of Variance | Cumulative % |
| 1 | 3,861 | 48,262 | 48,262 |
| 2 | 3,325 | 41,558 | 89,820 |
| 3 | | | |
| 4 | | | |
| 5 | | | |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |

Scree Plot



D.2.3. Component Matrix (Πίνακας Συνιστωσών)

Παρακάτω δίνεται ο πίνακας των κυρίων συνιστωσών με τις αντίστοιχες παραγοντικές φορτίσεις τους. Το τετράγωνο της παραγοντικής επιβάρυνσης εκφράζει το ποσοστό της συμμετοχής της κύριας συνιστώσας στην εξήγηση της διακύμανσης της μεταβλητής. Συνεπώς, το άθροισμα των τετραγώνων των παραγοντικών φορτίσεων της μεταβλητής για τις αντίστοιχες συνιστώσες, είναι το ποσοστό της διακύμανσης της μεταβλητής που εξηγείται από αυτές. Το υπόλοιπο ποσοστό της διακύμανσης που δεν εξηγείται από τις κύριες συνιστώσες σαν κοινή παραγοντική διακύμανση, οφείλεται στην μοναδικότητα της κάθε μεταβλητής.

Component Matrix^a

| | Component | |
|---------|-----------|-------|
| | 1 | 2 |
| Gearly | ,971 | -,211 |
| EDT | ,961 | -,194 |
| G | ,903 | ,382 |
| STlate | ,903 | -,397 |
| STearly | ,884 | ,158 |
| C80 | -,881 | ,449 |
| Glate | ,840 | ,498 |
| T30 | -,649 | -,376 |

Extraction Method: Principal Component Analysis.^a

a. 2 components extracted.

D.2.4. Rotated component matrix (Περιστρεμμένος Πίνακας Συνιστωσών):

Με βασικό σκοπό την καλύτερη ερμηνεία των συνιστωσών, γίνεται περιστροφή των κυρίων συνιστωσών με την τεχνική της ορθογωνικής περιστροφής μέγιστης διακύμανσης. Με αυτήν επιχειρείται να μεγιστοποιηθεί η διακύμανση των τετραγώνων των επιβαρύνσεων και να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των μεταβλητών με υψηλές επιβαρύνσεις σε κάθε παράγοντα, που θα βοηθήσει, έτσι, στην ερμηνεία των παραγόντων. Στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται οι φορτίσεις των παραγόντων μετά την περιστροφή του. Από εκεί μπορεί κανείς να εκφράσει κάθε μια μεταβλητή με την χρήση των δύο συνιστωσών. Έχουμε λοιπόν, την αντιπροσώπευση των 8 παραμέτρων-μεταβλητών από δύο κύριες συνιστώσες.

Rotated Component Matrix^a

| | Component | |
|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | 2 |
| C80 | -,955 | -,256 |
| STlate | ,937 | ,309 |
| Gearly | ,863 | ,493 |
| EDT | ,844 | ,500 |
| Glate | ,290 | ,932 |
| G | ,415 | ,889 |
| T30 | -,231 | -,713 |
| STearly | ,551 | ,709 |
| Min. | 0,46 | 0,49 |

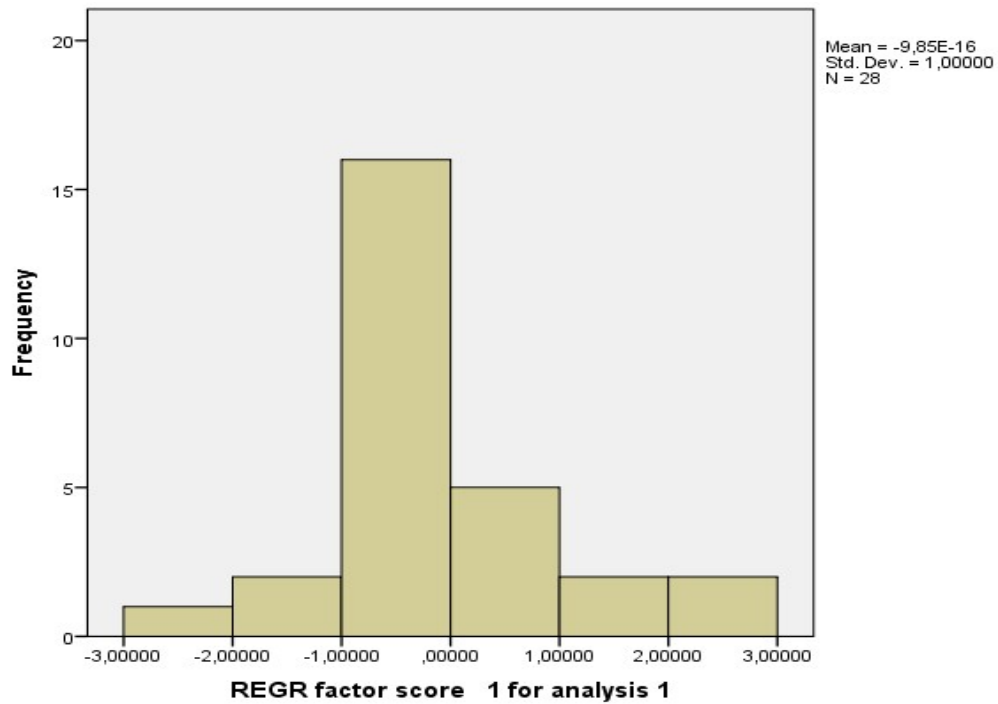
Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.^a

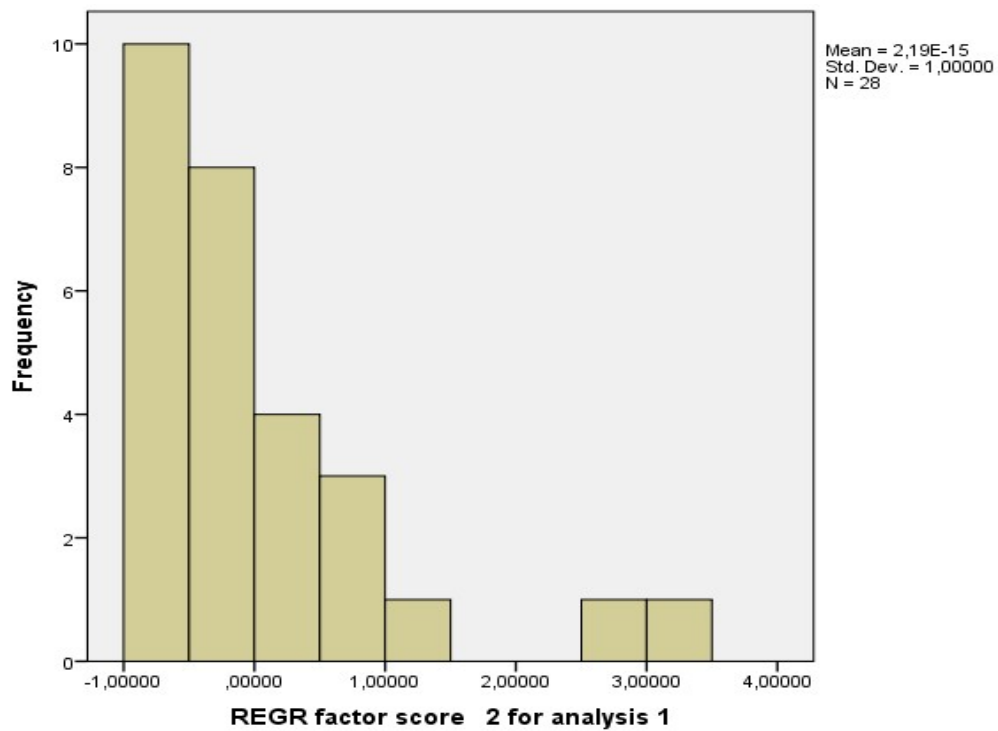
a. Rotation converged in 3 iterations.

D.2.5. Factor scores (Τιμές Συνιστωσών)

Graph



Graph



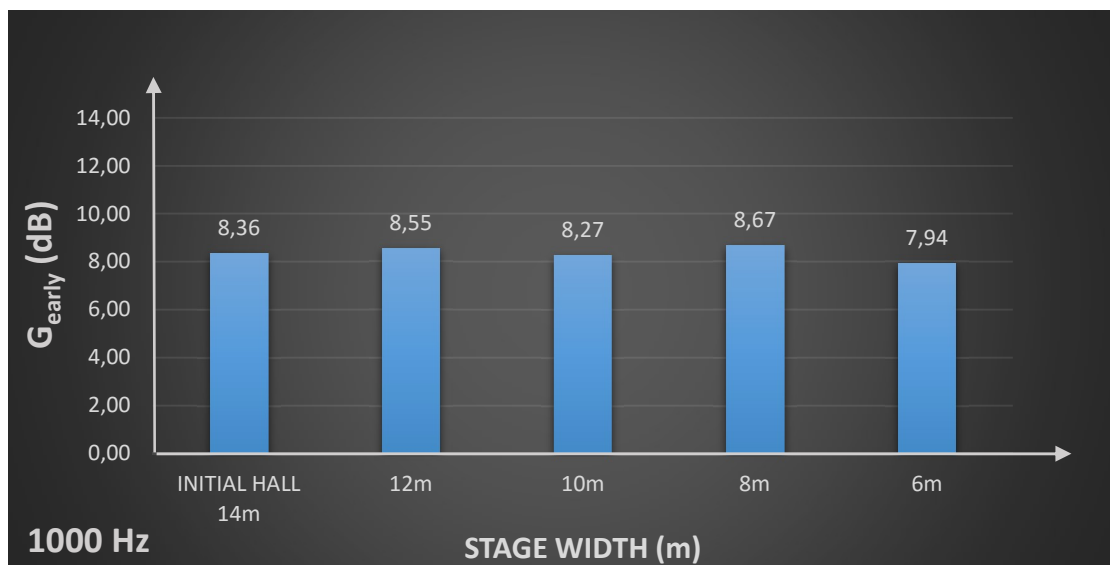
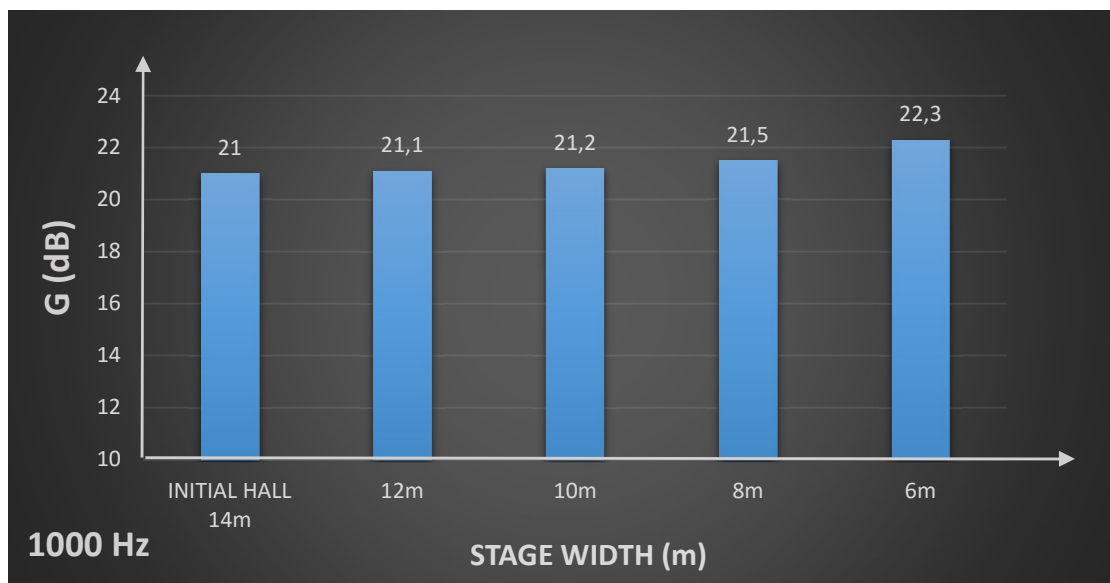
| A/A | Factor_1 Score | Factor_2 Score |
|-----|----------------|----------------|
| 1 | -0.18412 | -0.11857 |
| 2 | -0.47186 | 0.14971 |
| 3 | -0.34663 | 0.274 |
| 4 | -2.24927 | 2.63421 |
| 5 | -0.25446 | -0.58755 |
| 6 | -0.37072 | -0.20872 |
| 7 | -1.06106 | 0.97348 |
| 8 | -1.43365 | 0.8236 |
| 9 | -0.03645 | -0.85353 |
| 10 | -0.18412 | -0.11857 |
| 11 | 0.04982 | 0.34023 |
| 12 | 1.52154 | 1.1068 |
| 13 | 1.6395 | 3.00536 |
| 14 | 0.05239 | -0.35541 |
| 15 | 0.04305 | -0.34031 |
| 16 | -0.08183 | -0.55744 |
| 17 | 0.06812 | -0.91186 |
| 18 | -0.02388 | -0.98931 |
| 19 | -0.18396 | -0.71593 |
| 20 | -0.19976 | -0.85658 |
| 21 | -0.14756 | -0.83777 |
| 22 | -0.1528 | -0.92951 |
| 23 | -0.07238 | -0.85036 |
| 24 | -0.54917 | -0.3358 |
| 25 | -0.37072 | -0.20872 |
| 26 | 0.0165 | 0.13938 |
| 27 | 2.75862 | -0.42316 |
| 28 | 2.22488 | 0.75231 |

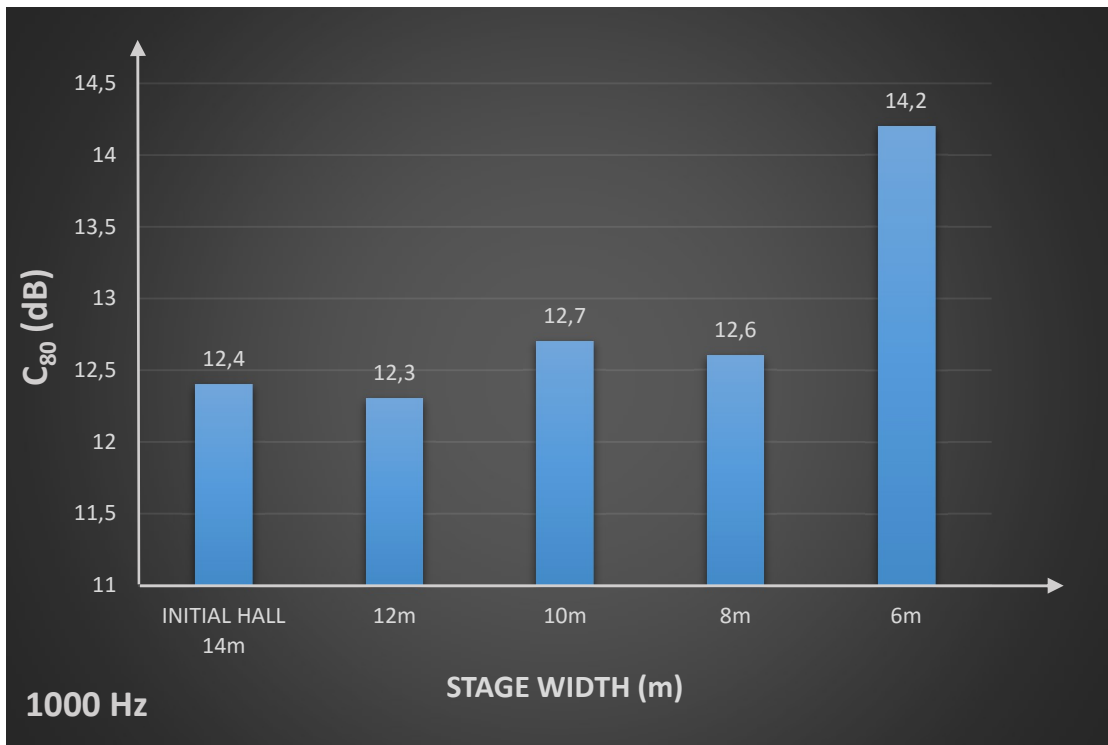
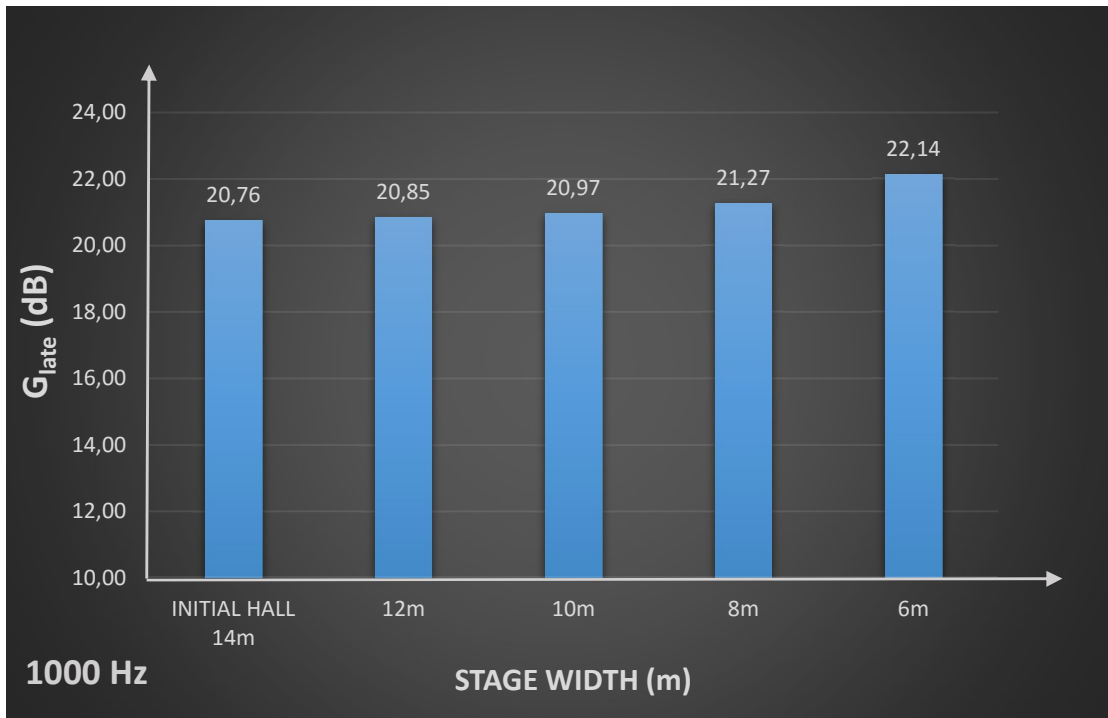
Factor scores are composite variables which provide information about an individual's placement on the **factor(s)**.

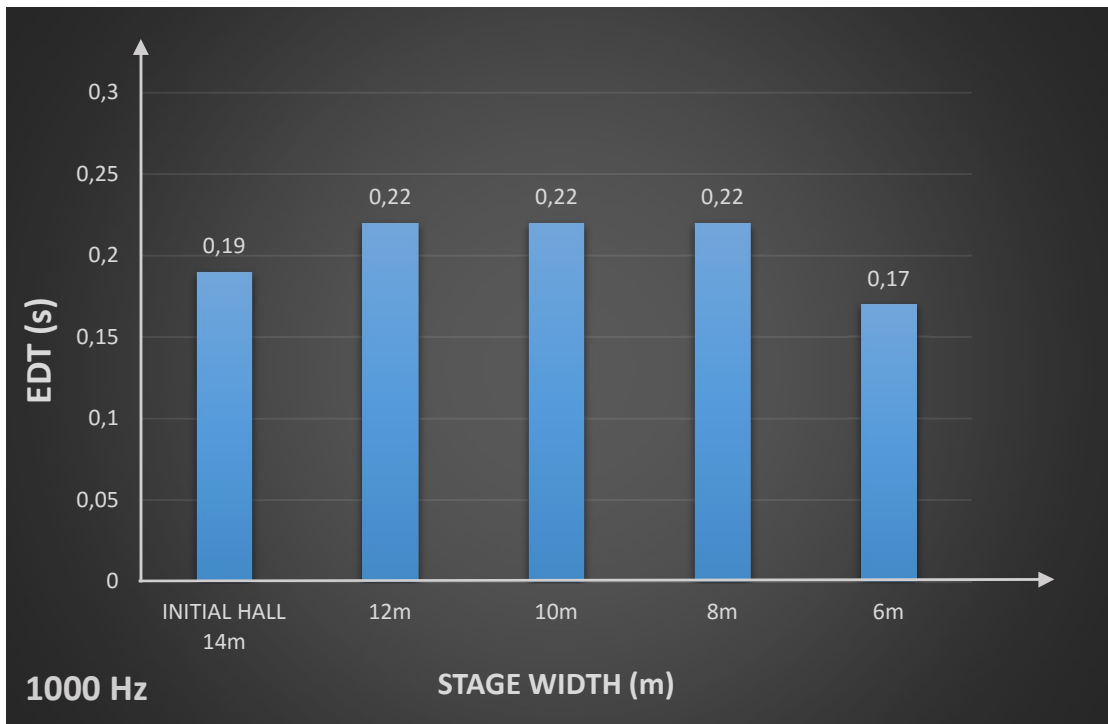
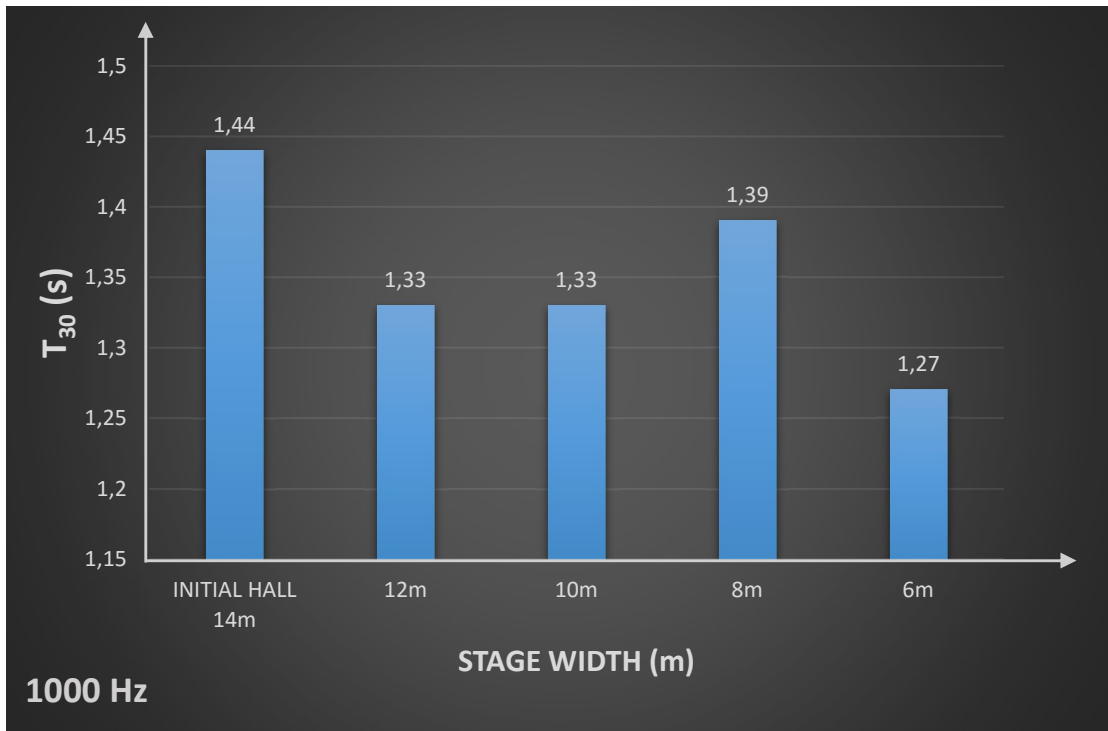
Appendix E

Στο παρών παράρτημα γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραμέτρων G , G_{early} , G_{late} , $C80$, $T30$ και EDT σε σχέση με τις γεωμετρικές αλλαγές στη σκηνή για τη συχνότητα 1000 Hz. Για το υπόλοιπο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) βλ. Παράρτημα Z.

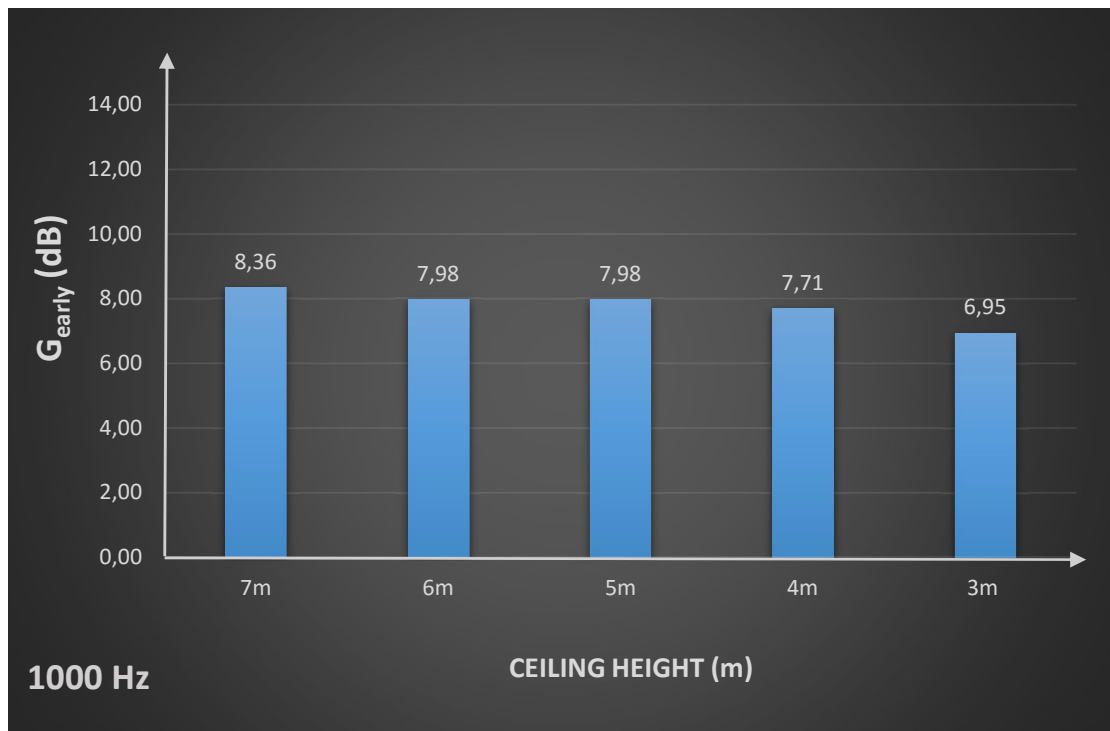
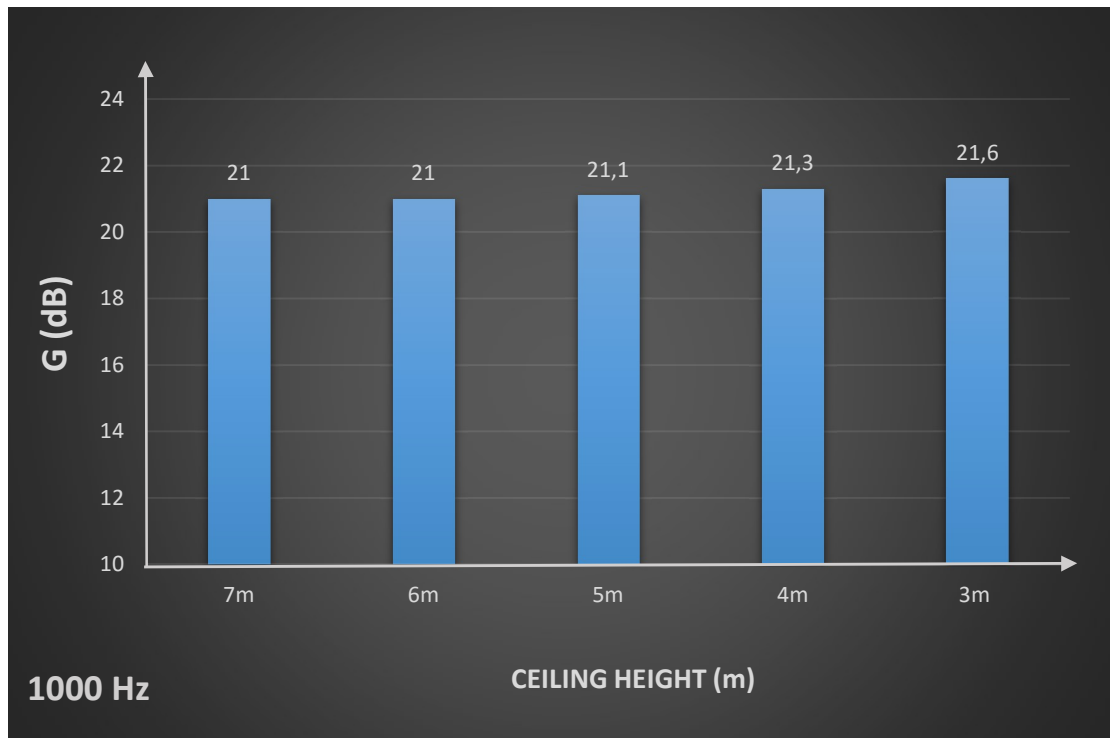
E.1. Stage width

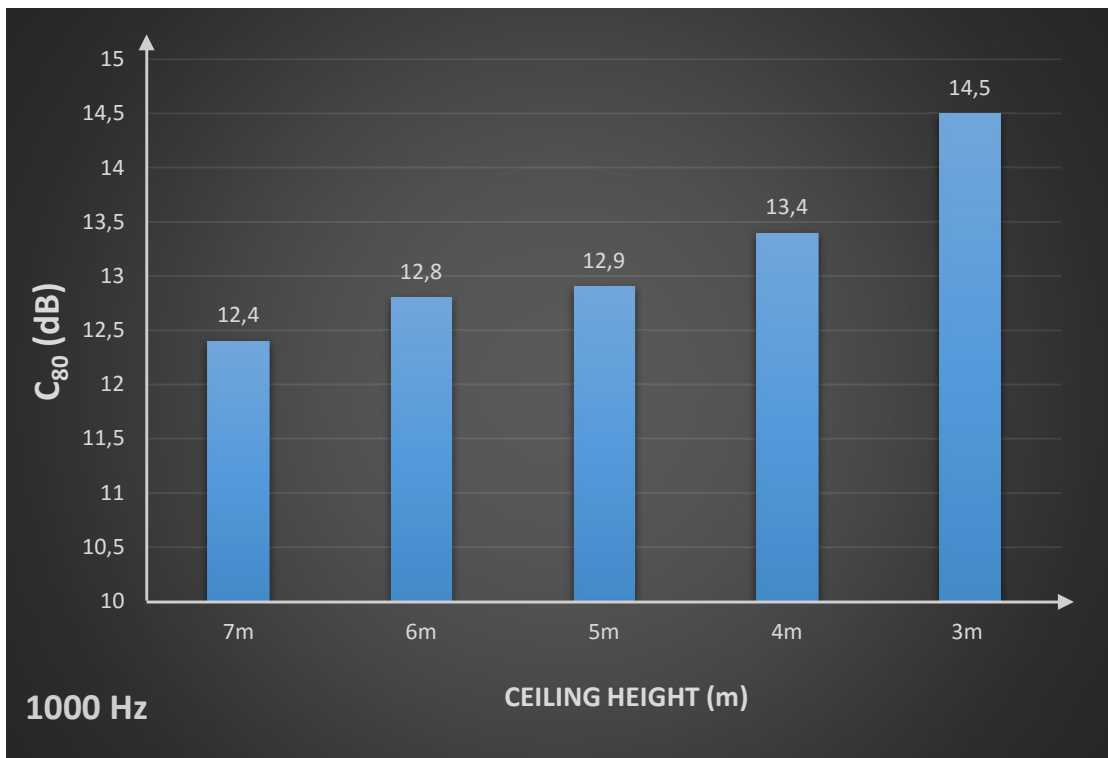
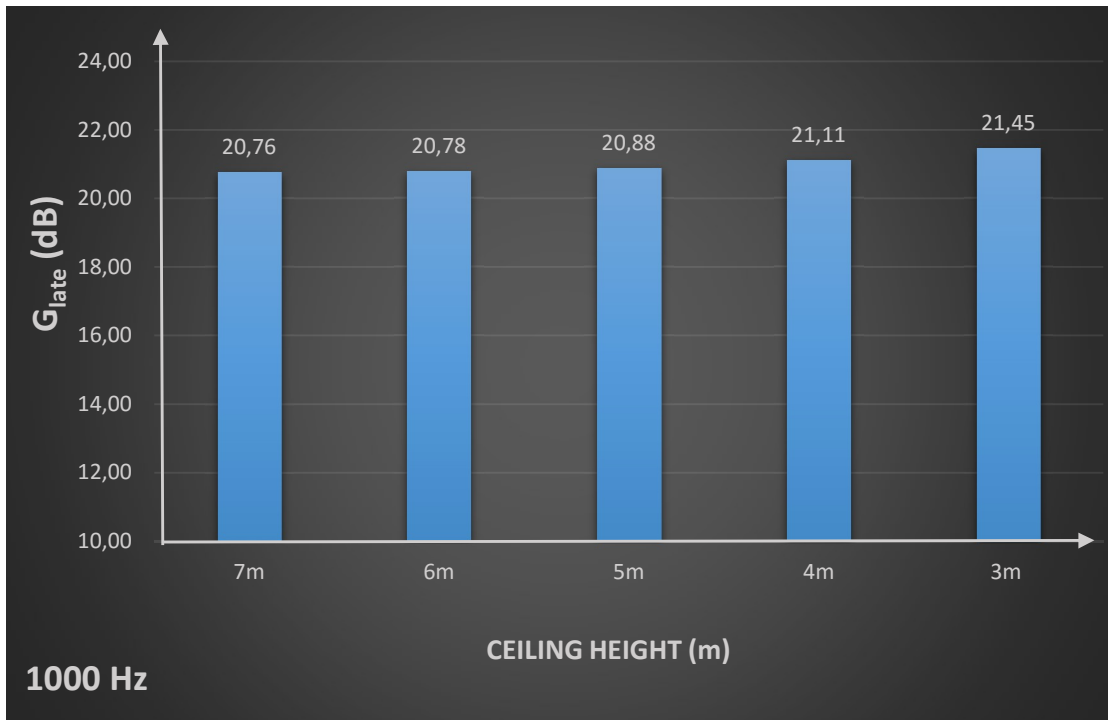


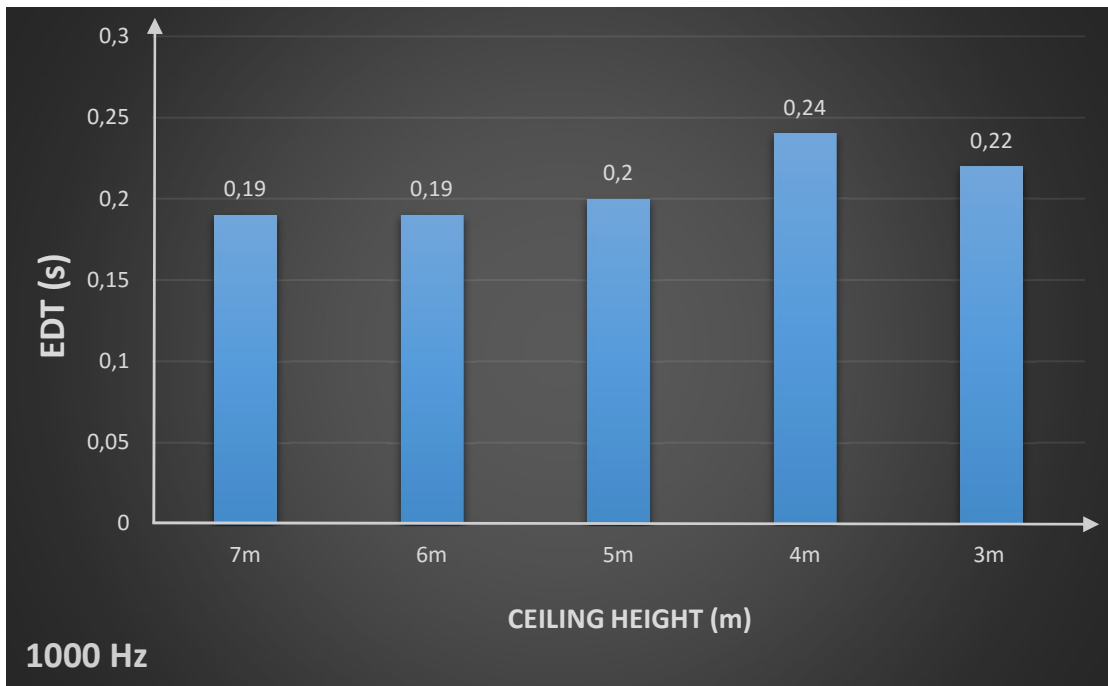
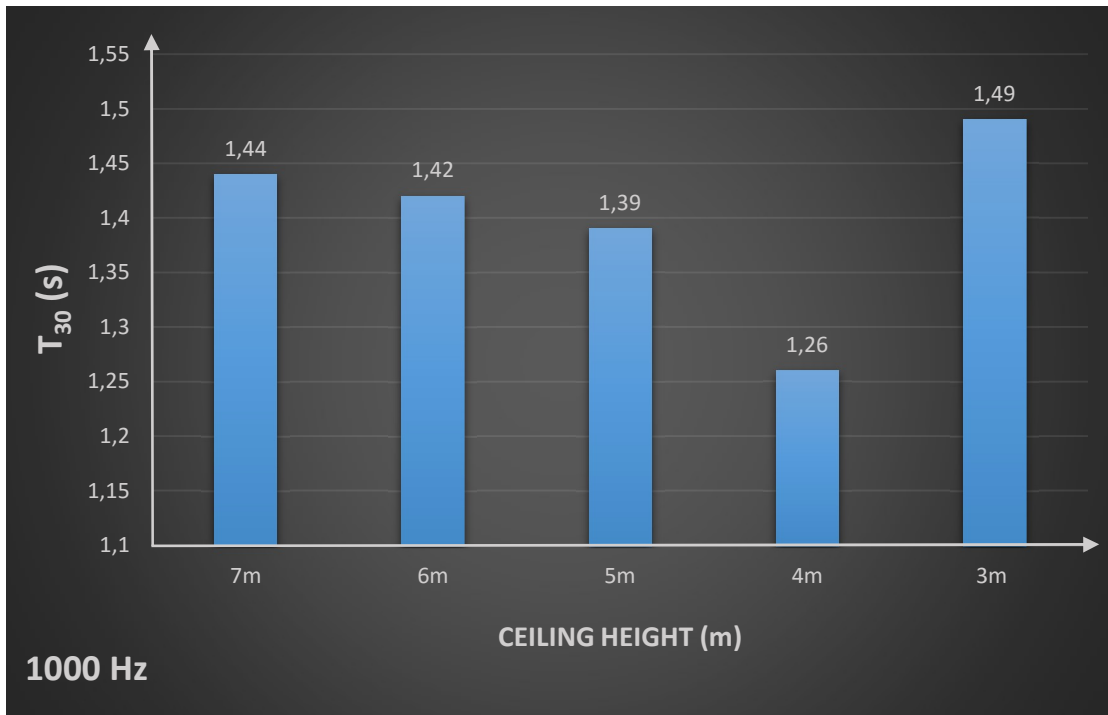




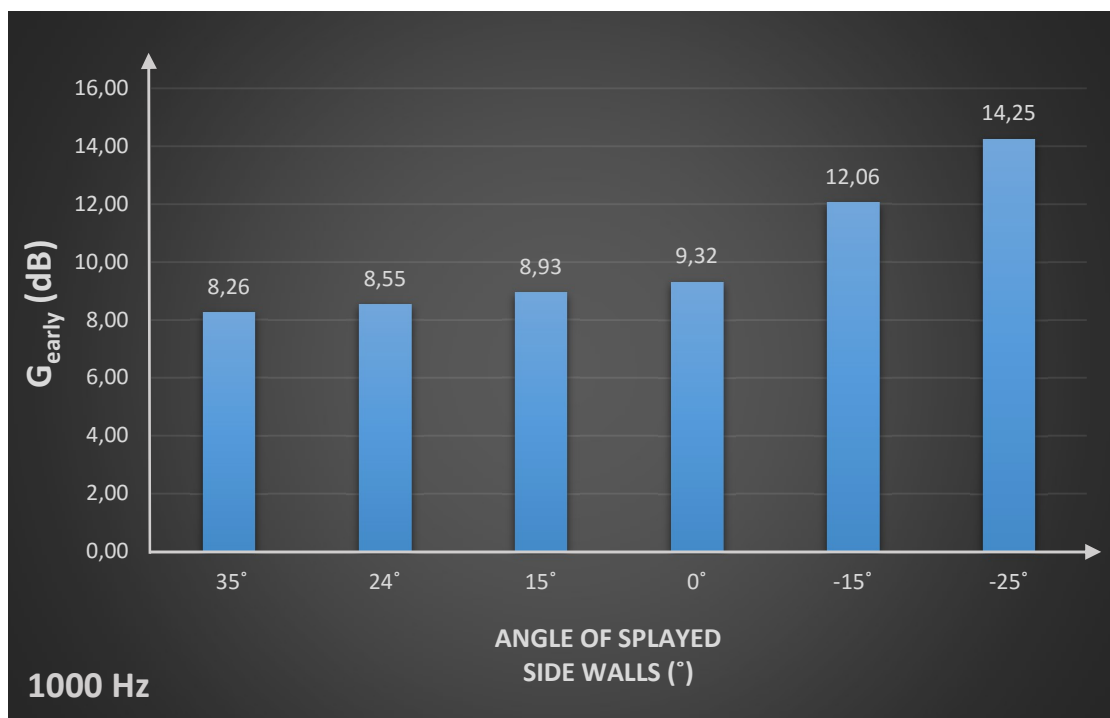
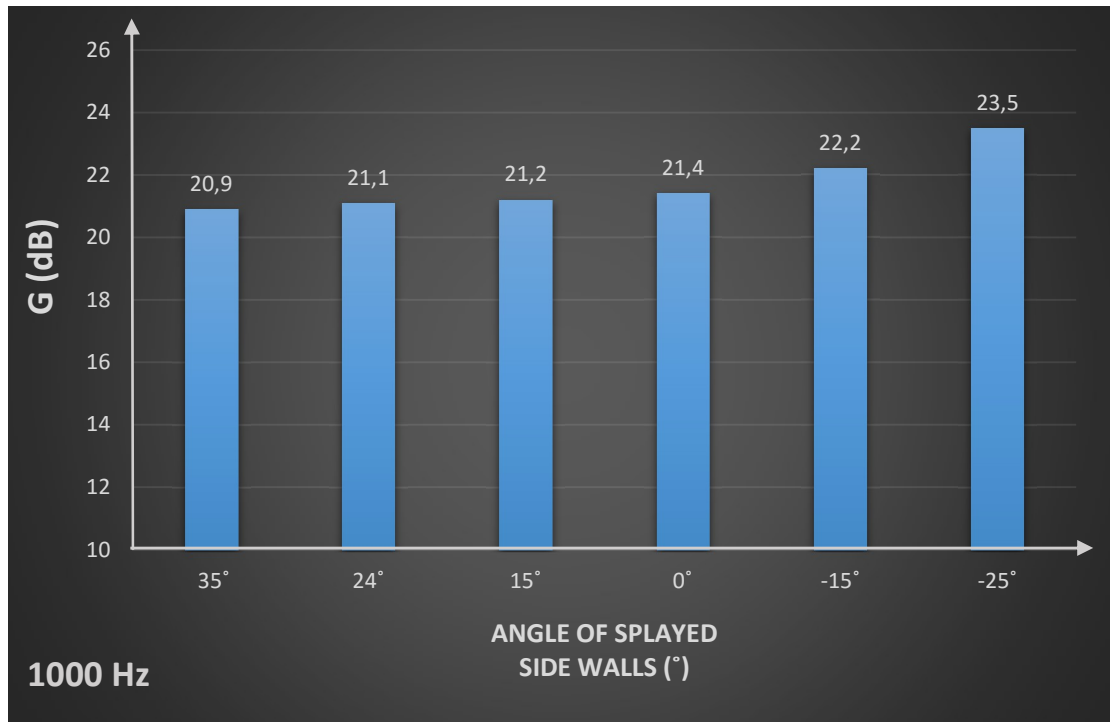
E.2. Ceiling height

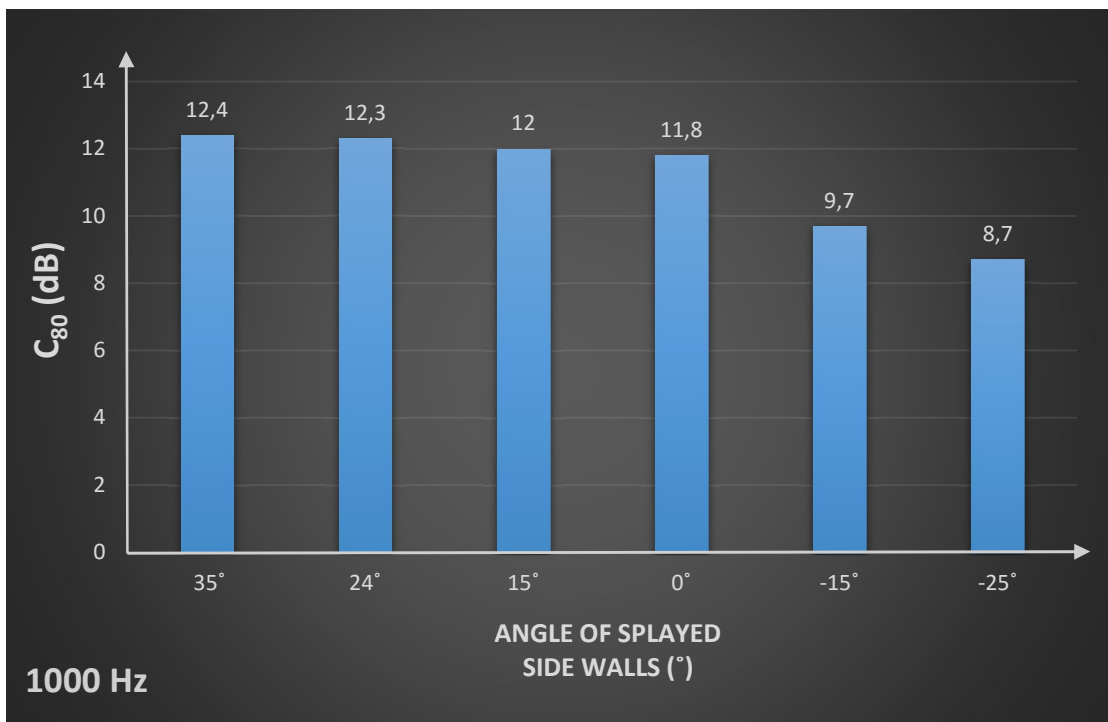
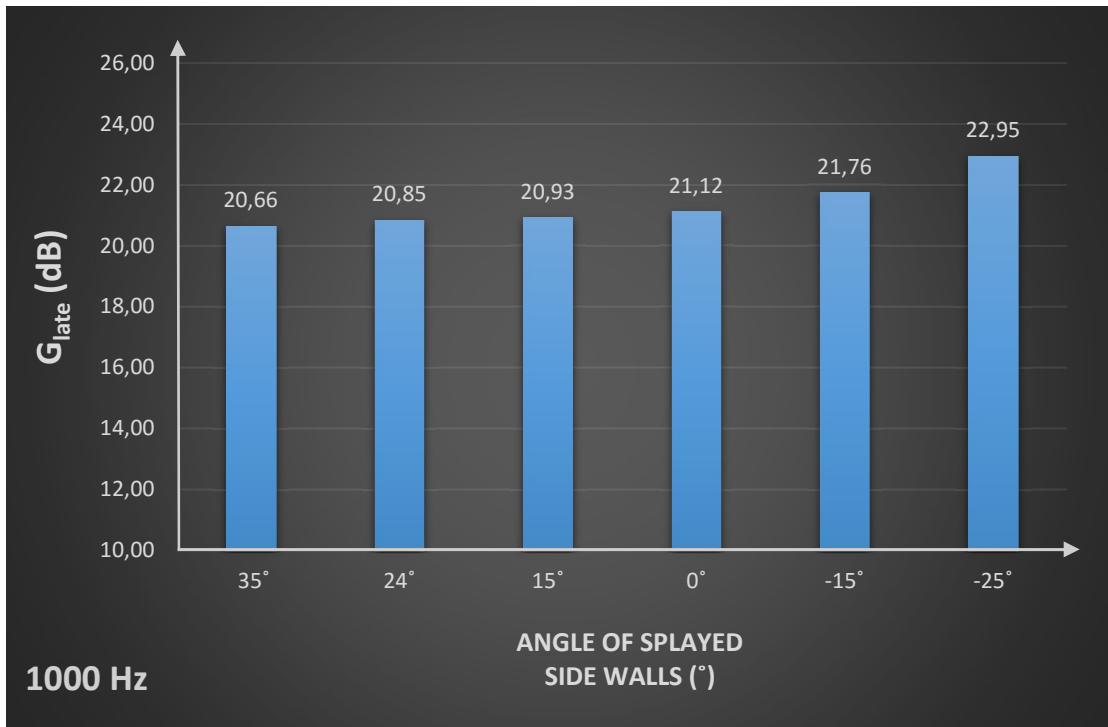


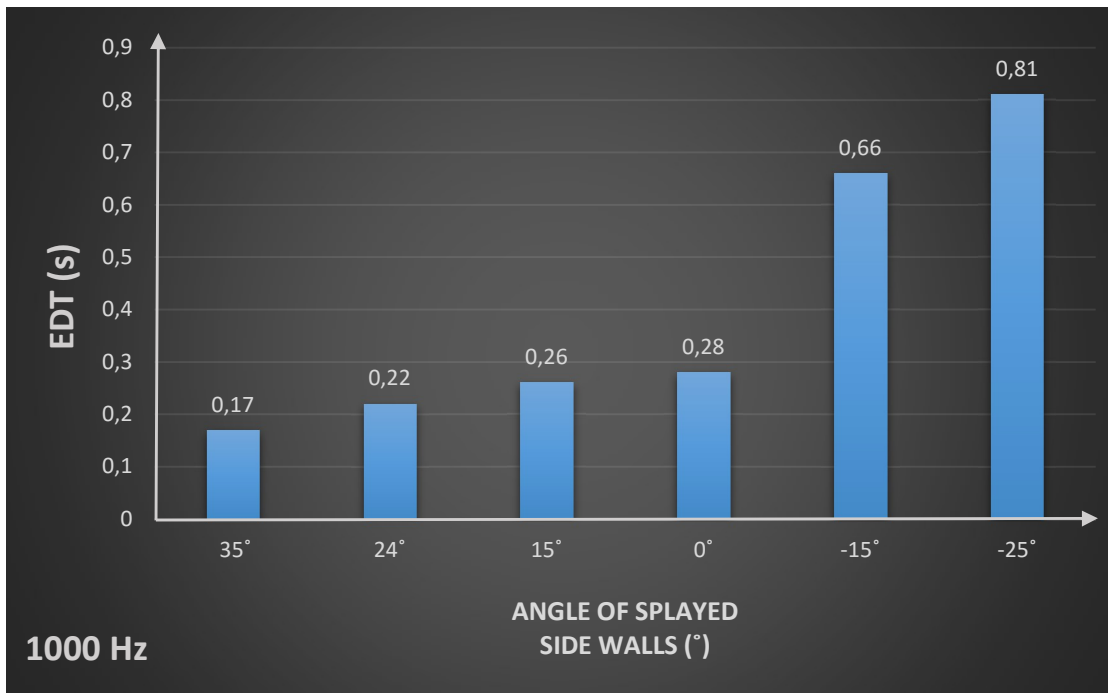
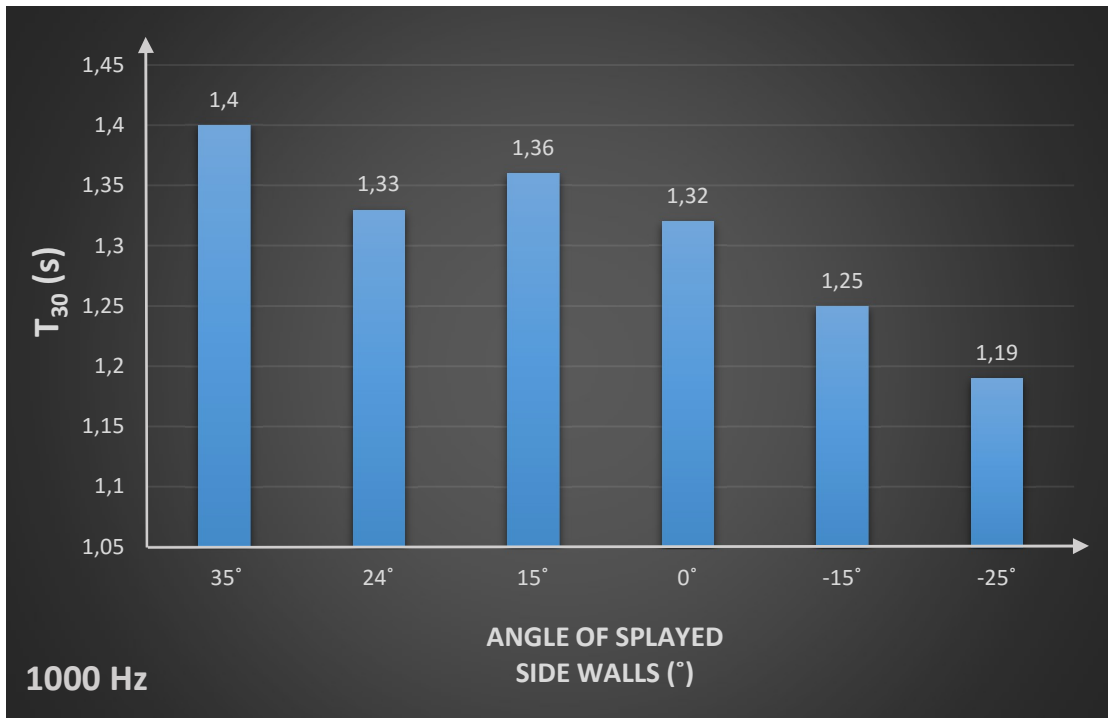




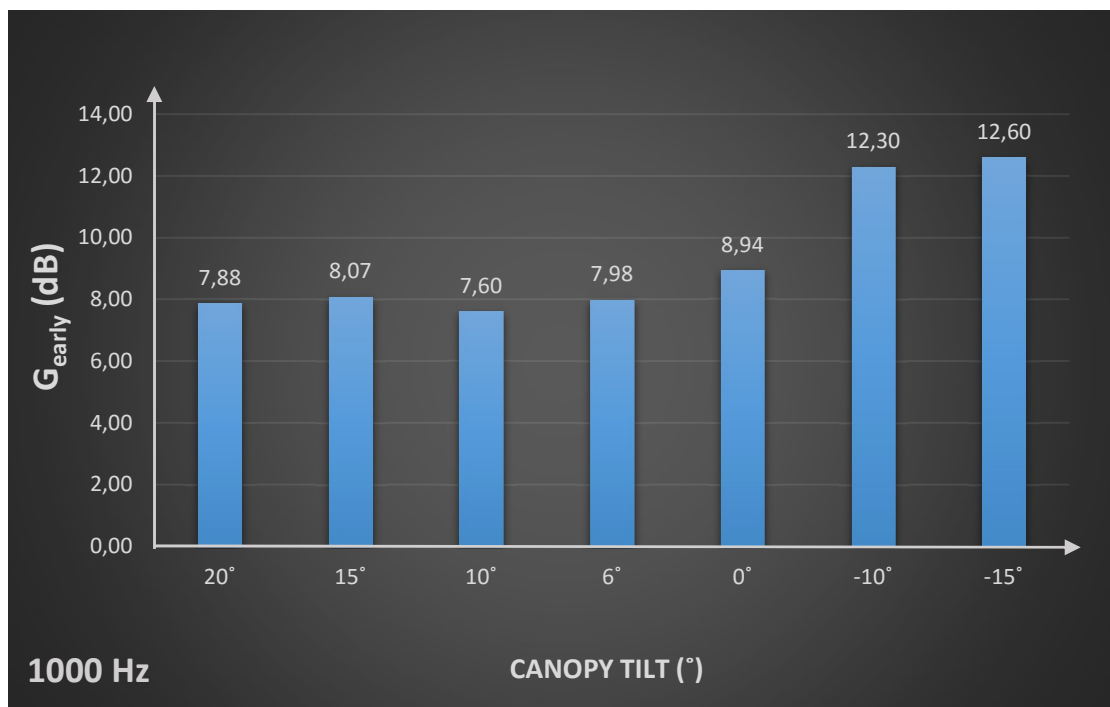
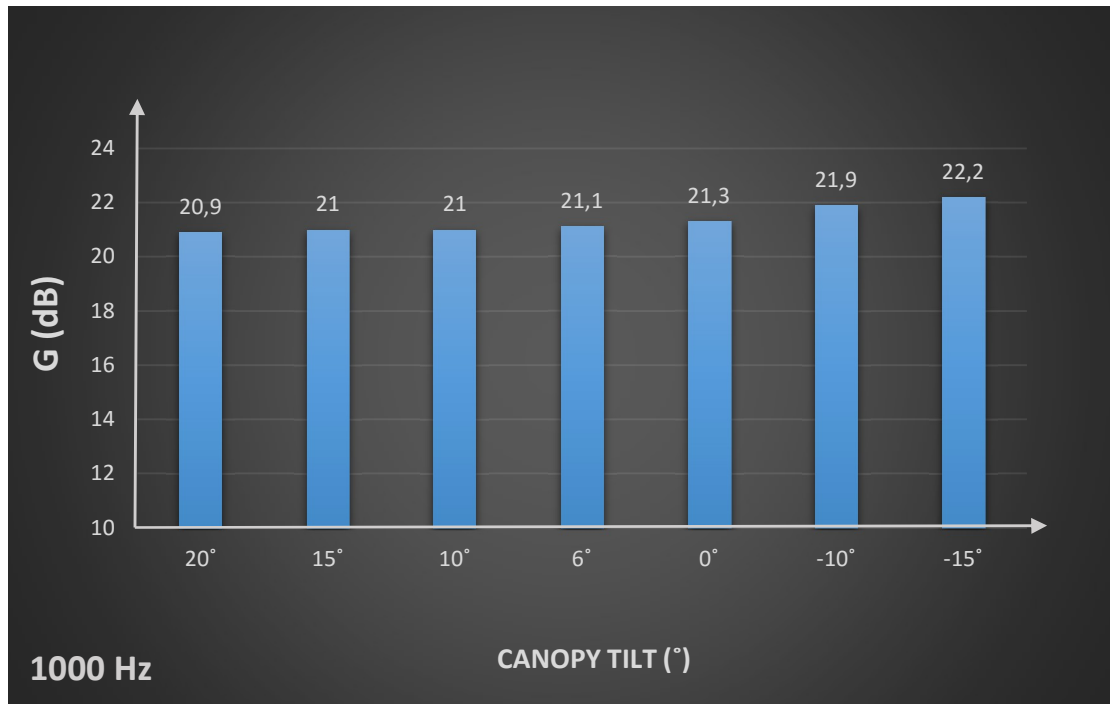
E.3. Angle of splayed side walls

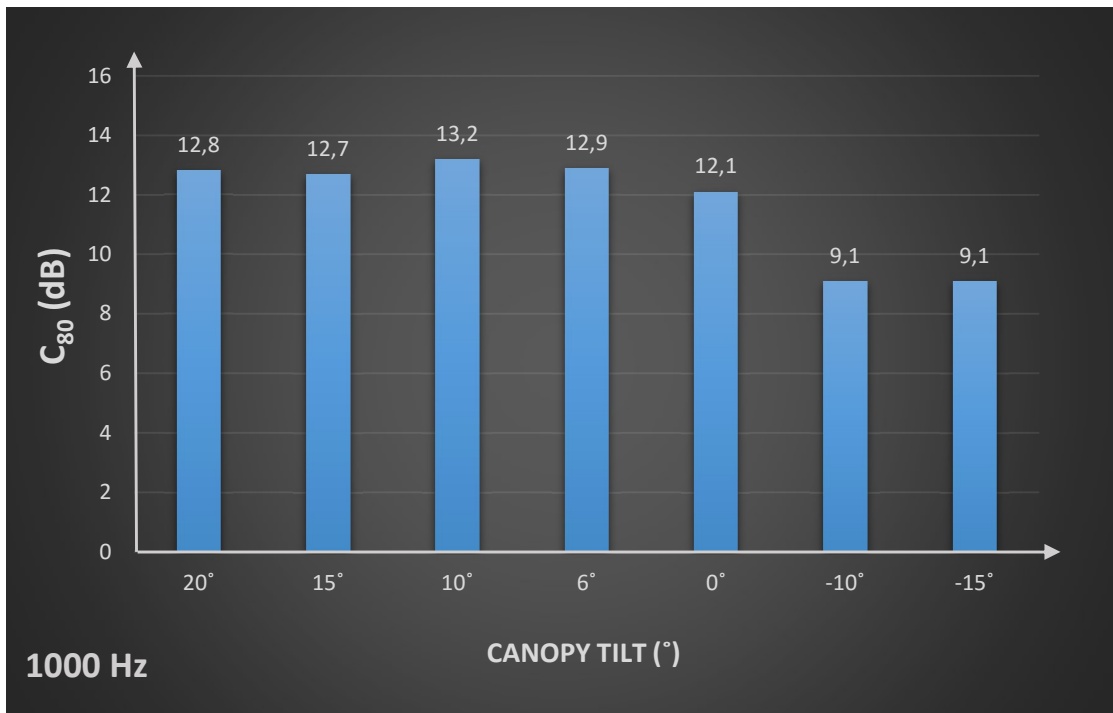
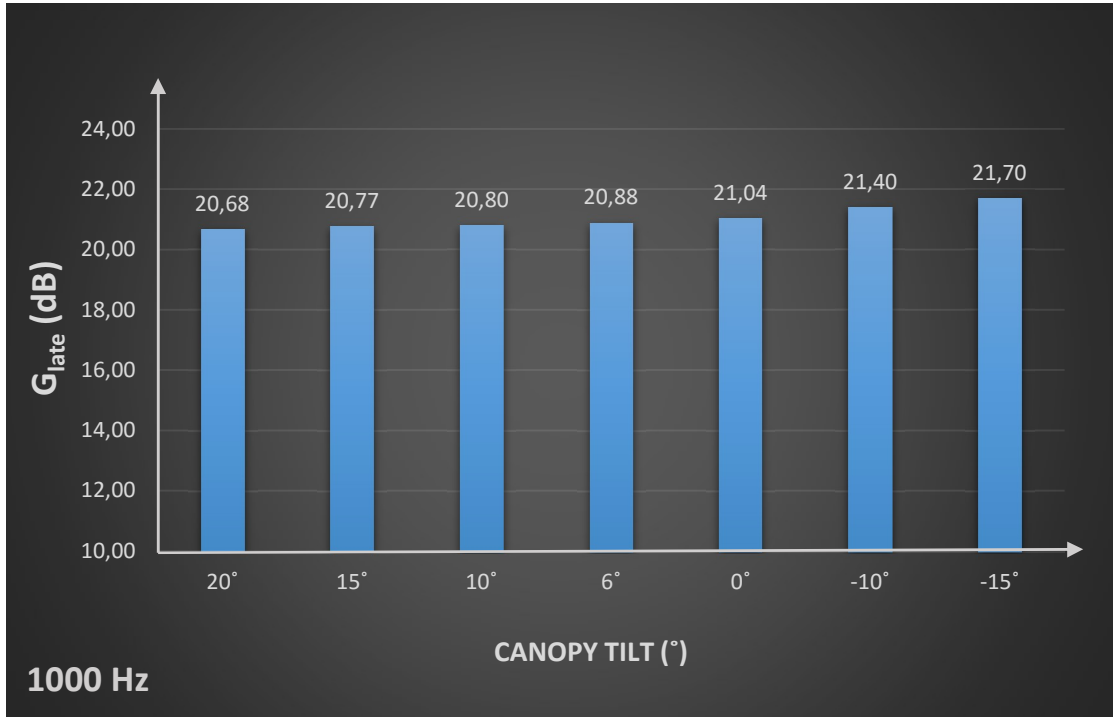


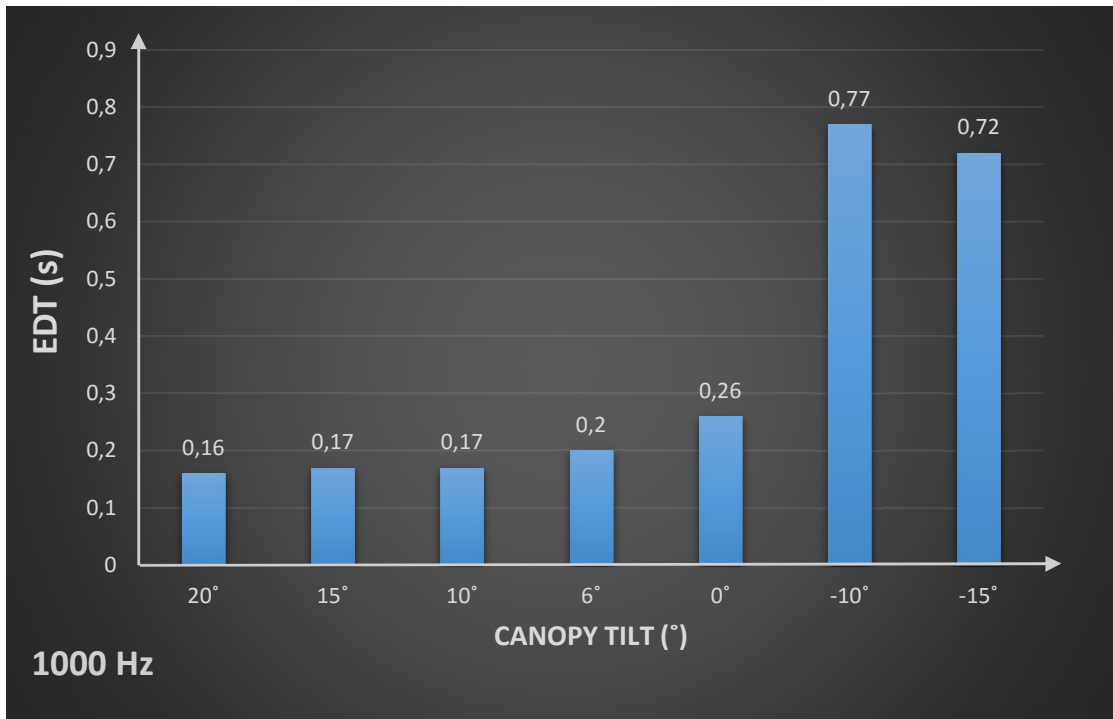
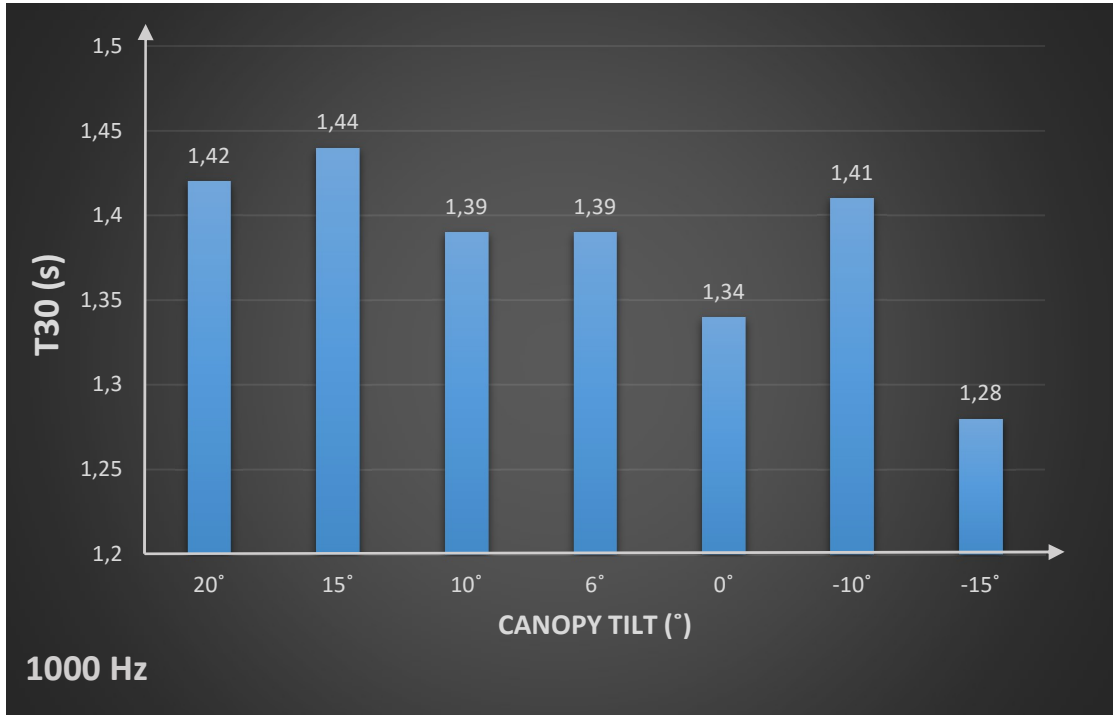




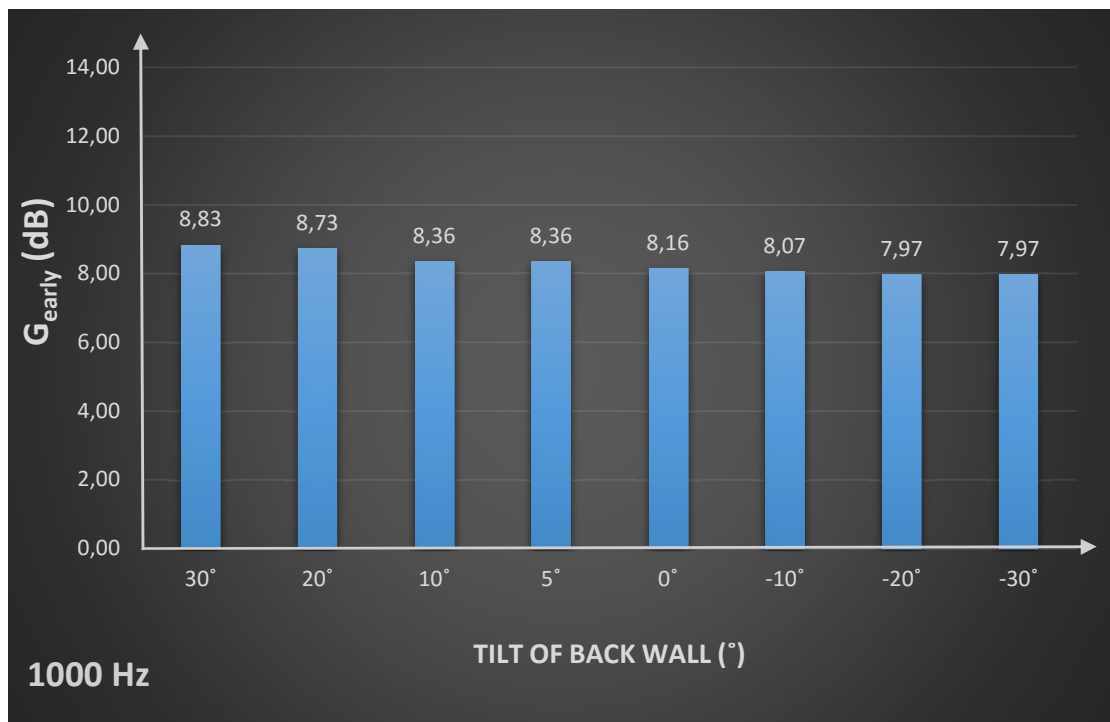
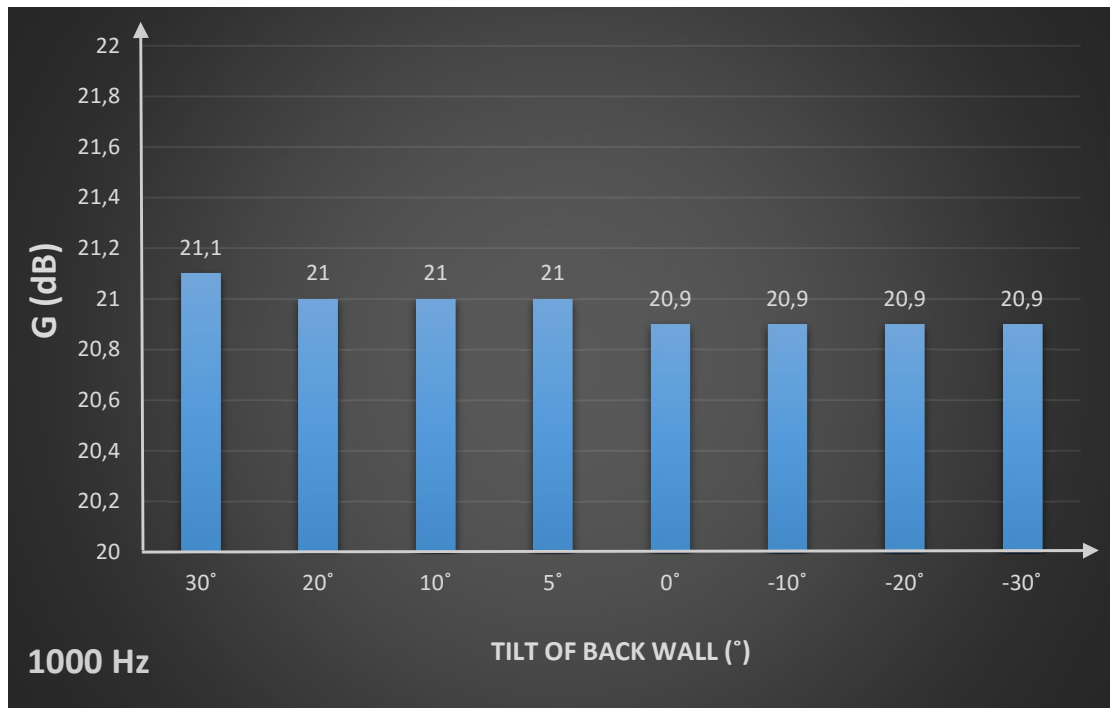
E.4. Canopy tilt

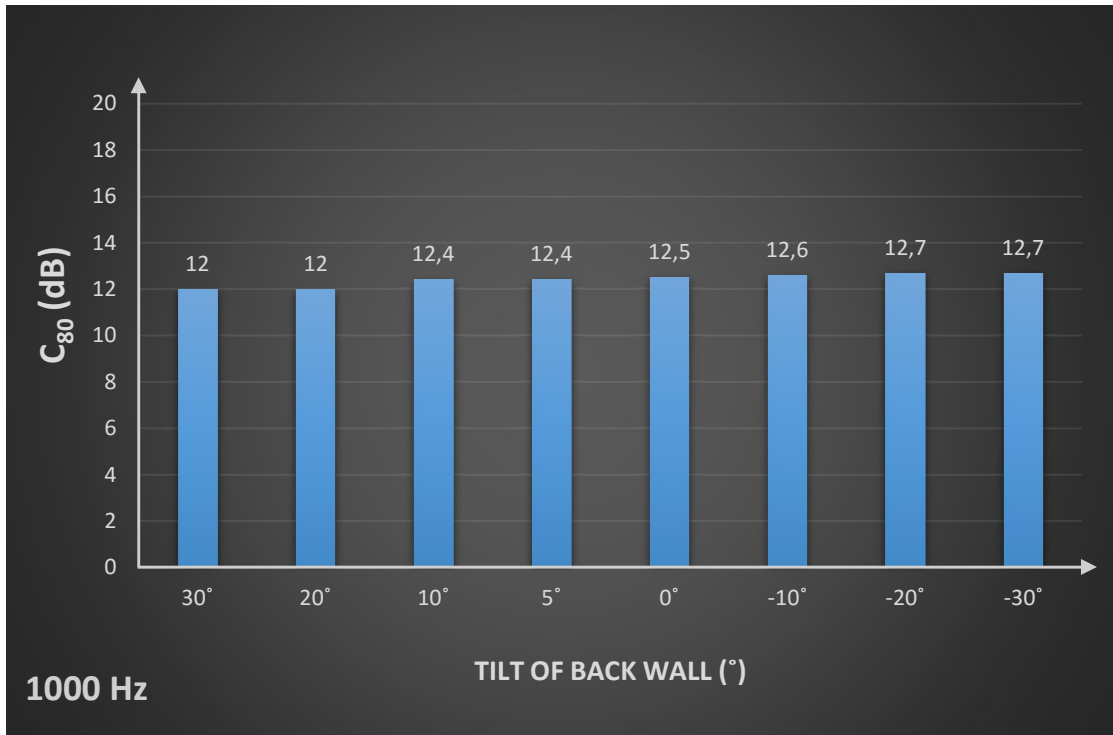
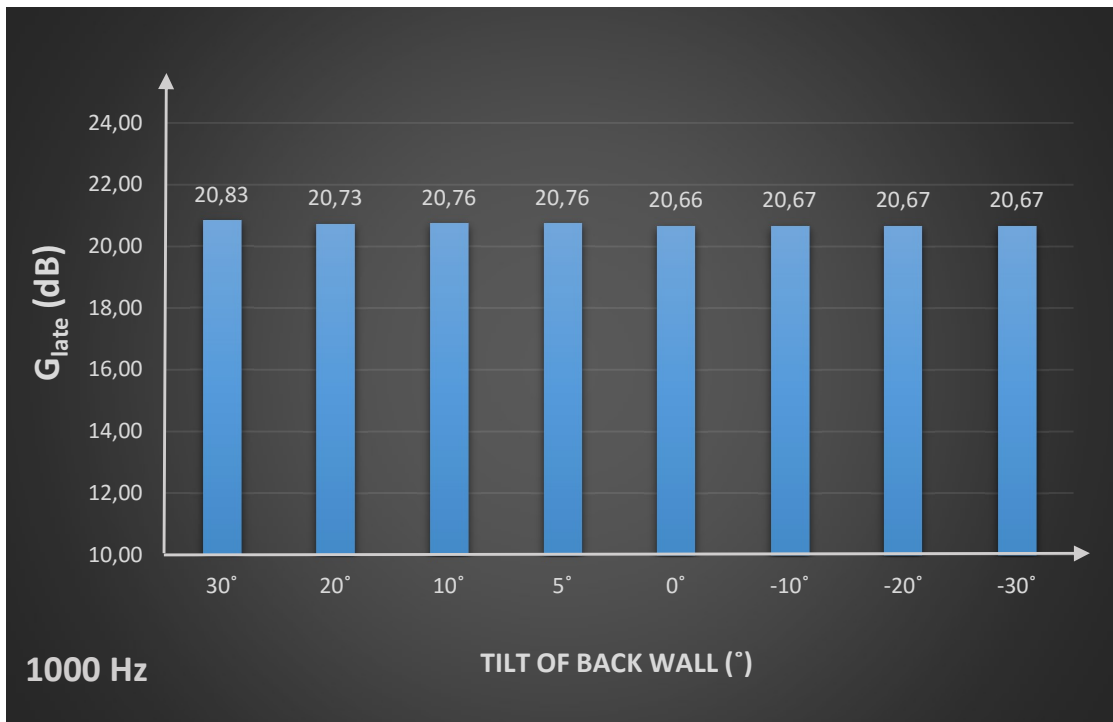


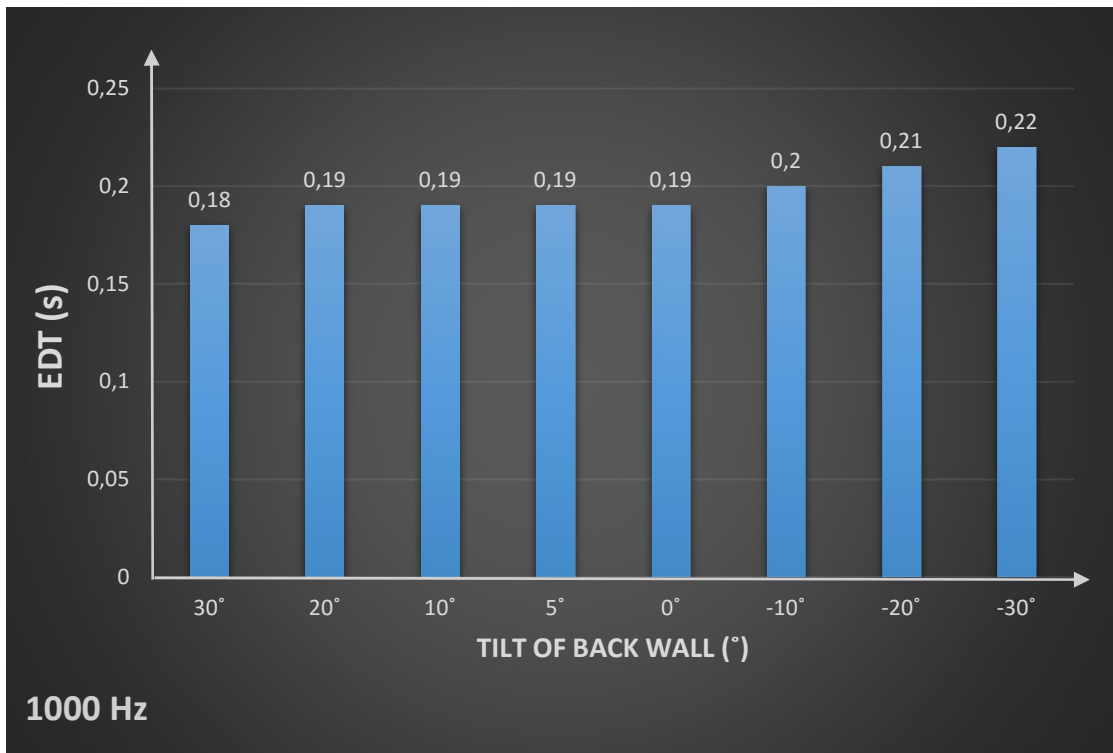
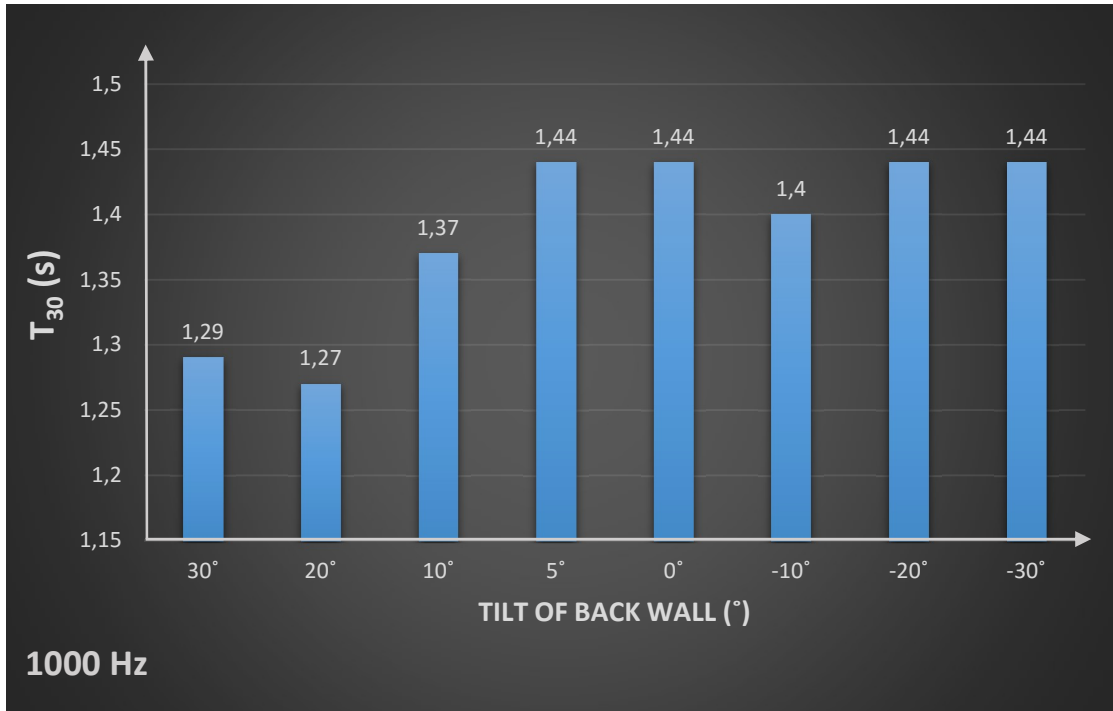




E.5. Tilt of back wall





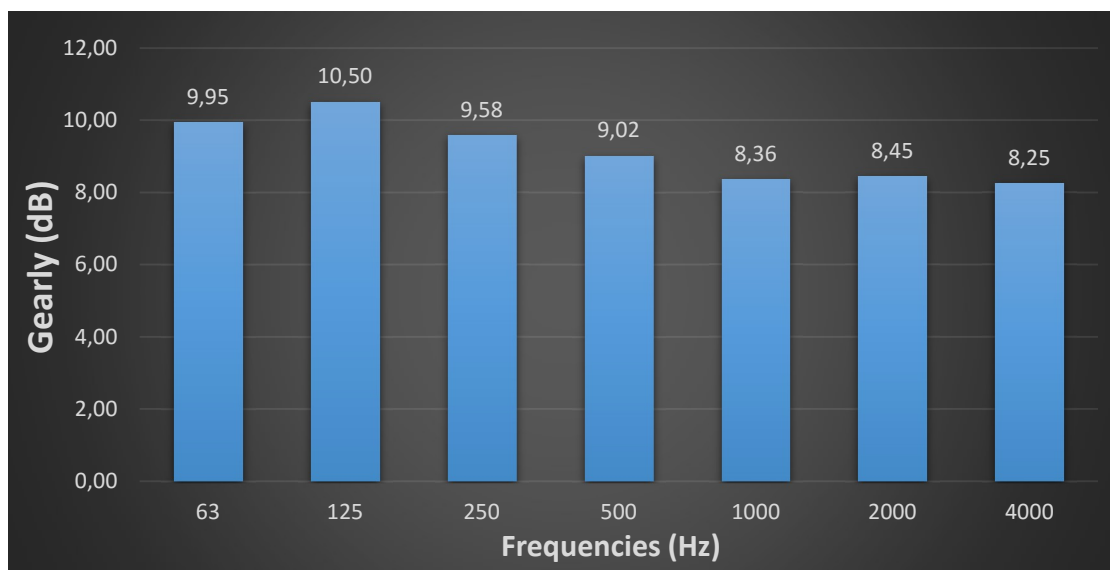
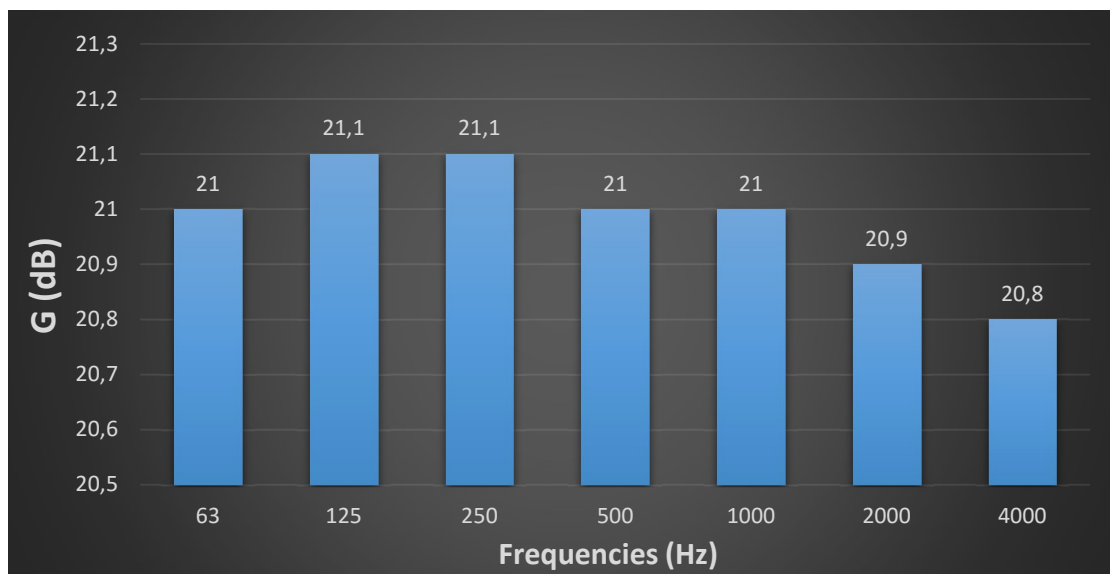


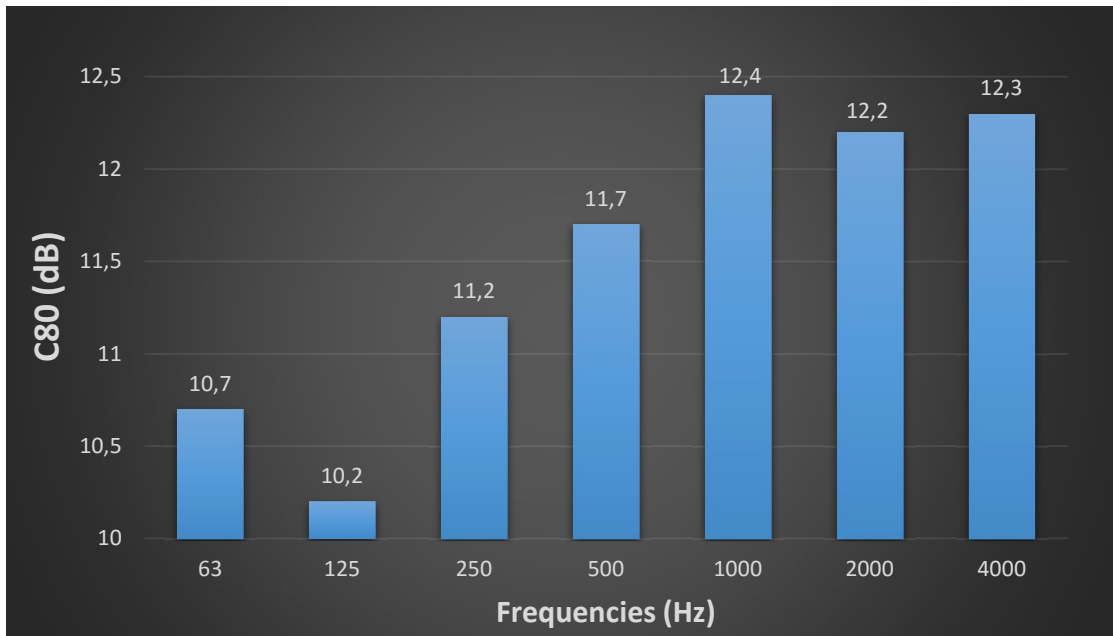
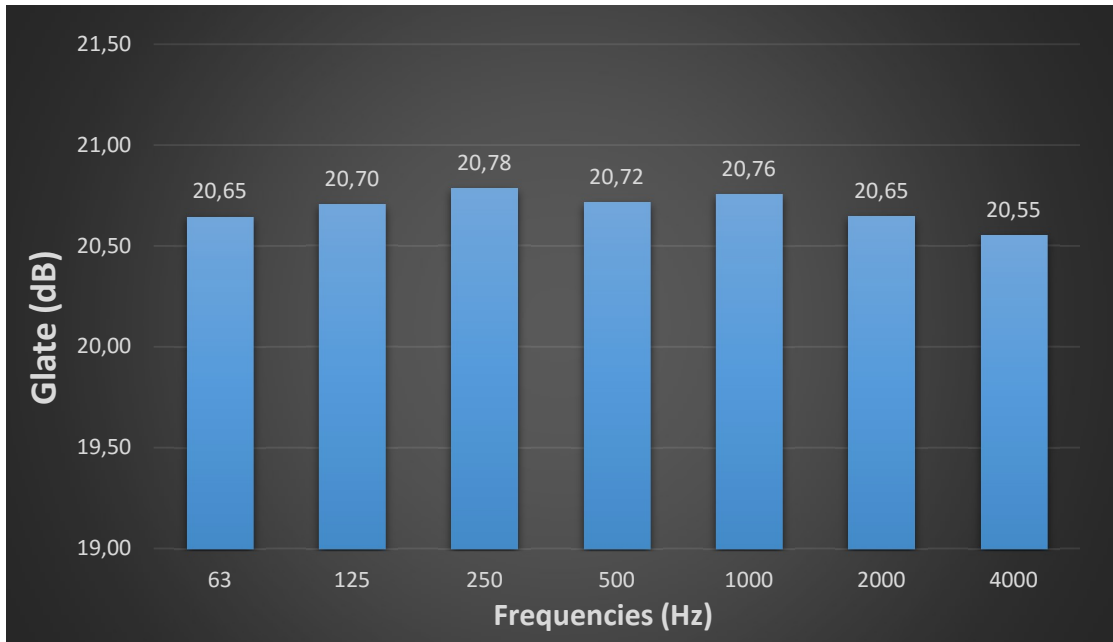
Appendix F

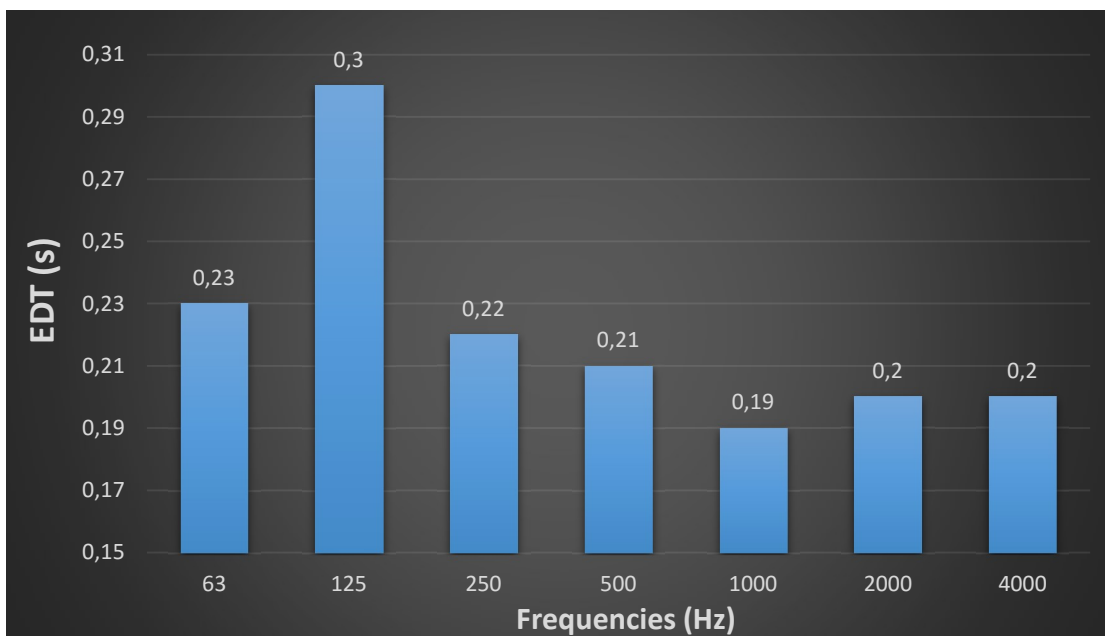
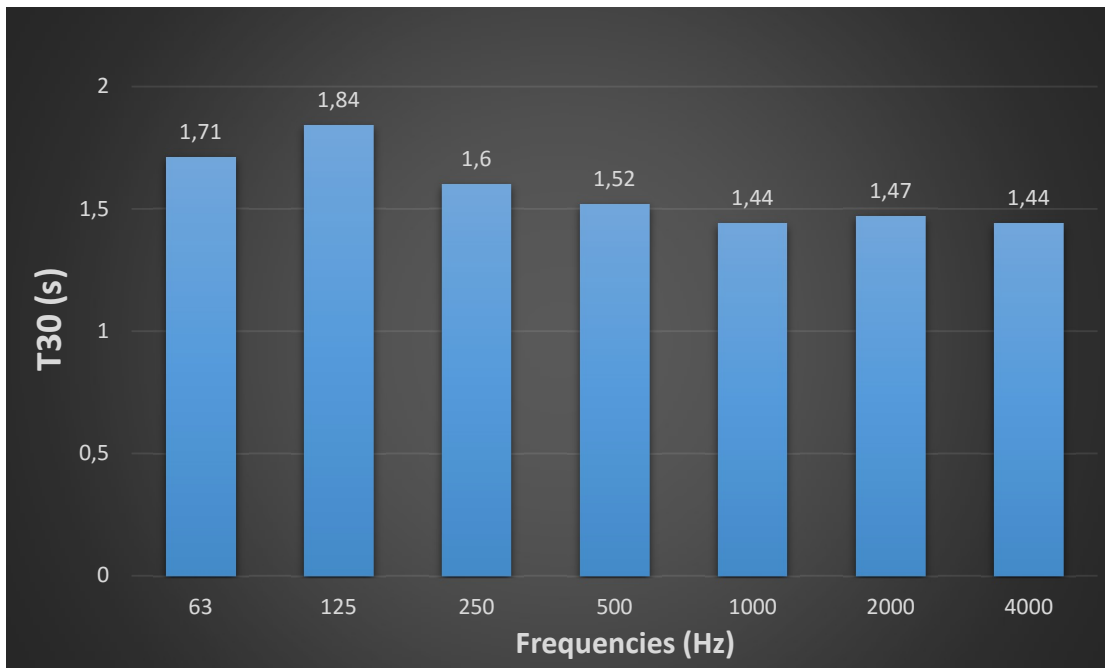
Στο παρών παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντικειμενικών παραμέτρων G, Gearly, Glate, C80, T30 και EDT για τις 28 γεωμετρικές αλλαγές στο φάσμα συχνοτήτων (63Hz - 4000Hz).

F.1. Εύρος σκηής

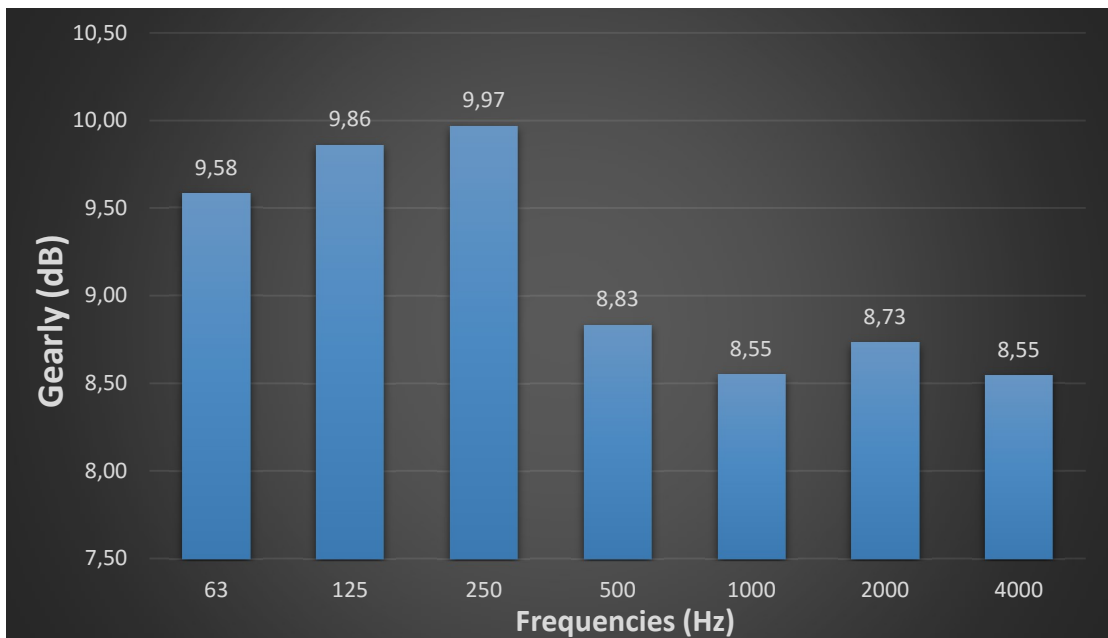
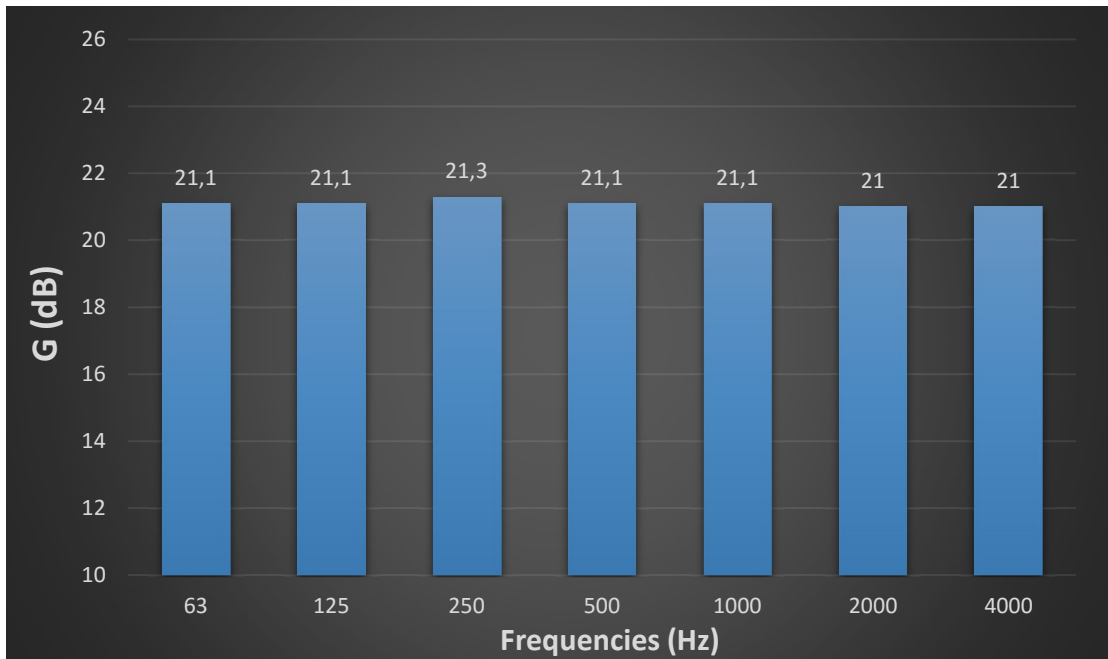
F.1.1. Εύρος σκηής 14m

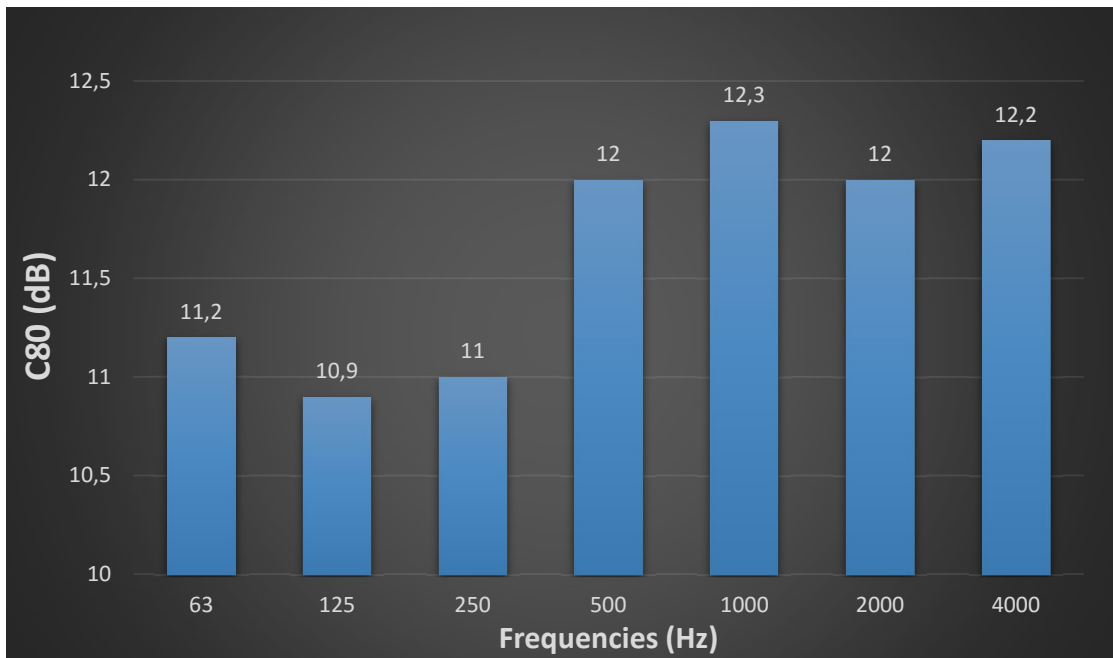
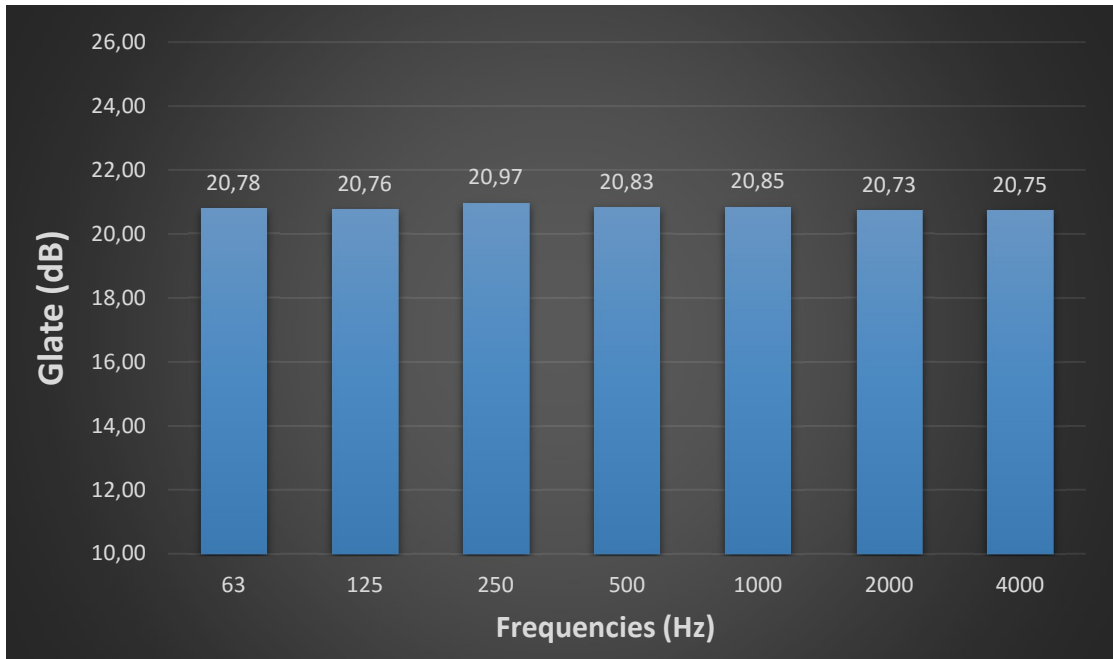


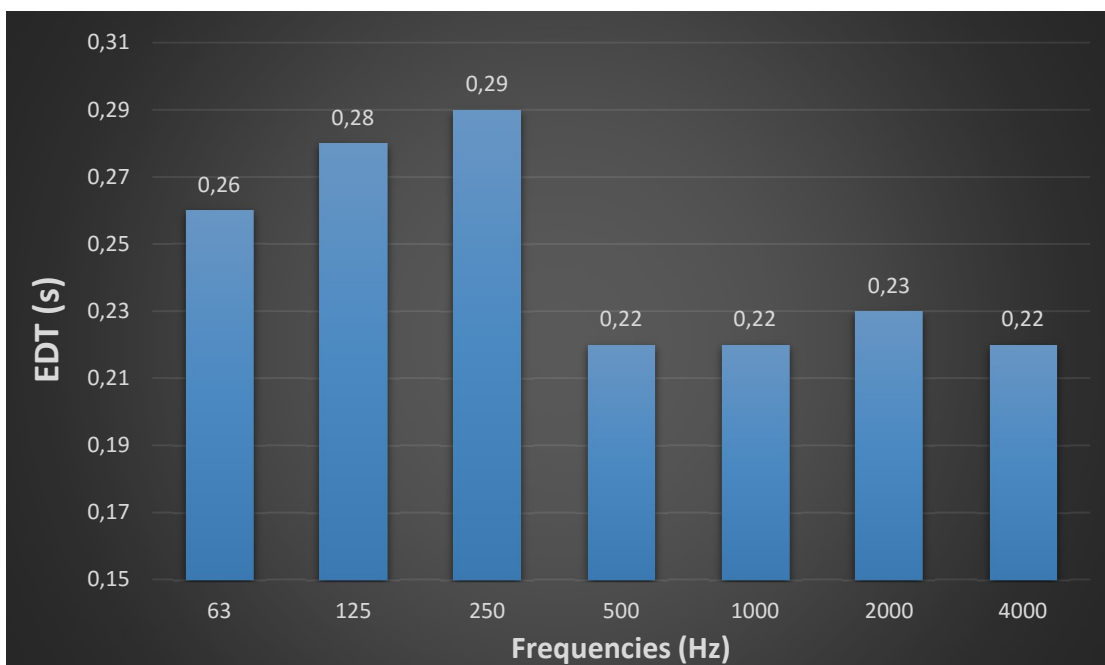
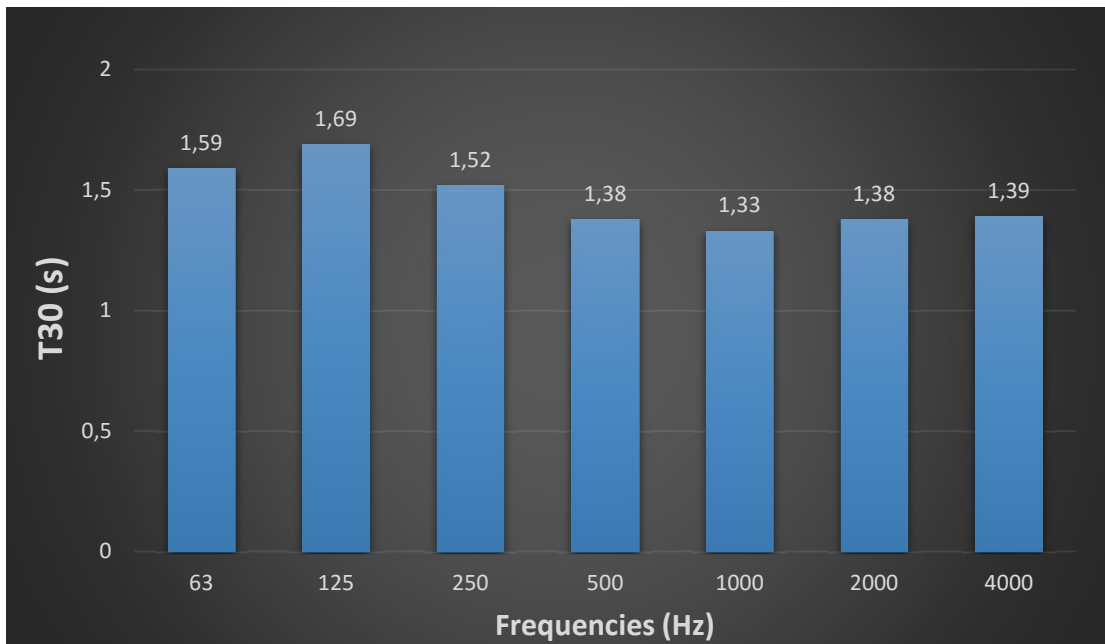




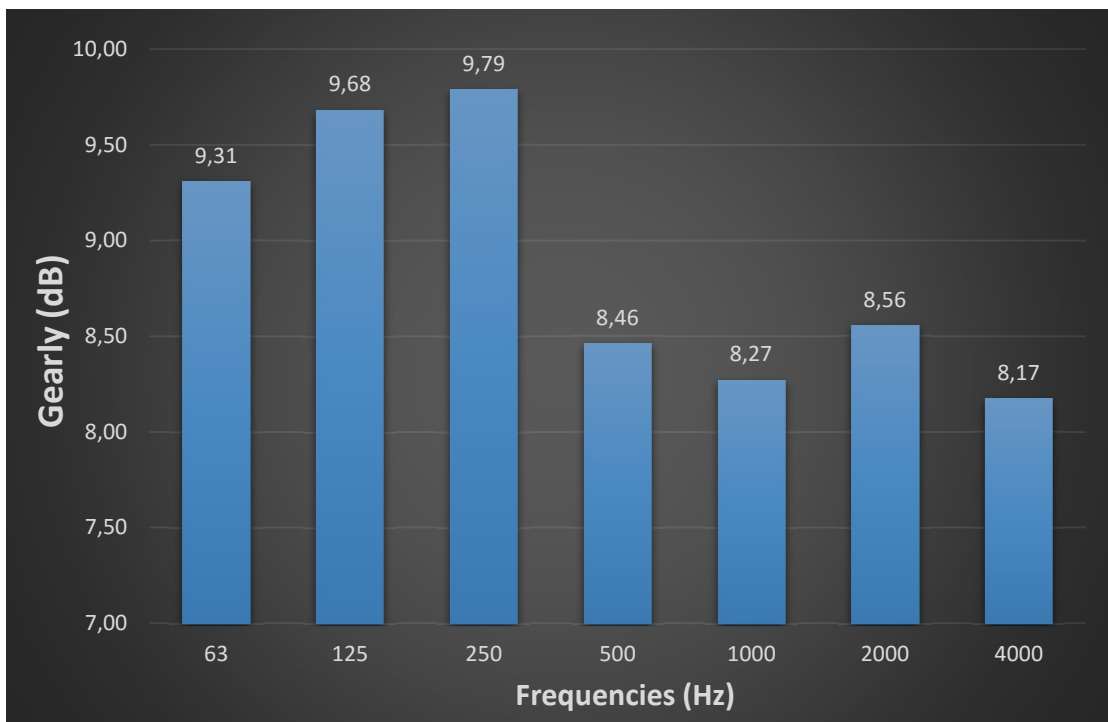
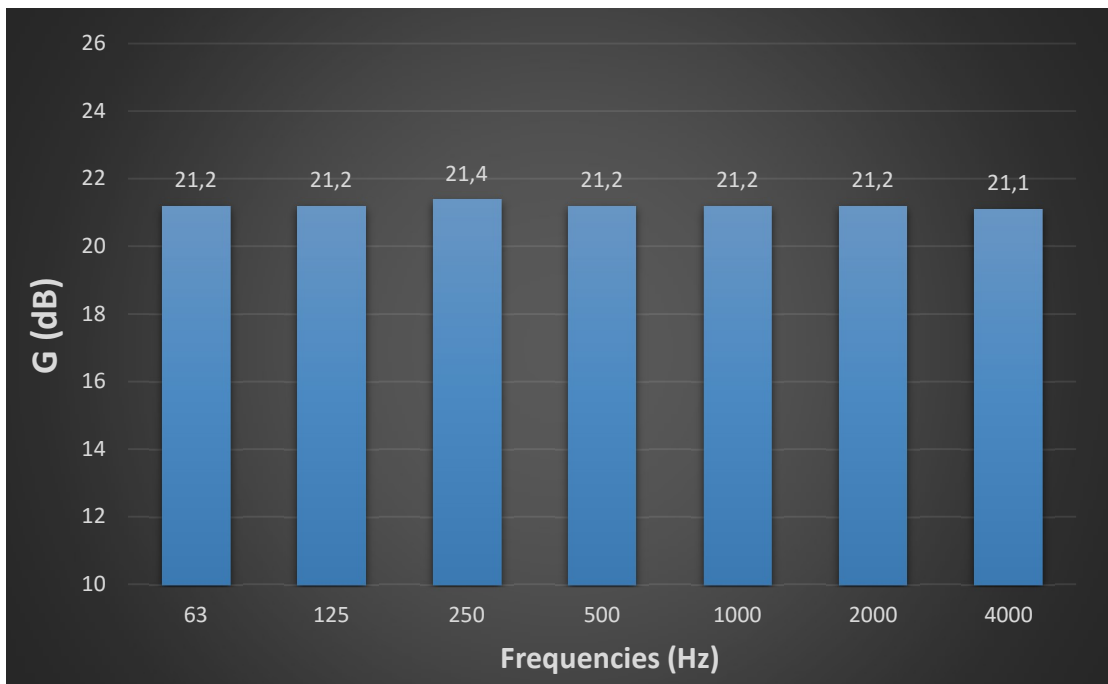
F.1.2. Εύρος σκηής 12m

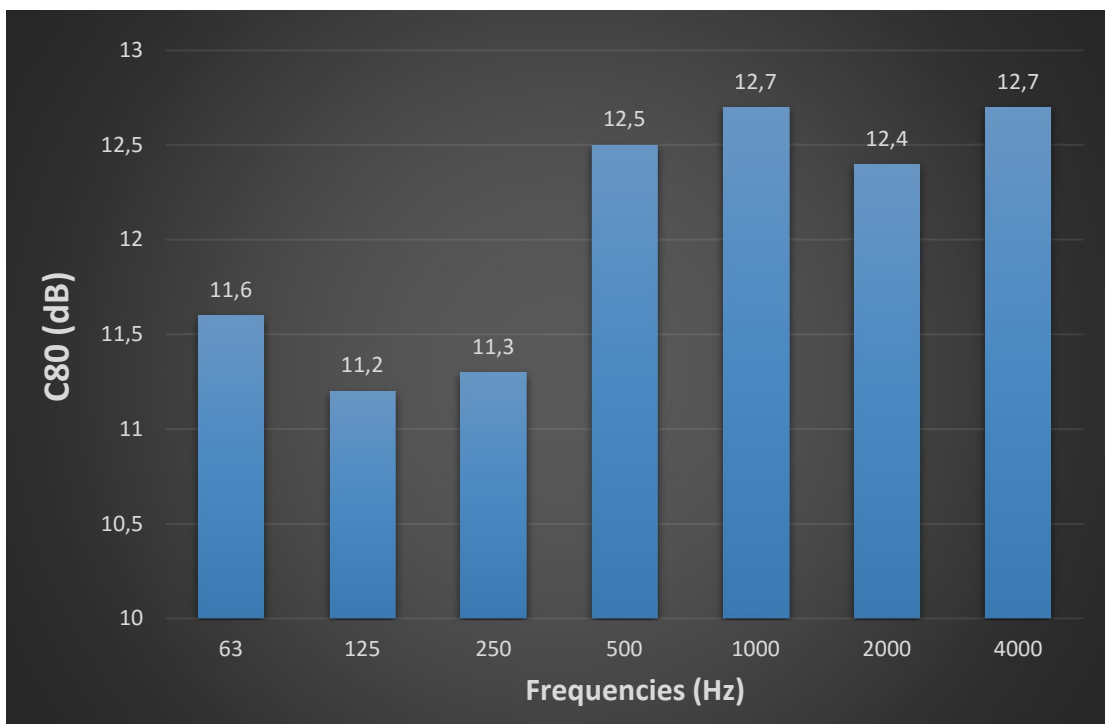
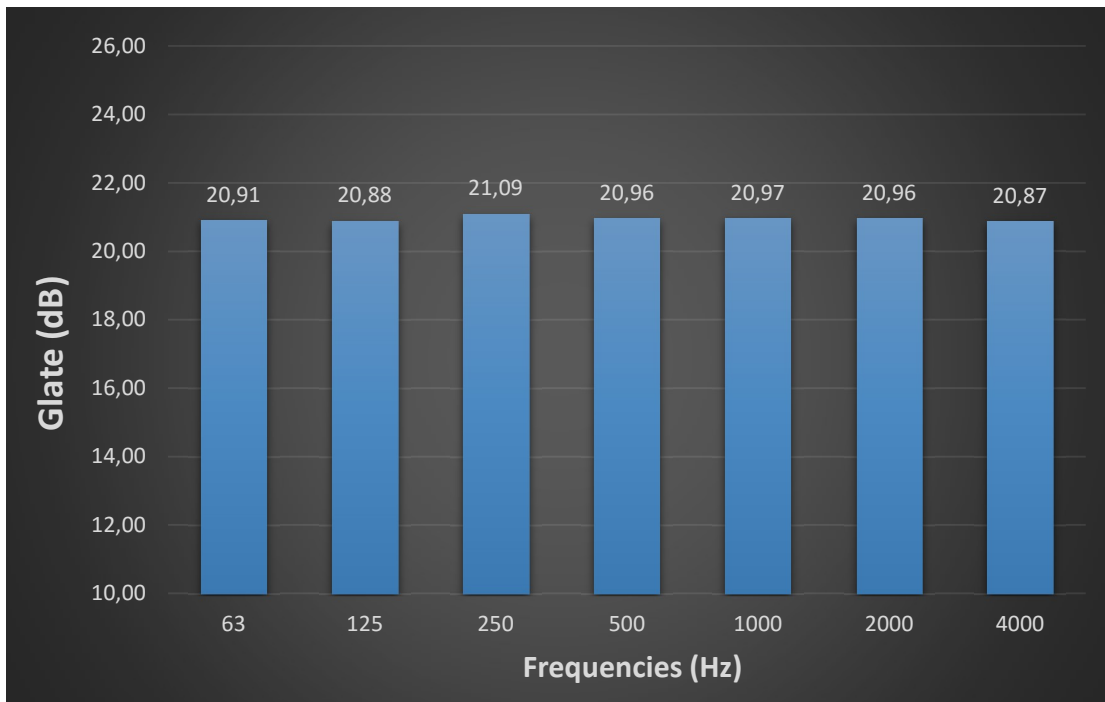


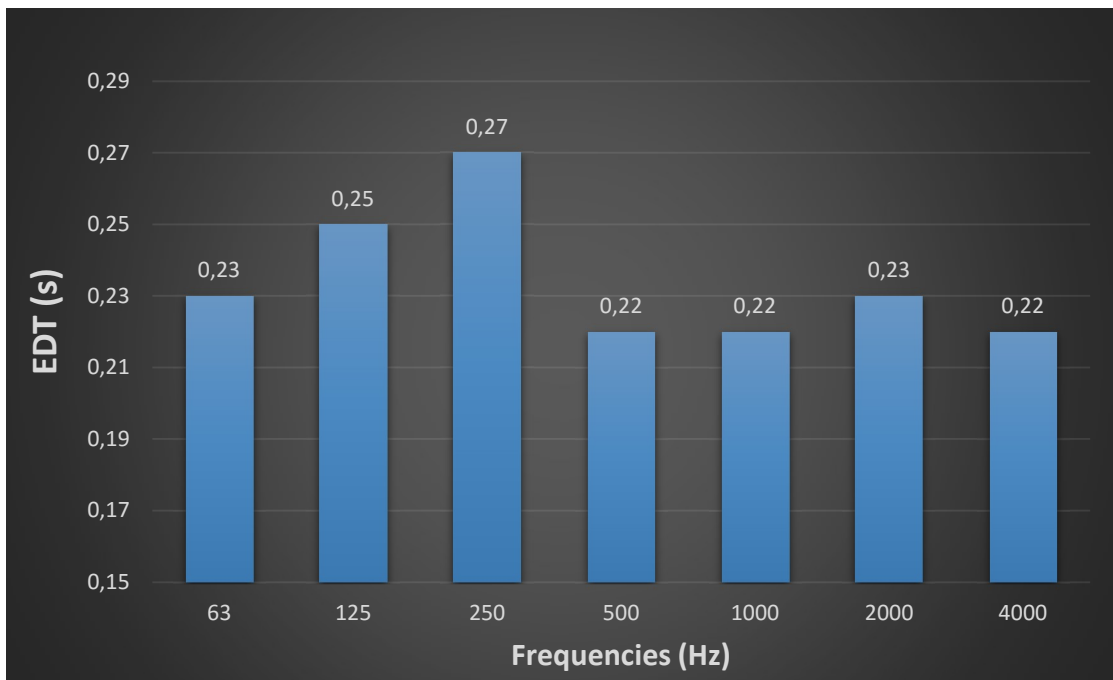
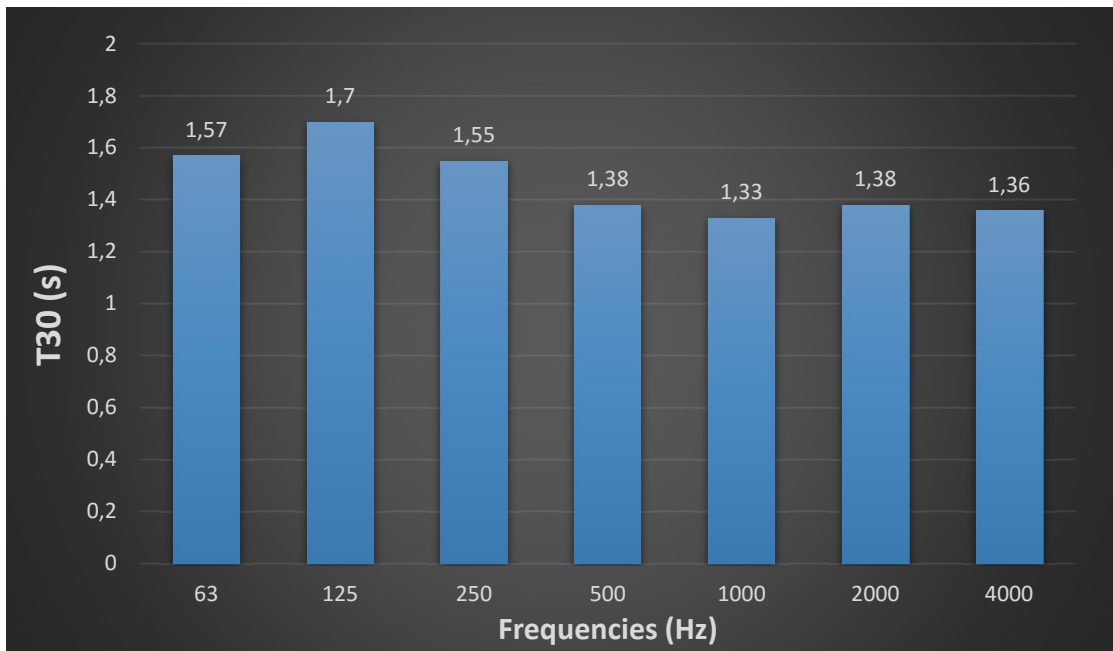




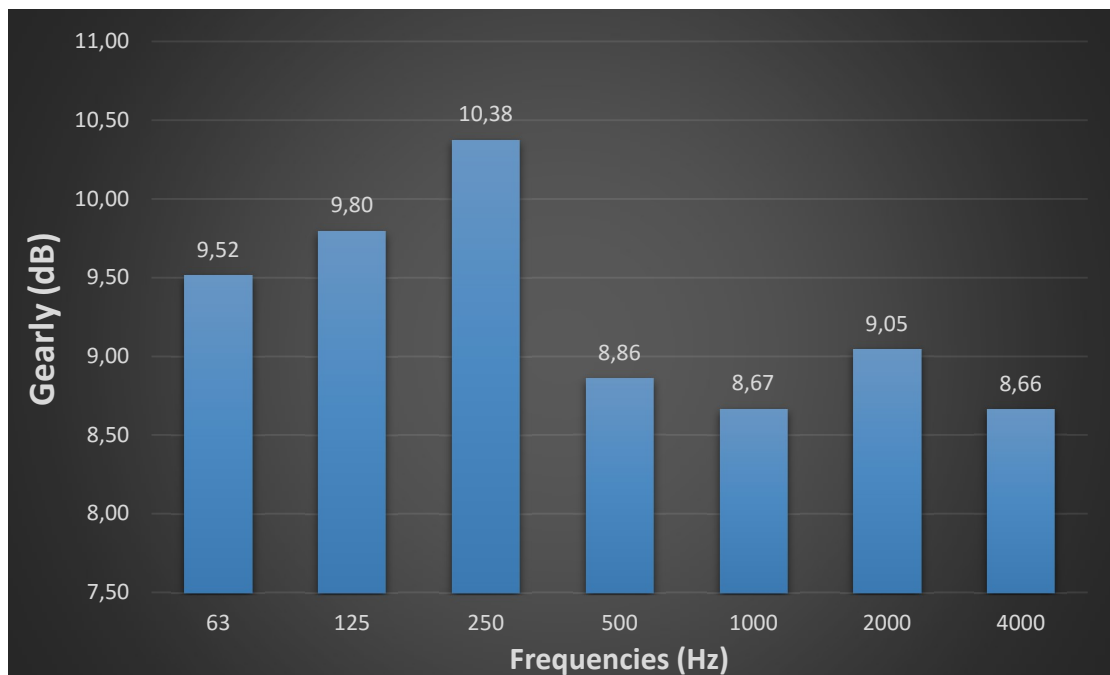
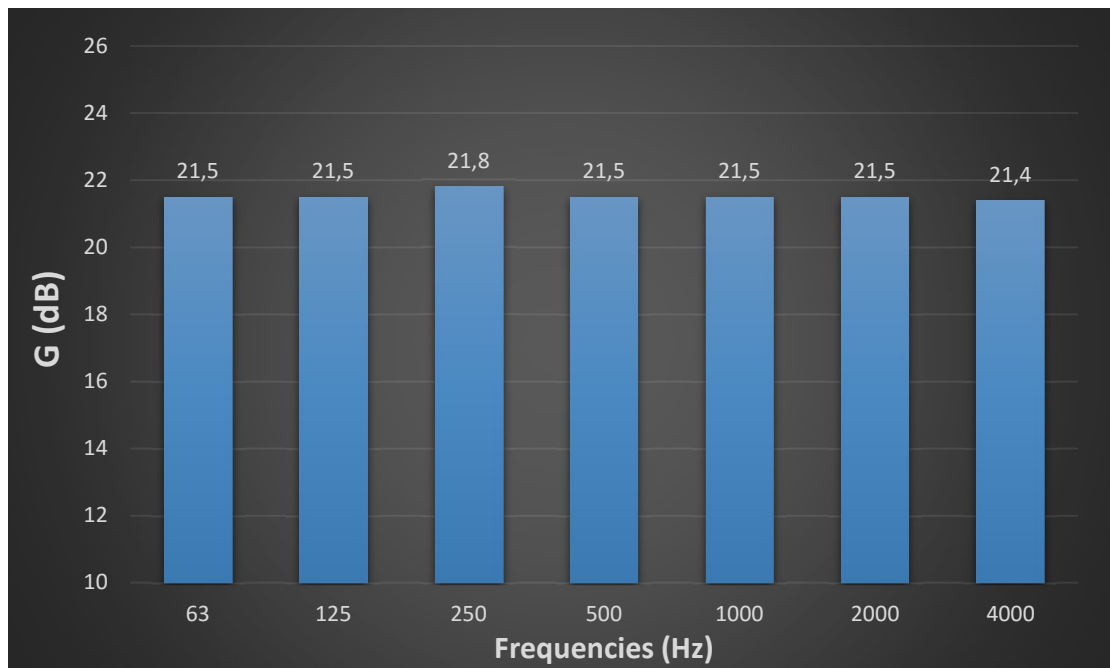
F.1.3. Εύρος σκηής 10m

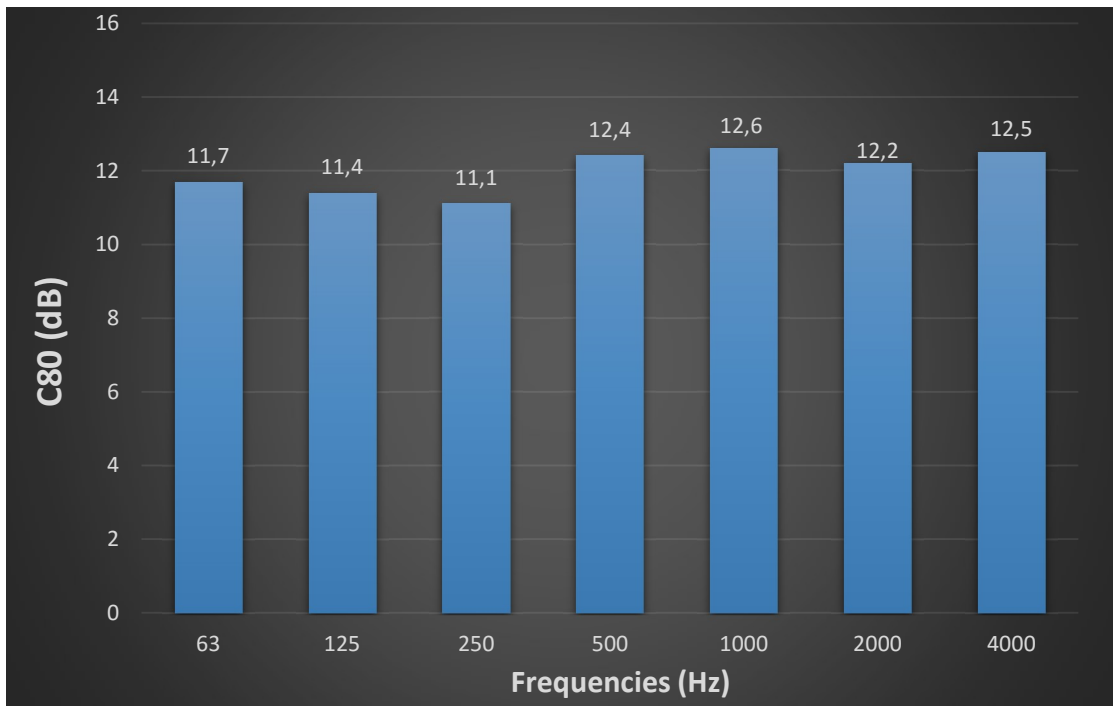
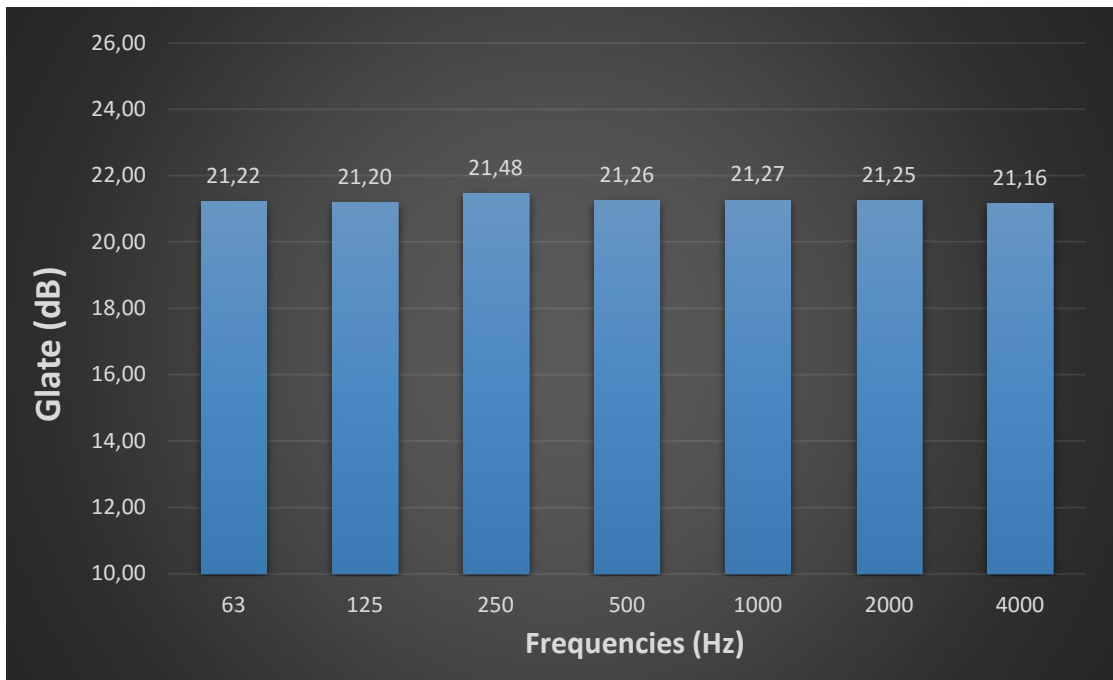


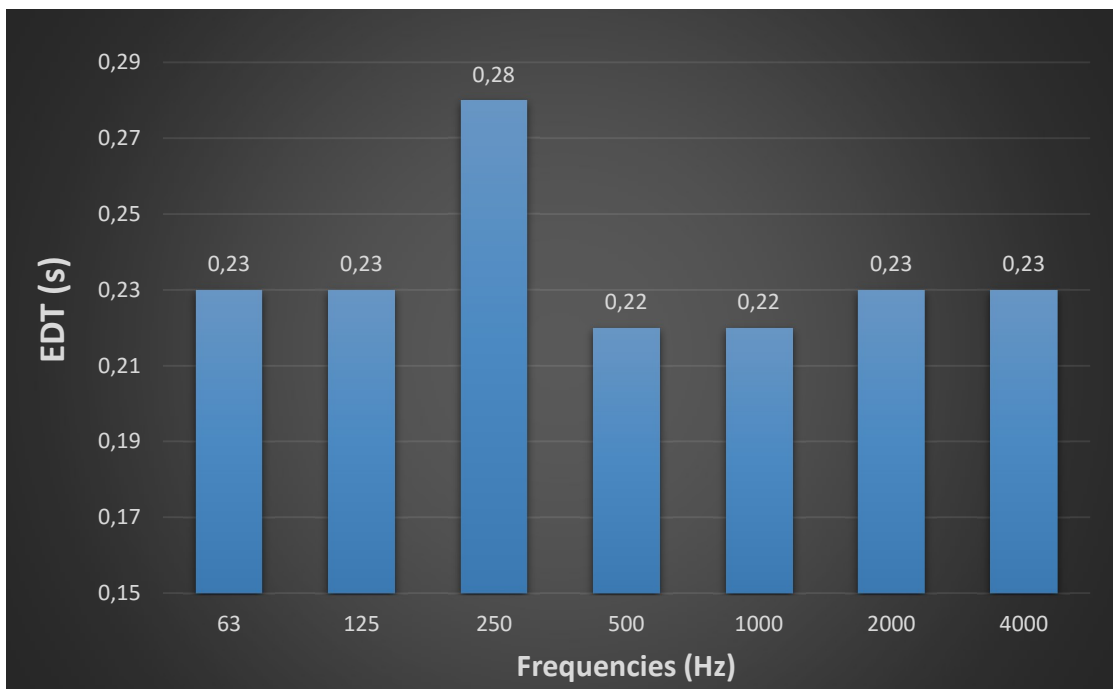
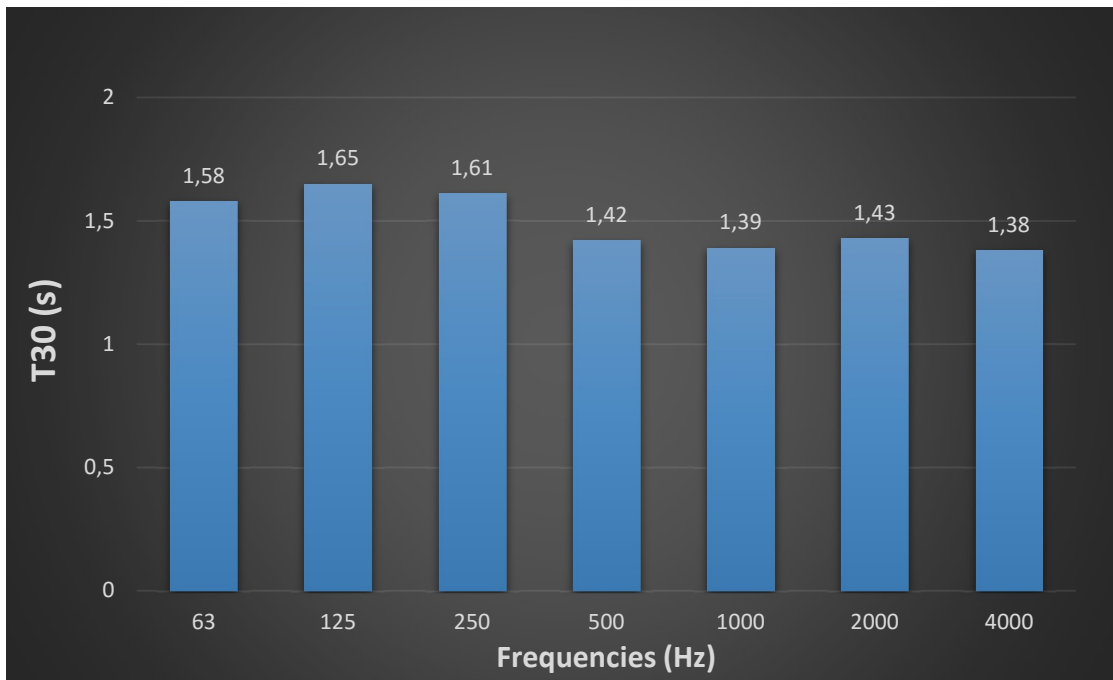




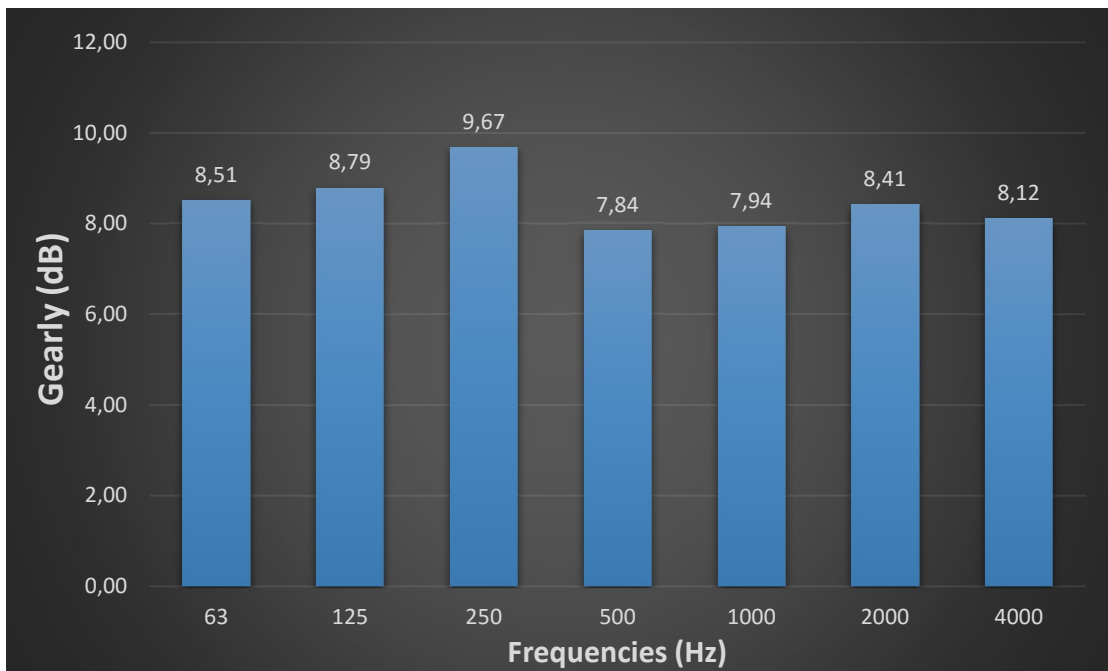
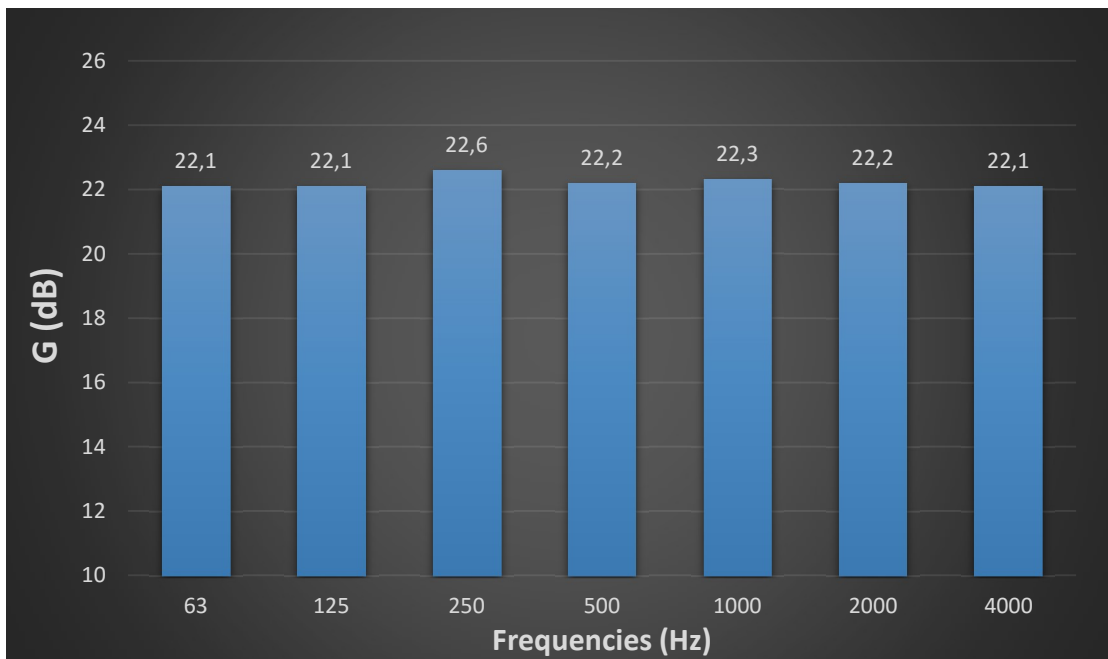
F.1.4. Εύρος σκηνής 8m

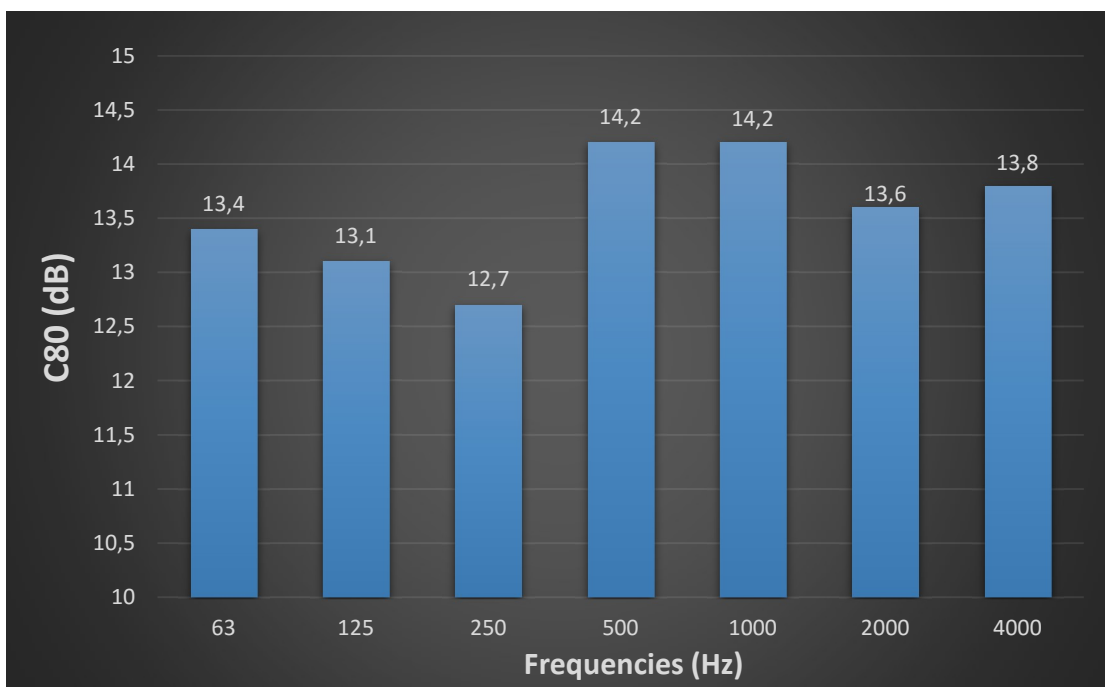
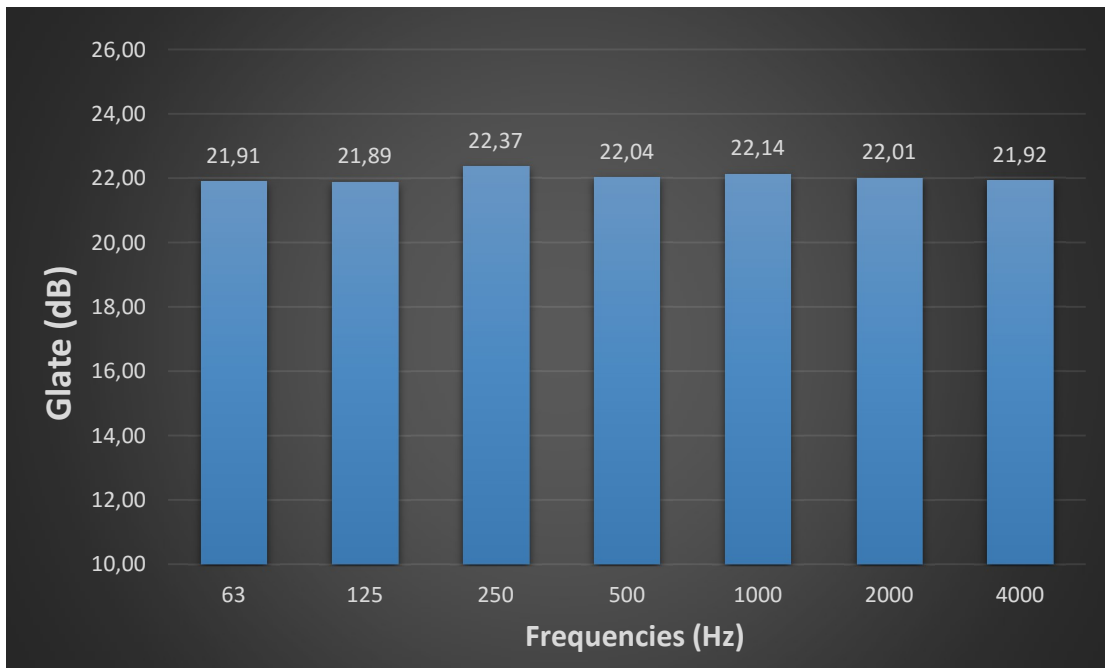


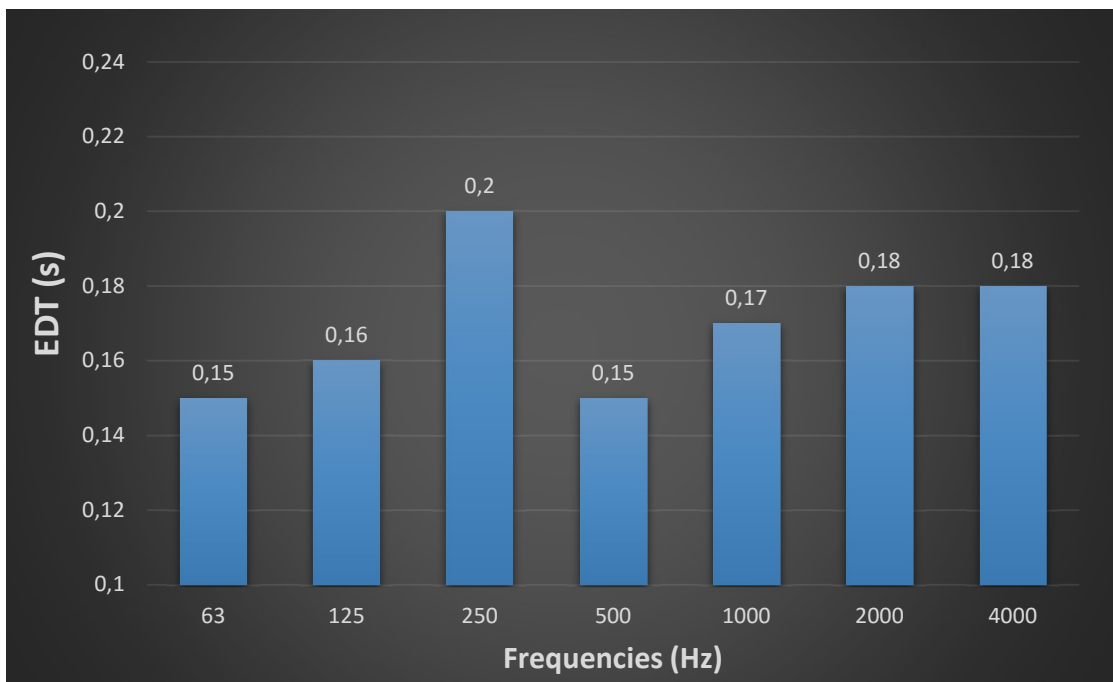
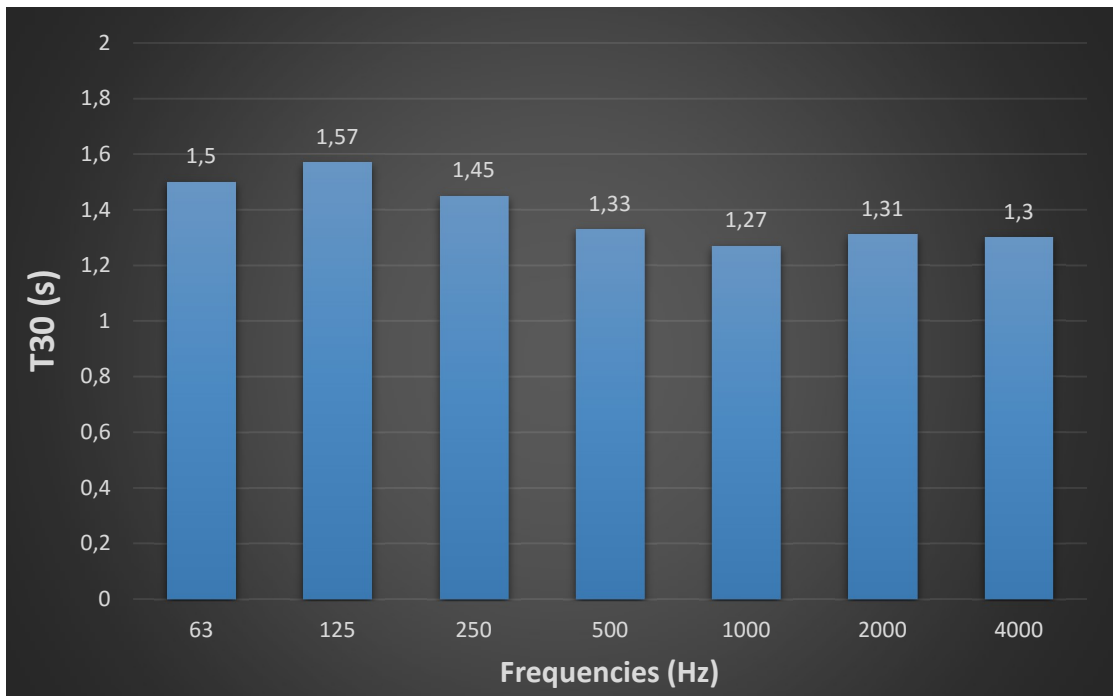




F.1.5. Εύρος σκηής 6m

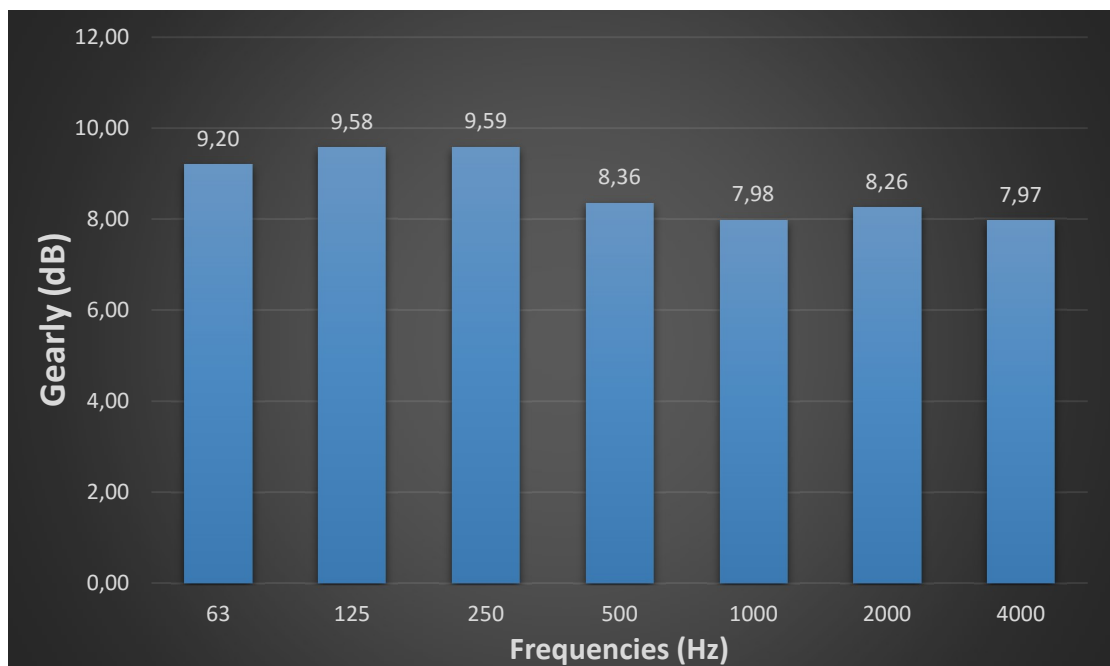
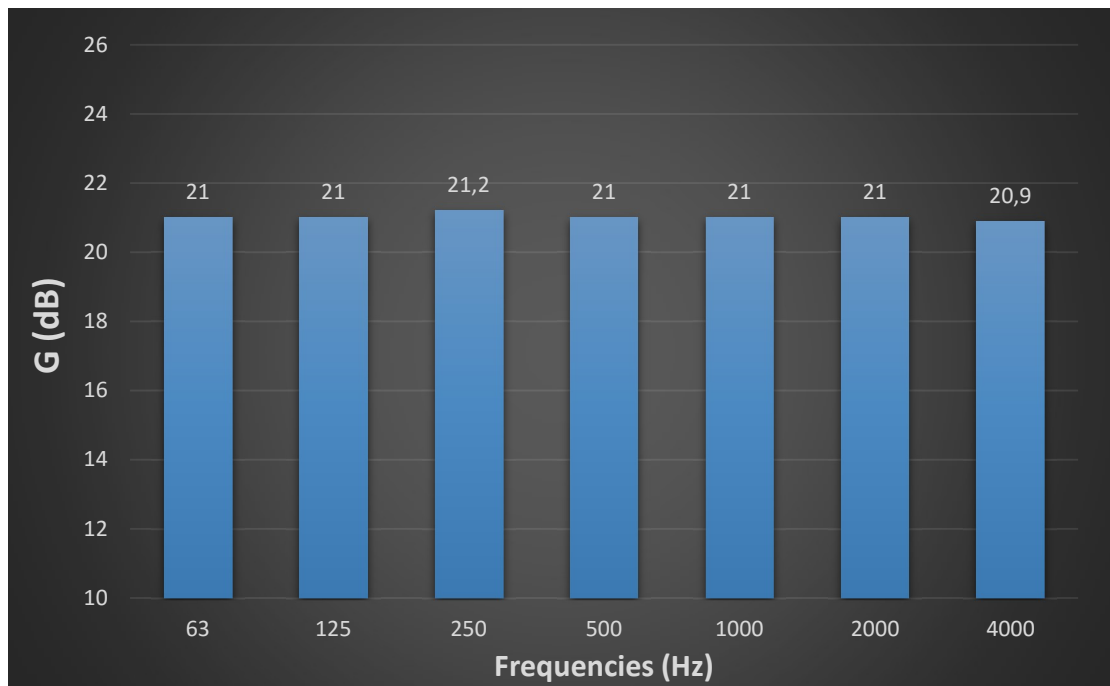


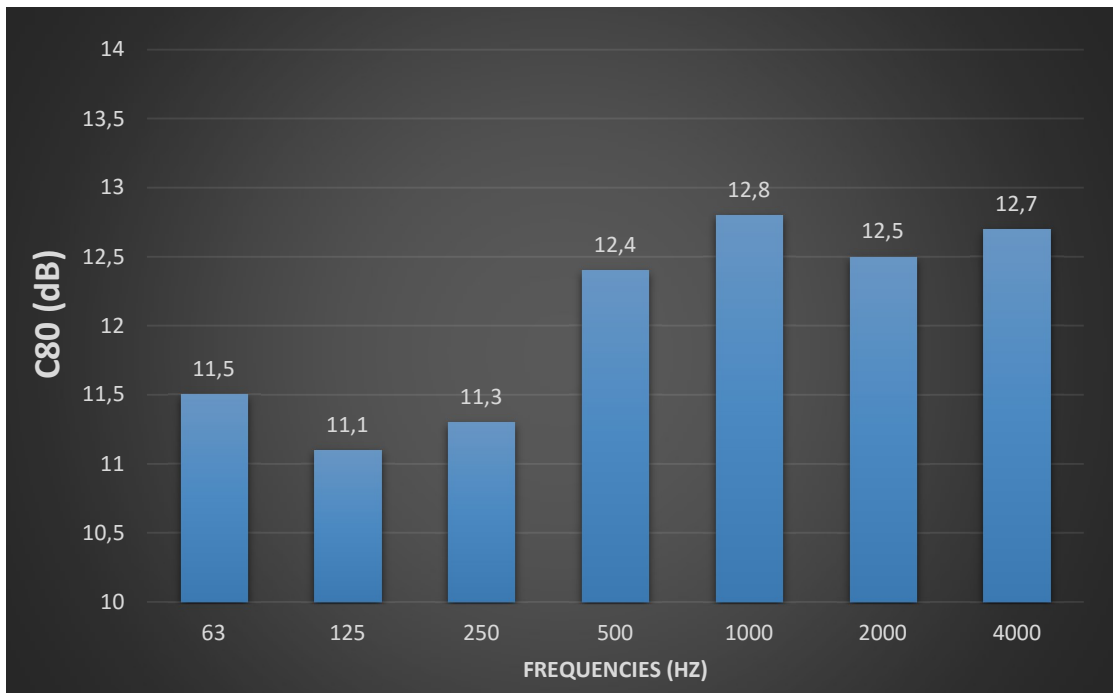
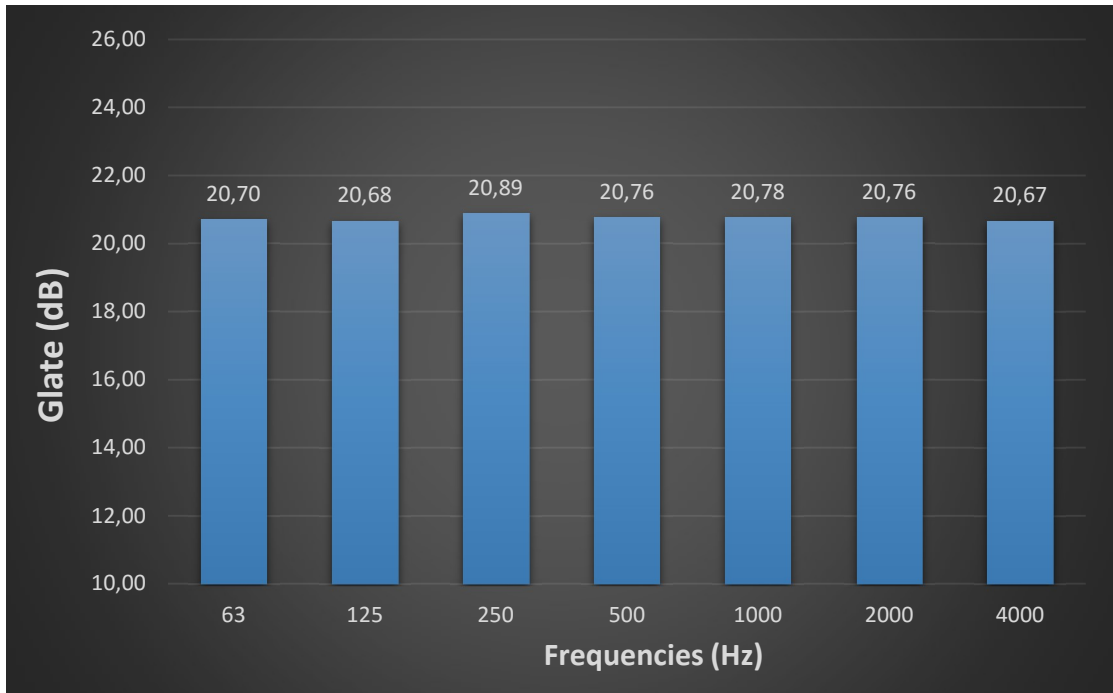


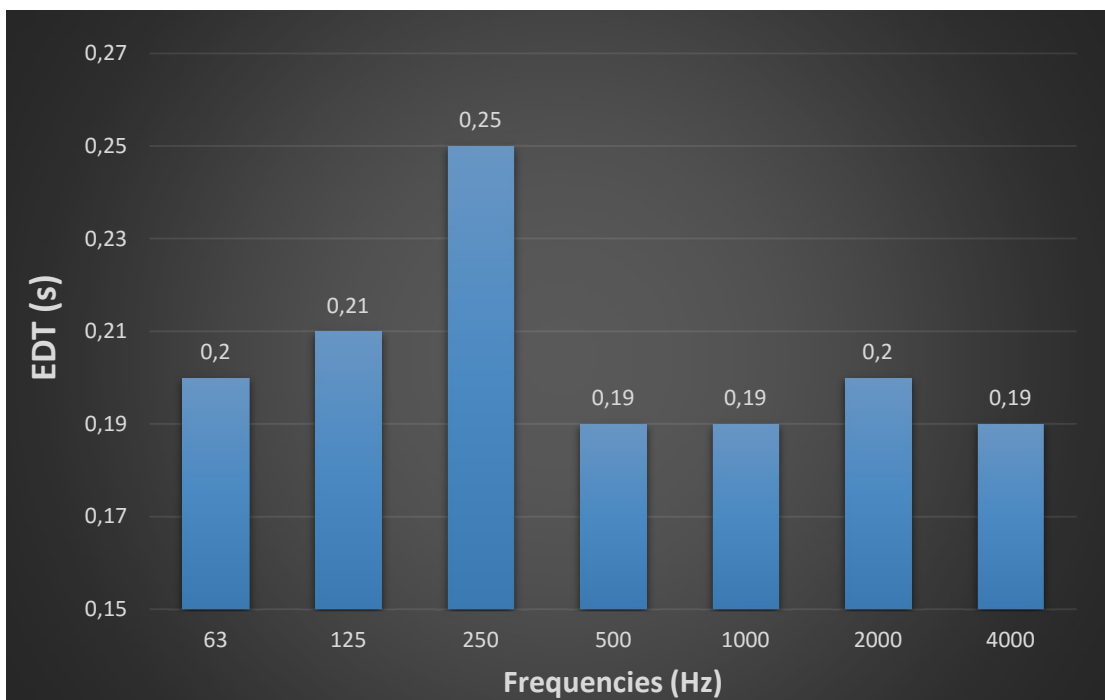
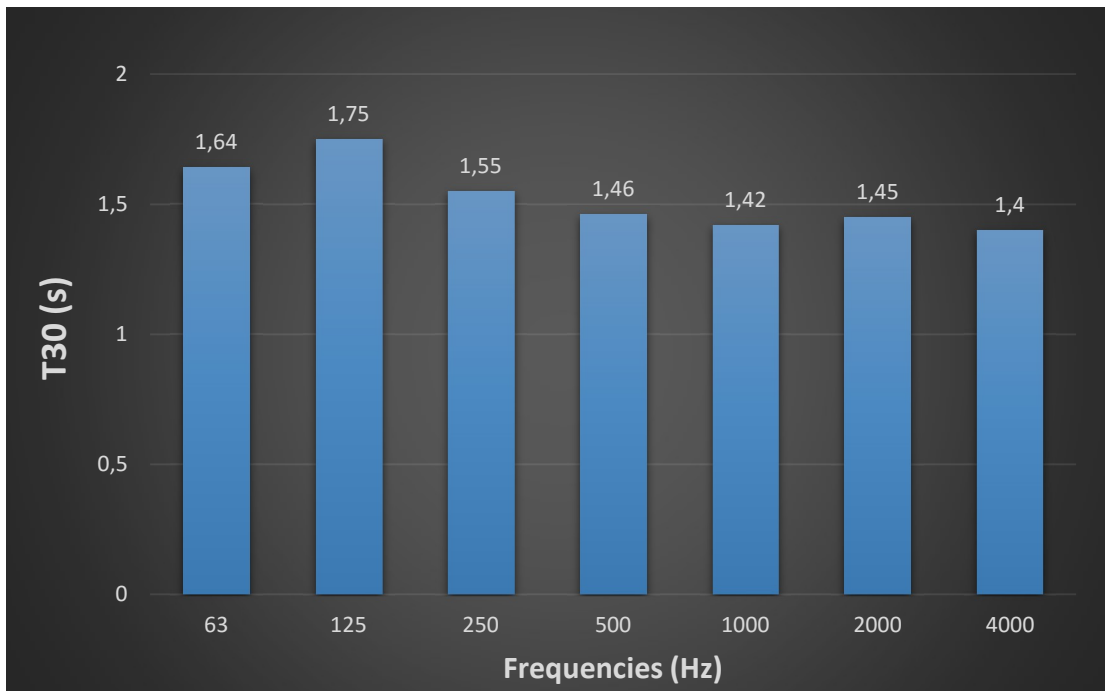


F.2. Ύψος οροφής σκηνής

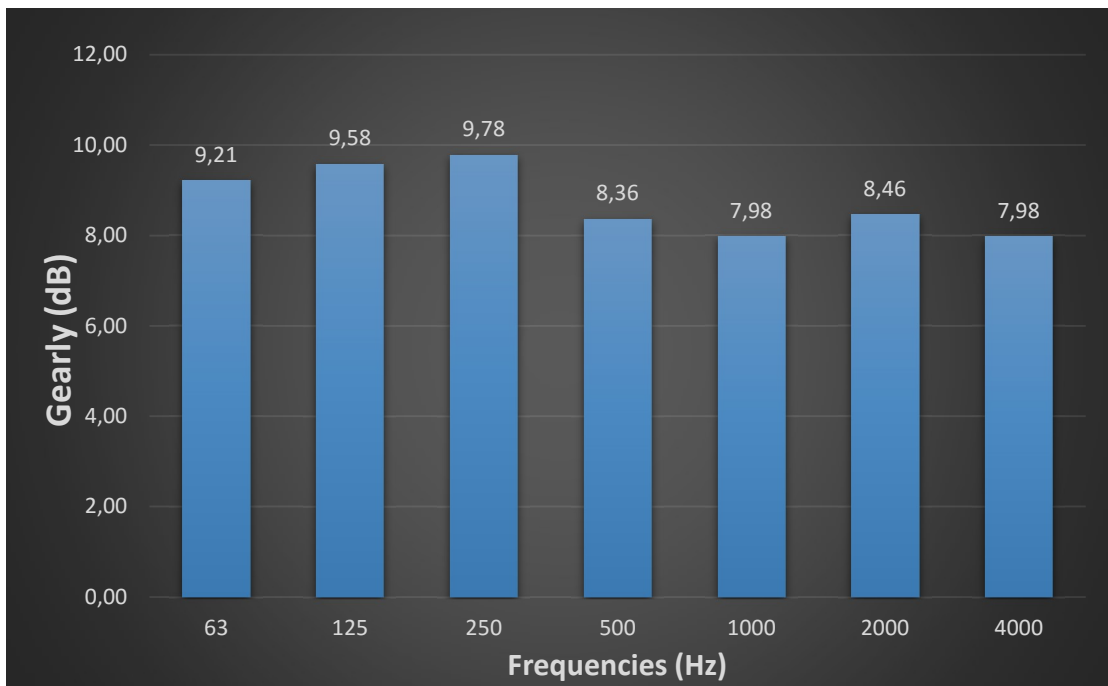
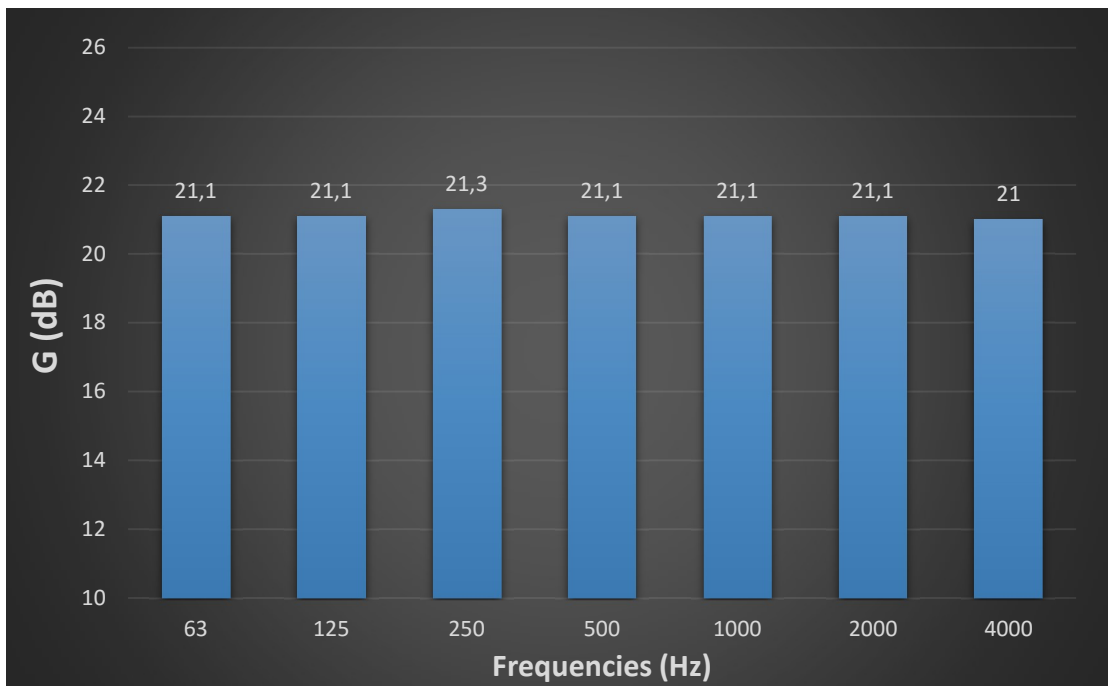
F.2.1. Ύψος οροφής σκηνής 6m

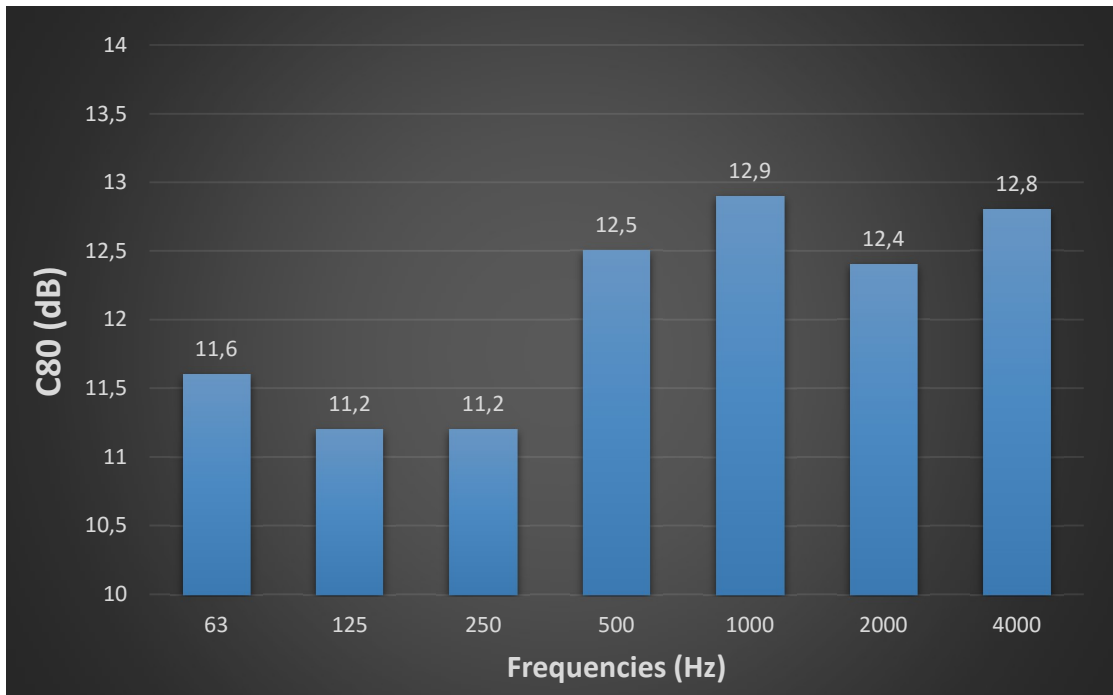
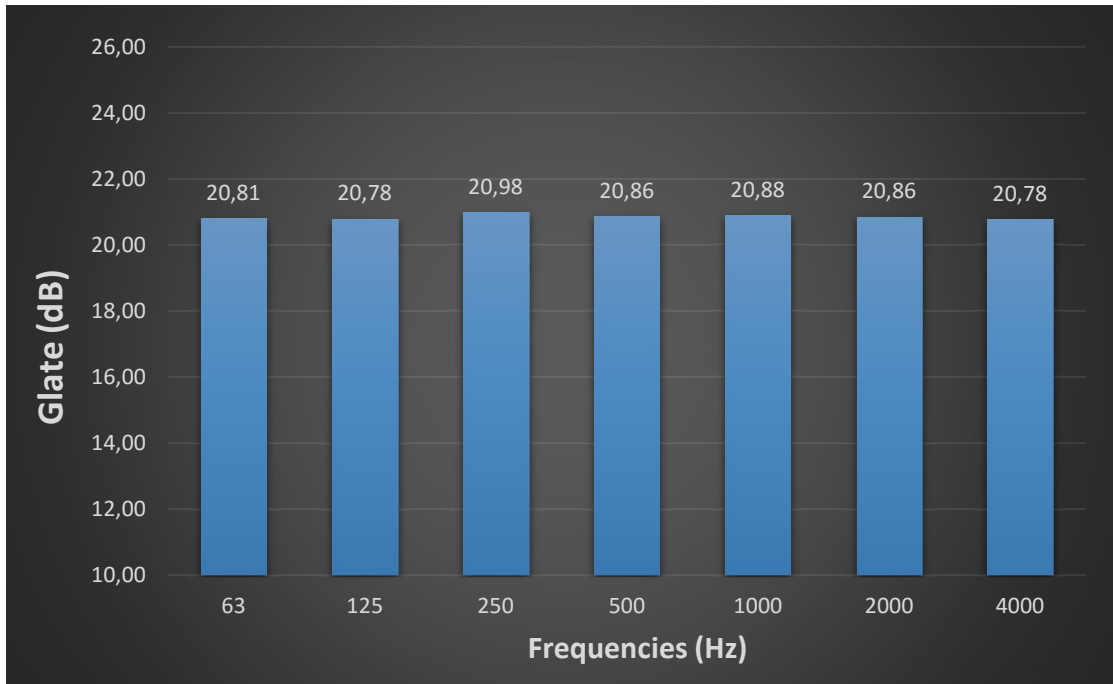


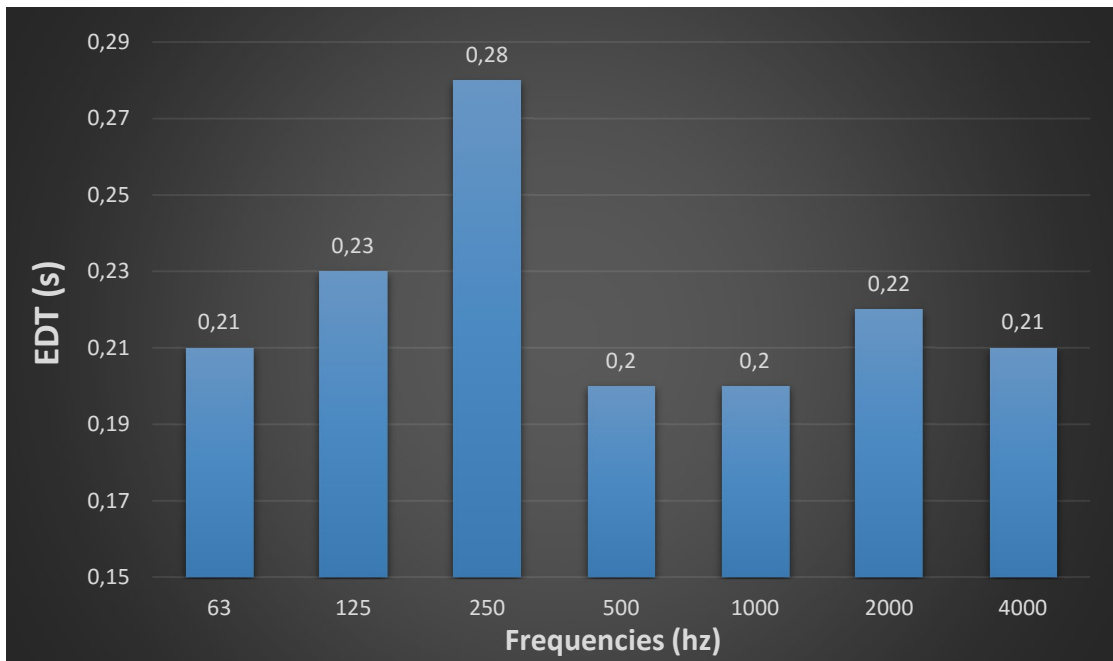
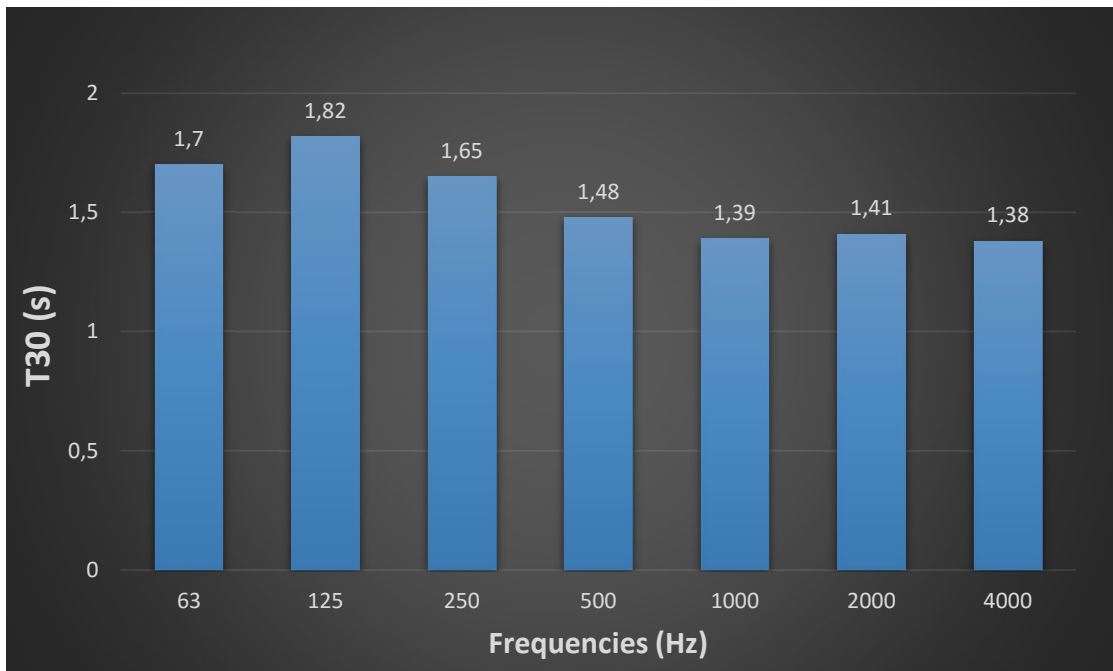




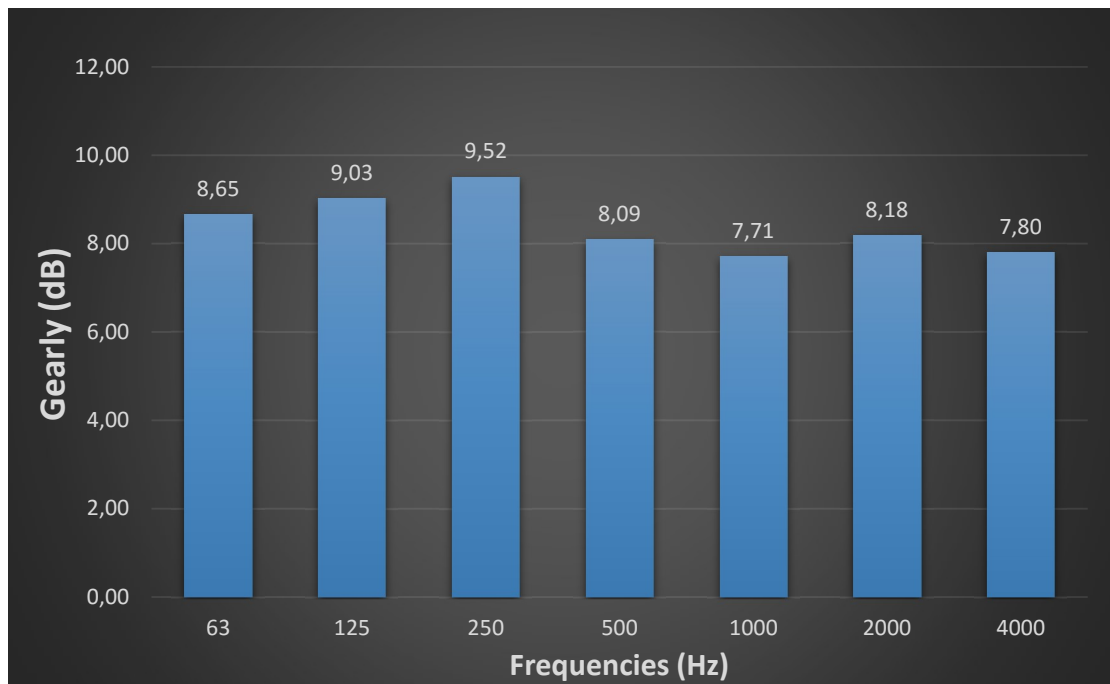
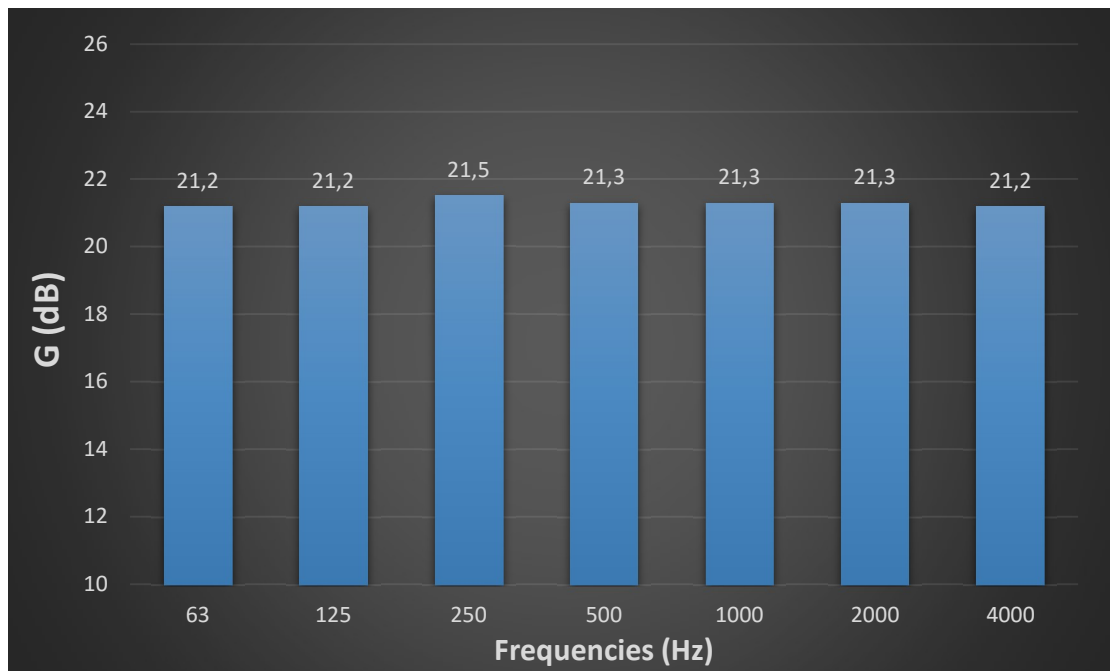
F.2.2. Ύψος οροφής σκηνής 5m

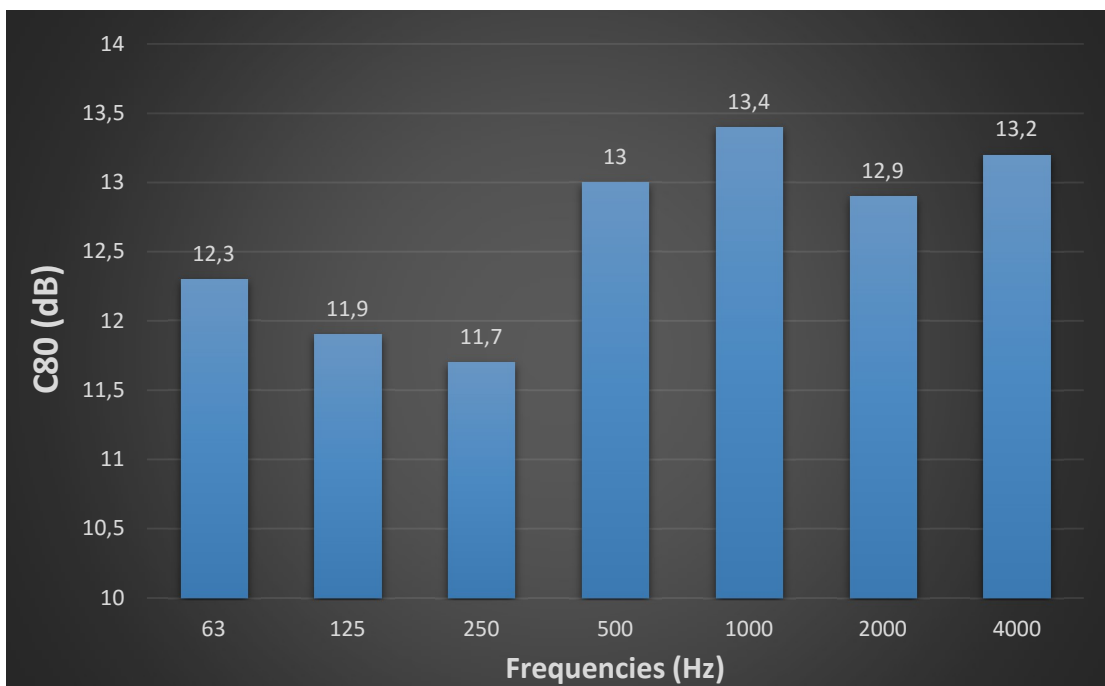
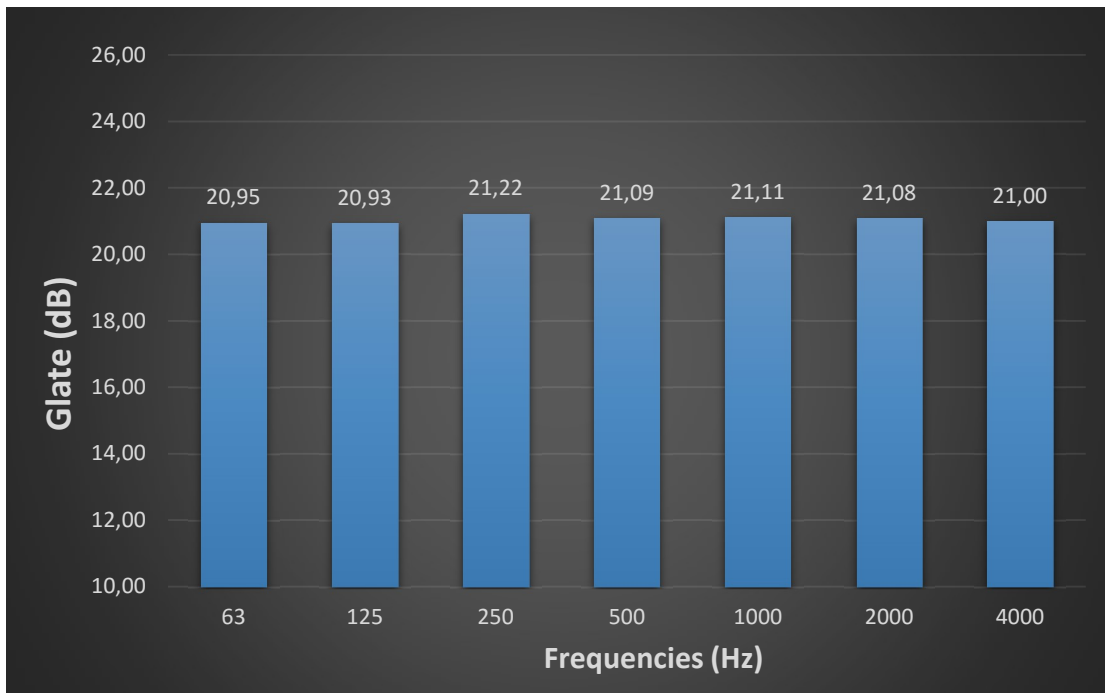


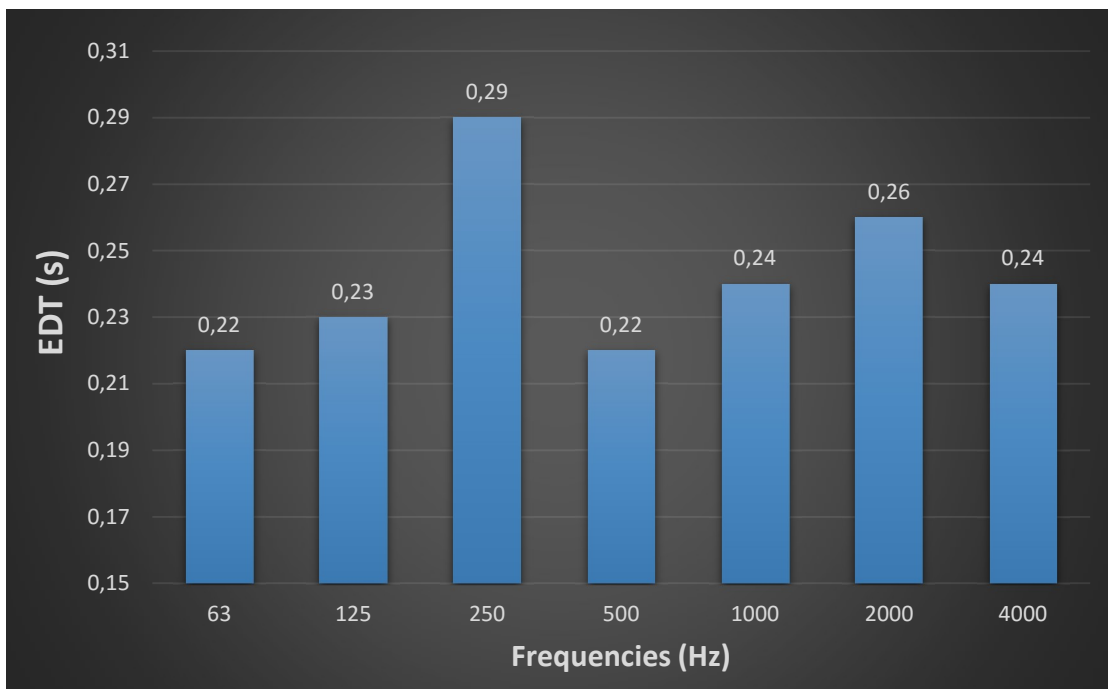
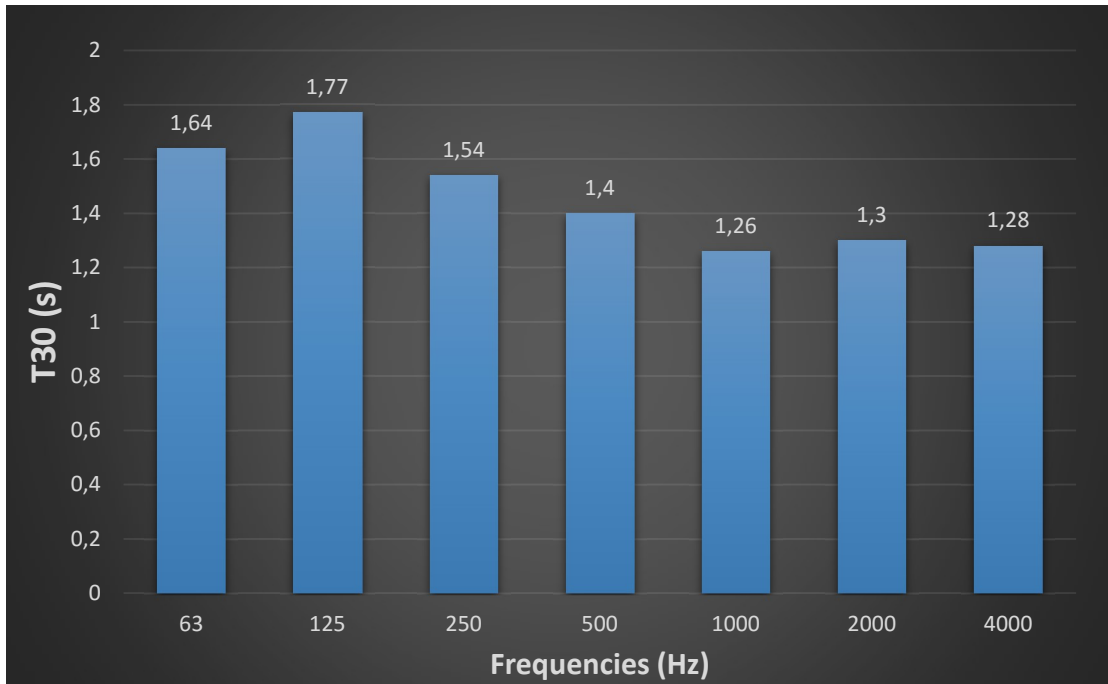




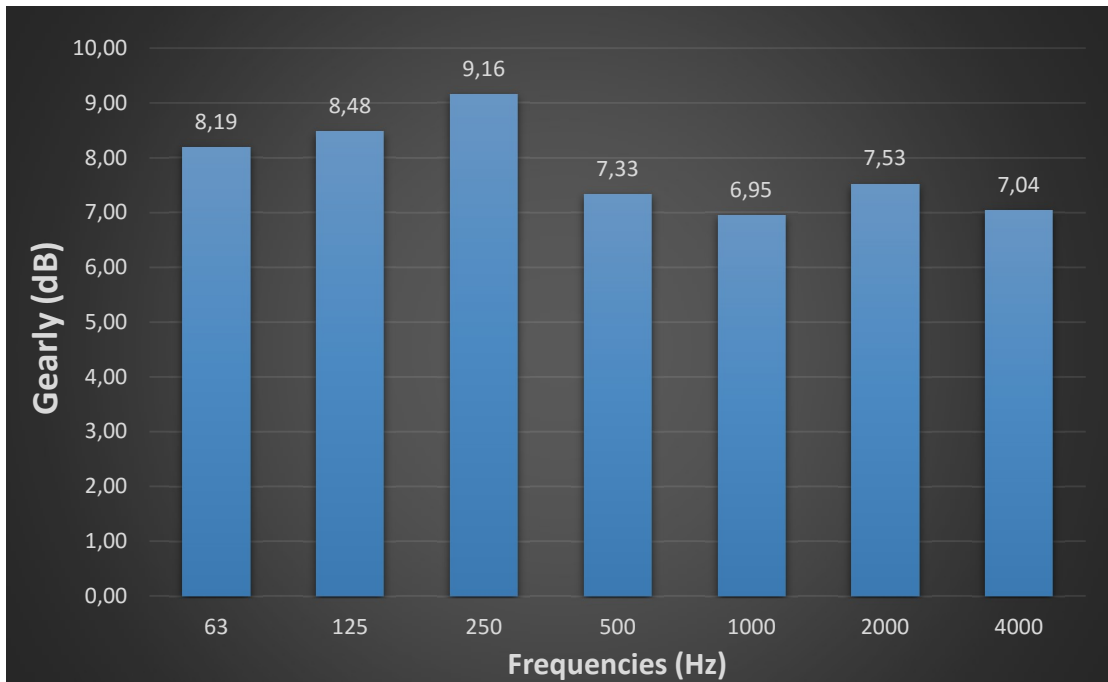
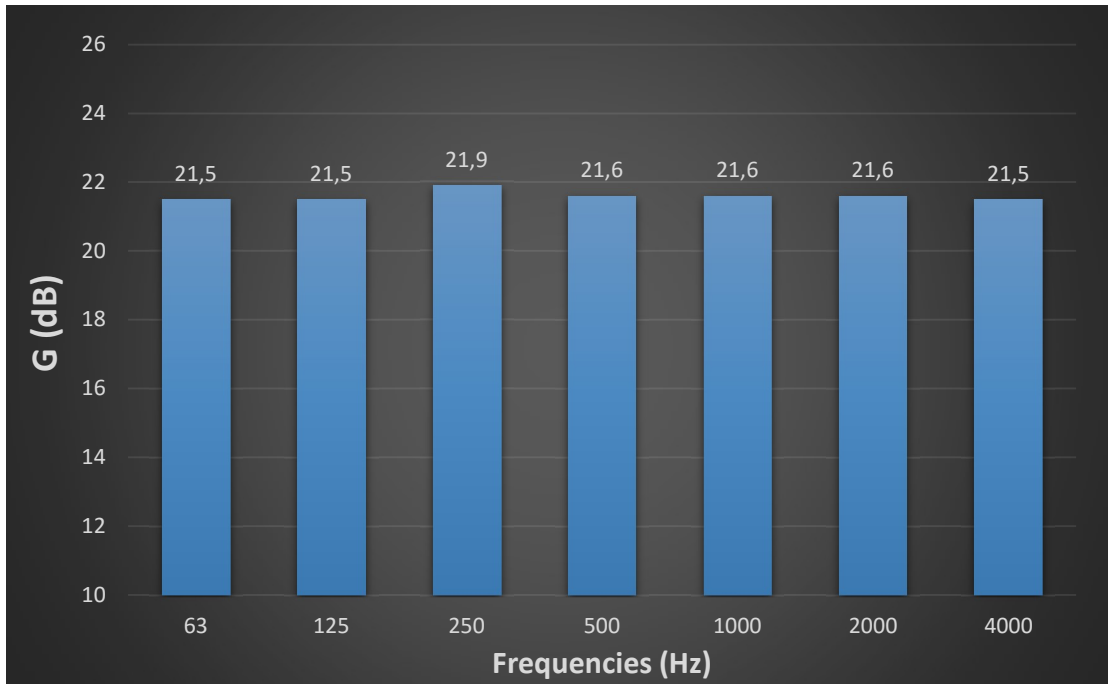
F.2.3. Ύψος οροφής σκηνής 4m

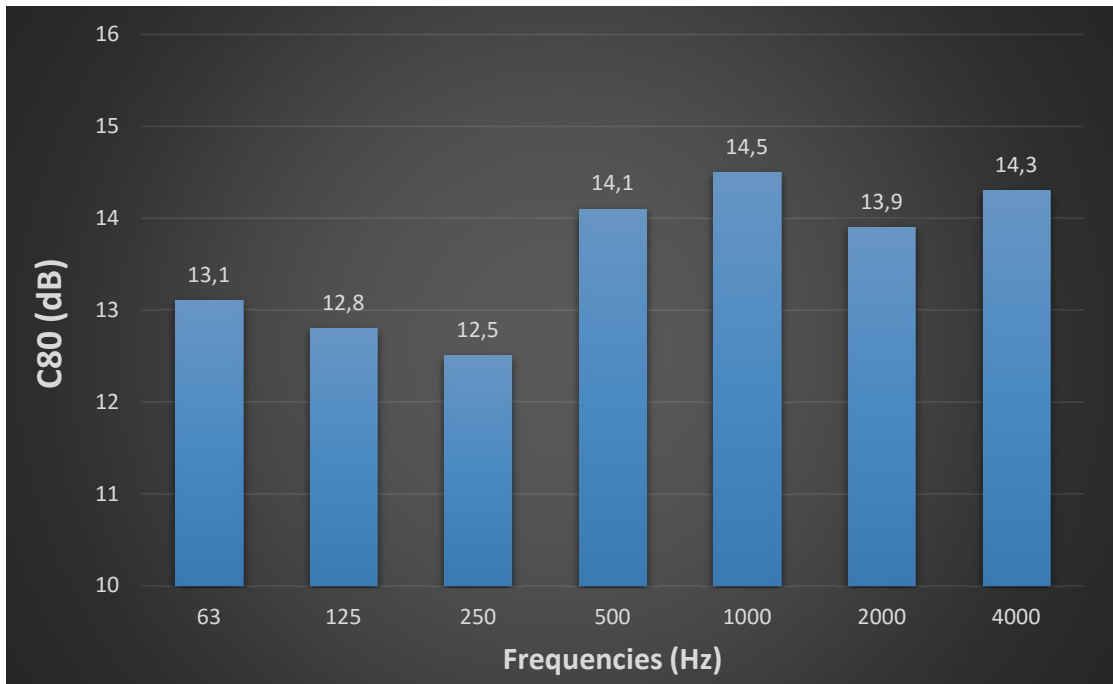
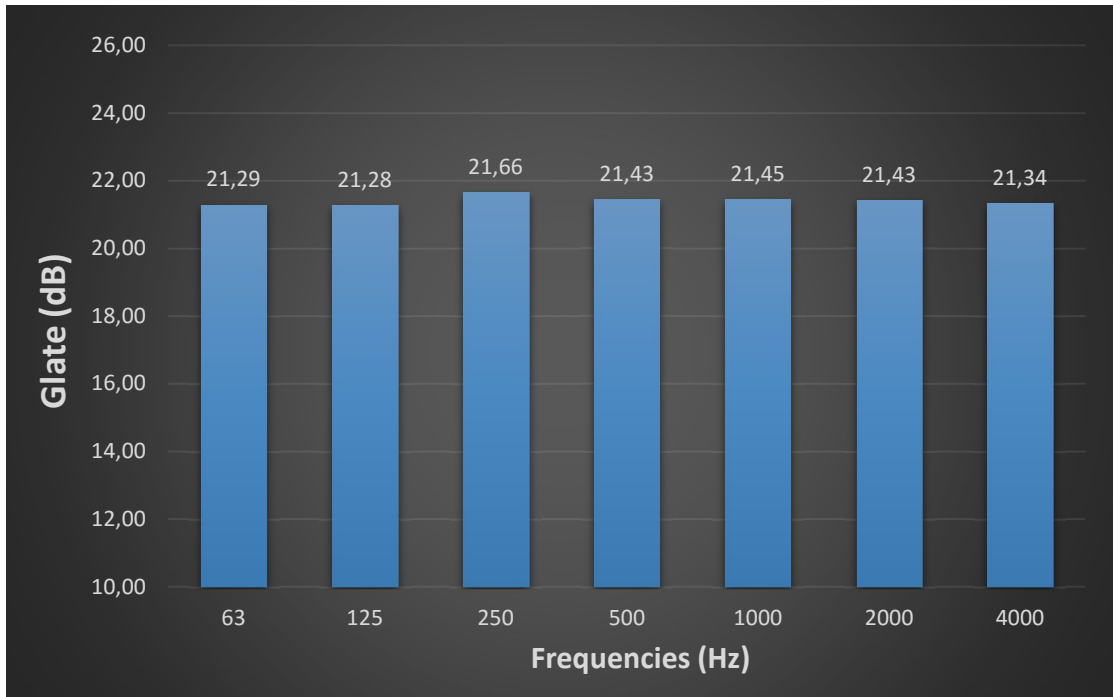


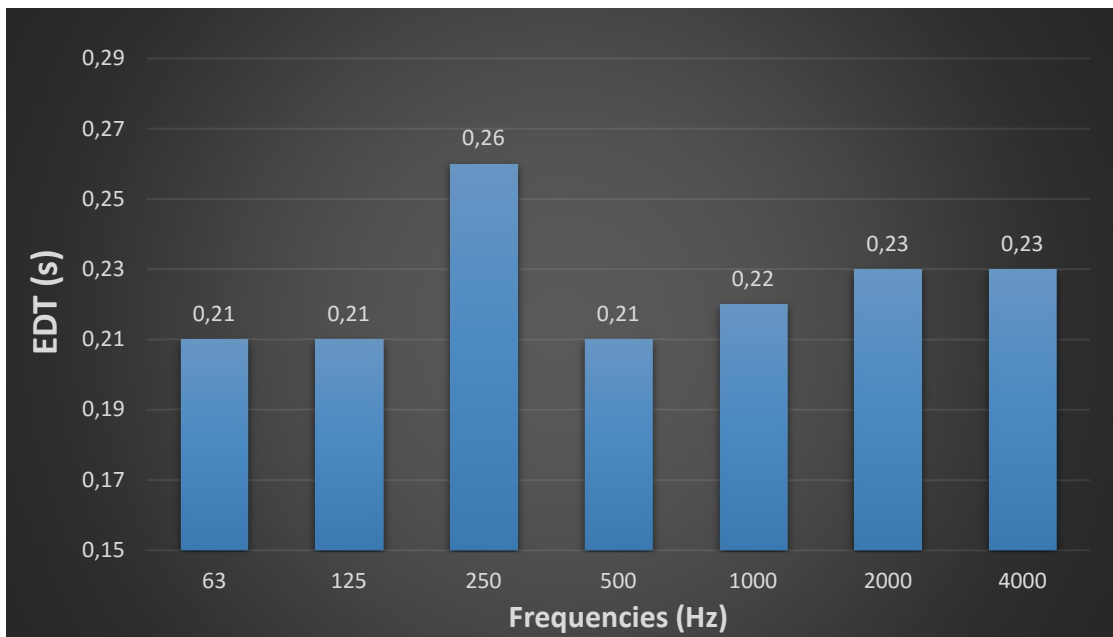
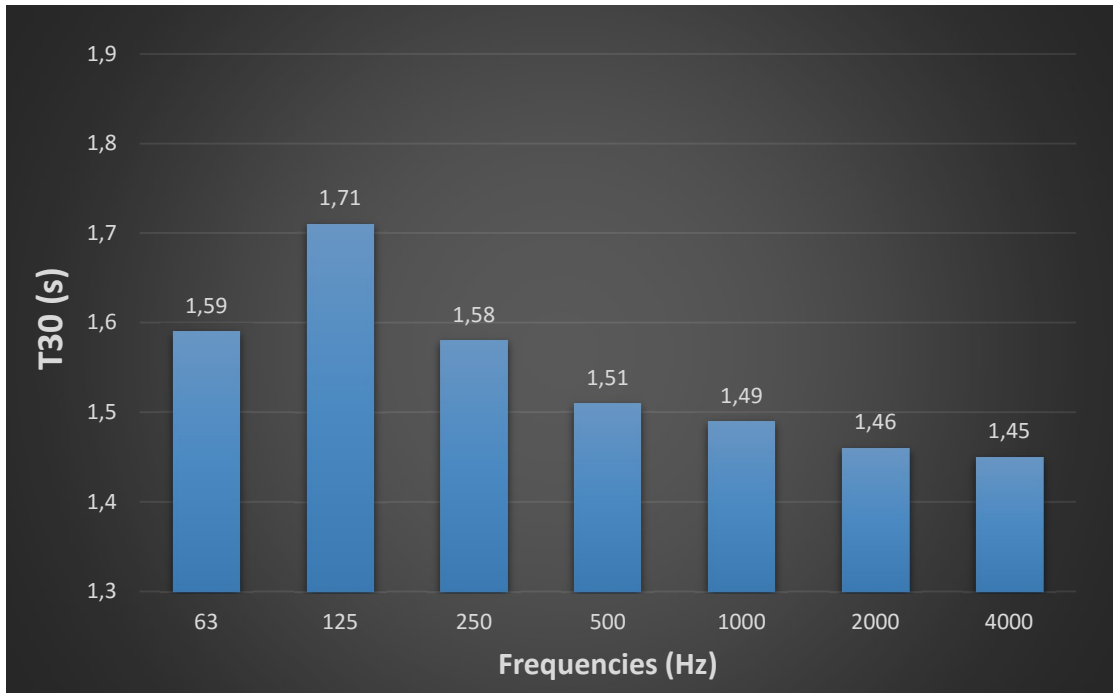




F.2.4. Ύψος οροφής σκηνής 3m

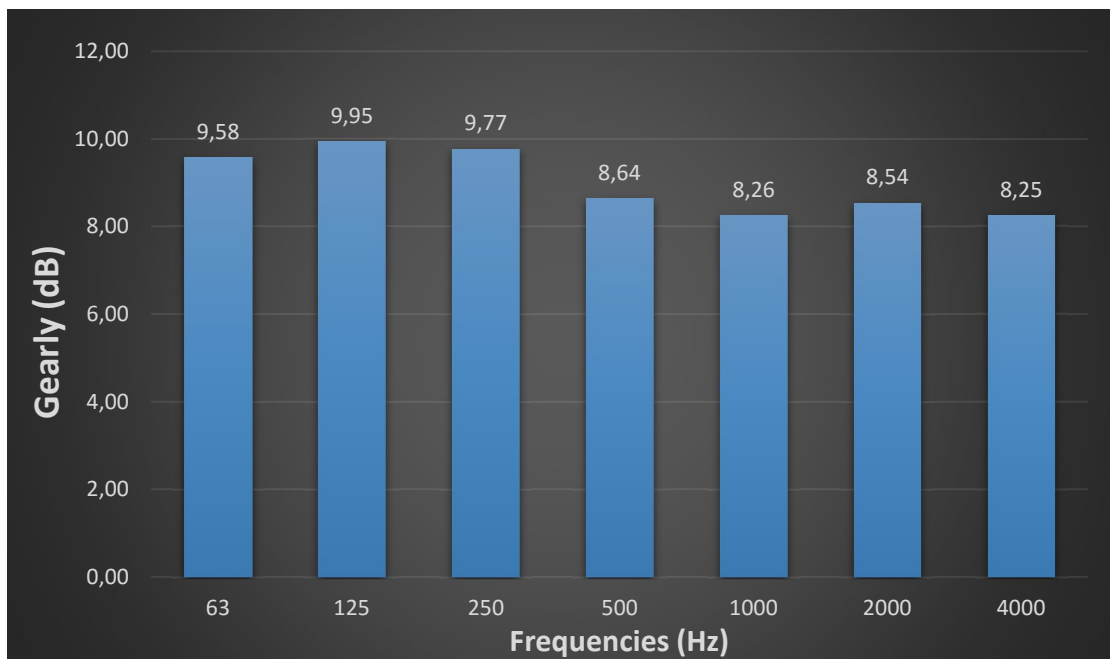
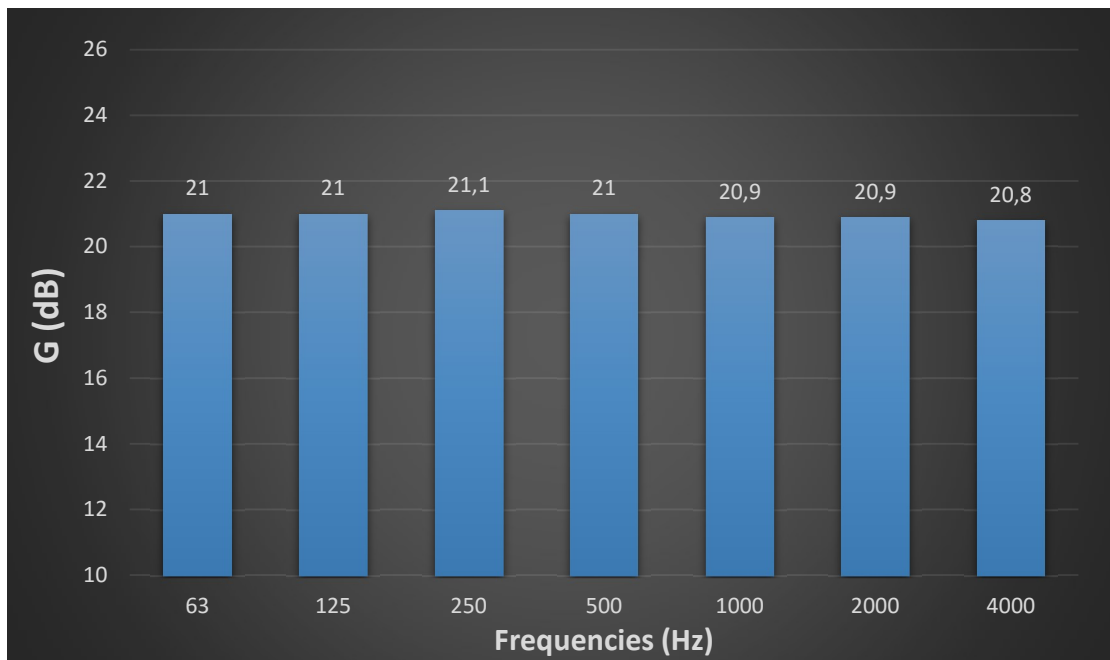


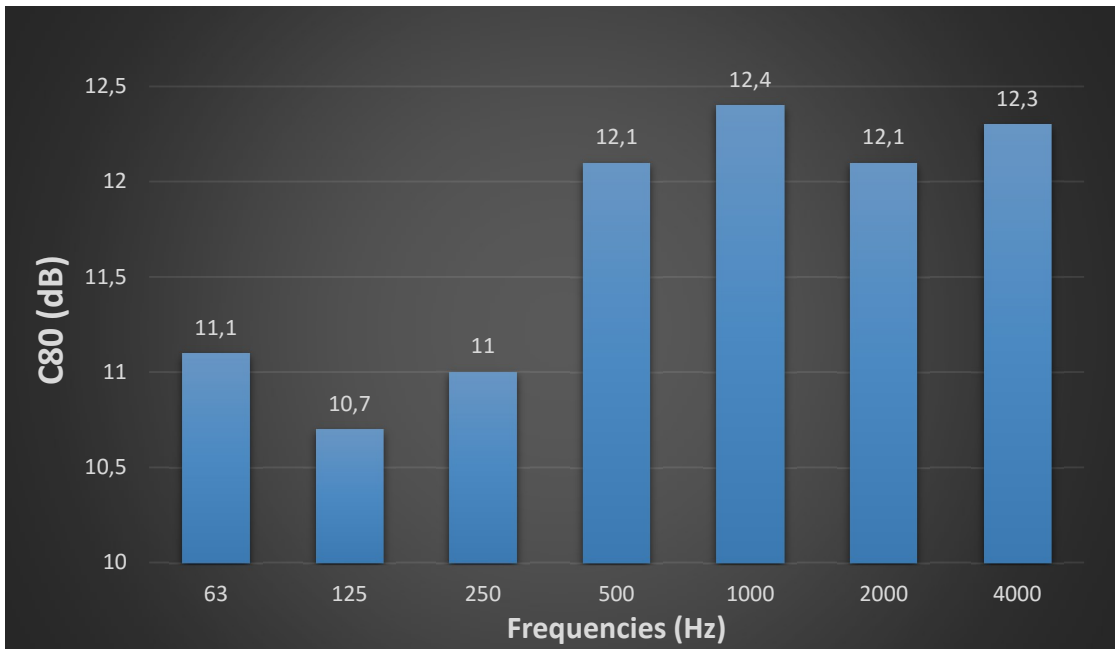
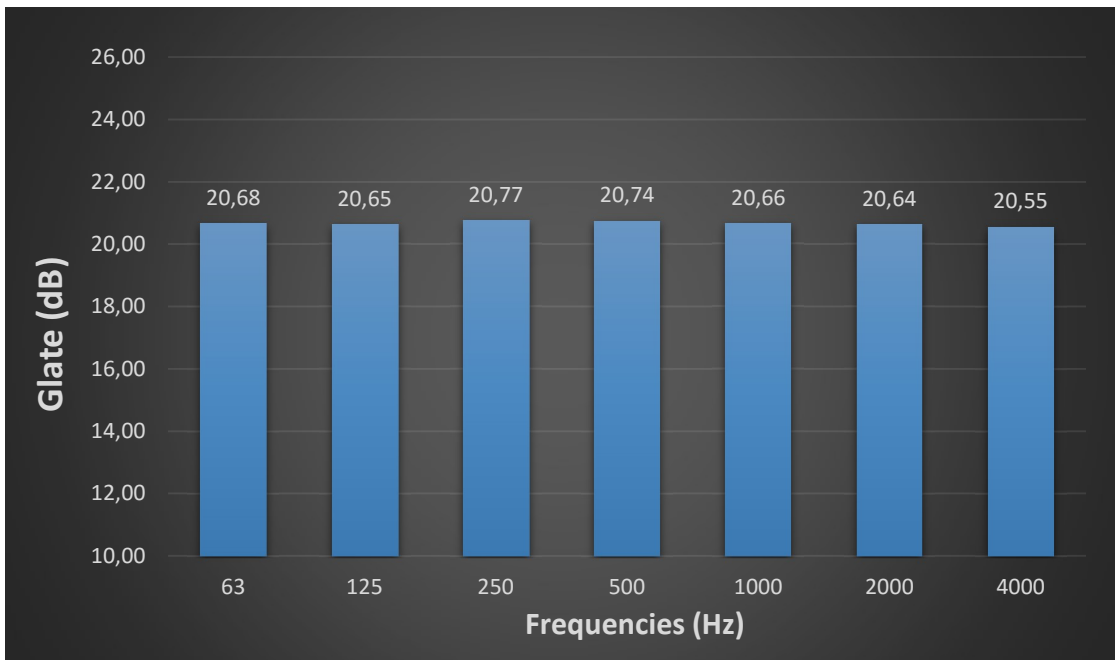


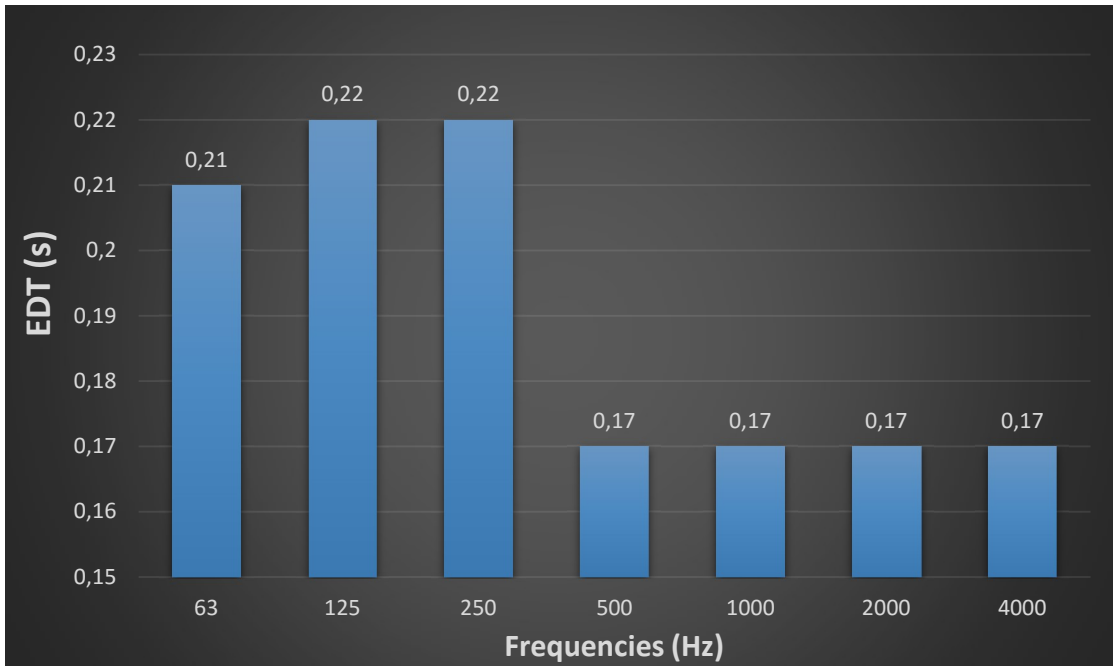
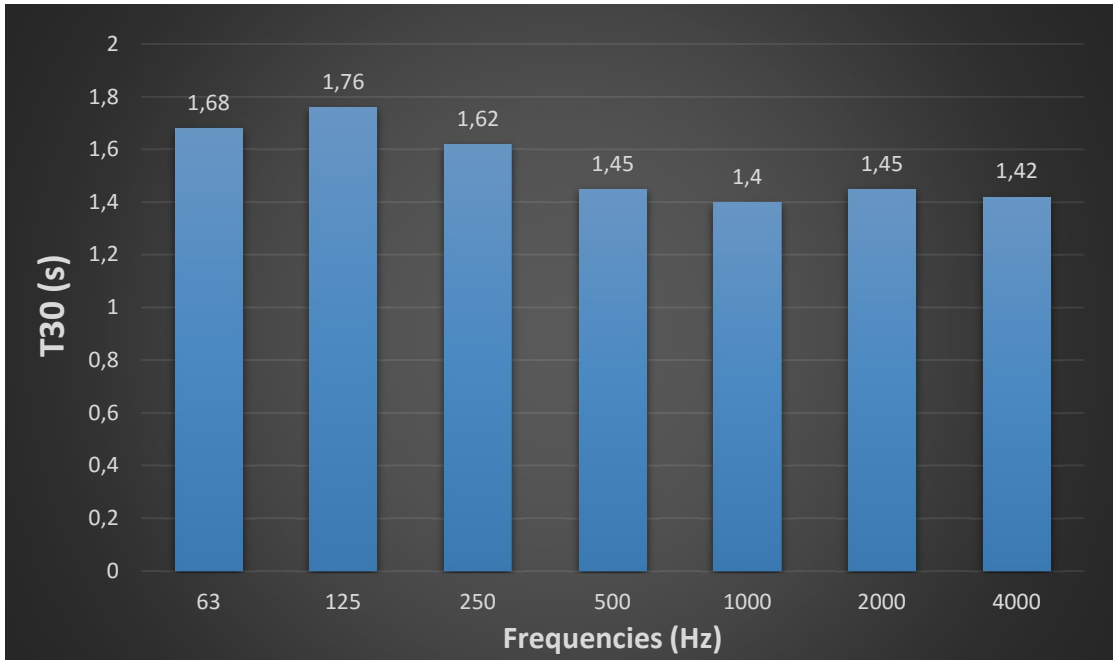


F.3. Κλίση πλαϊνών τοίχων σκηνής

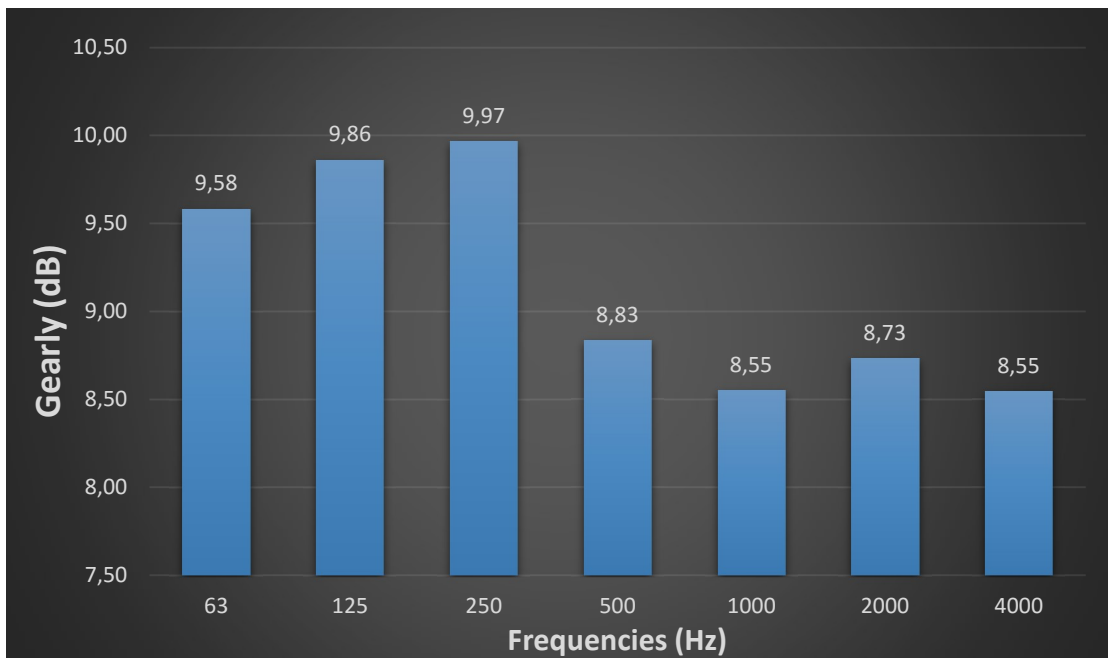
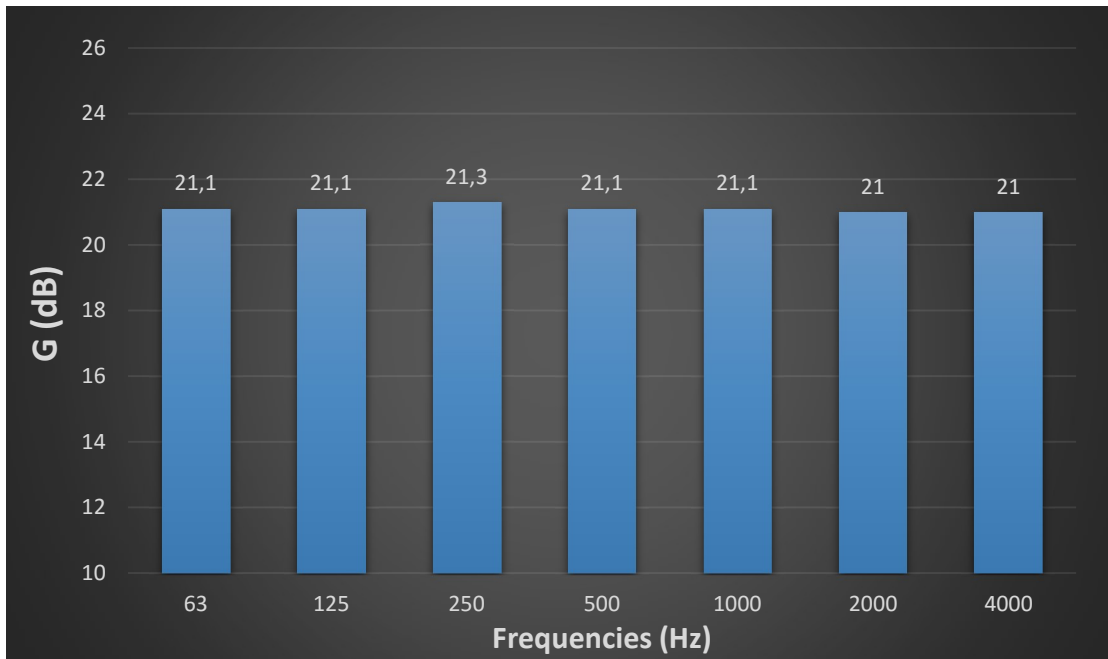
F.3.1. Κλίση 35°

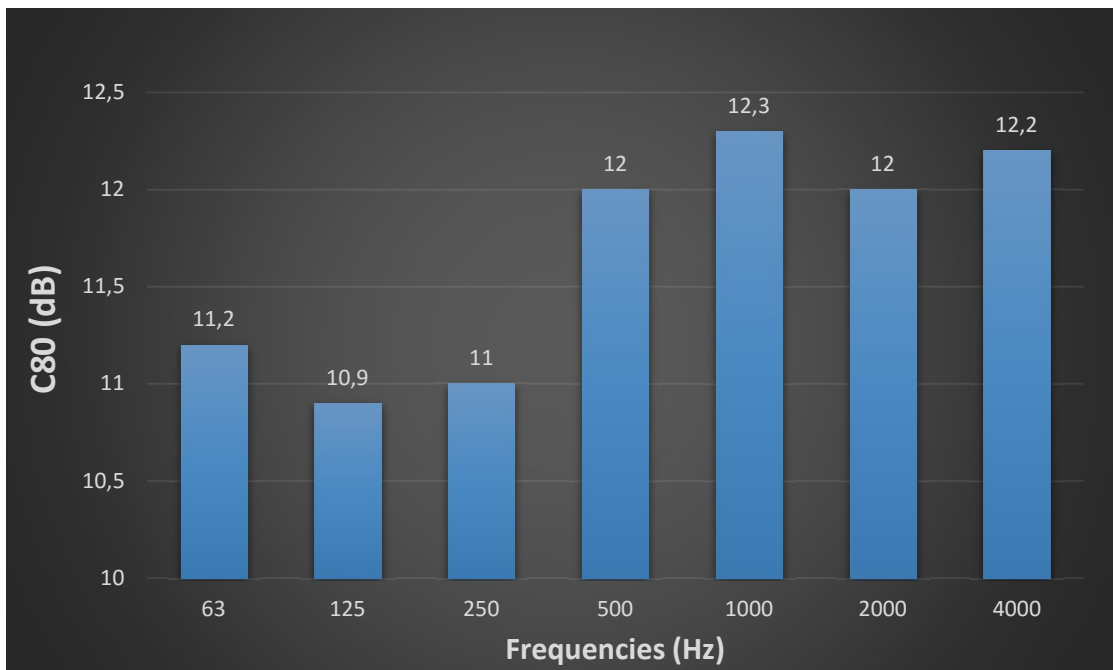
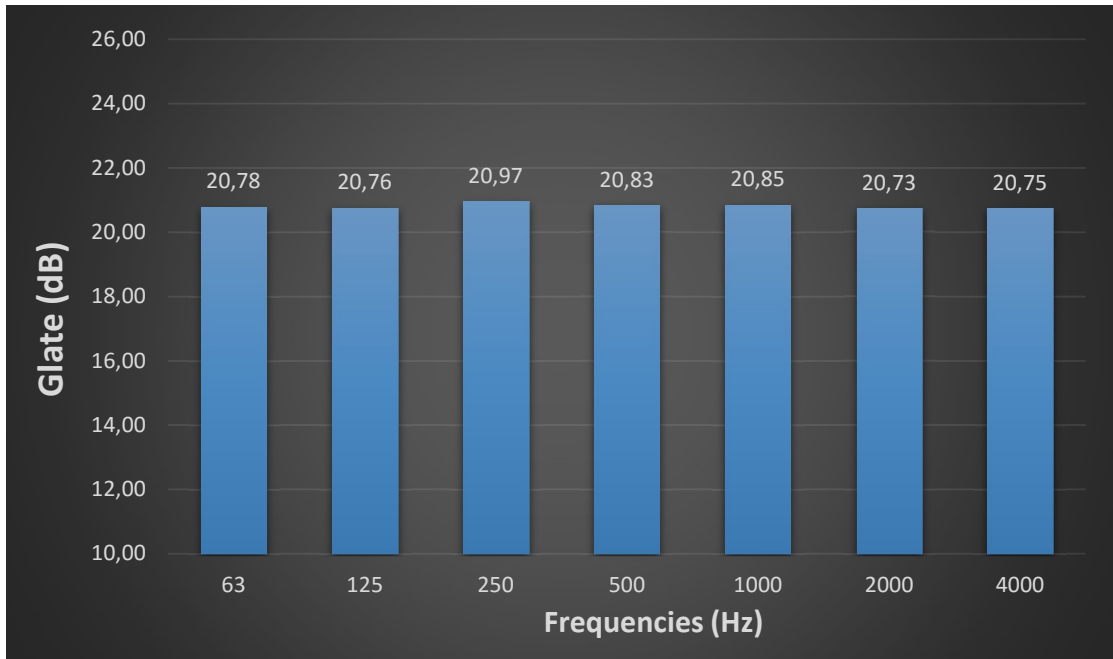


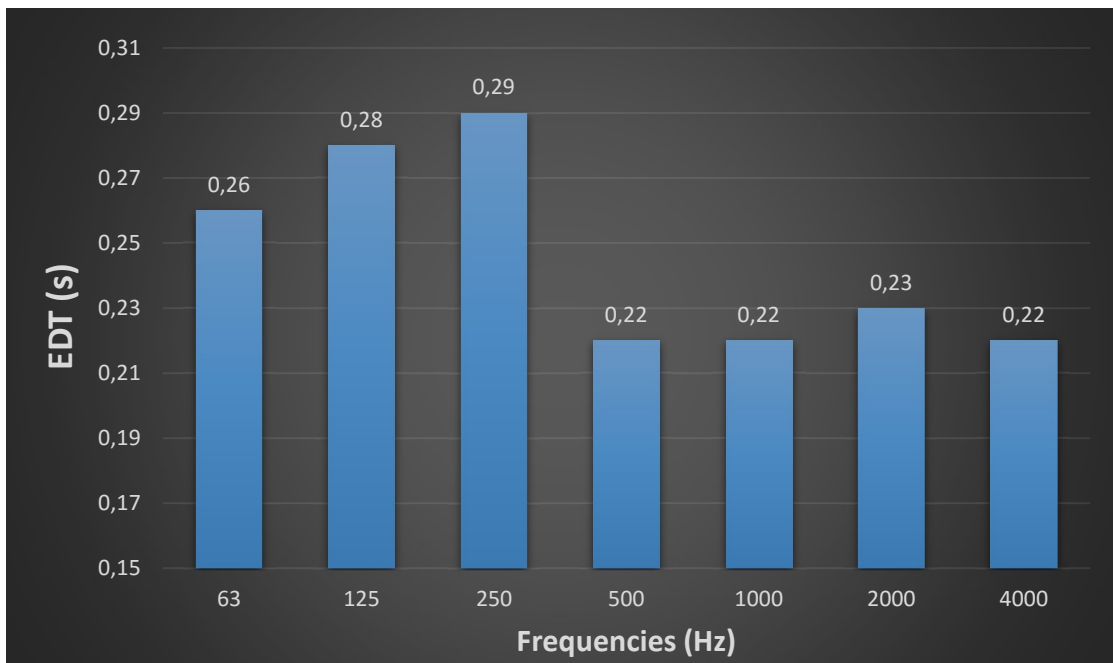
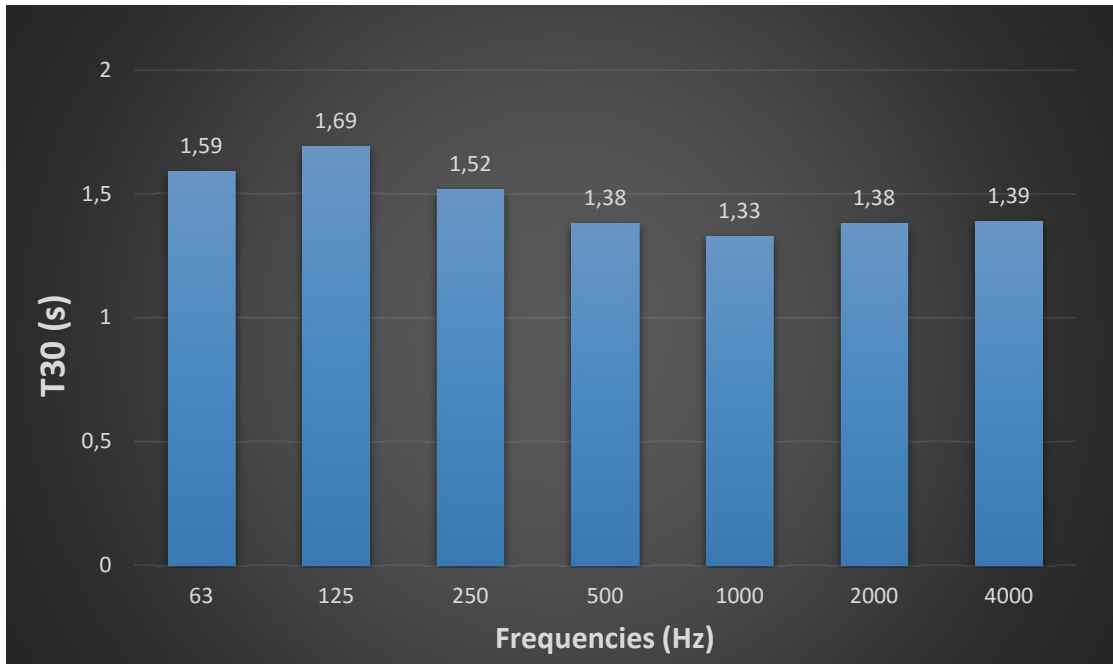




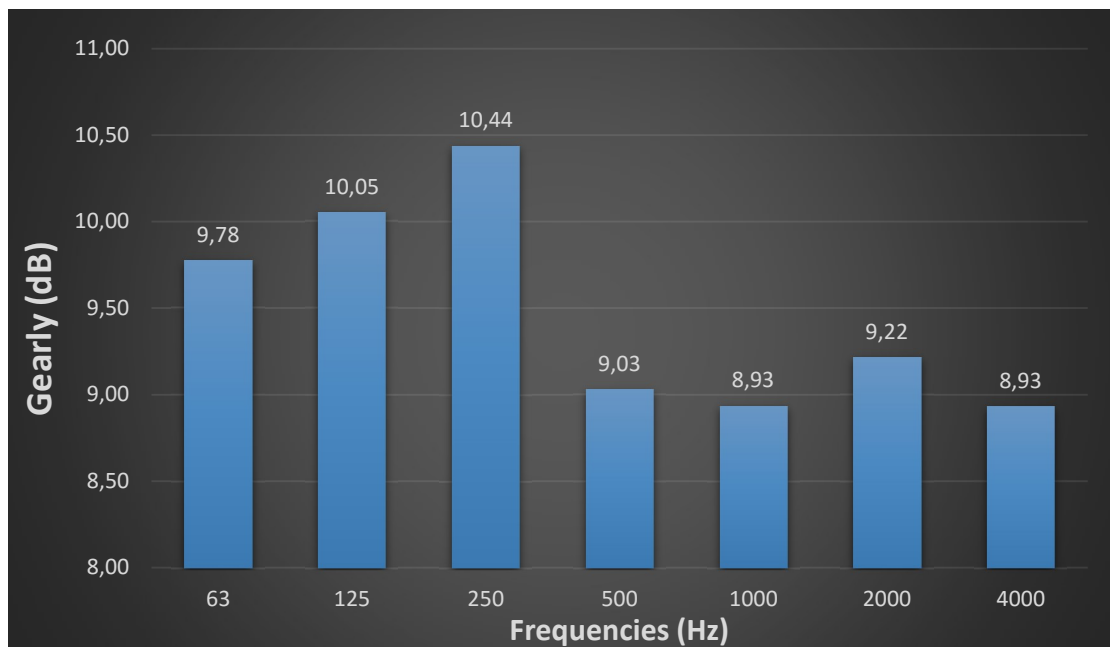
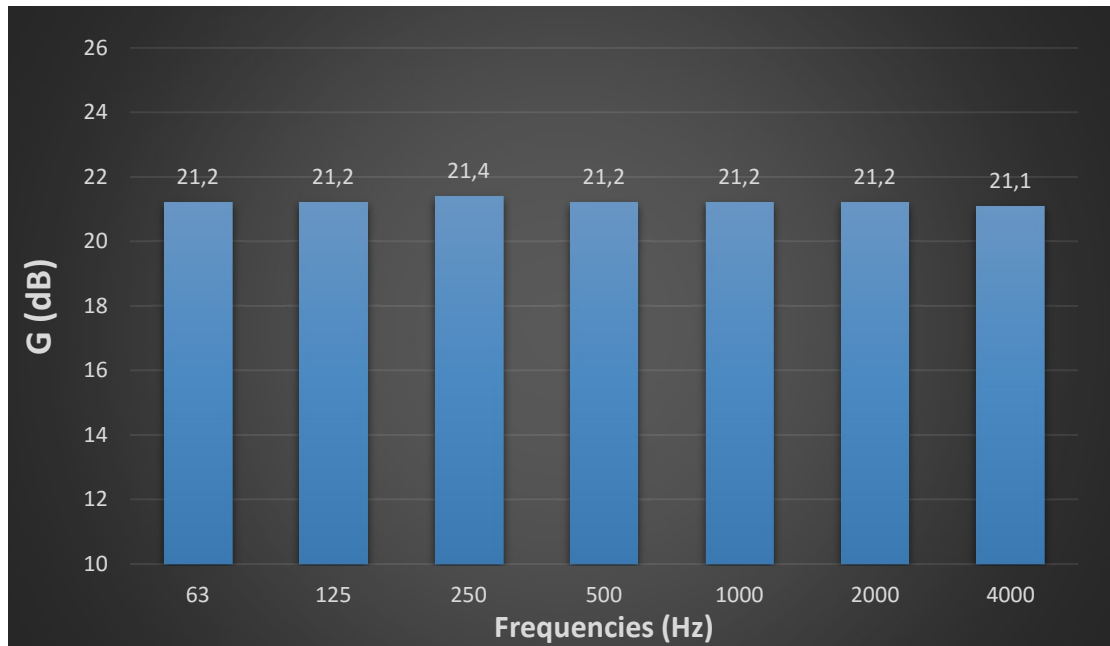
F.3.2. Κλίση 24°

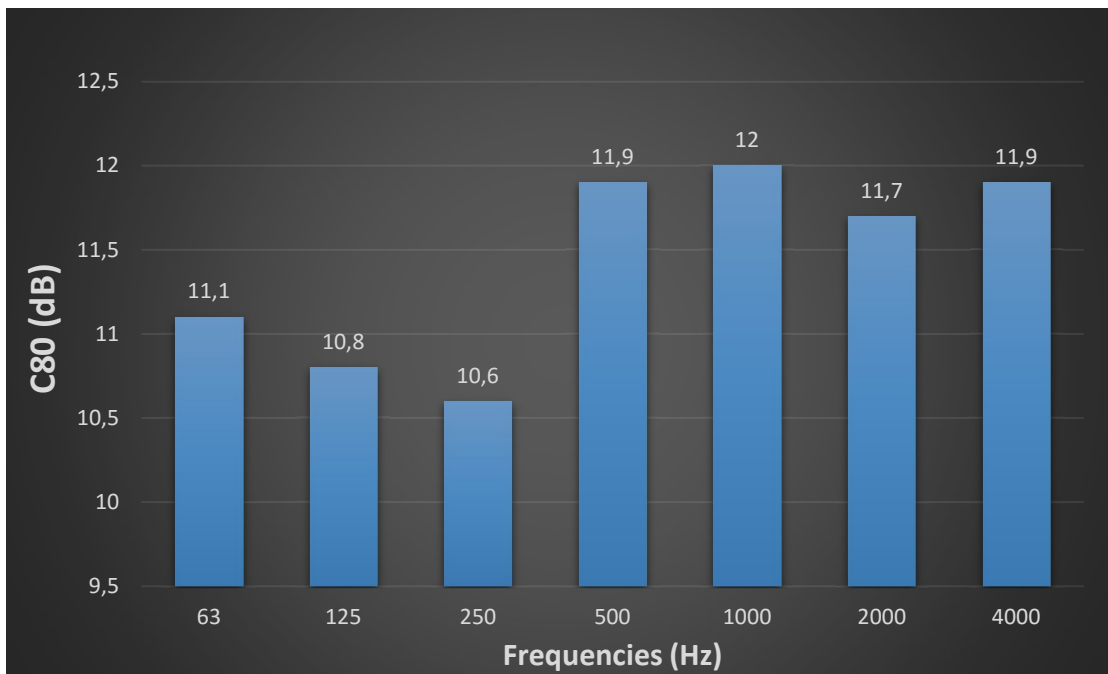
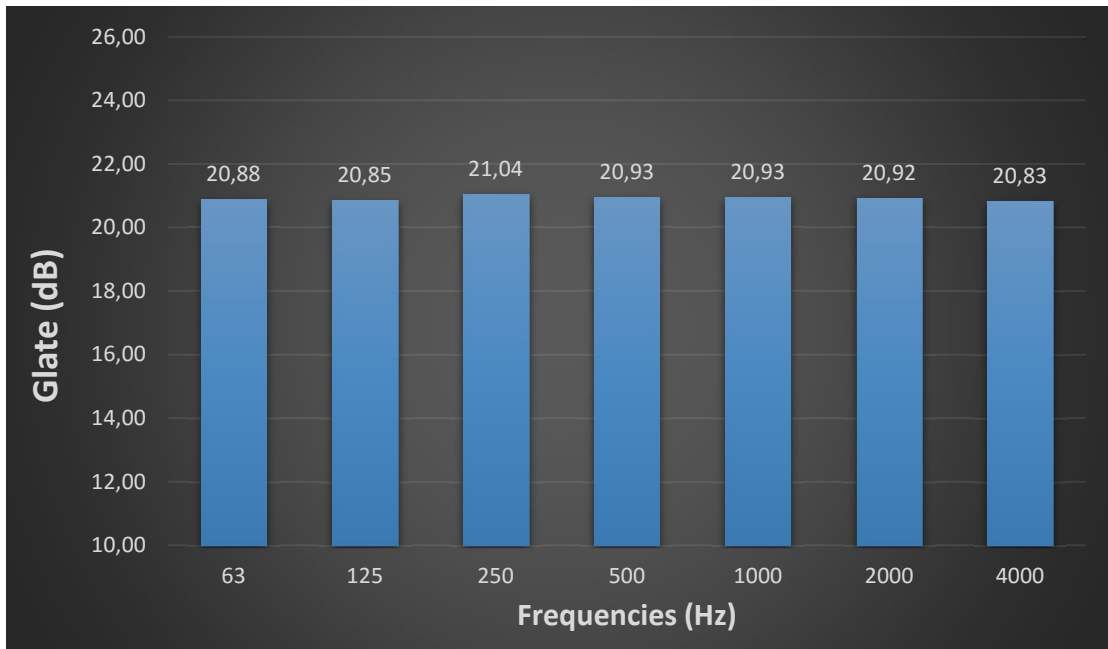


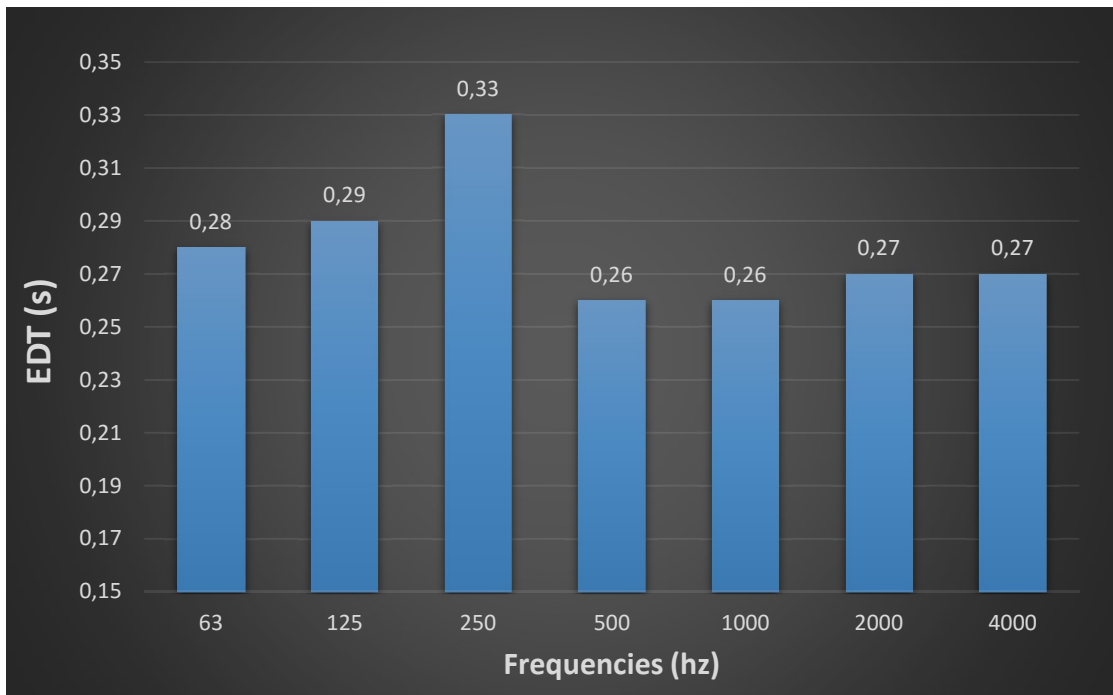
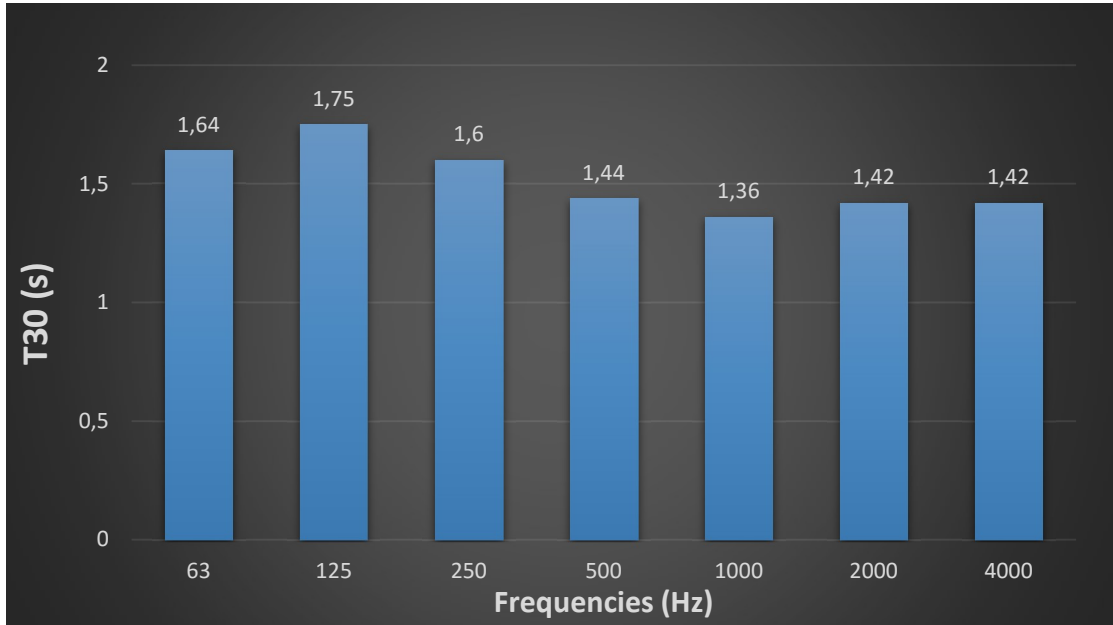




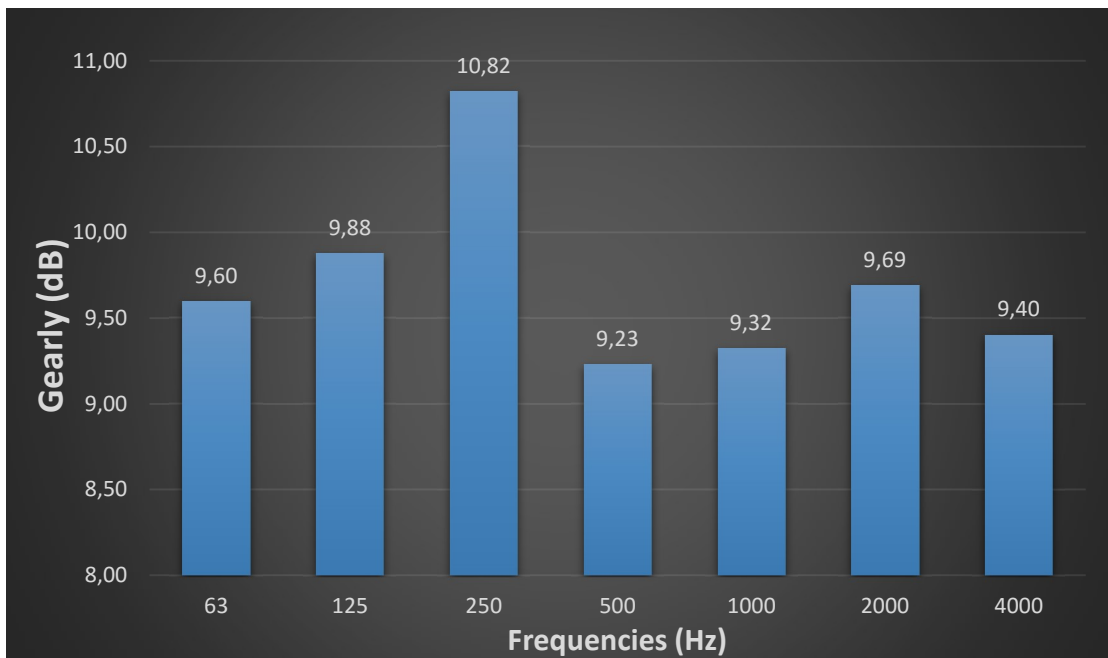
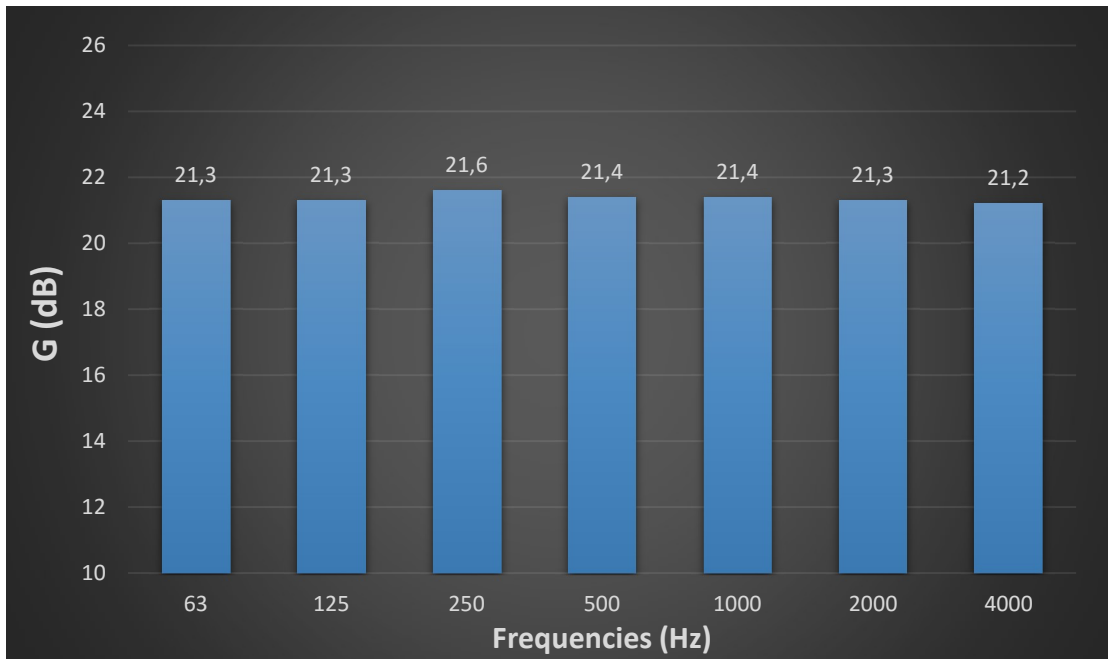
F.3.3. Κλίση 15°

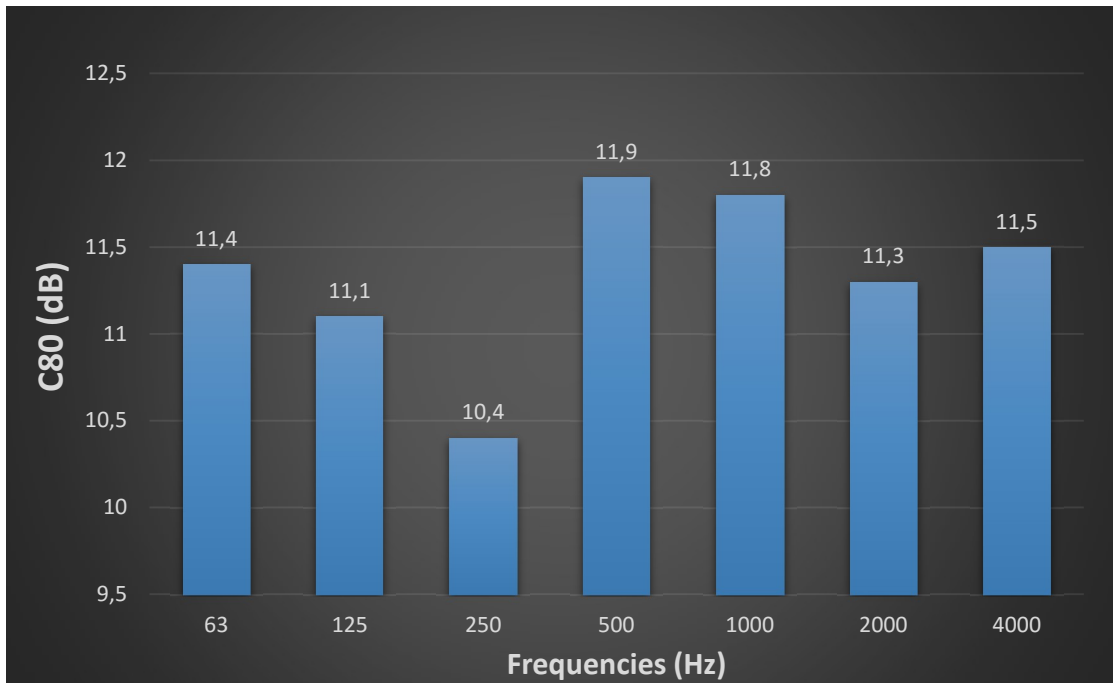
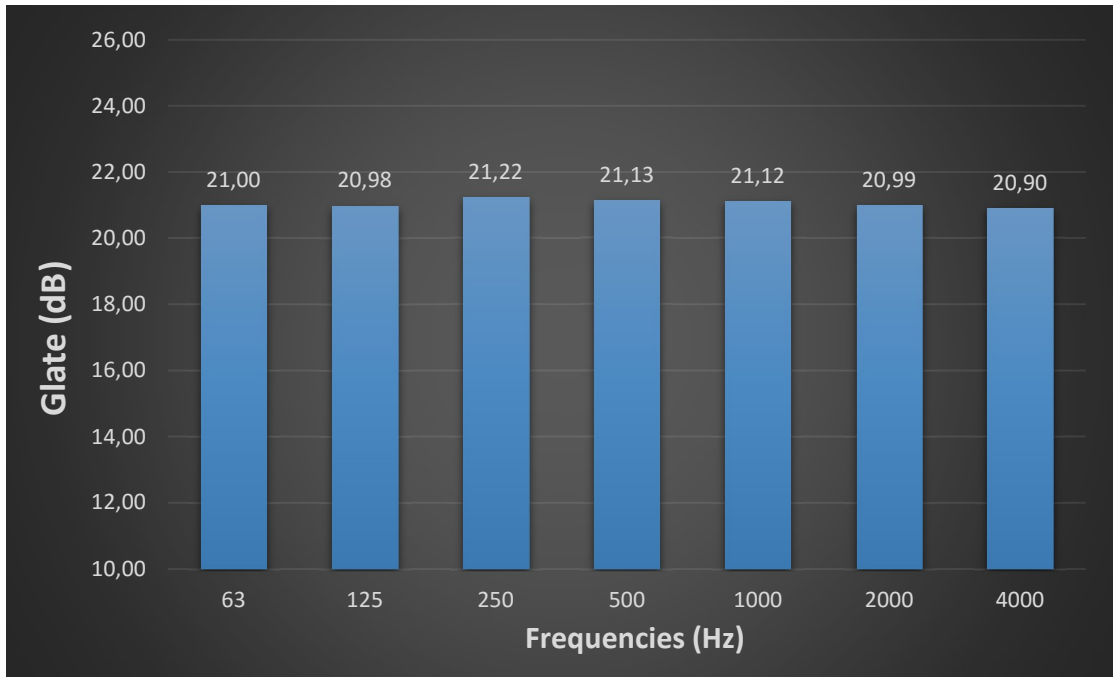


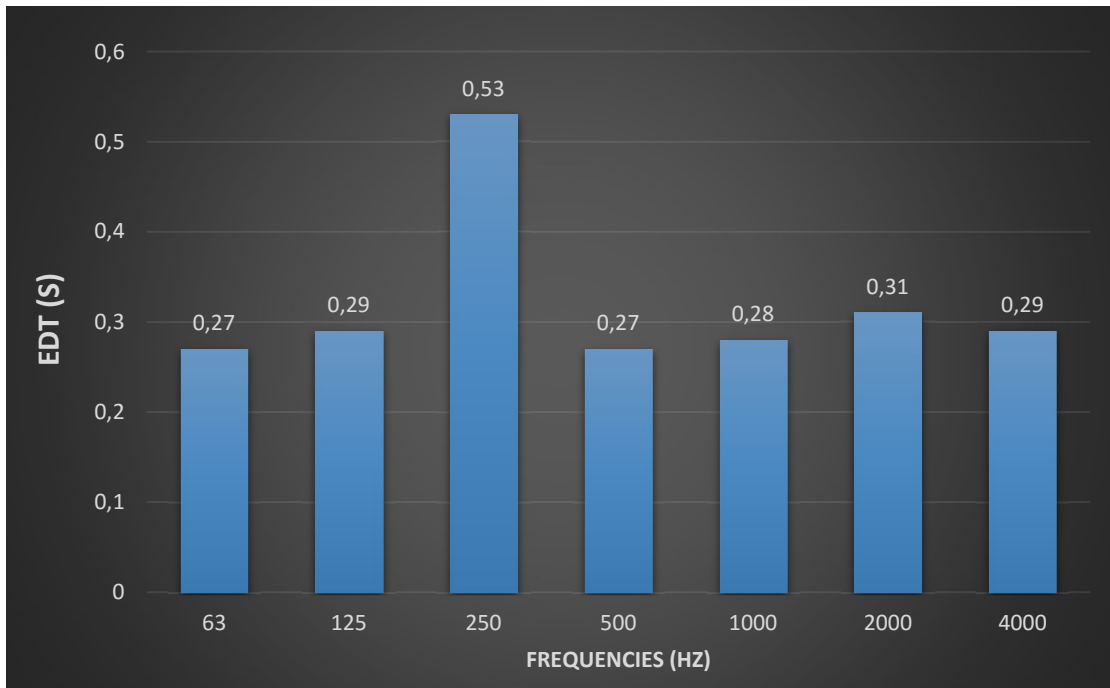
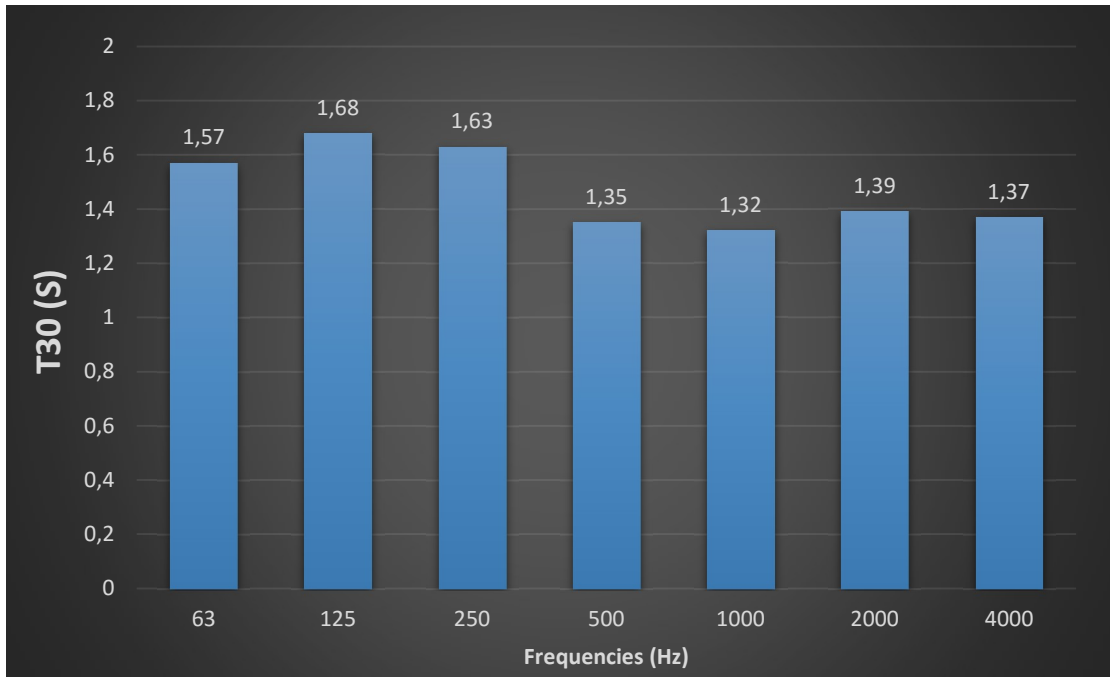




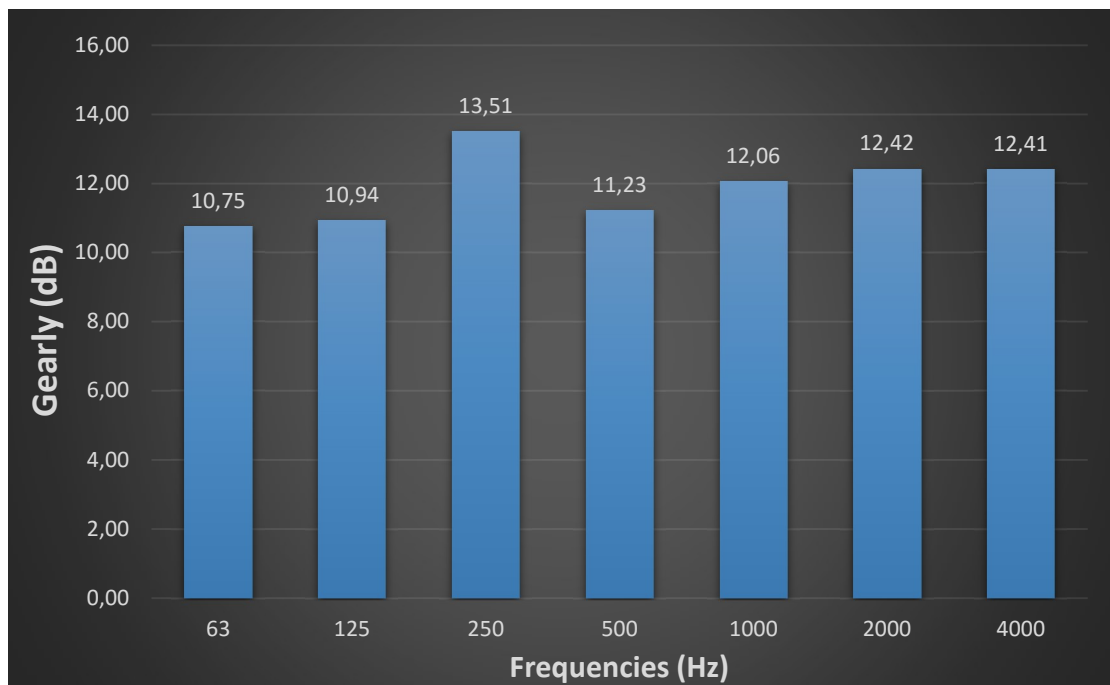
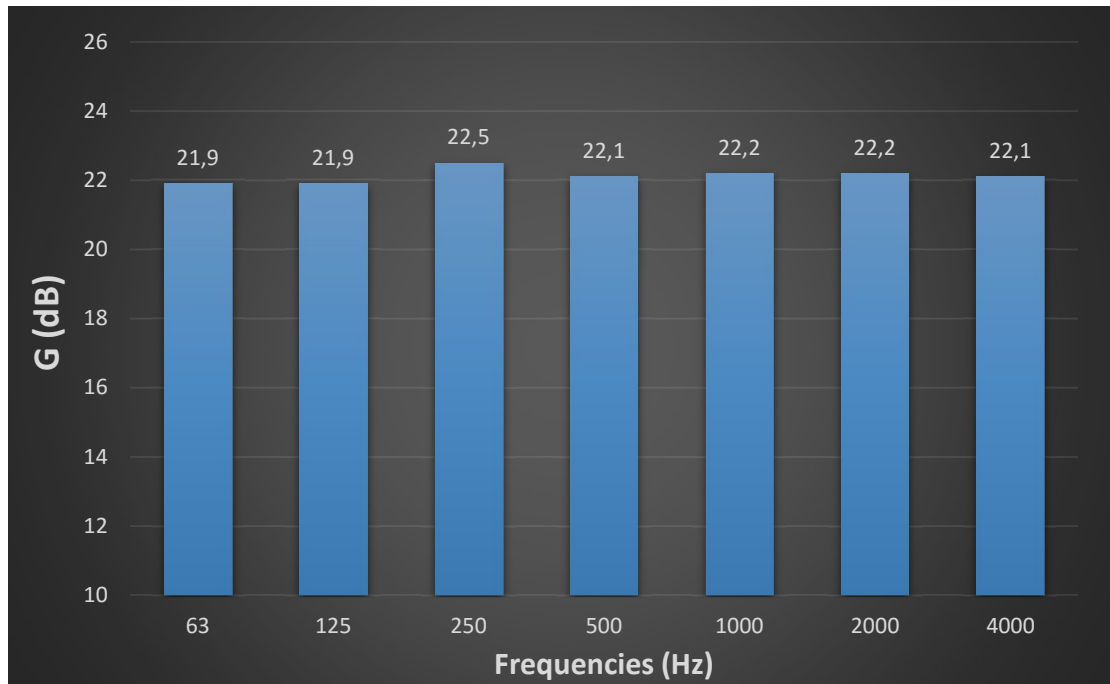
F.3.4. Κλίση 0°

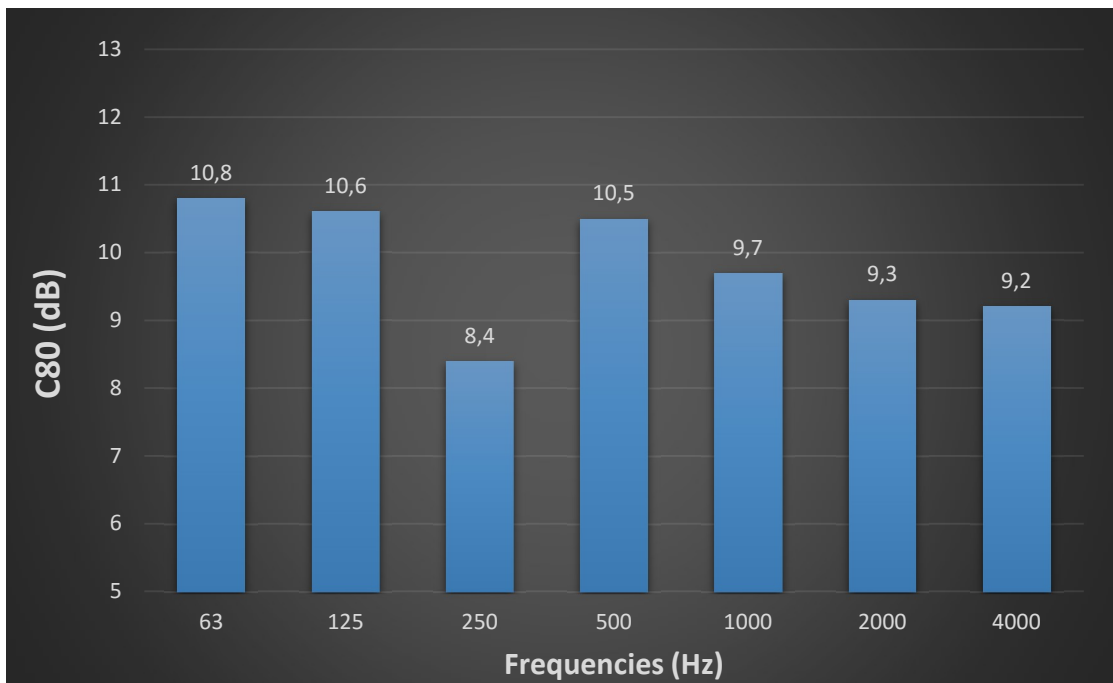
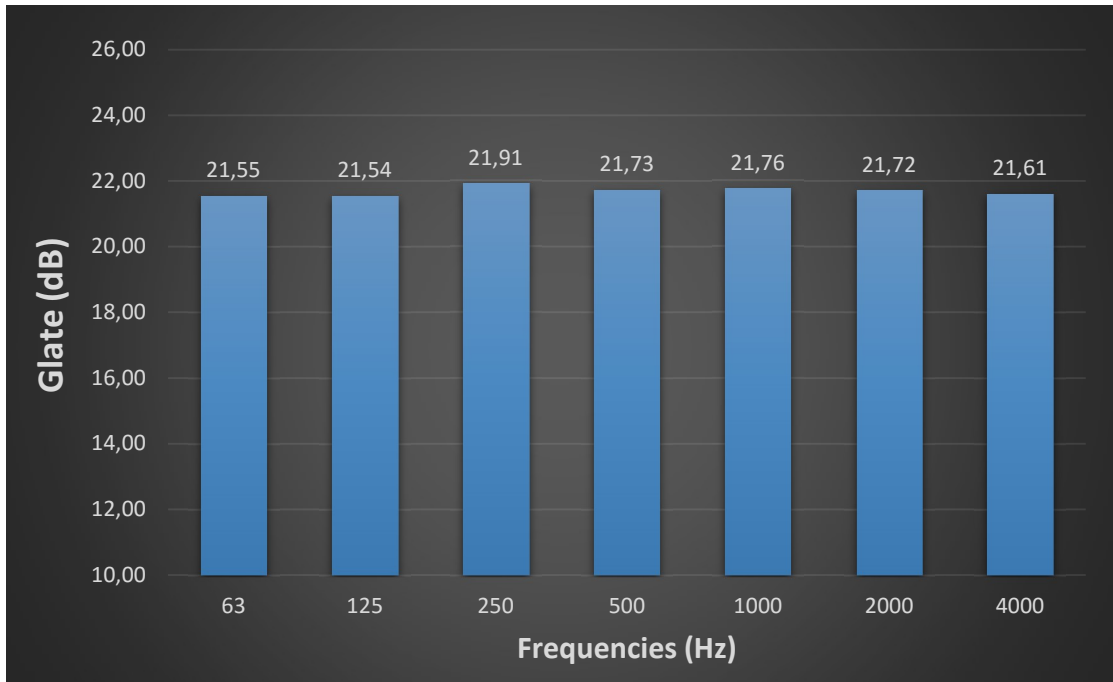


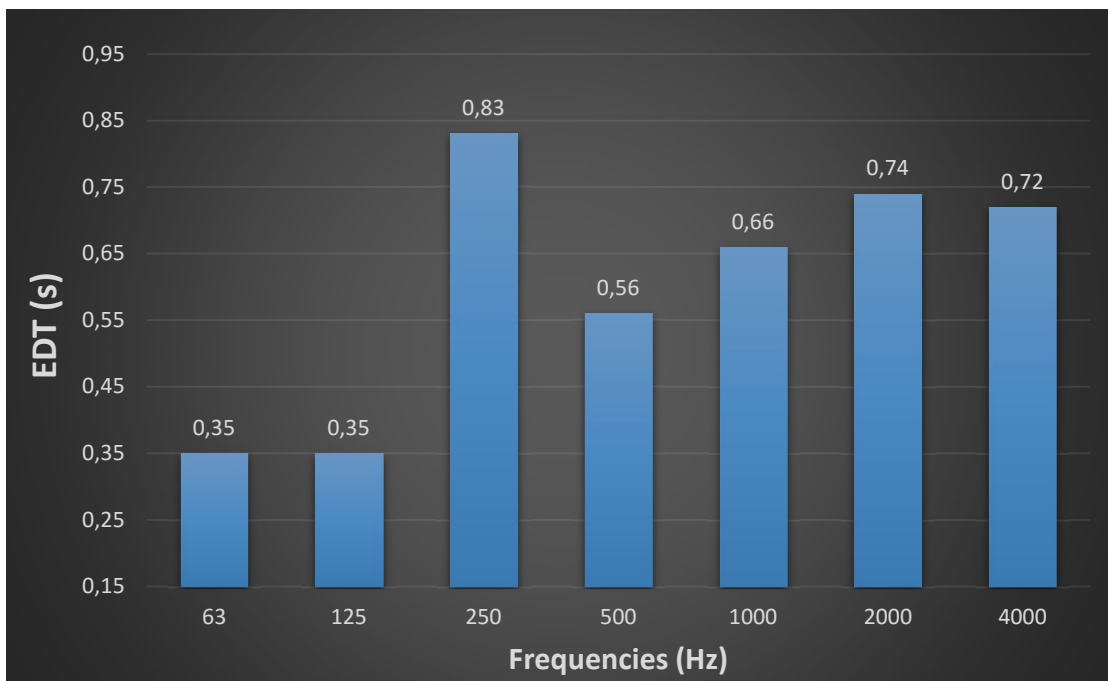
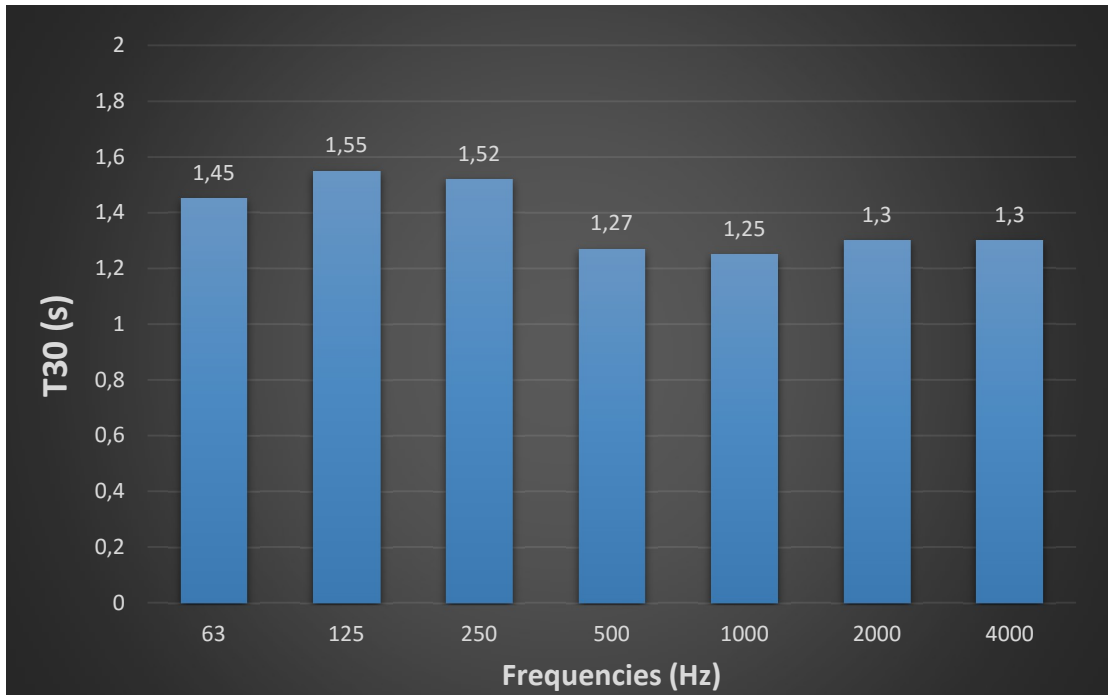




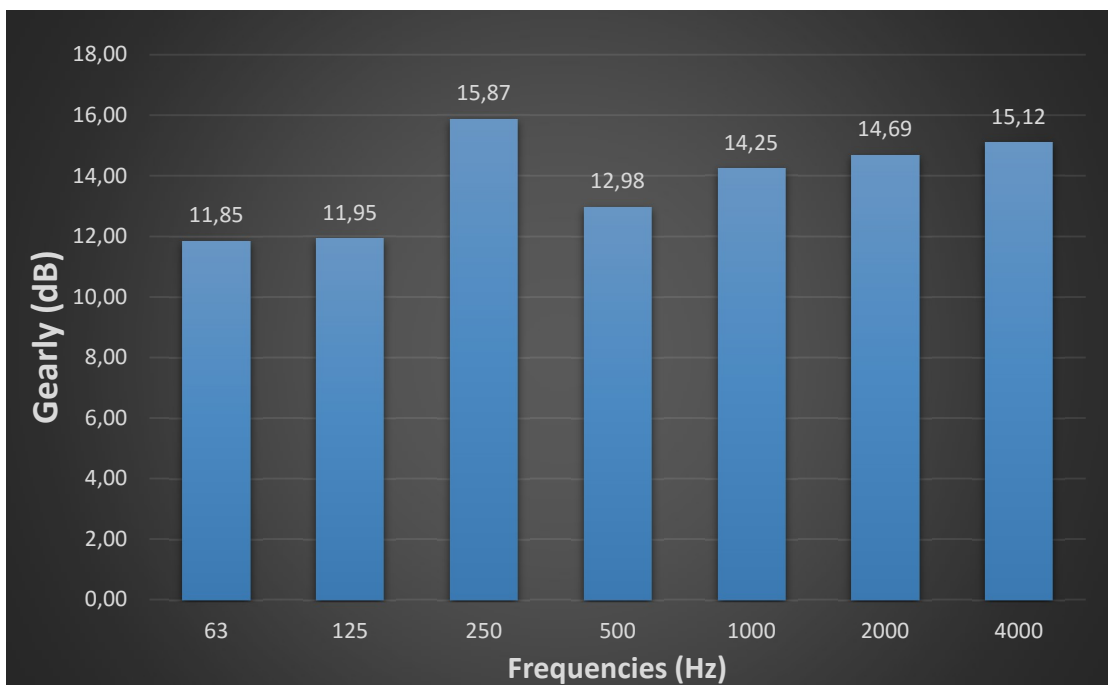
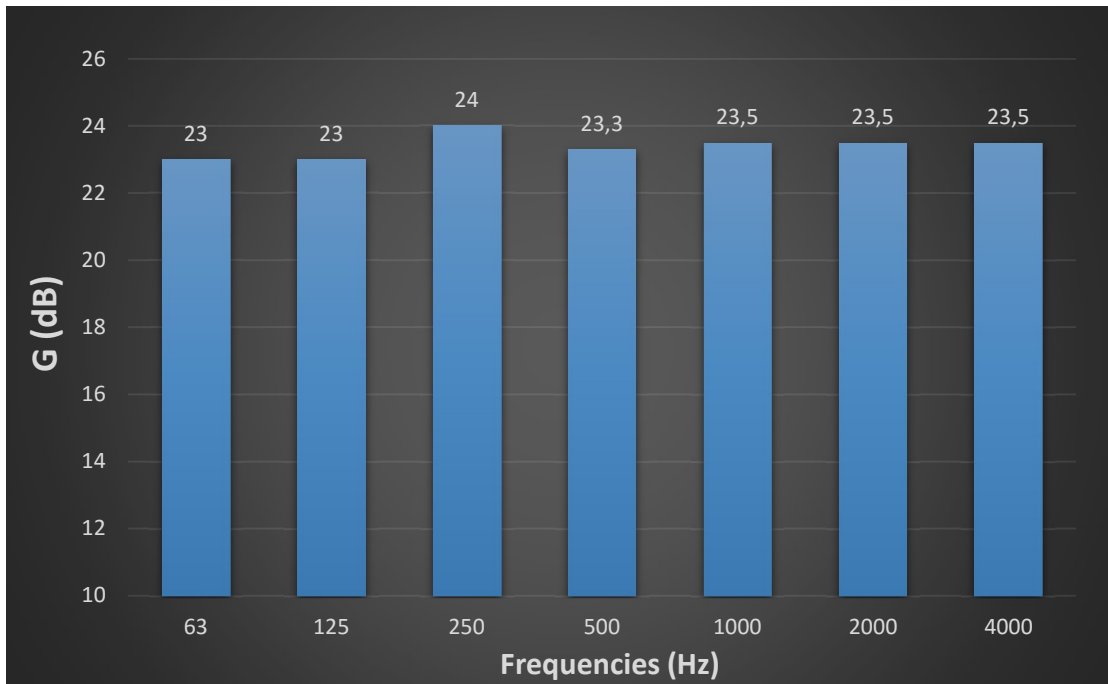
F.3.5. Κλίση -15°

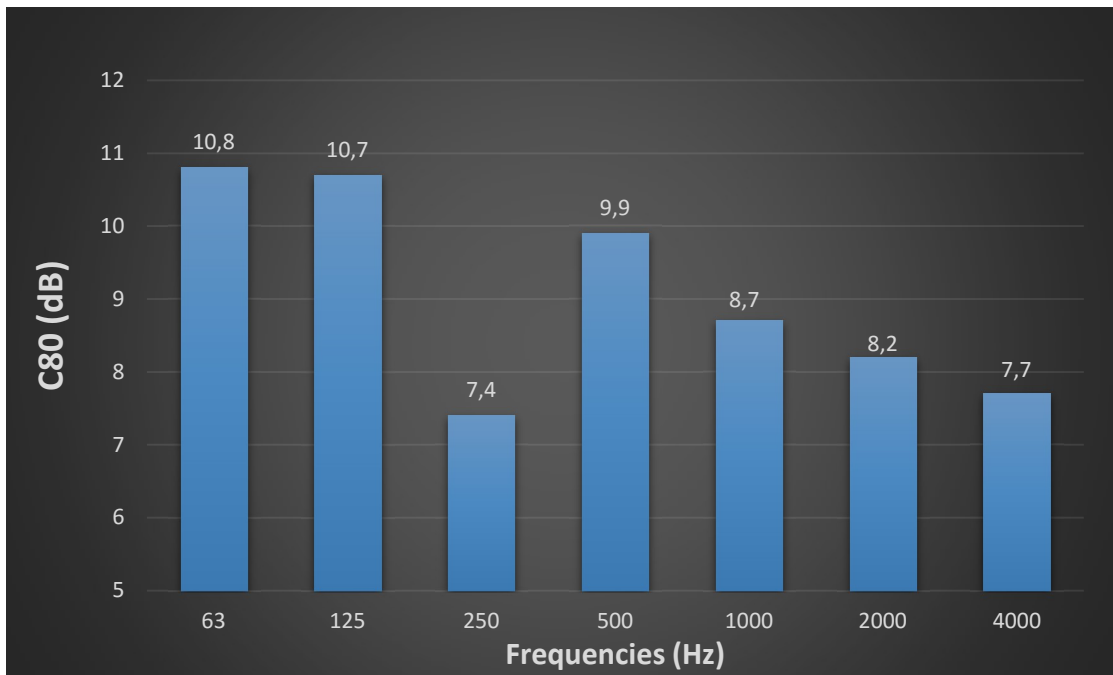
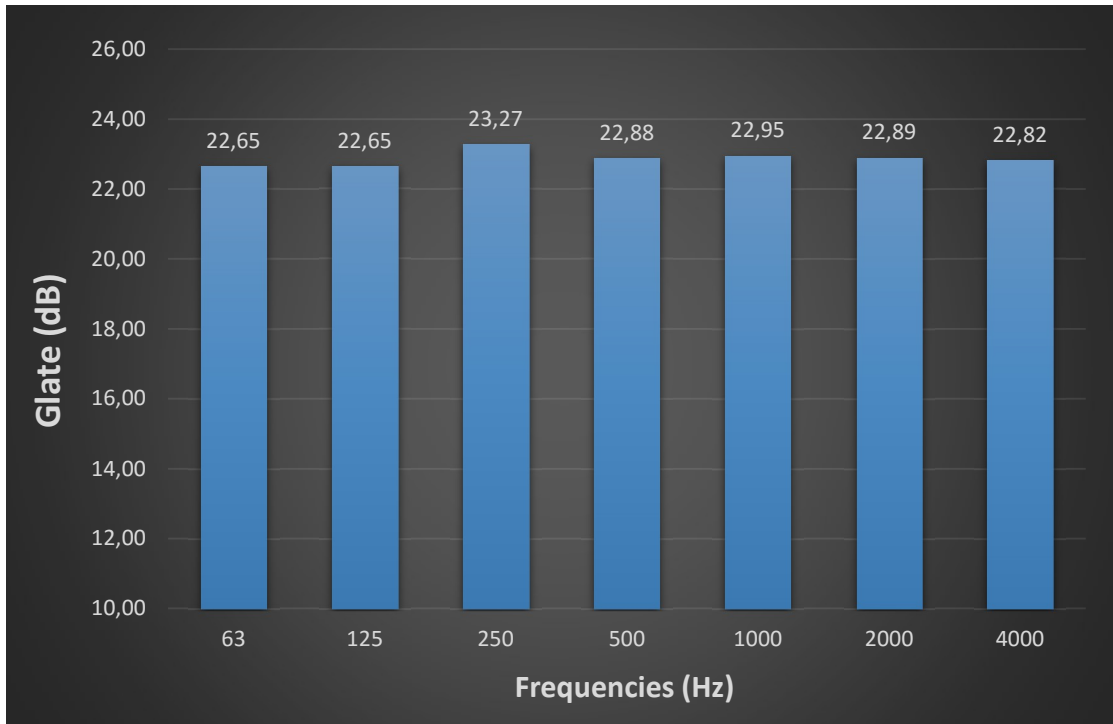


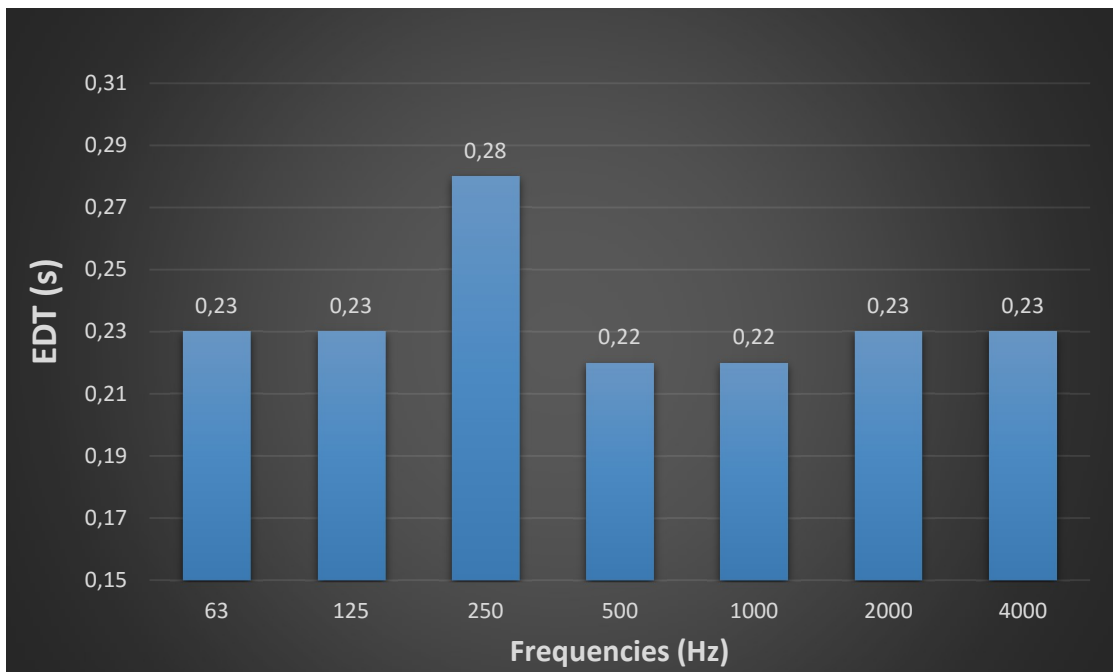
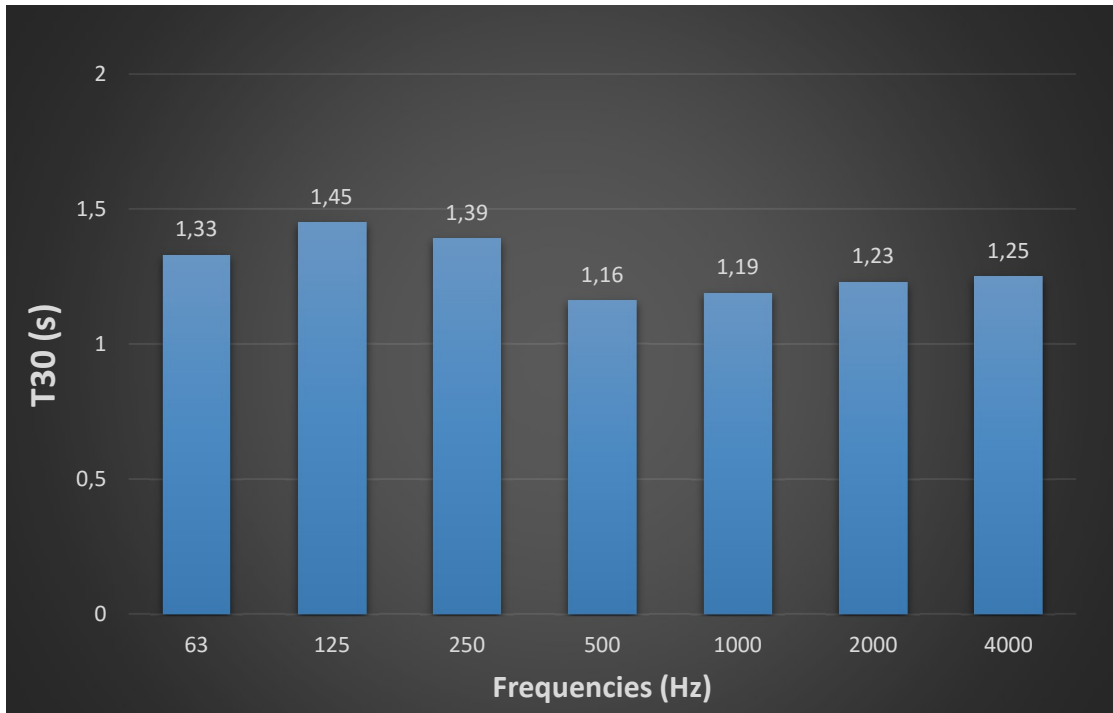




F.3.6. Κλίση -25°

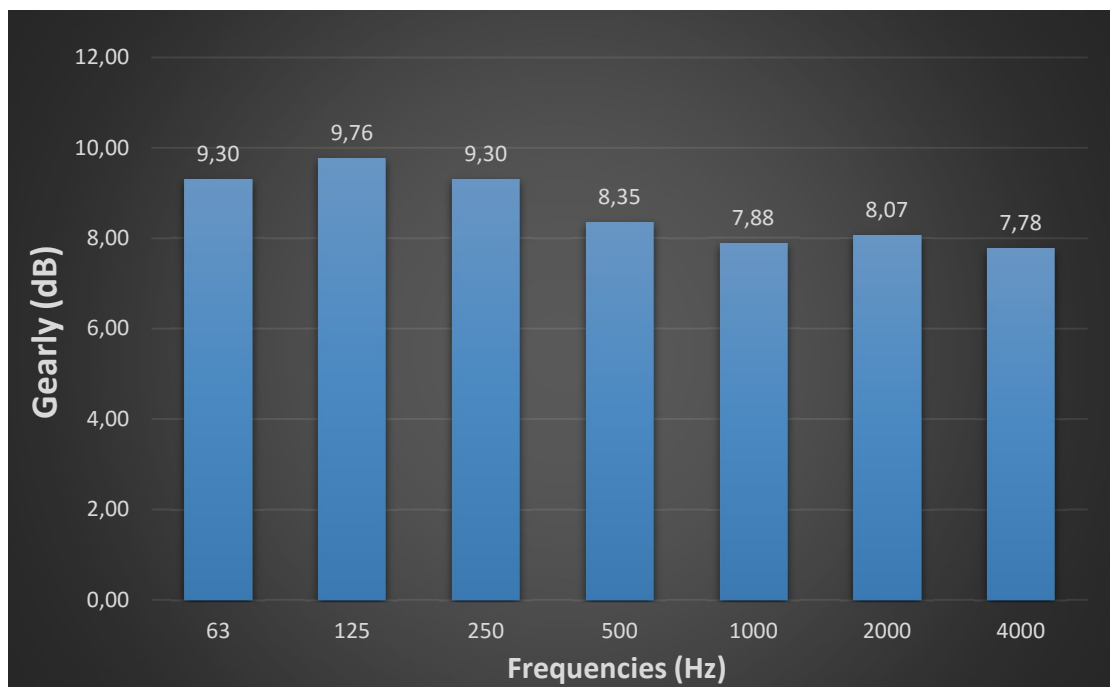
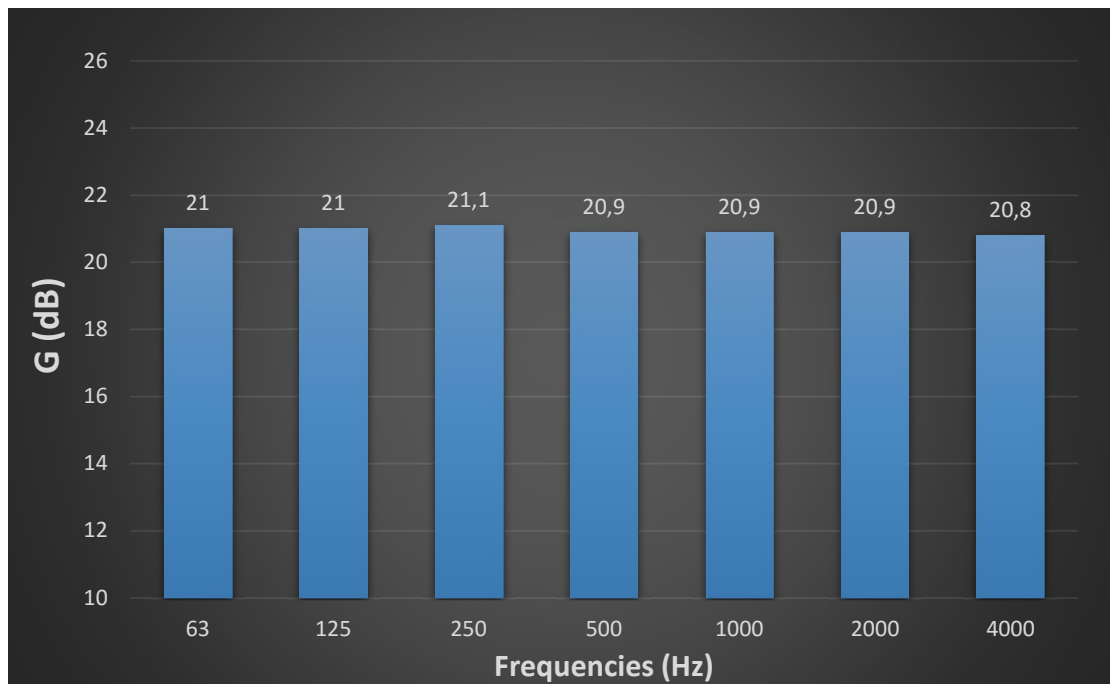


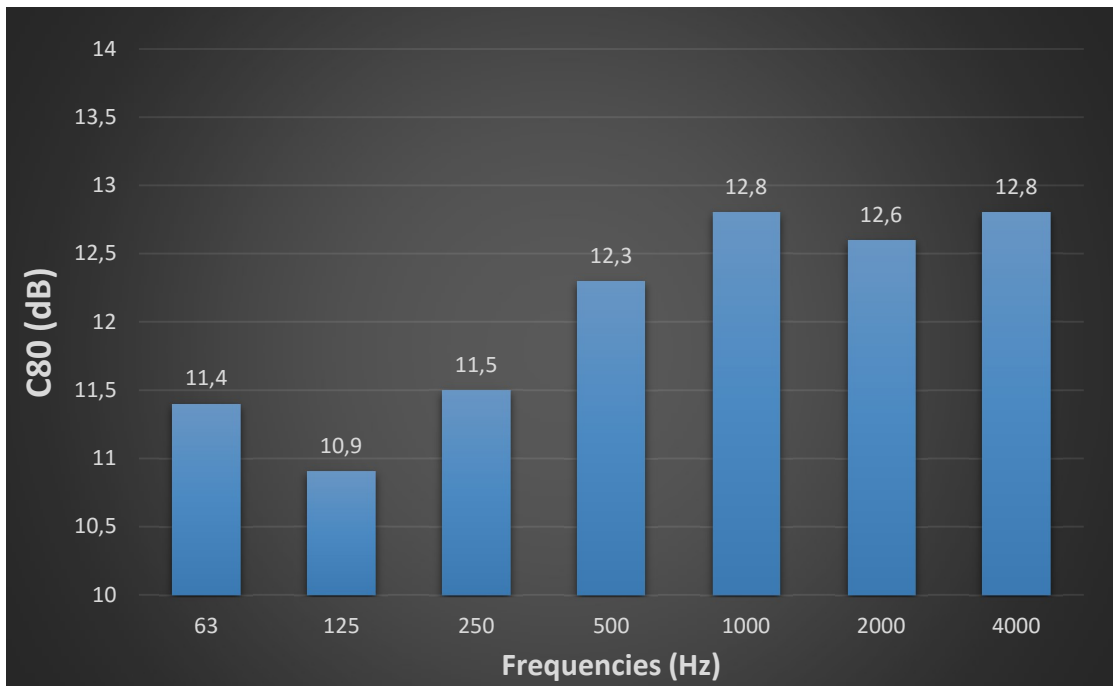
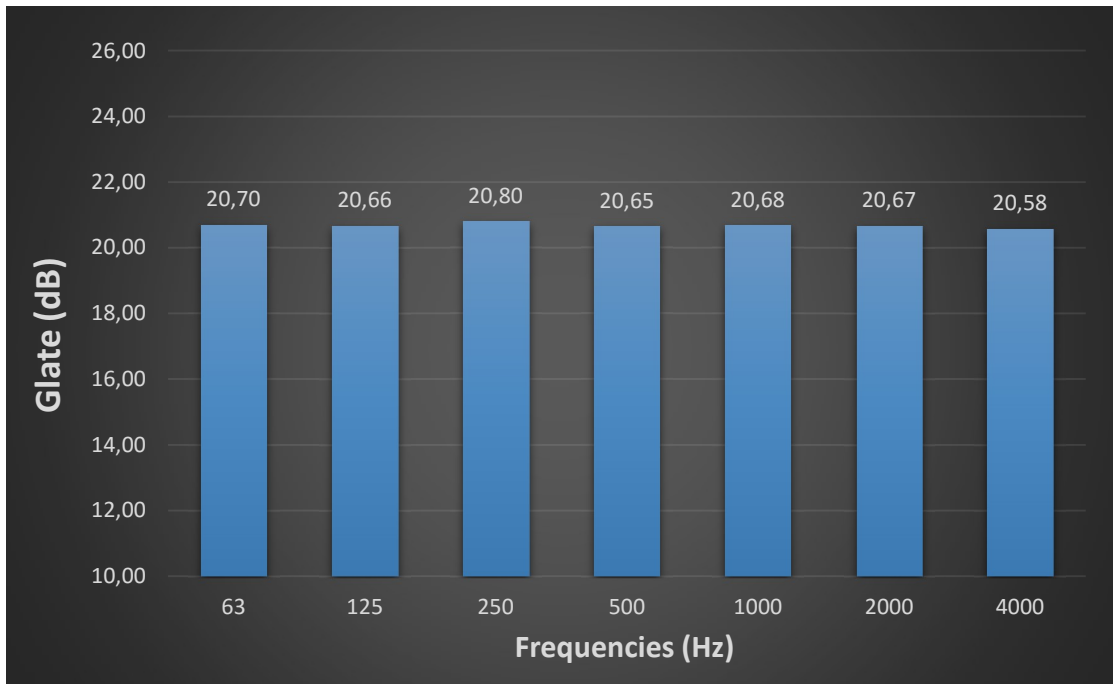


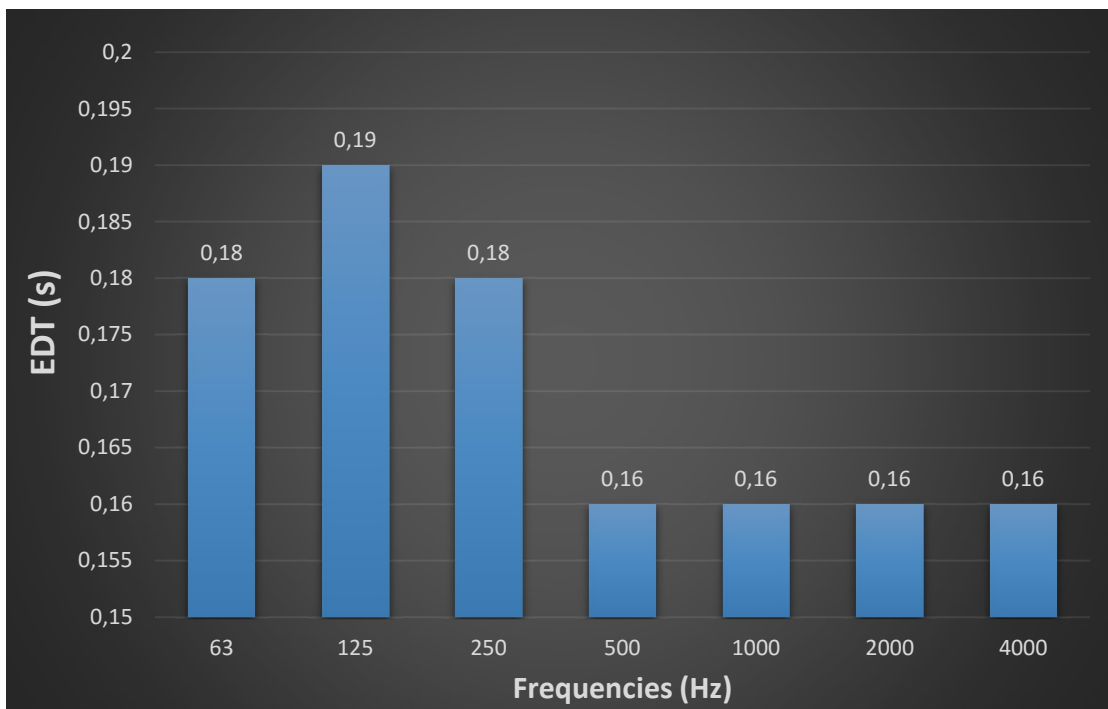
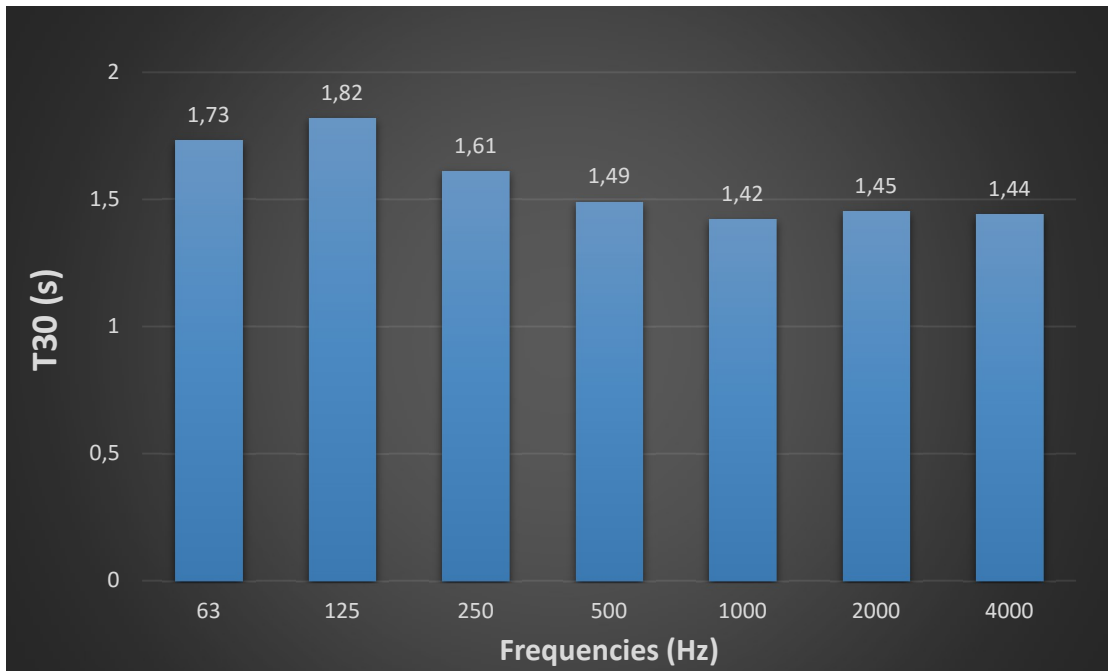


F.4. Κλίση ανακλαστήρα οροφής σκηνής

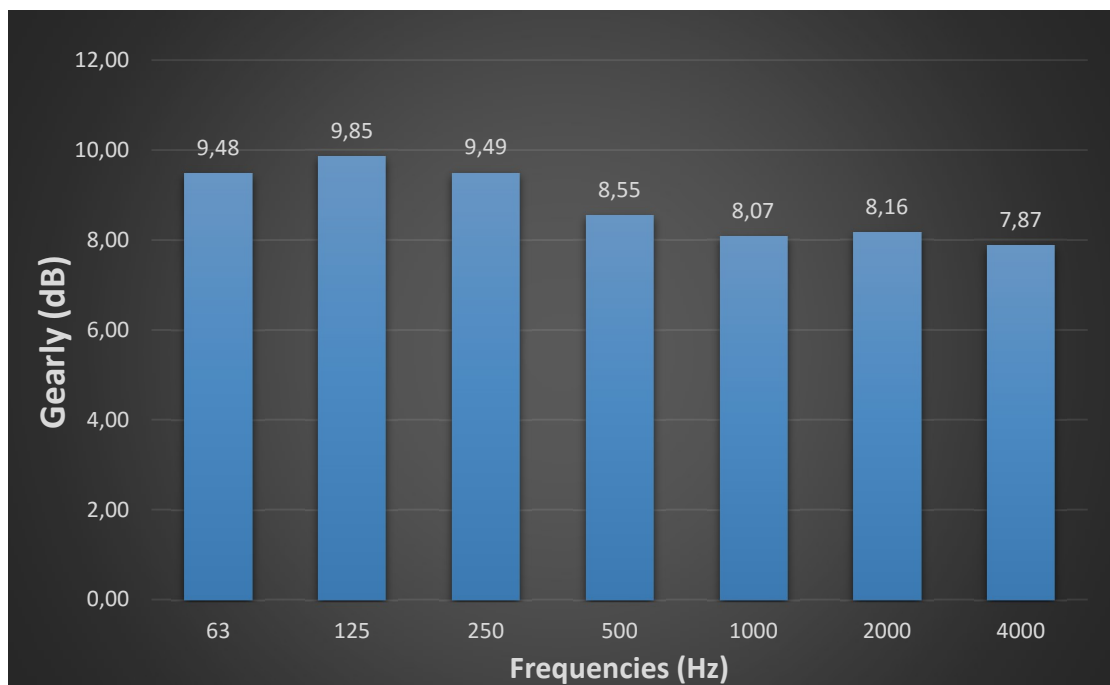
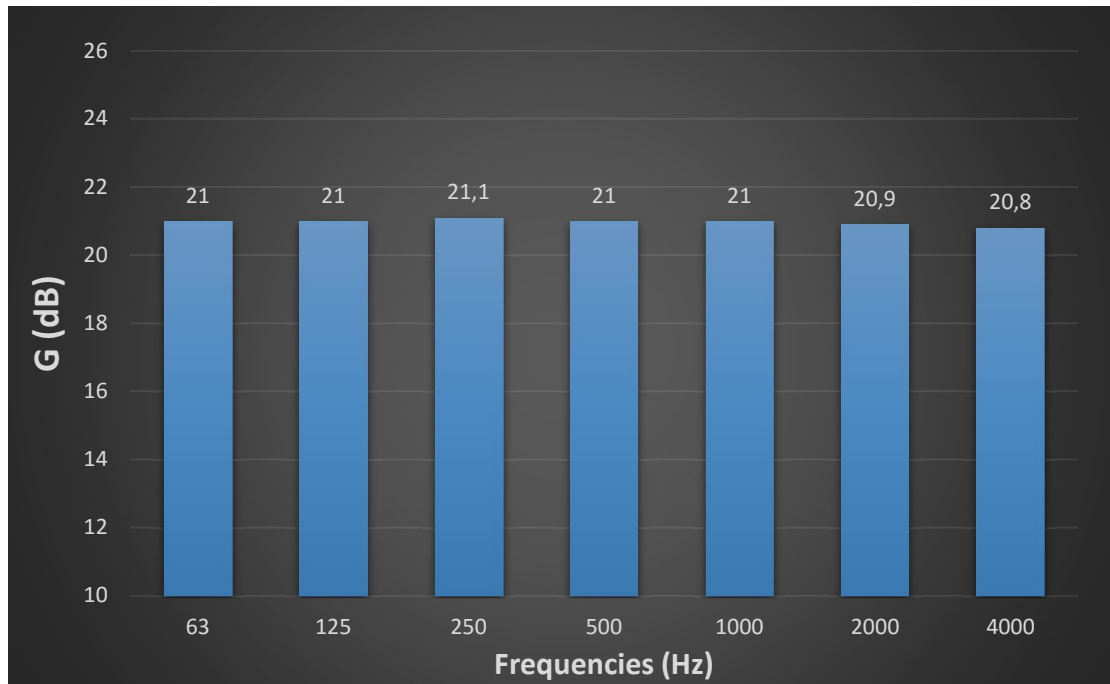
F.4.1. Κλίση 20°

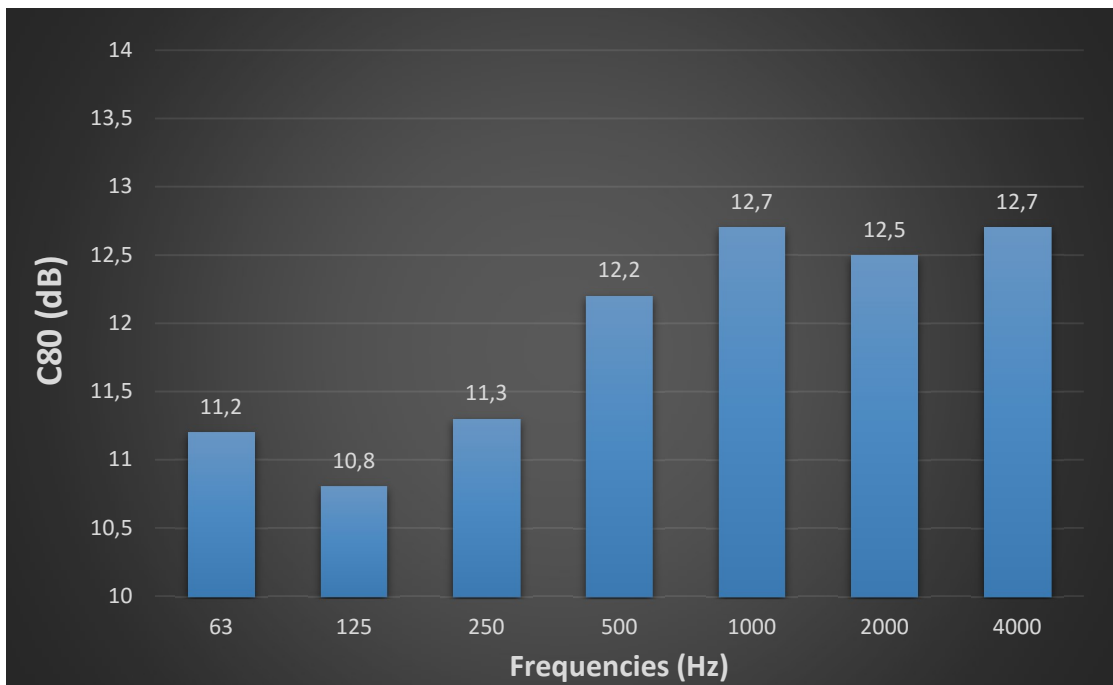
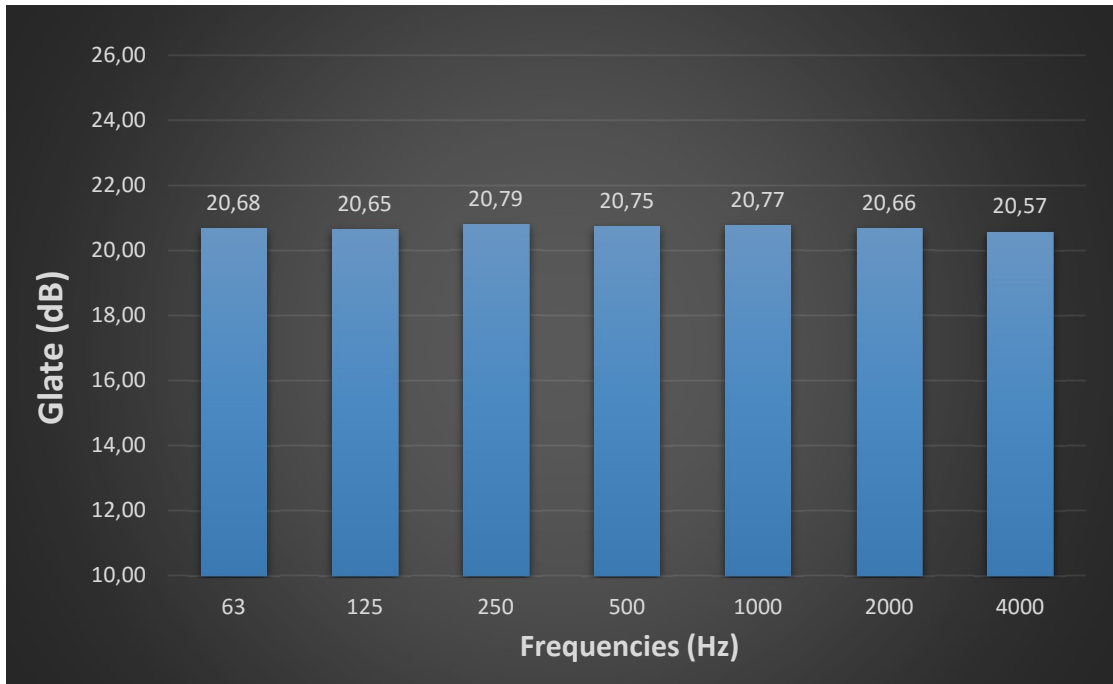


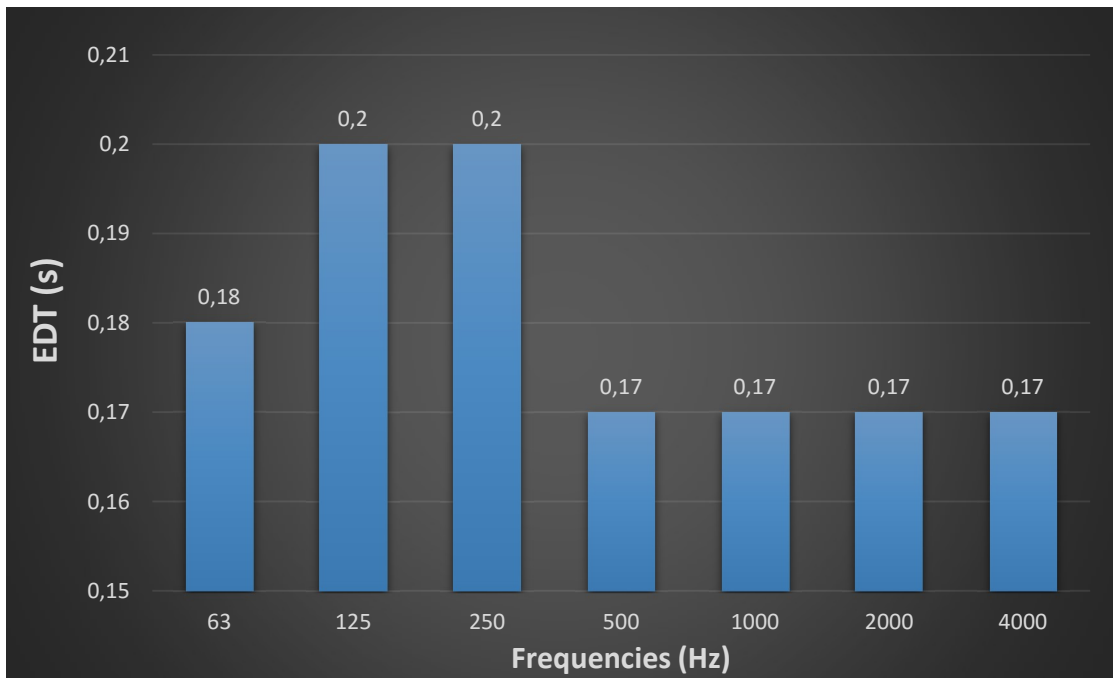
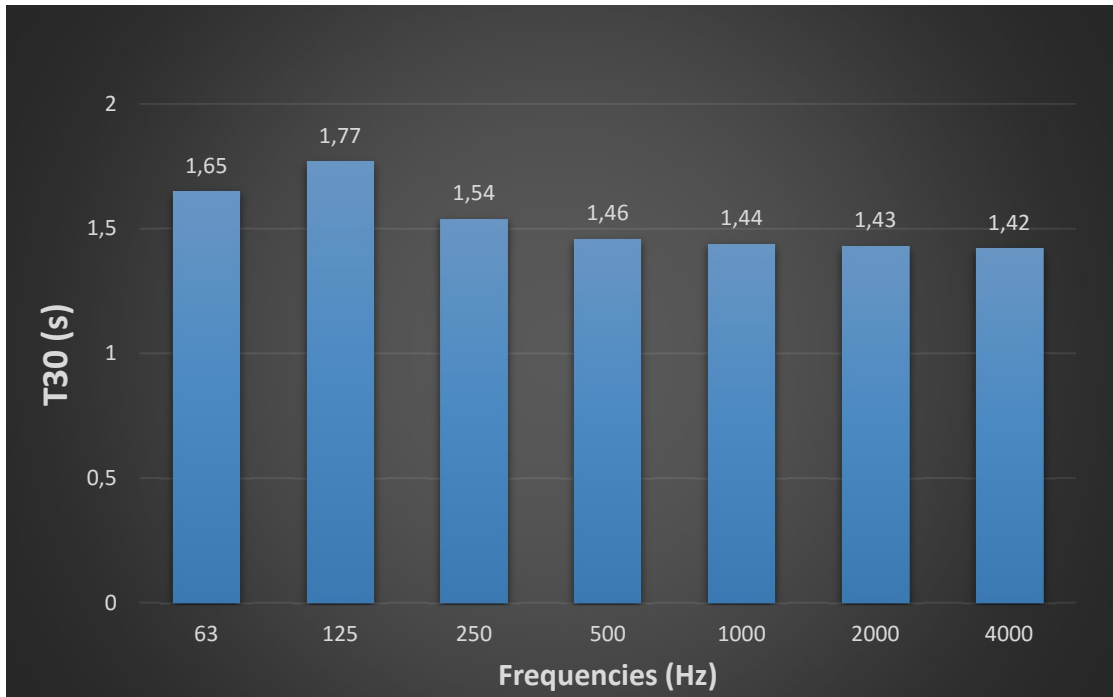




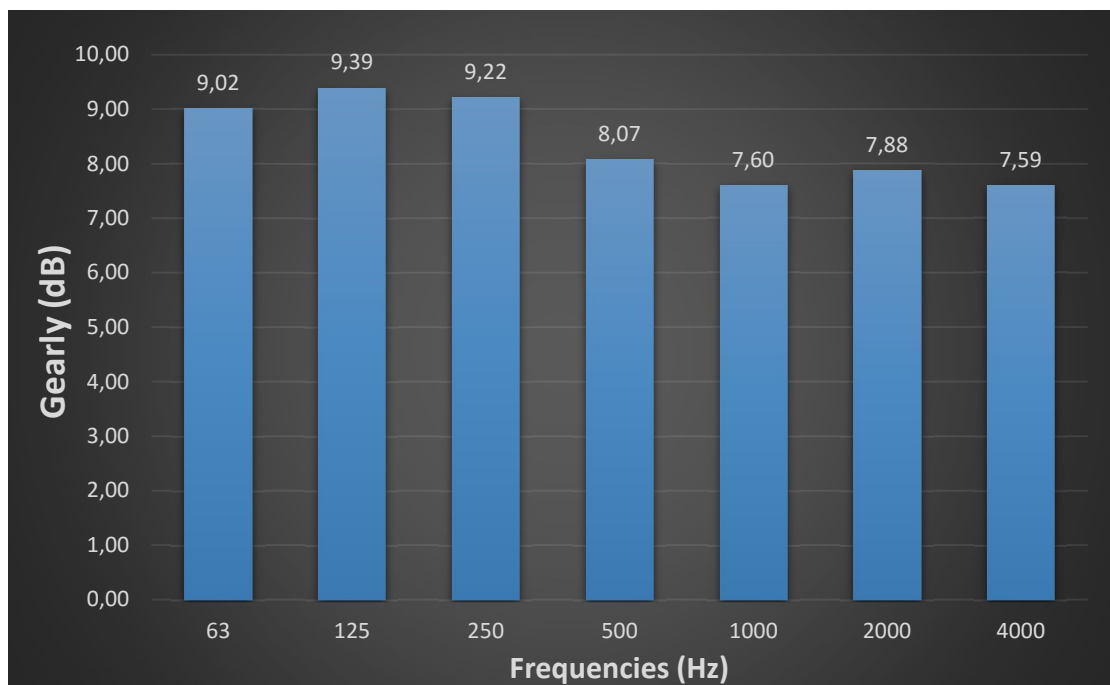
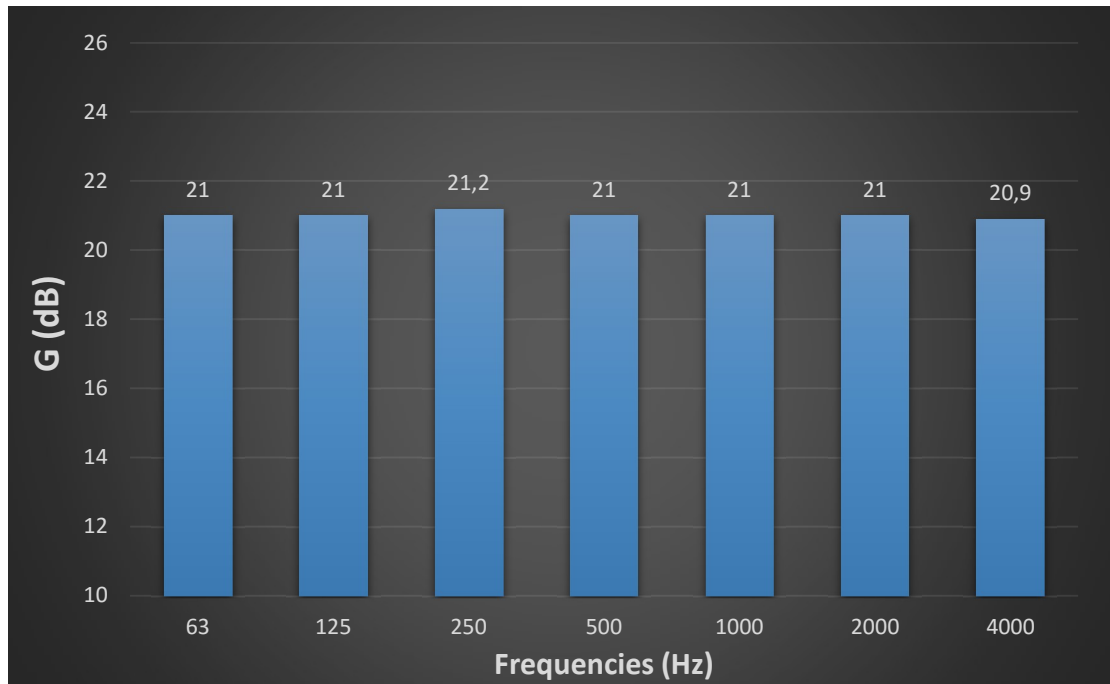
F.4.2. Κλίση 15°

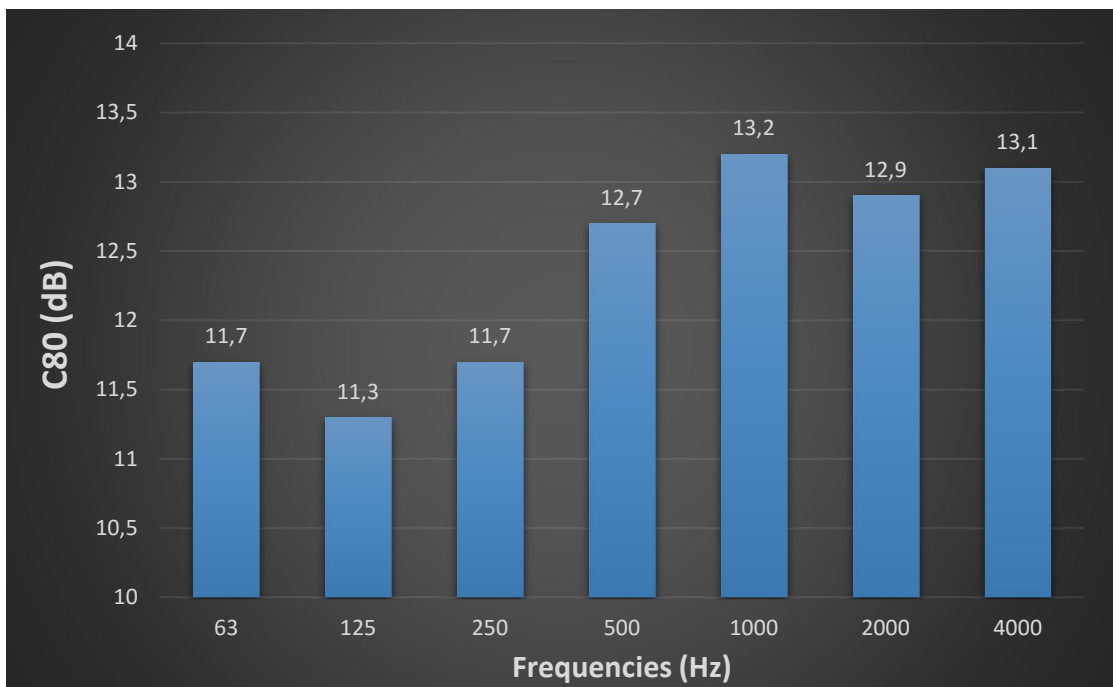
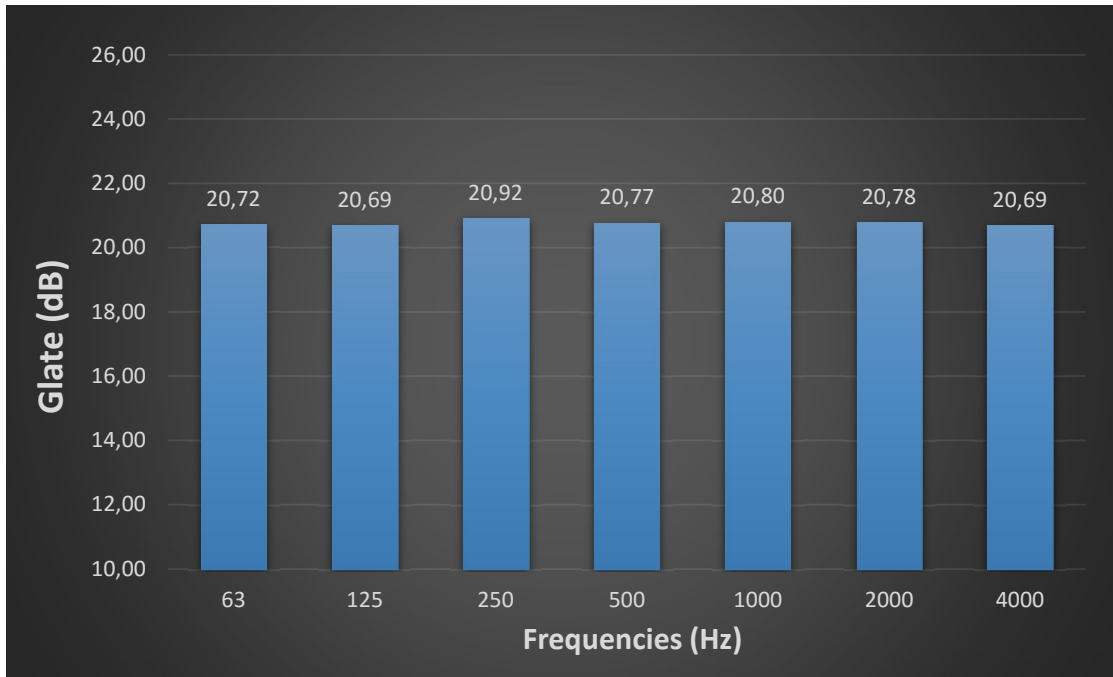


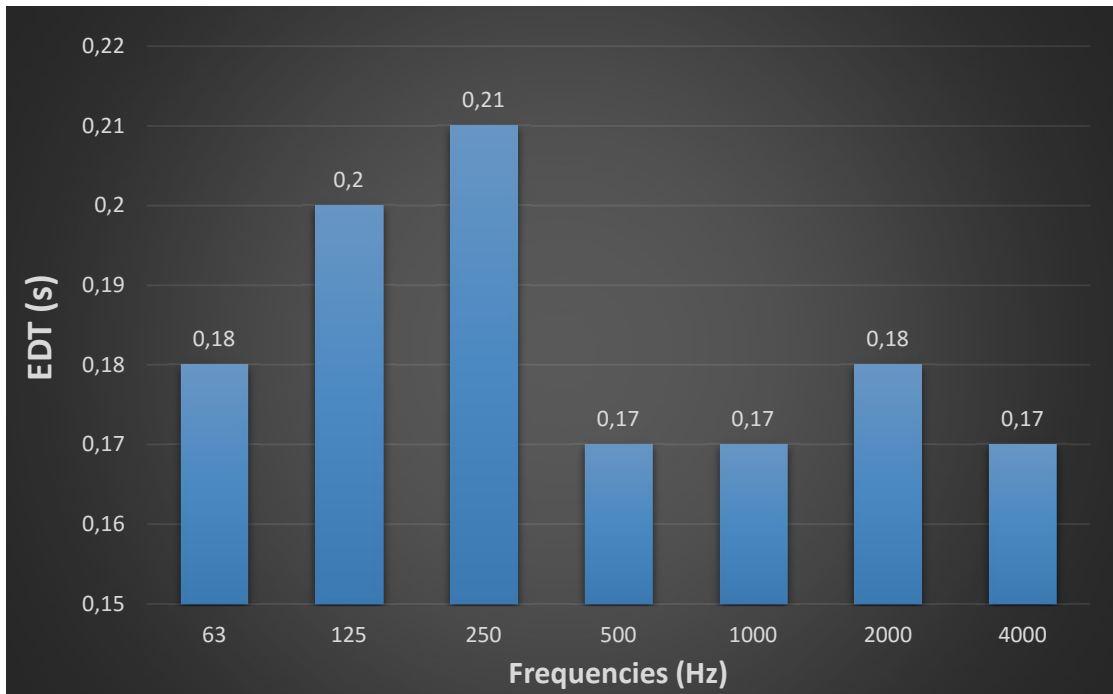
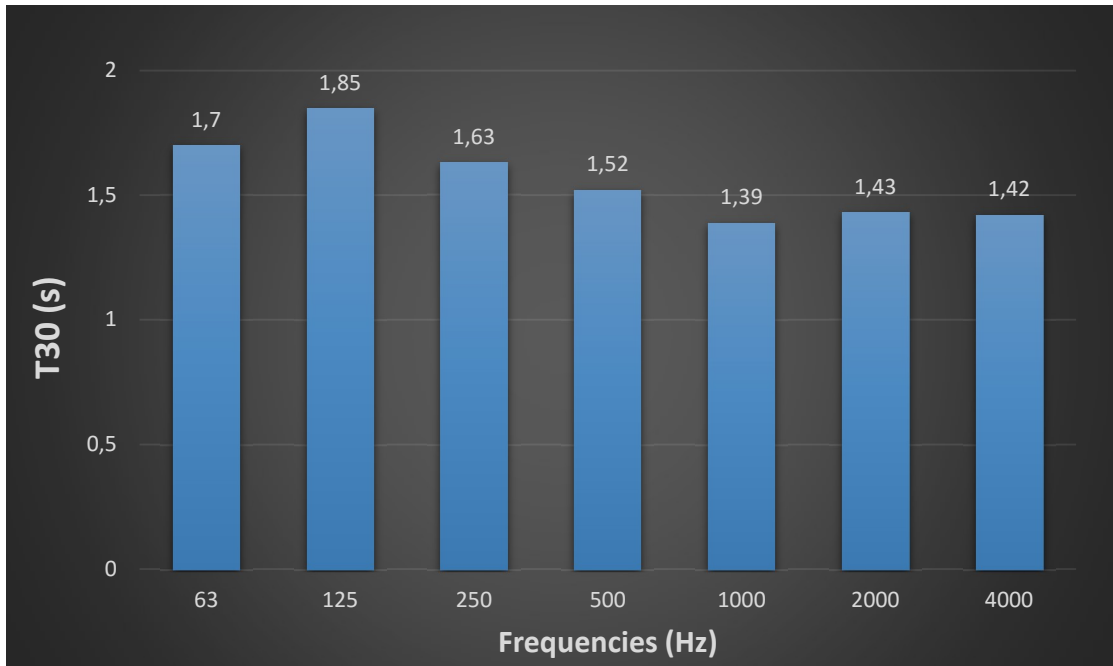




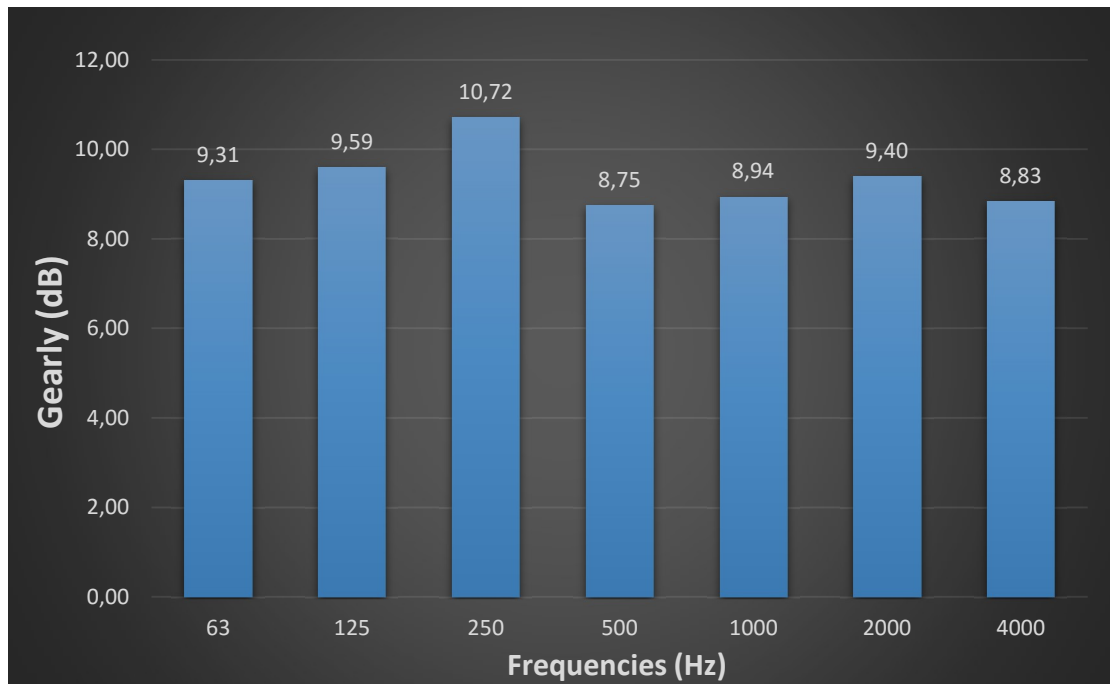
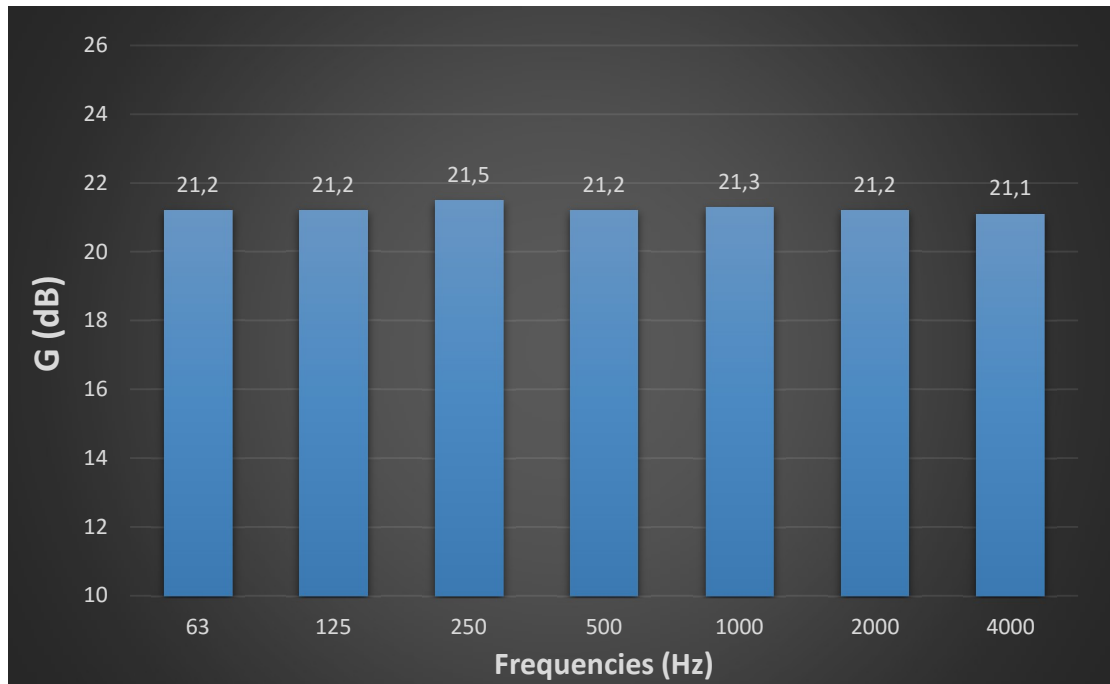
F.4.3. Κλίση 10°

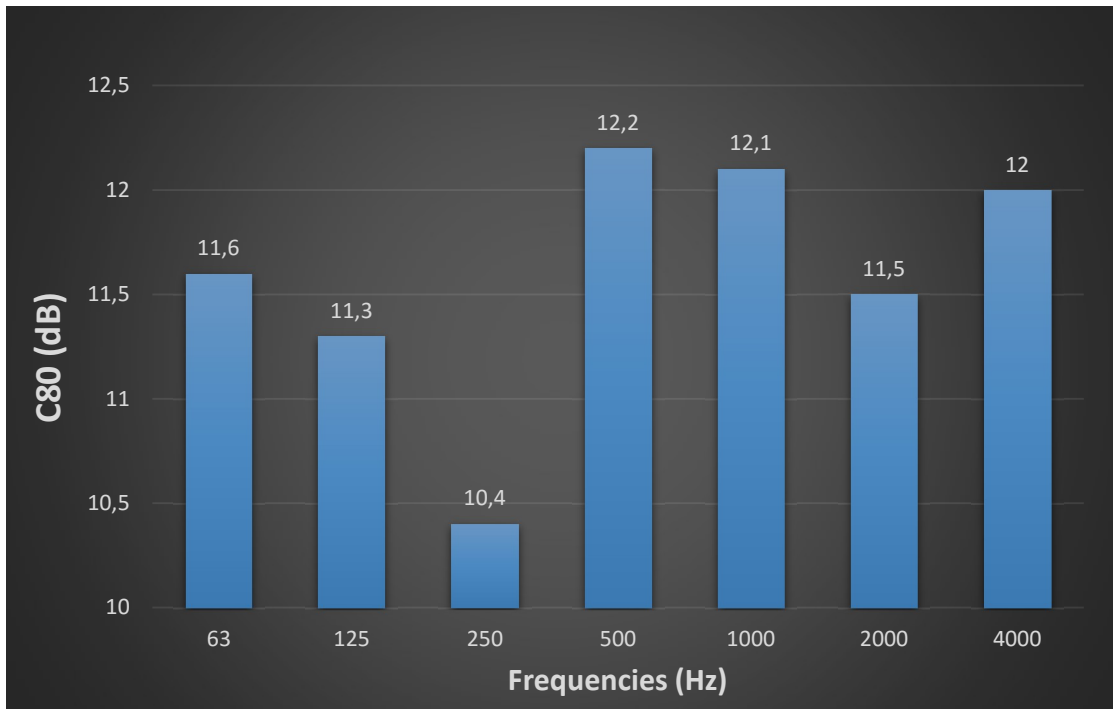
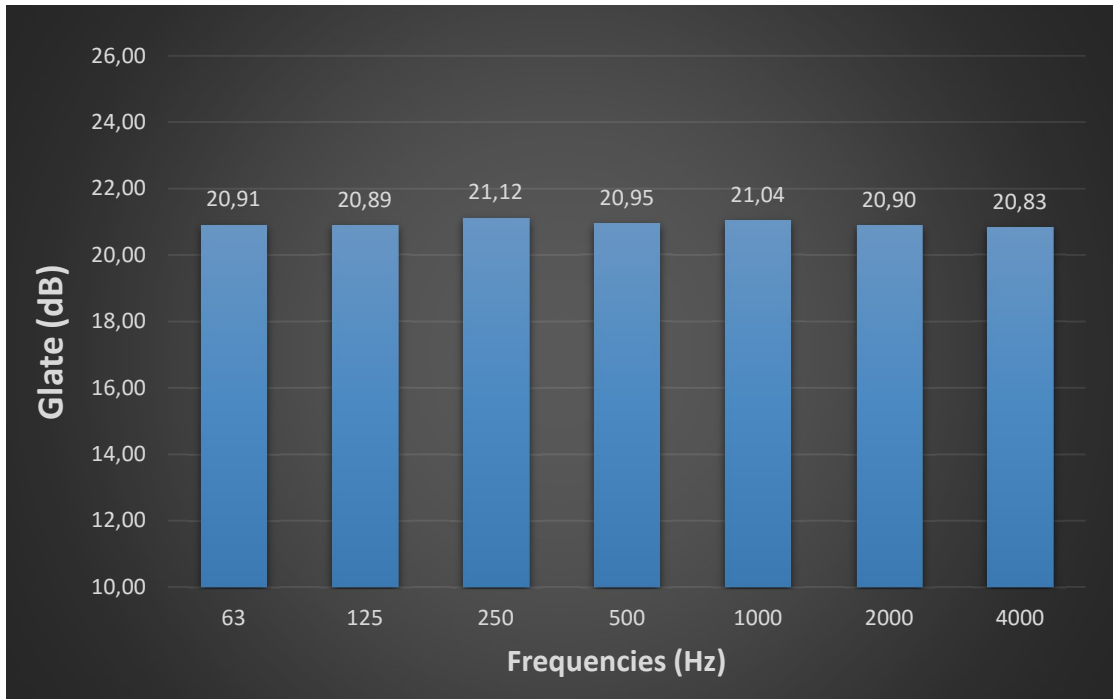


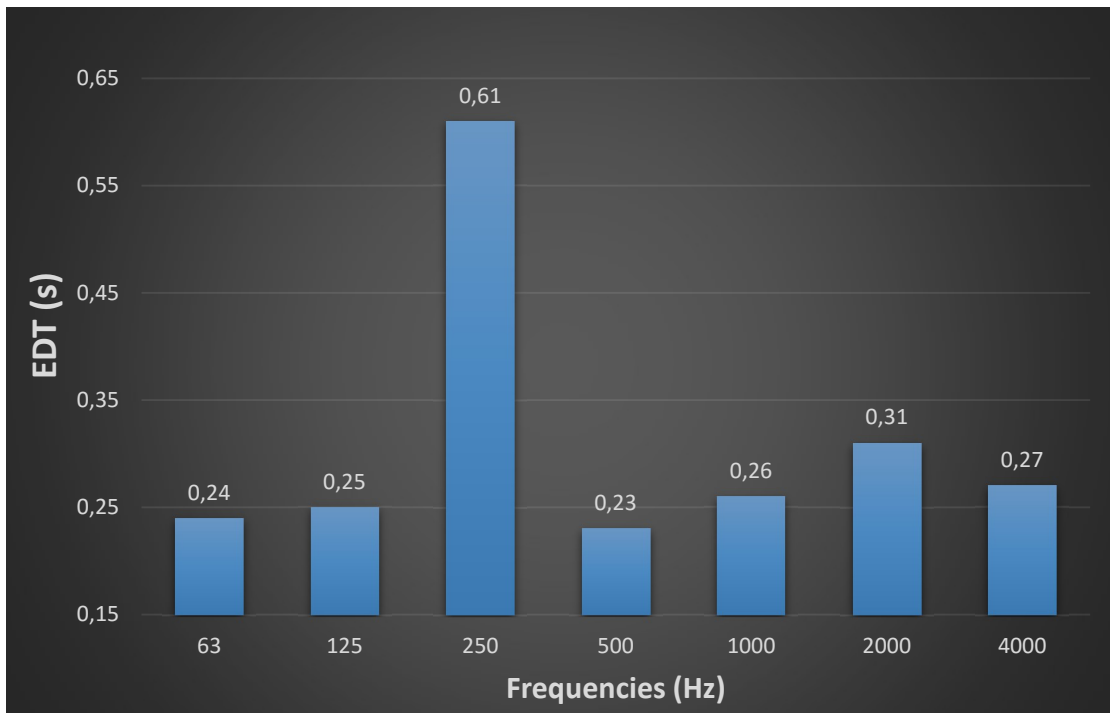
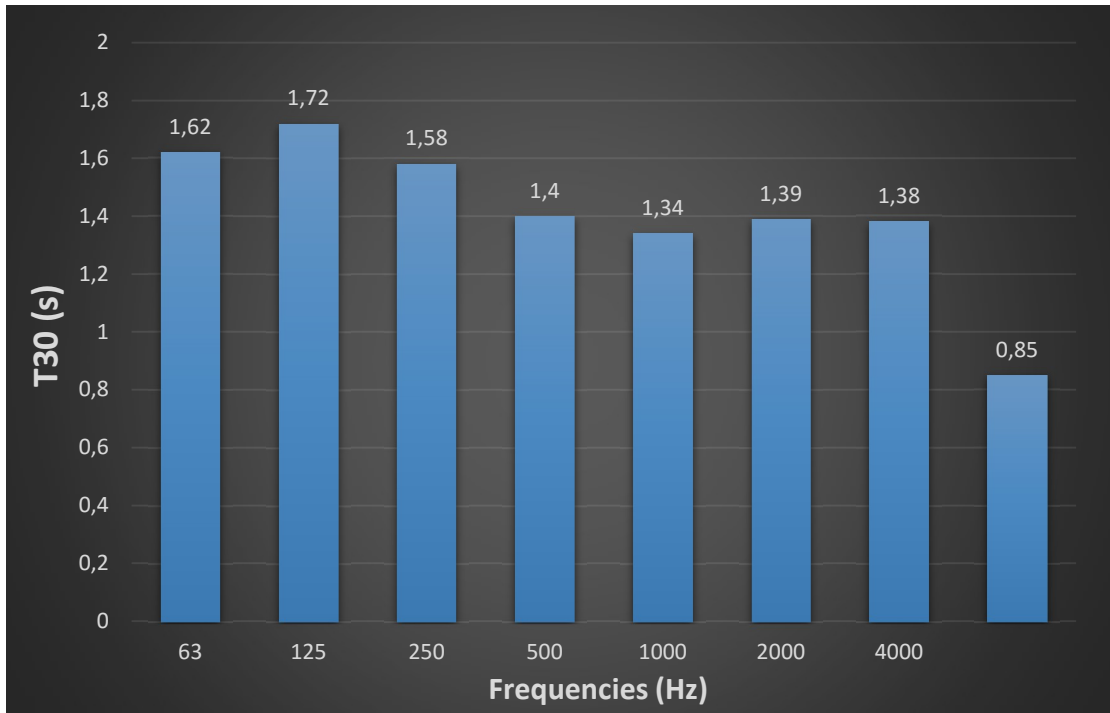




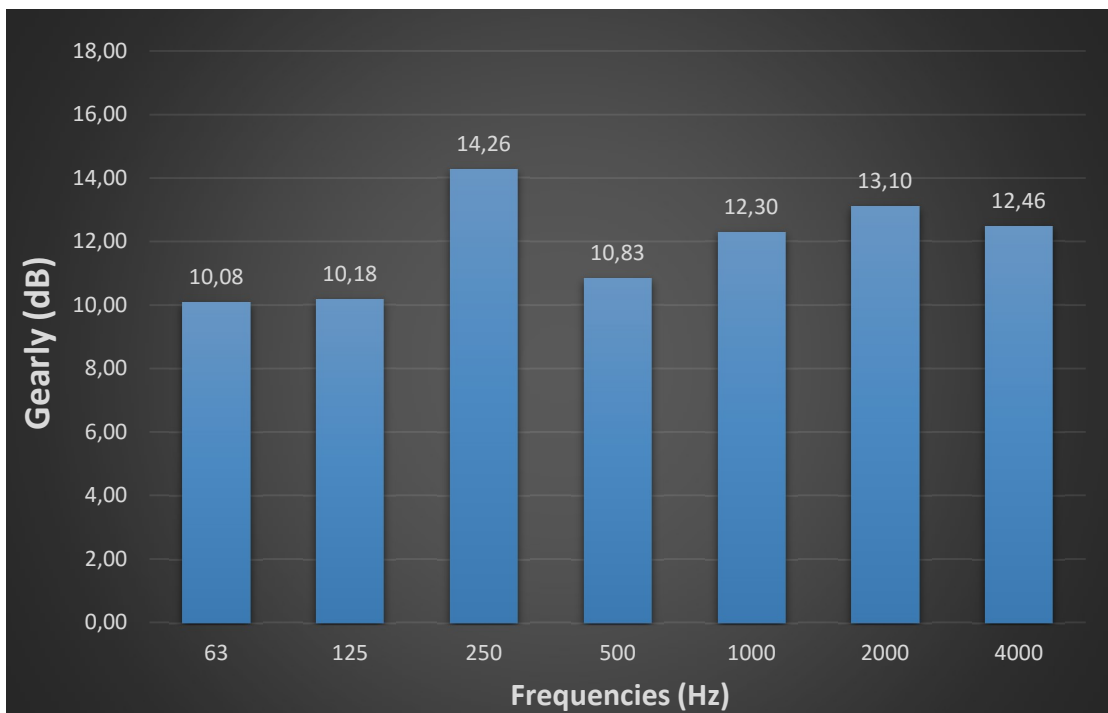
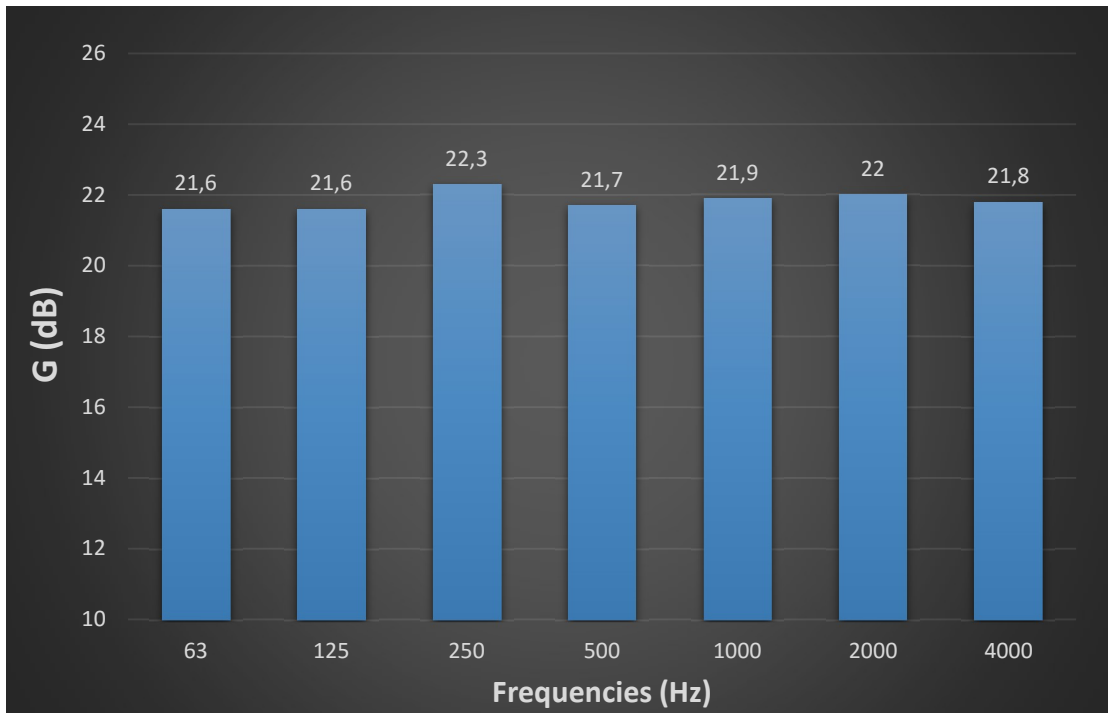
F.4.4. Κλίση 0°

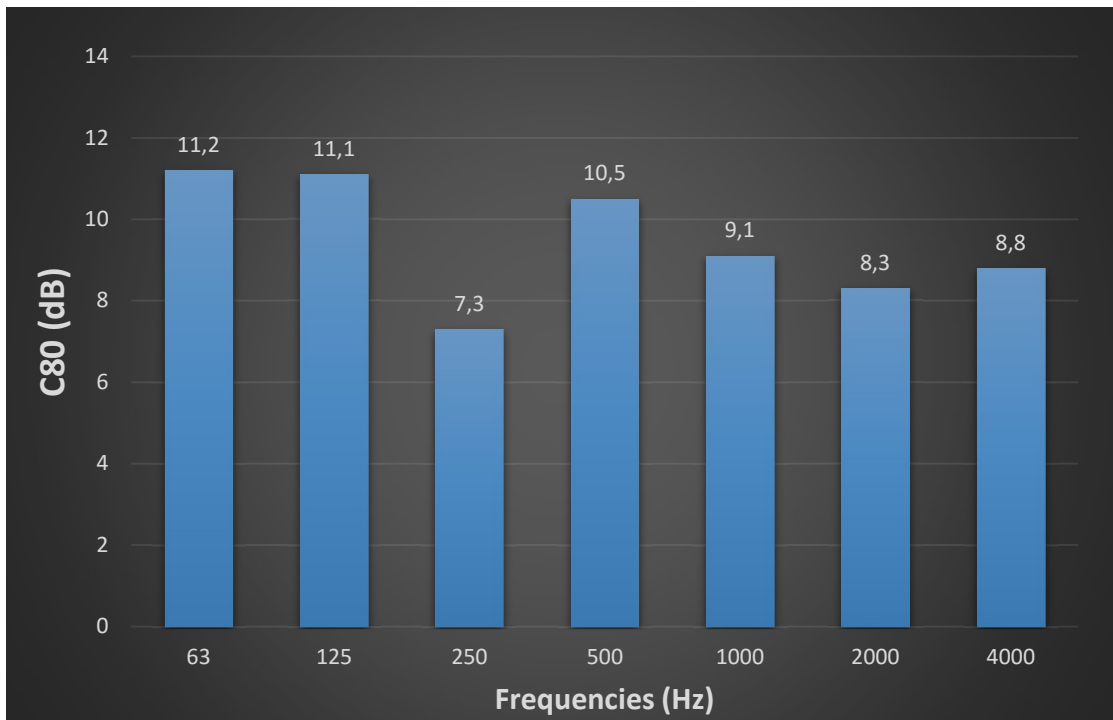
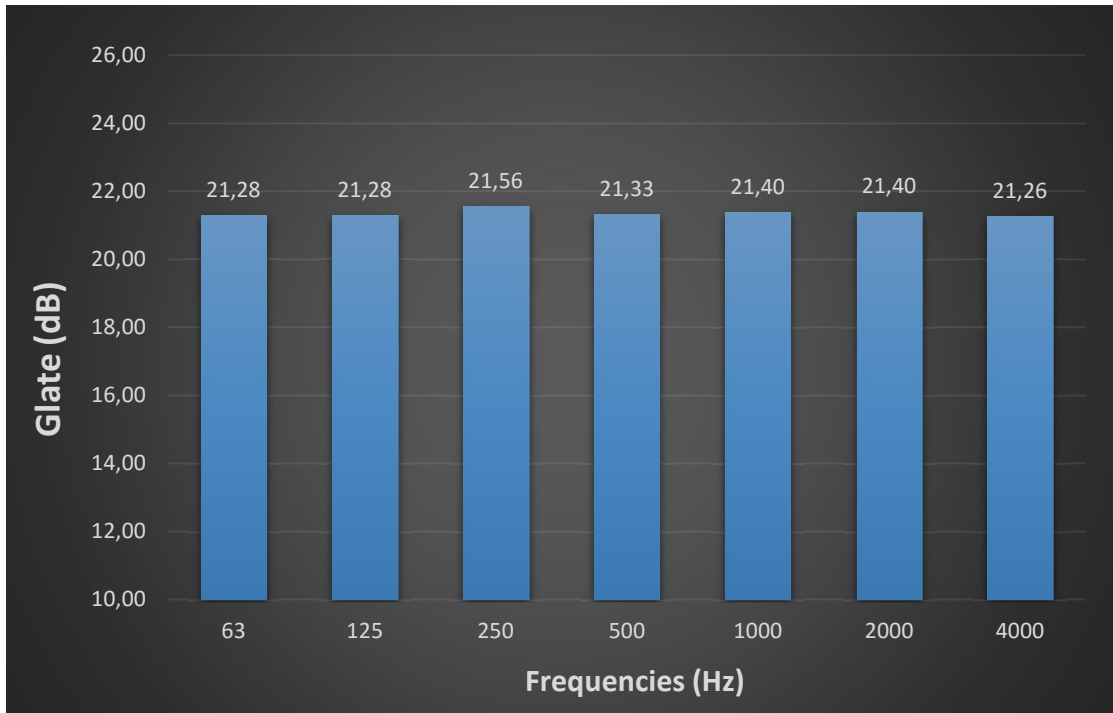


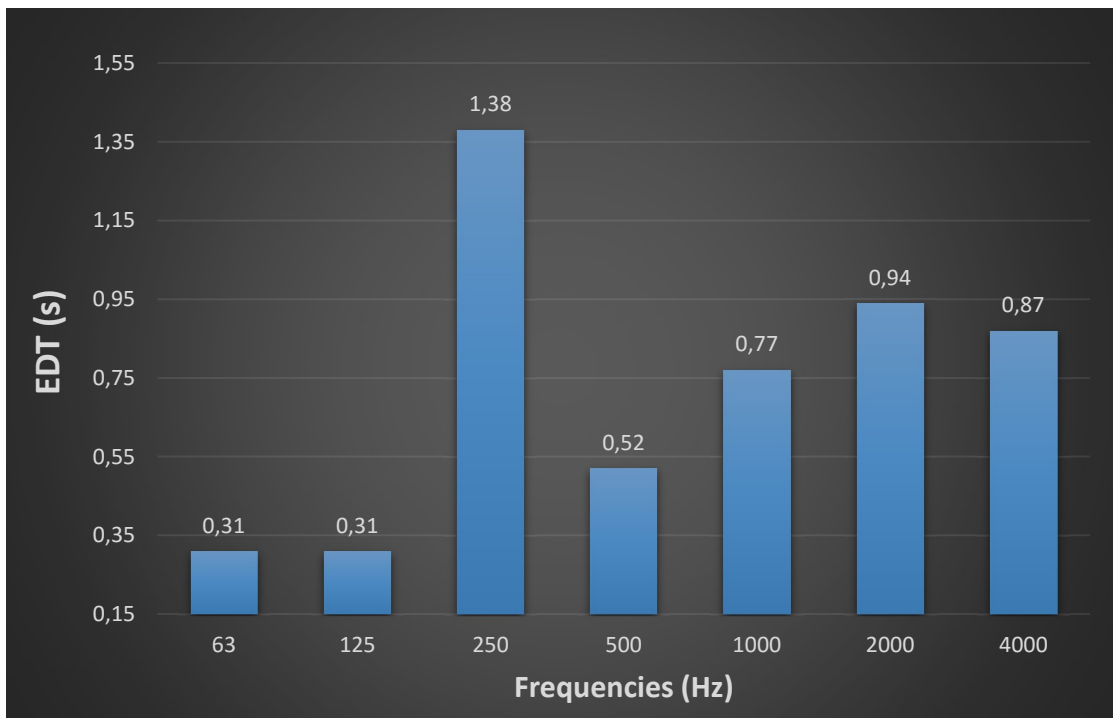
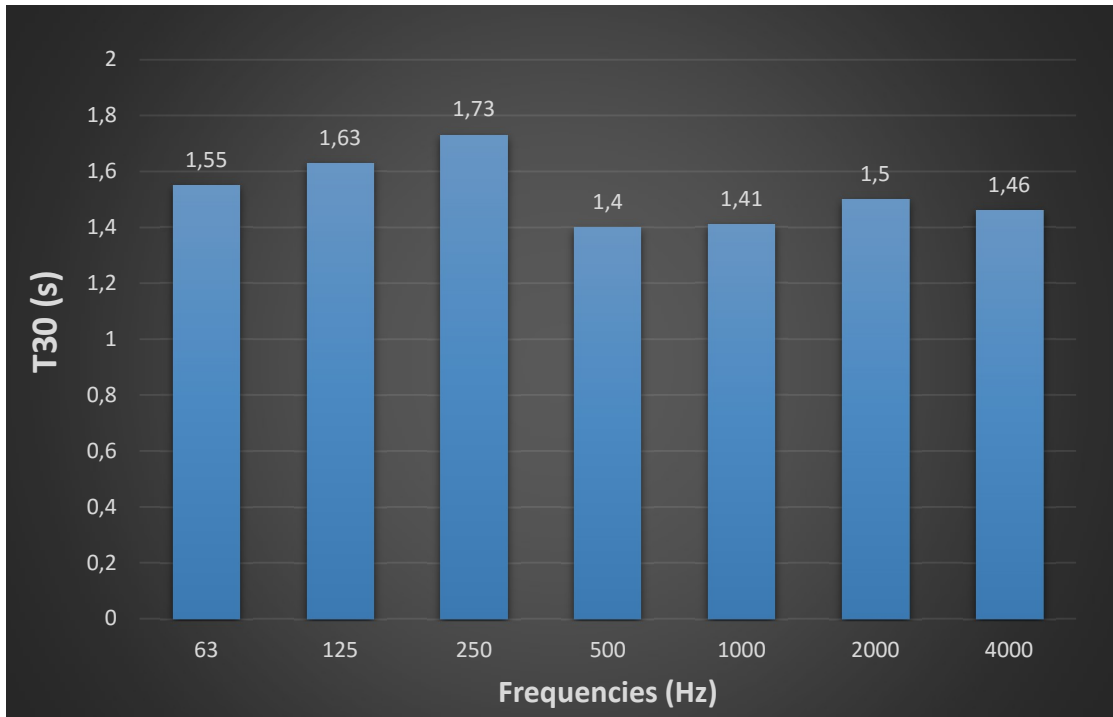




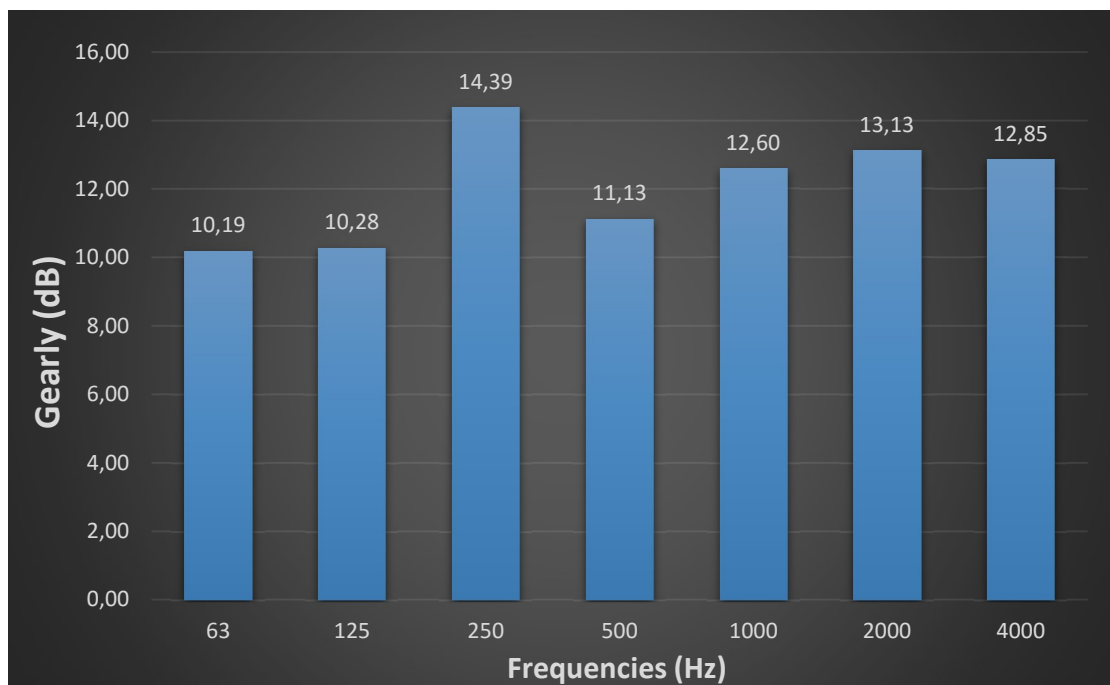
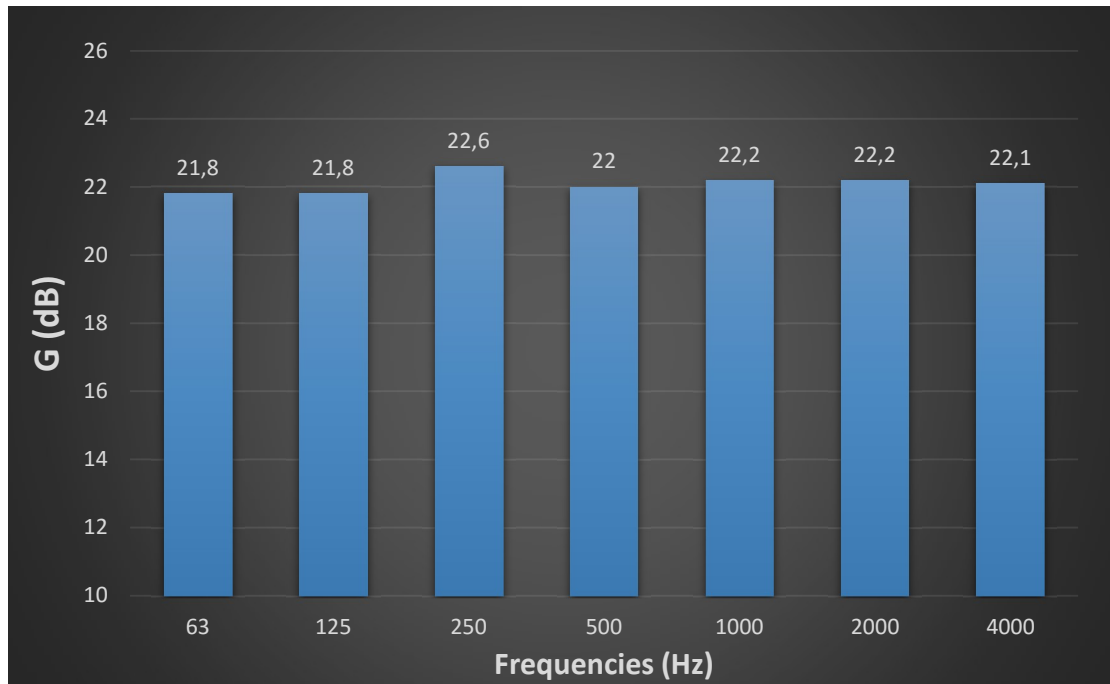
F.4.5. Κλίση -10°

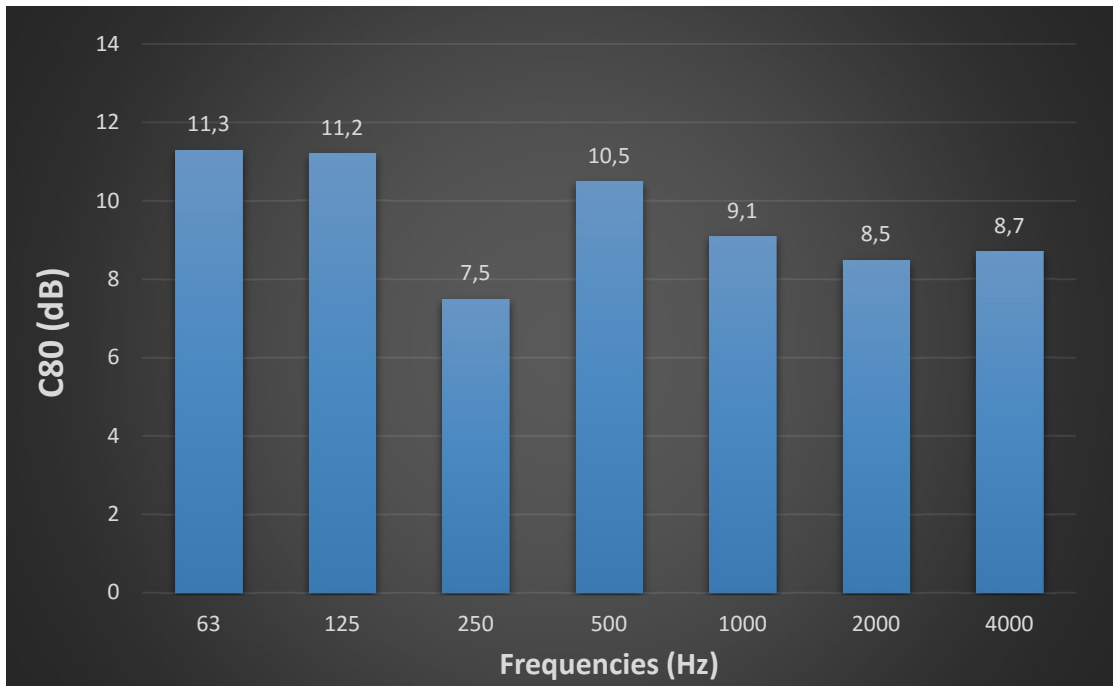
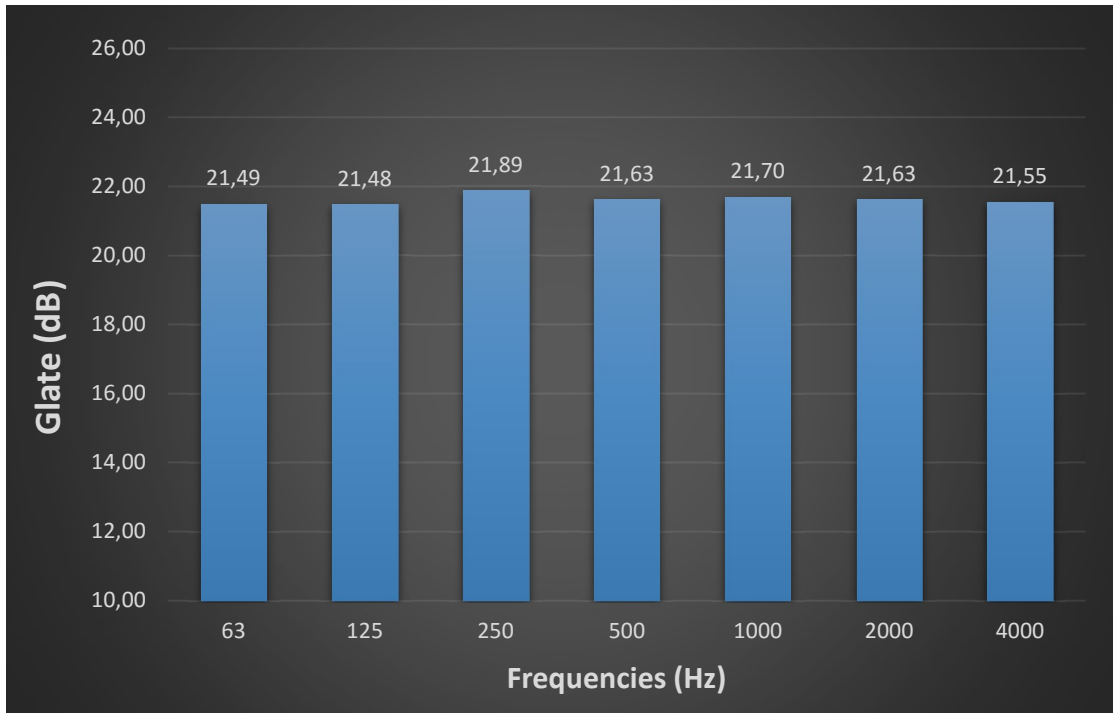


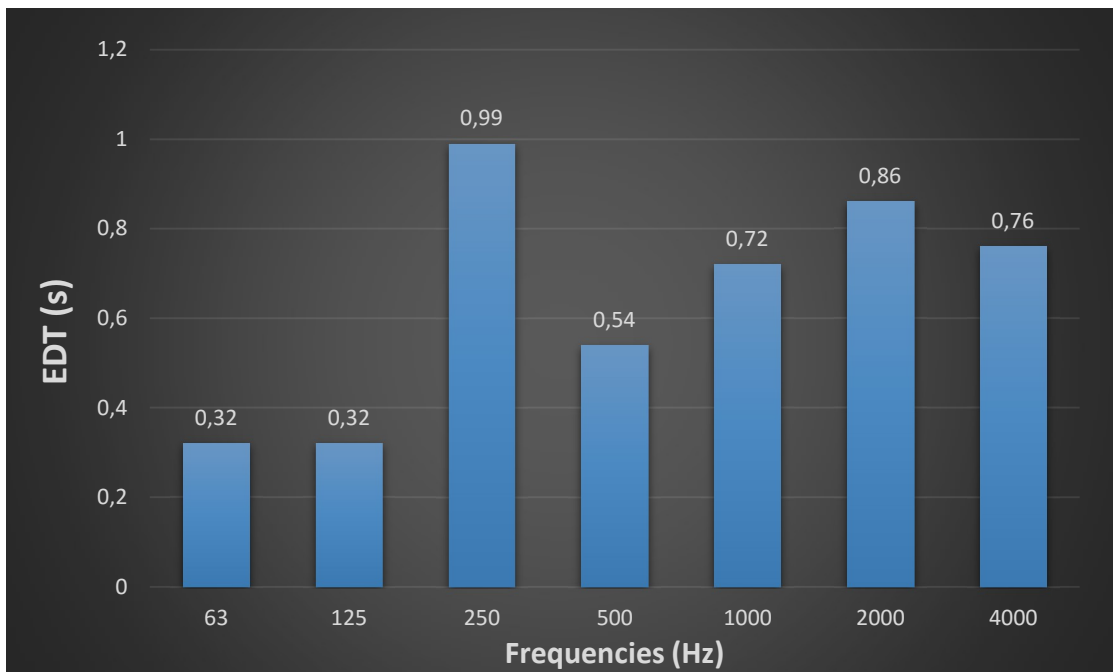
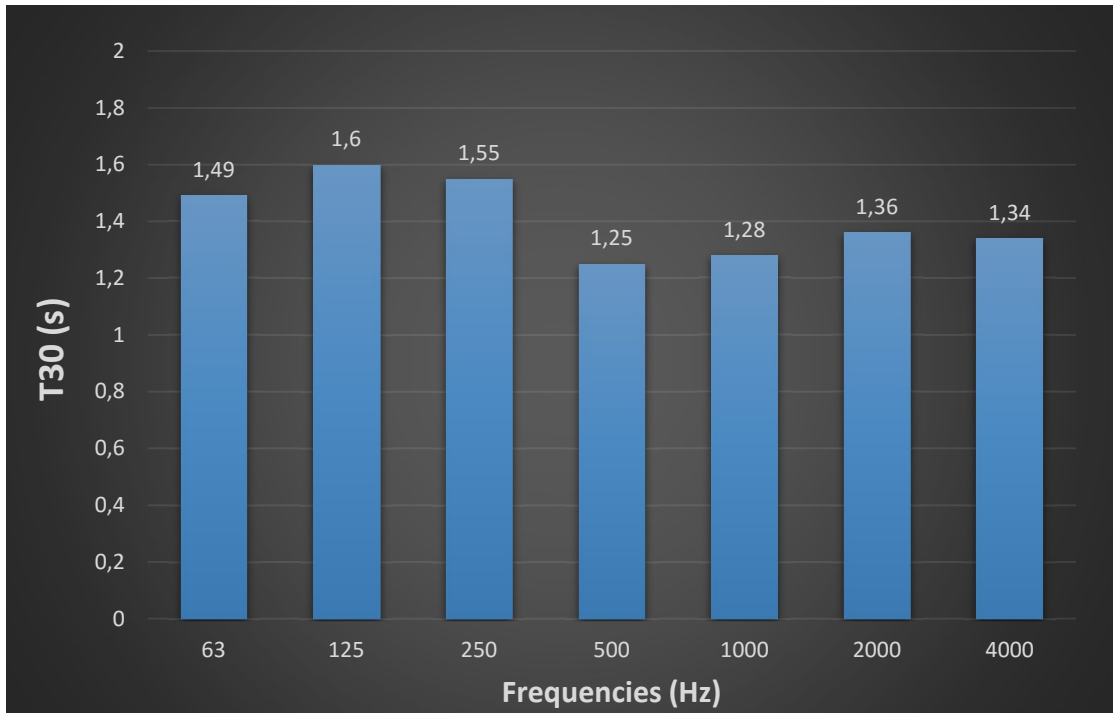




F.4.6. Κλίση -15°

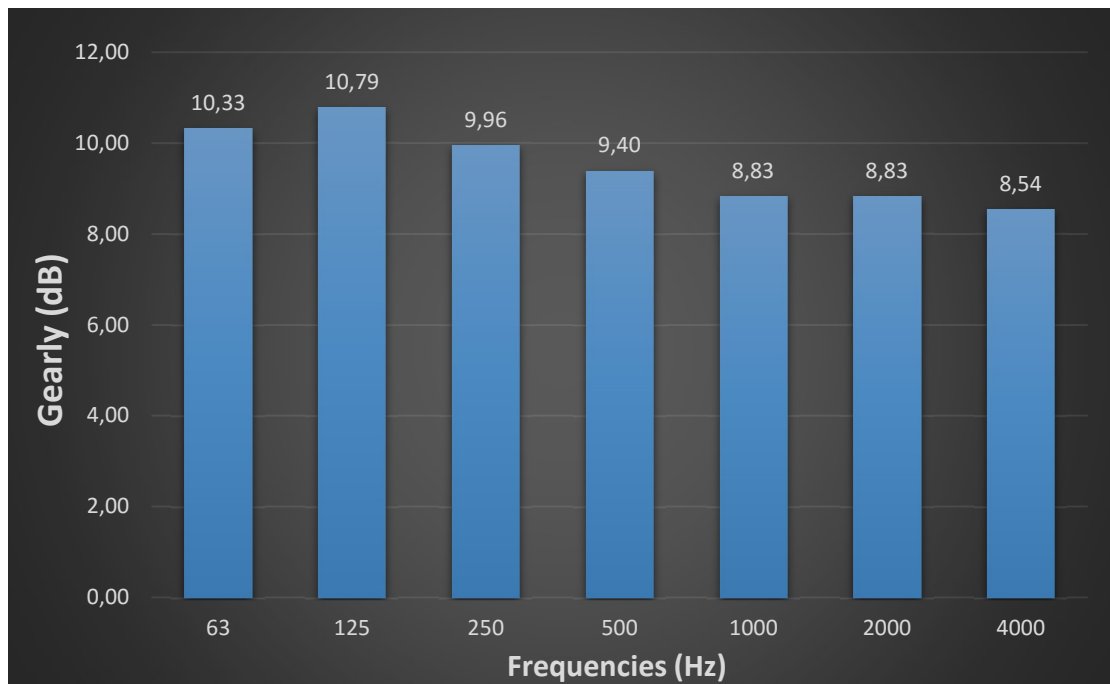
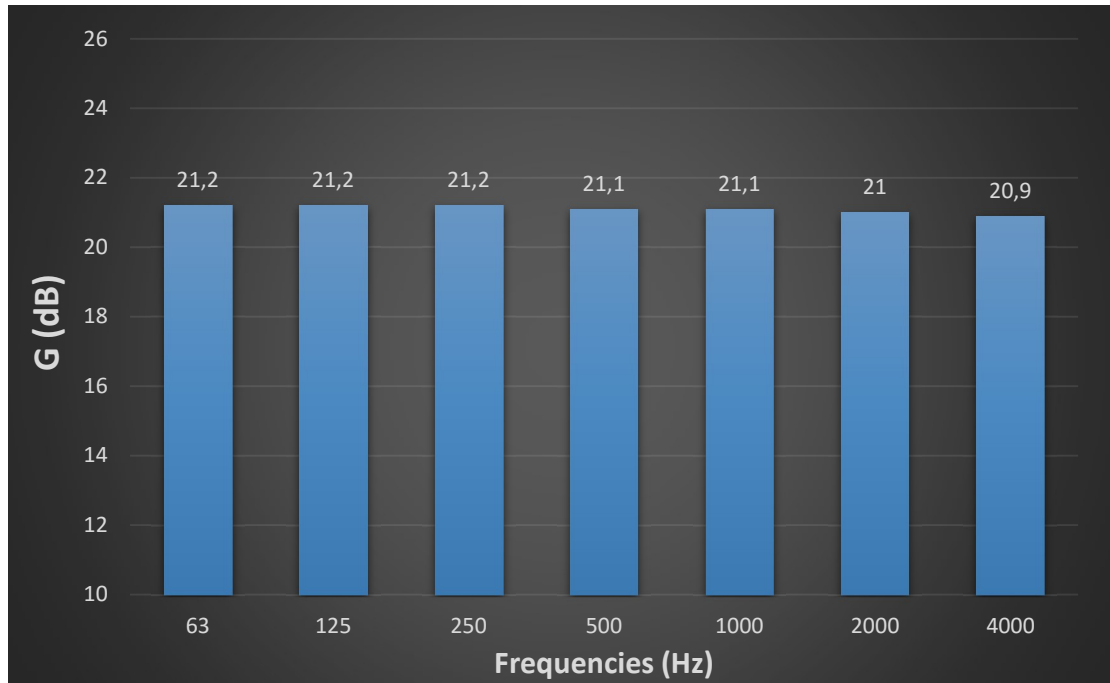


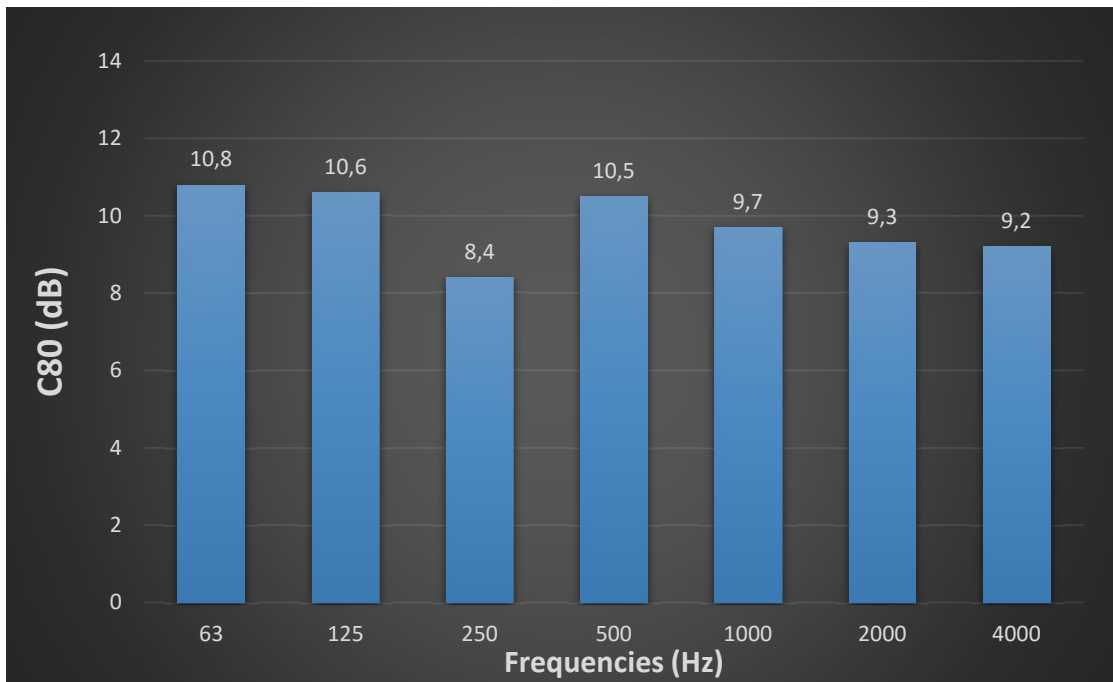
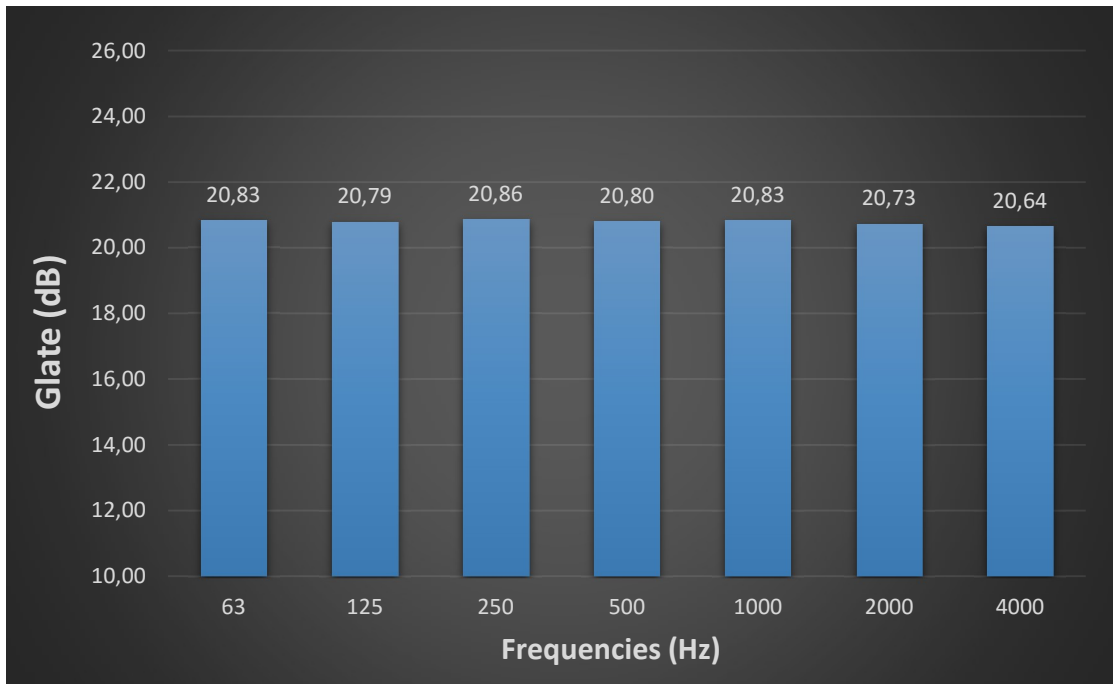


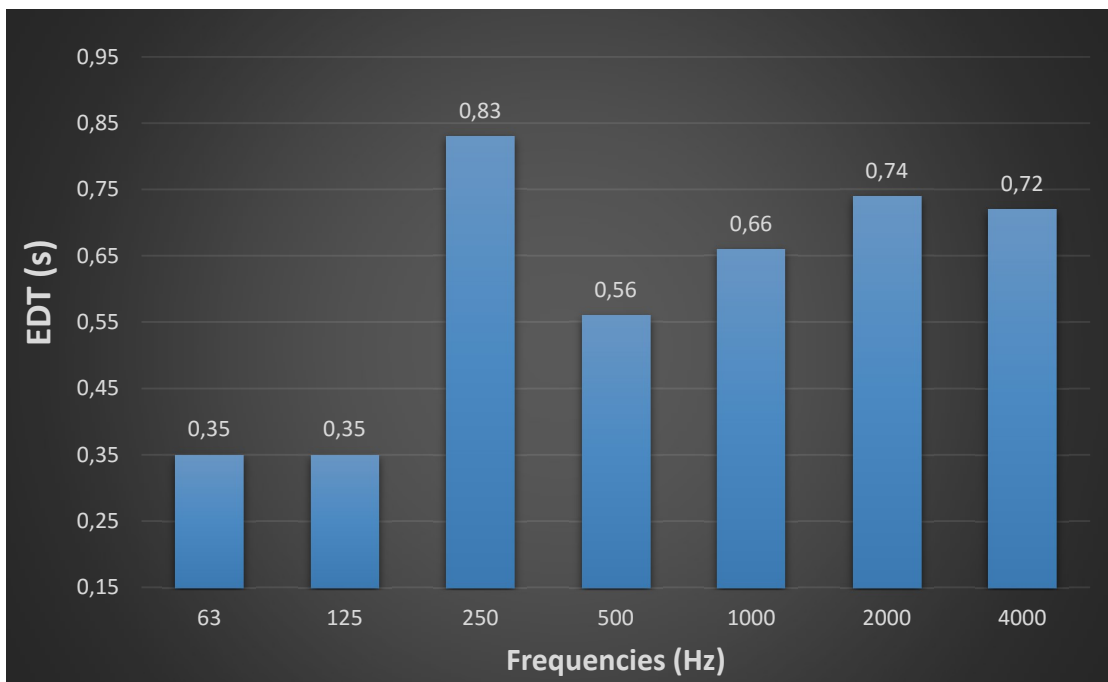
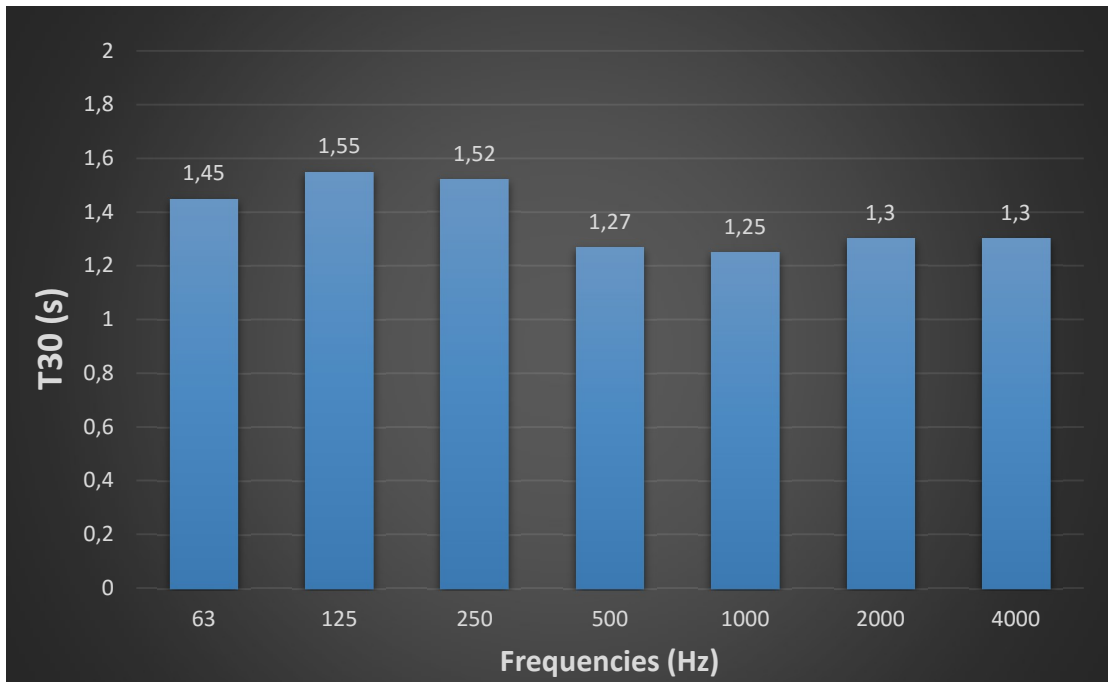


F.5. Κλίση τοίχου πίσω από τη σκηνή

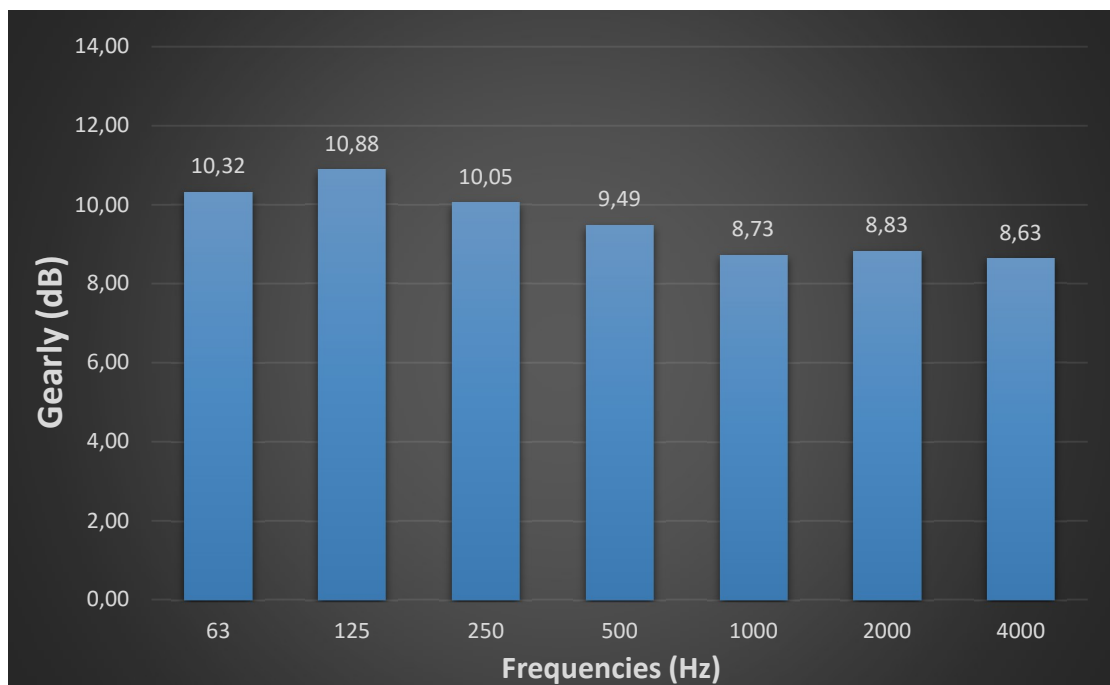
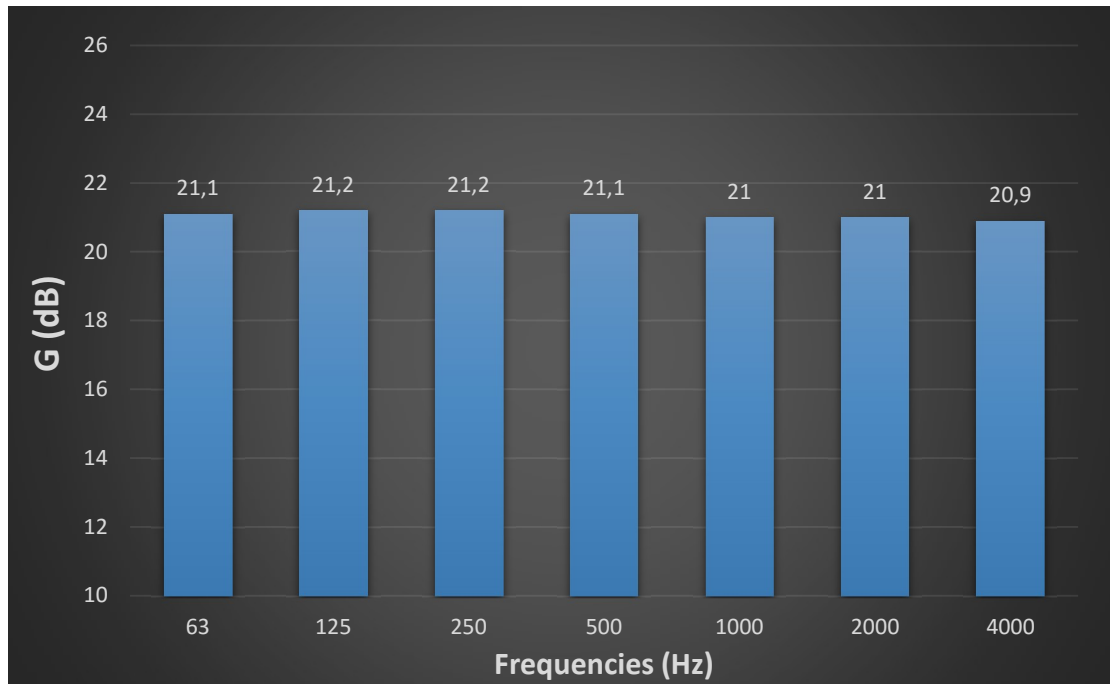
F.5.1. Κλίση 30°

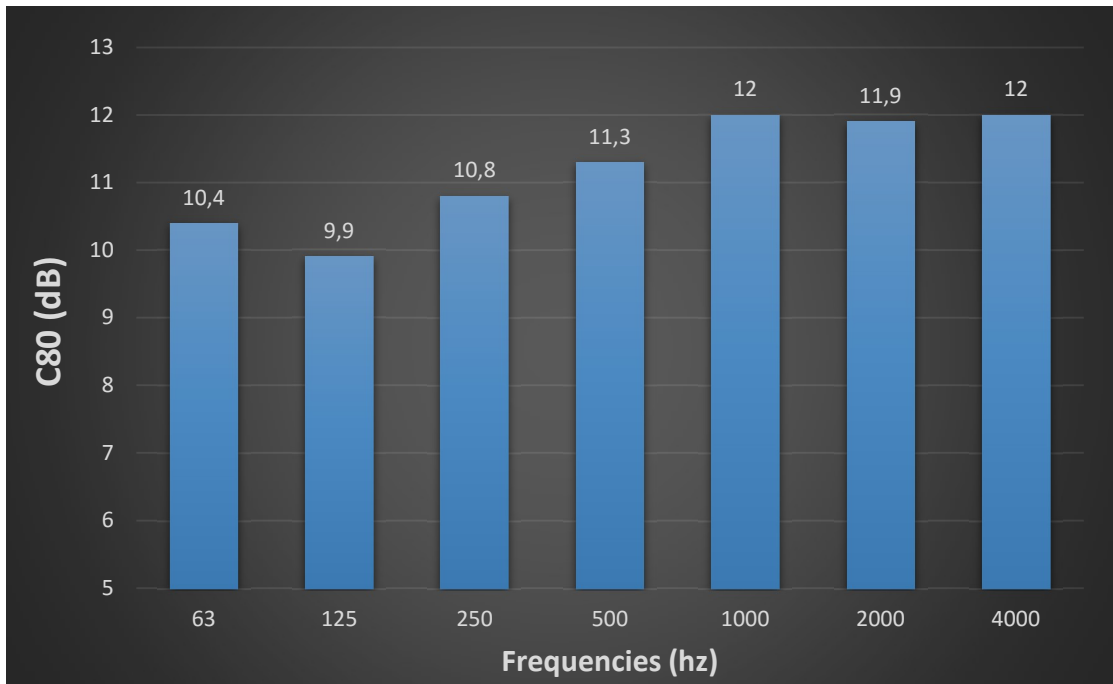
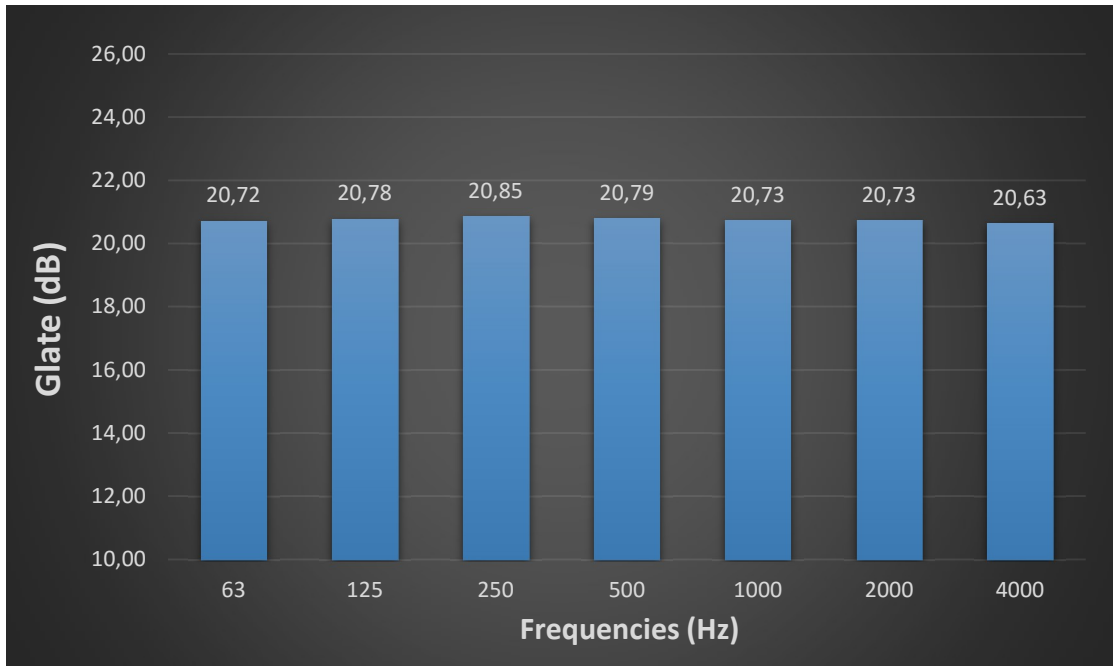


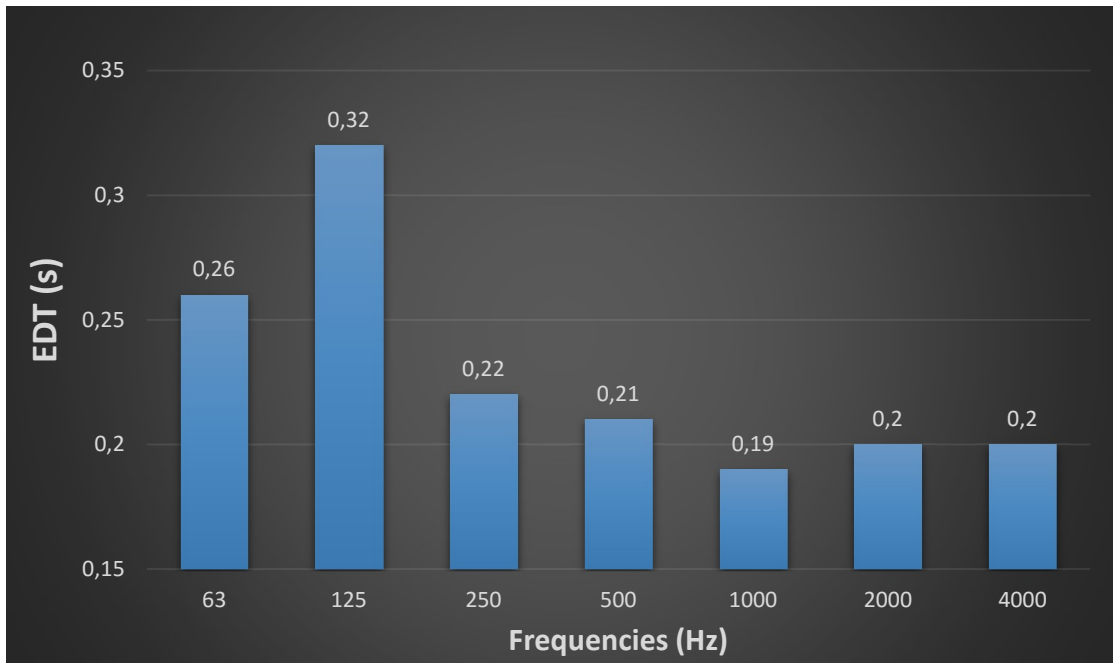
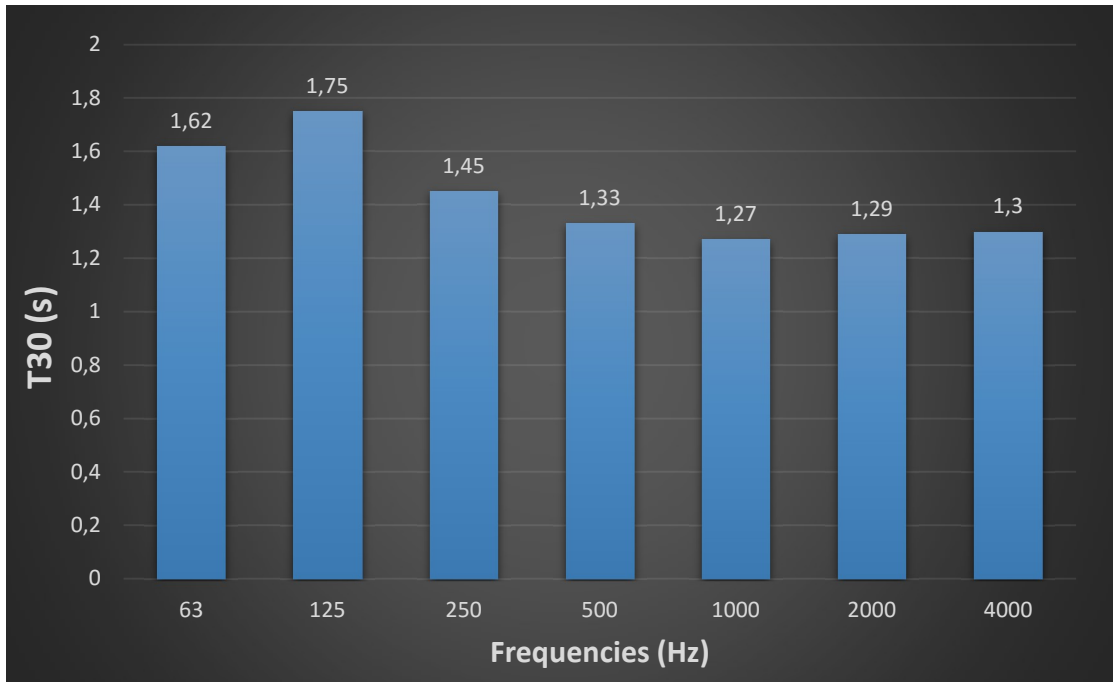




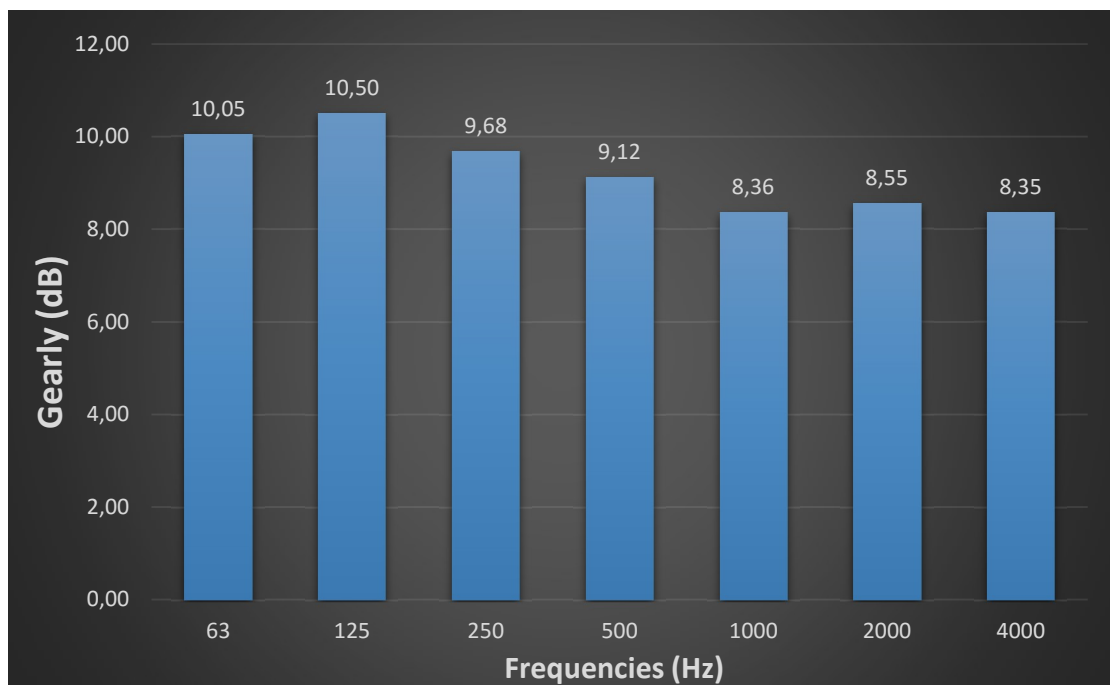
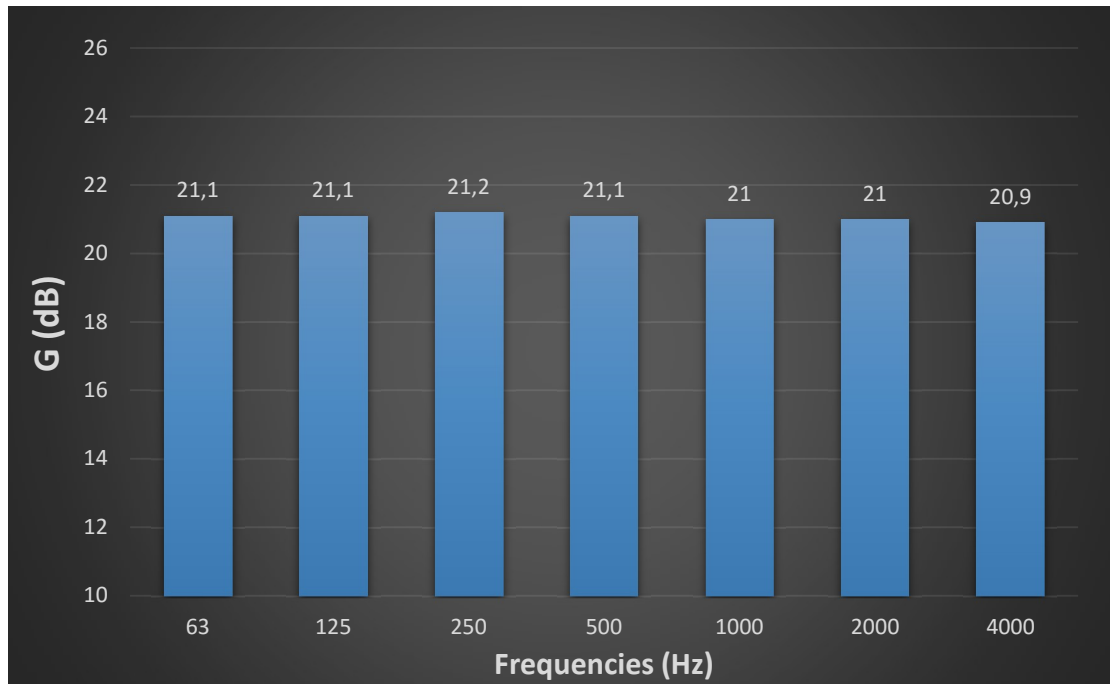
F.5.2. Κλίση 20°

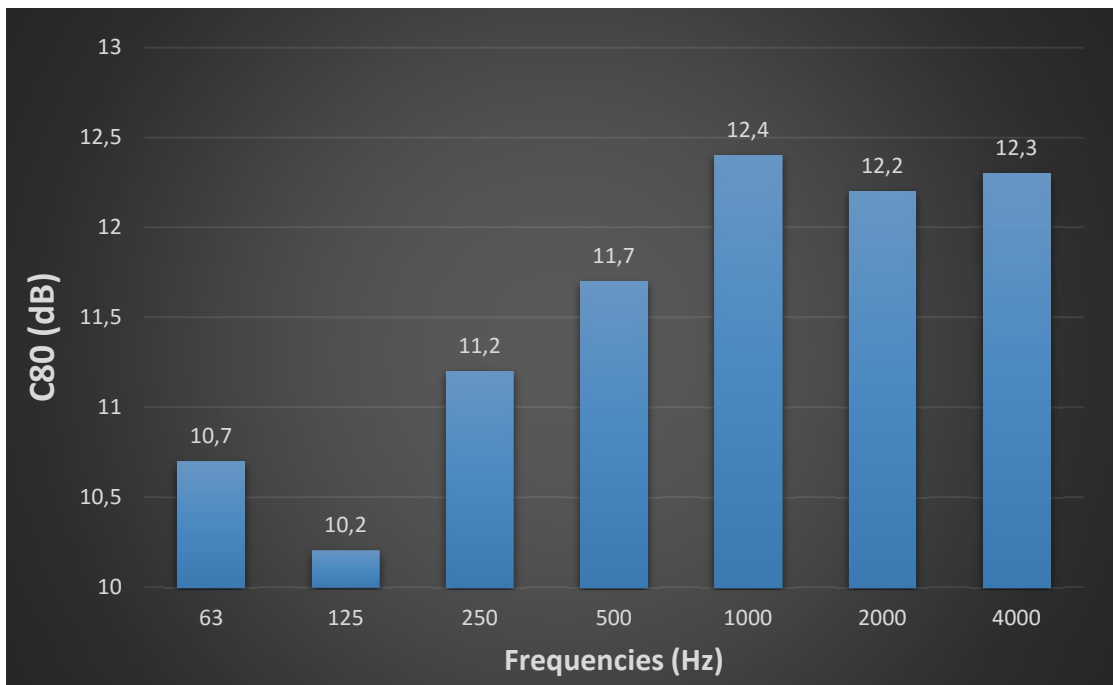
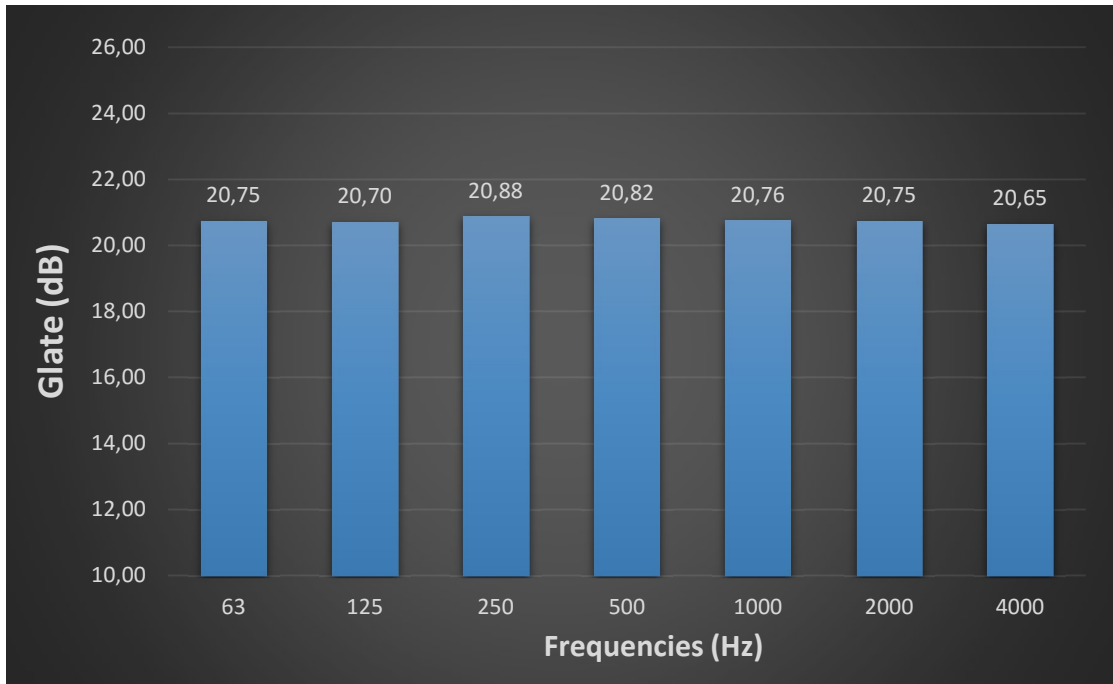


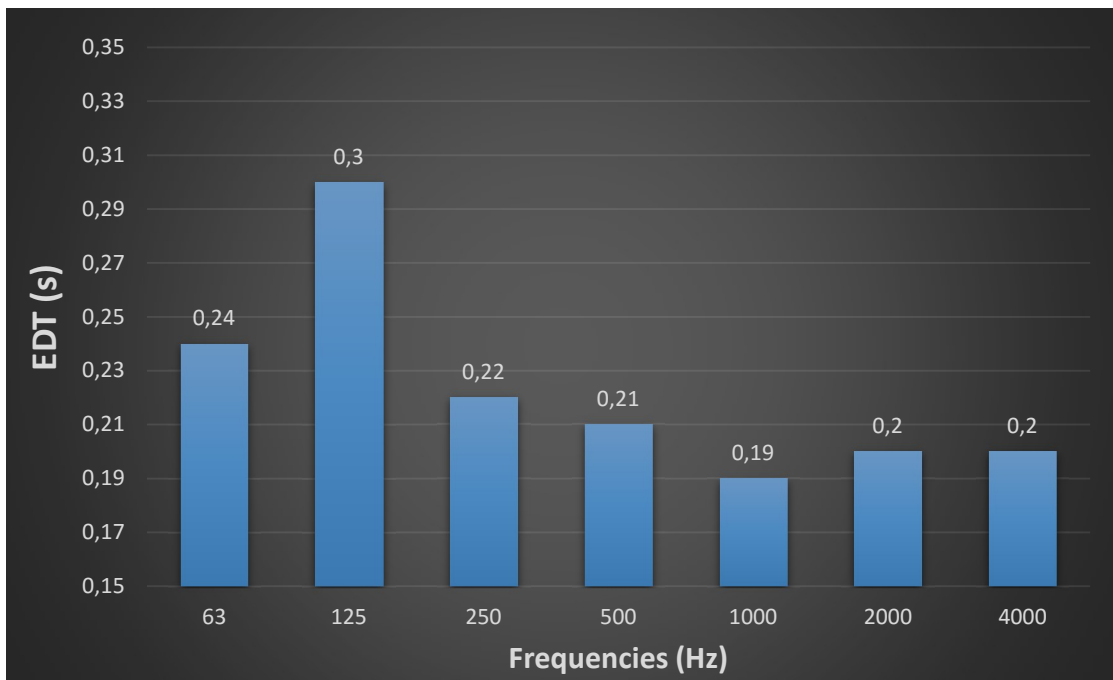
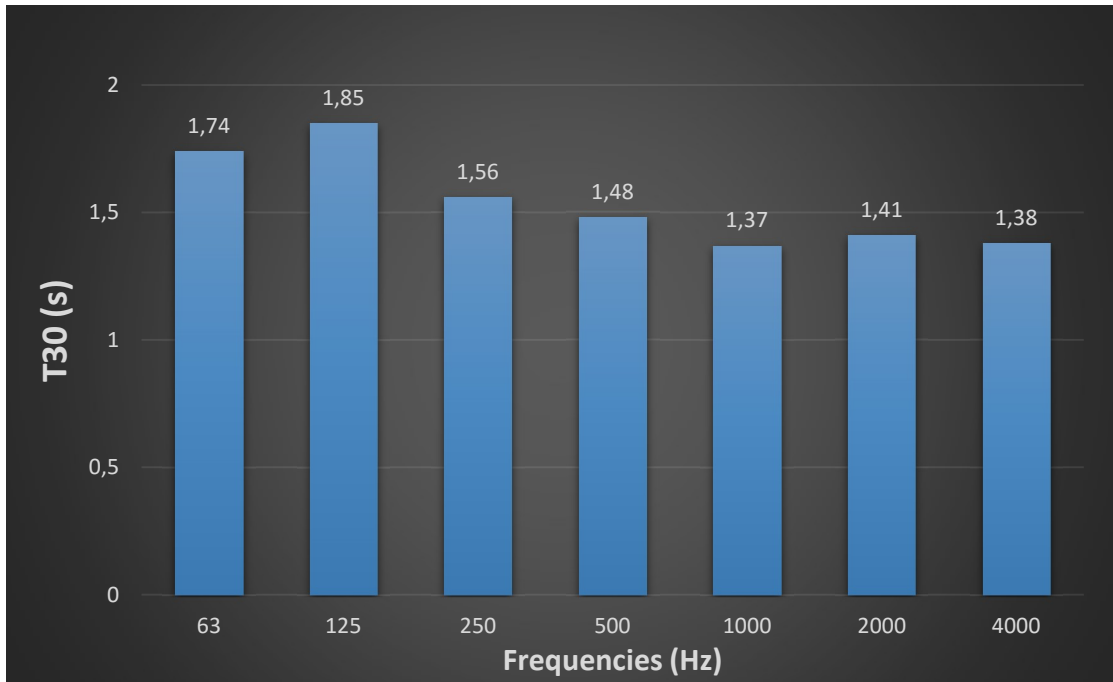




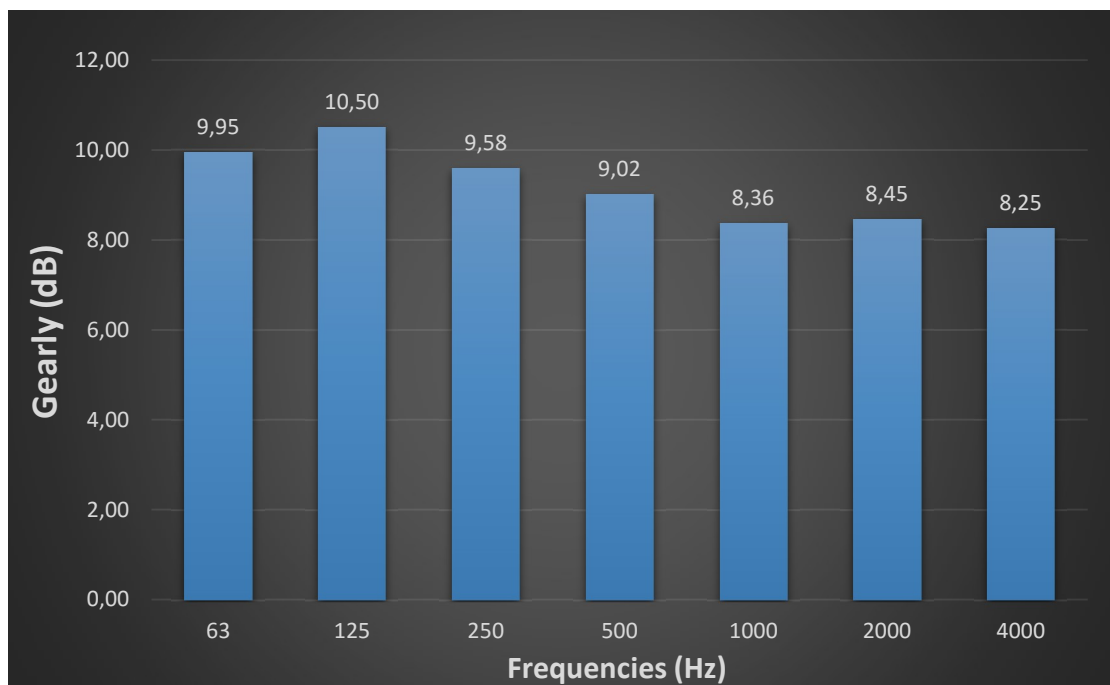
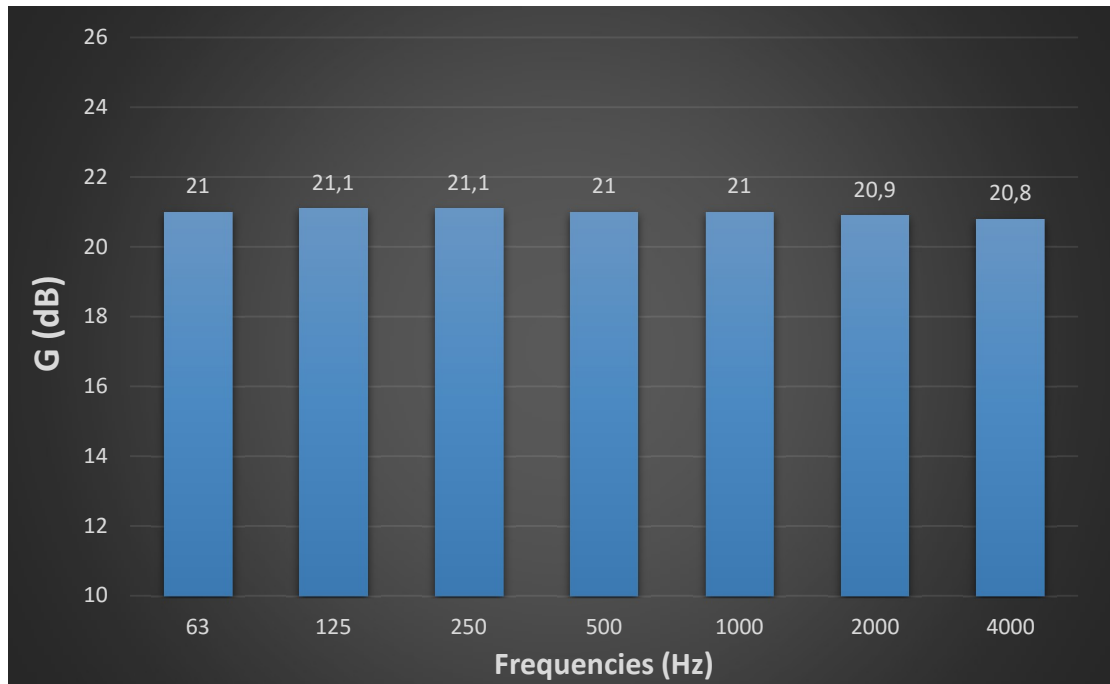
F.5.3. Κλίση 10°

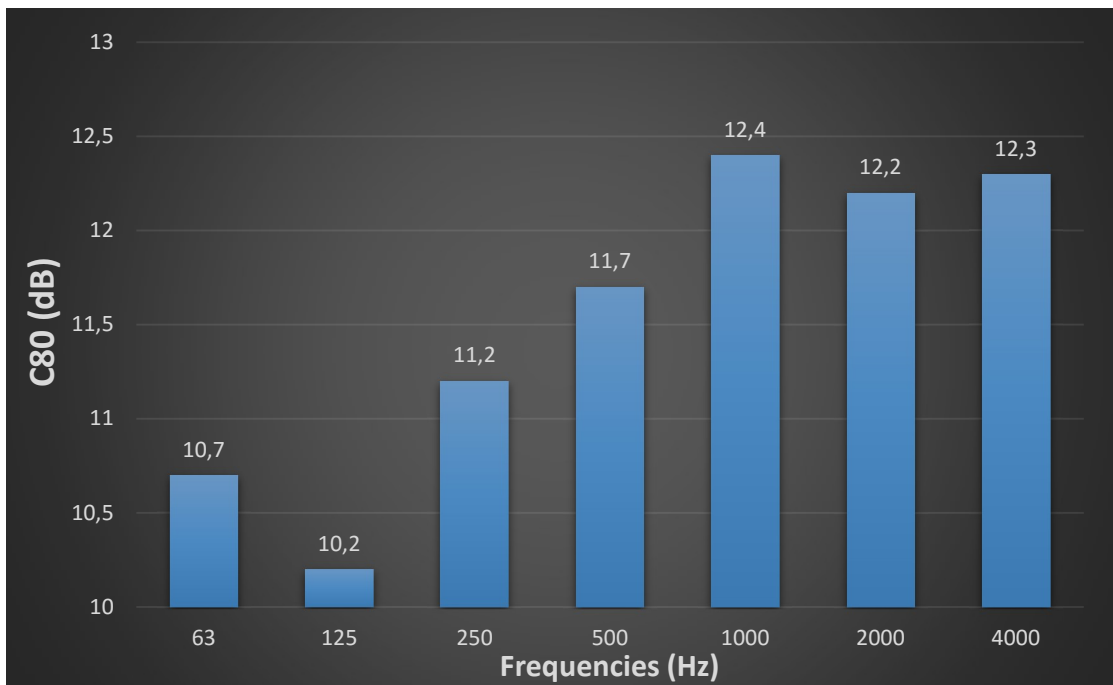
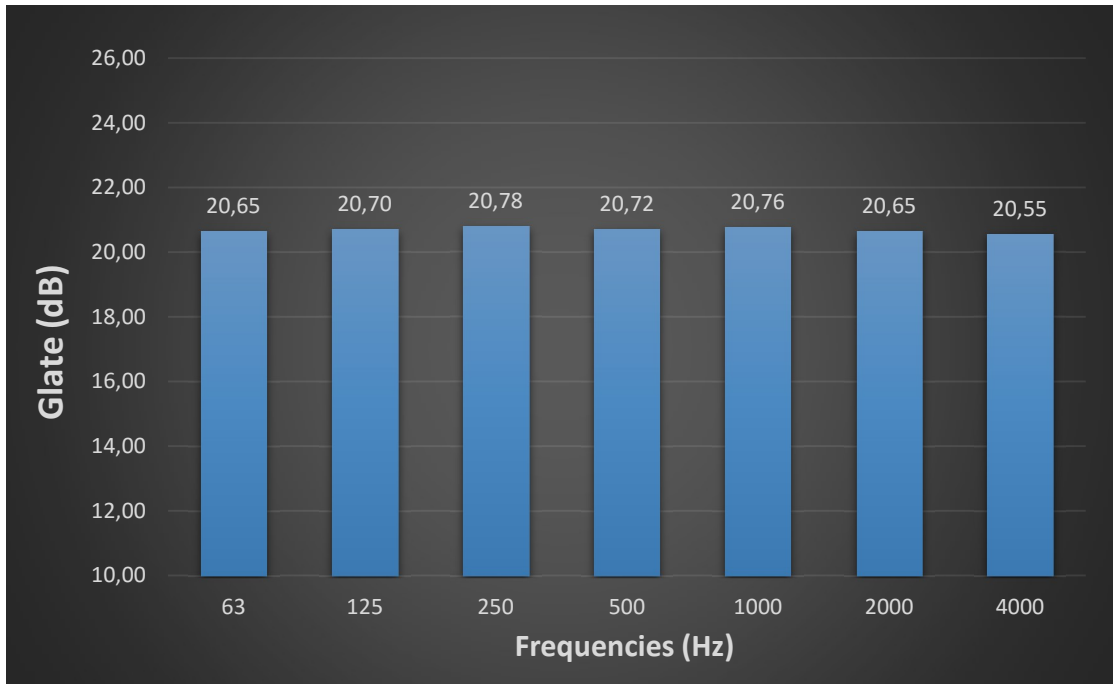


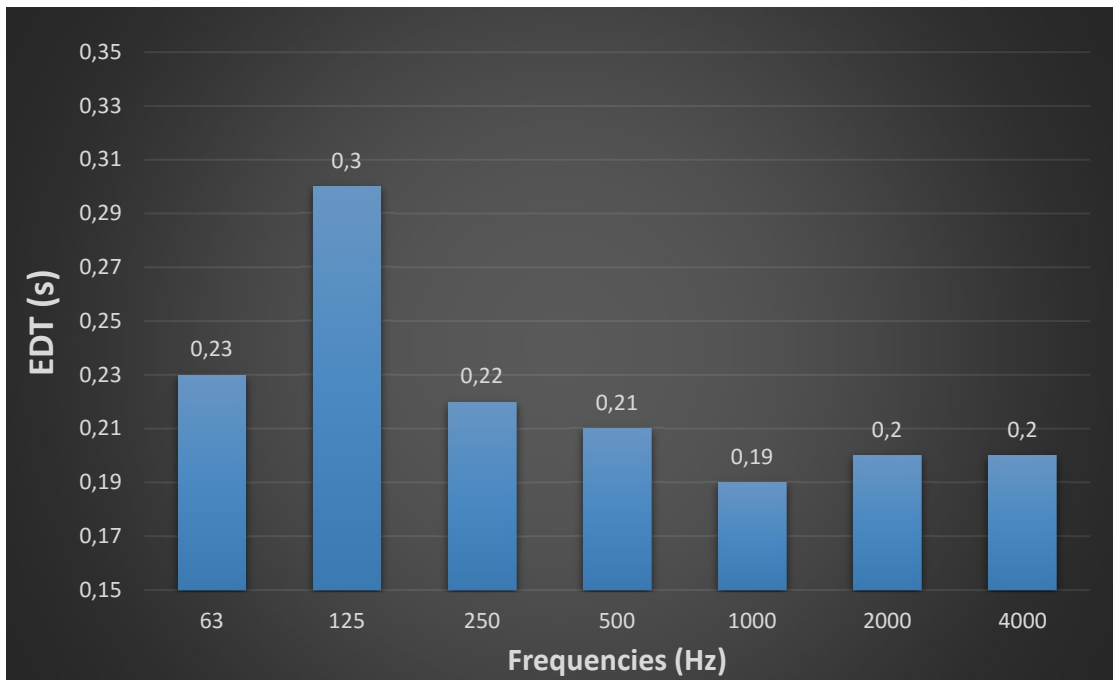
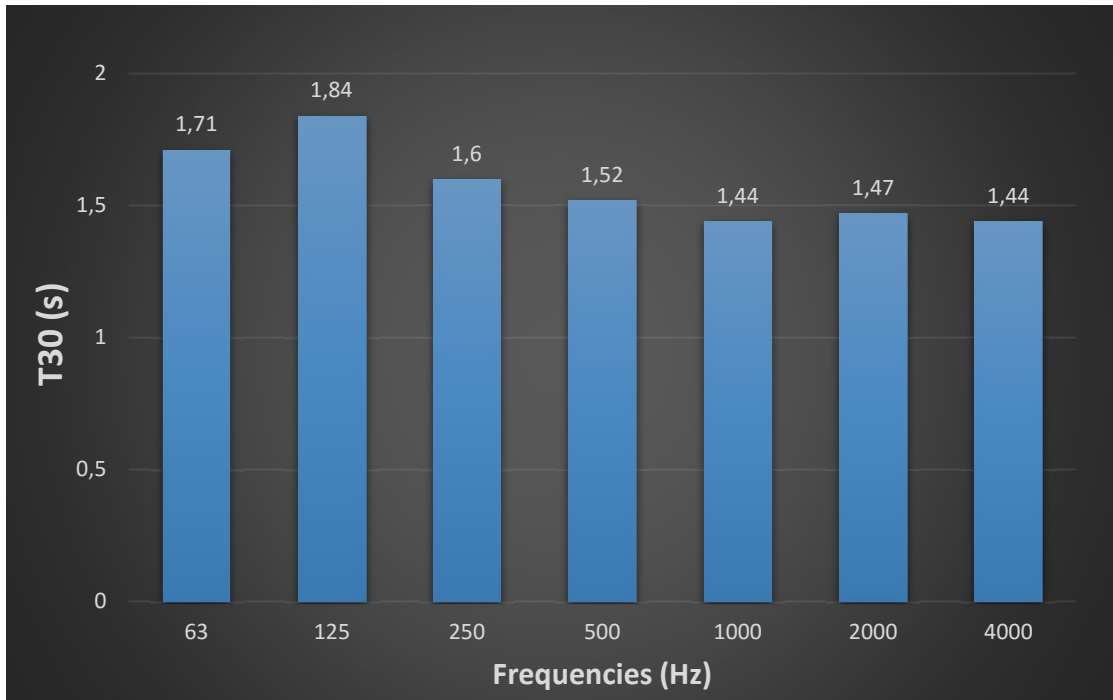




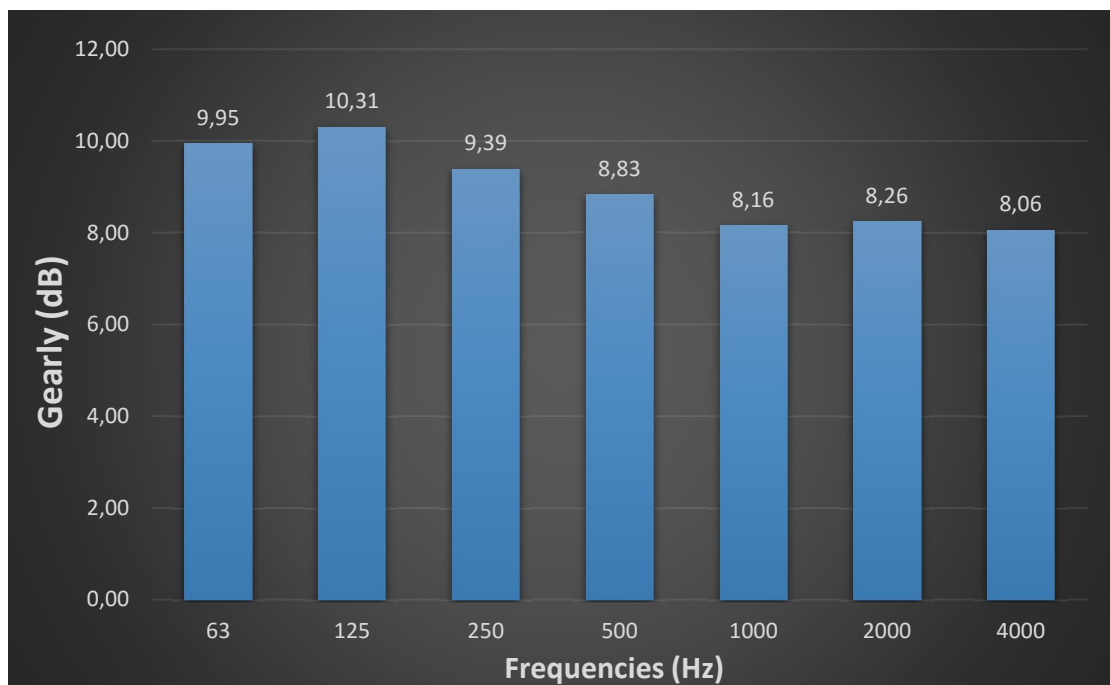
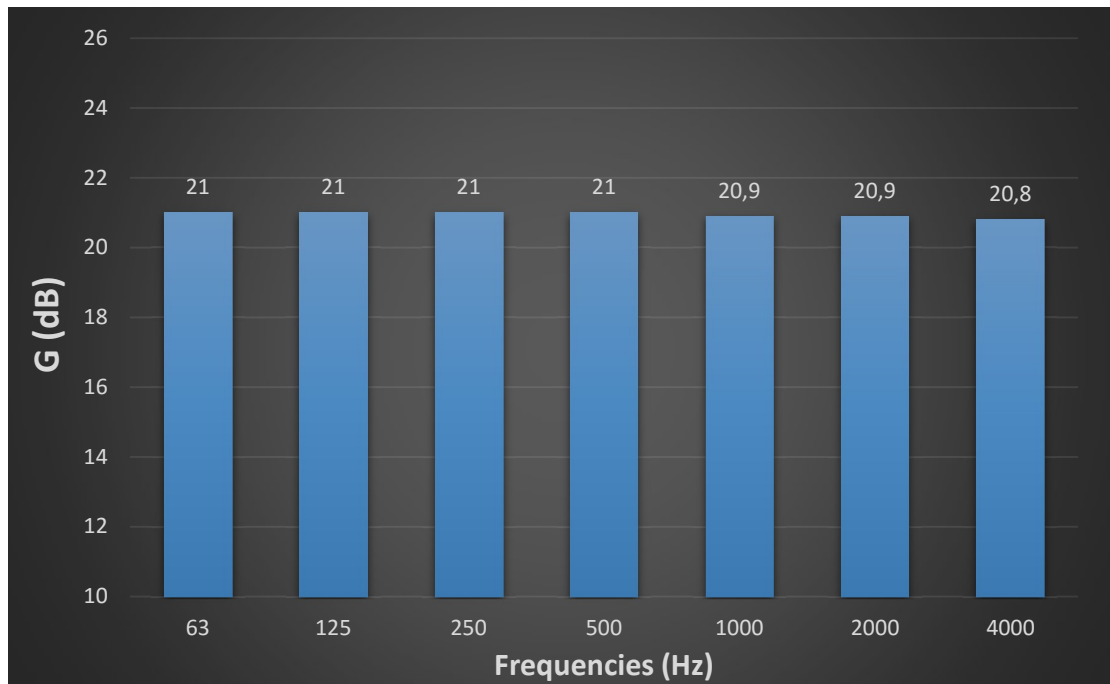
F.5.4. Κλίση 5°

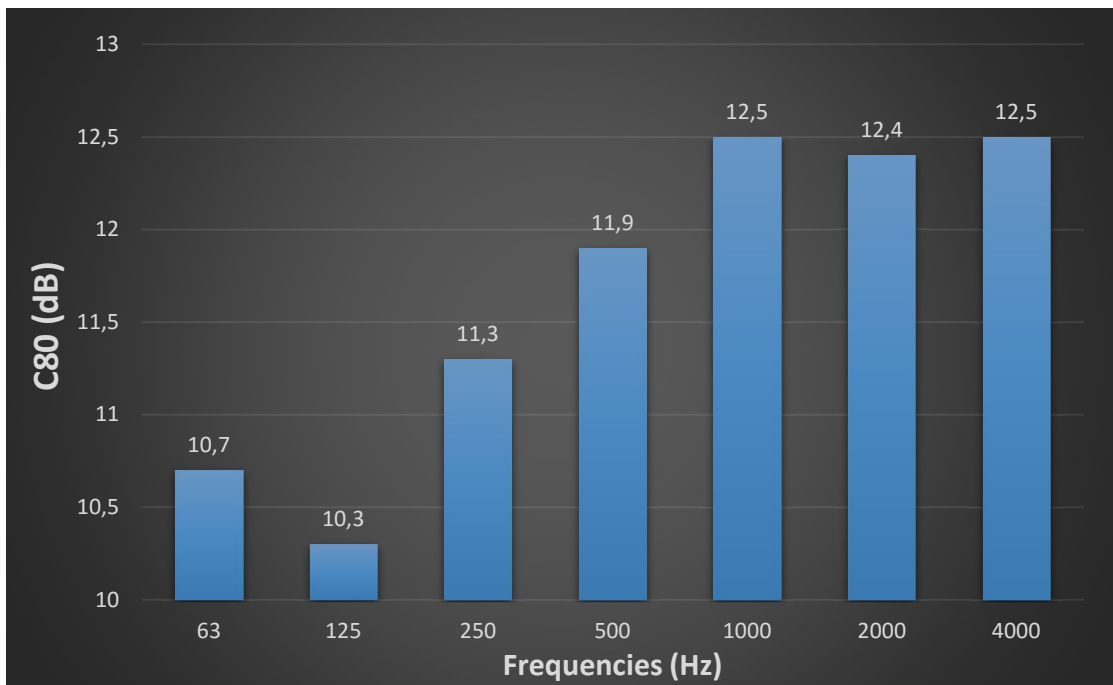
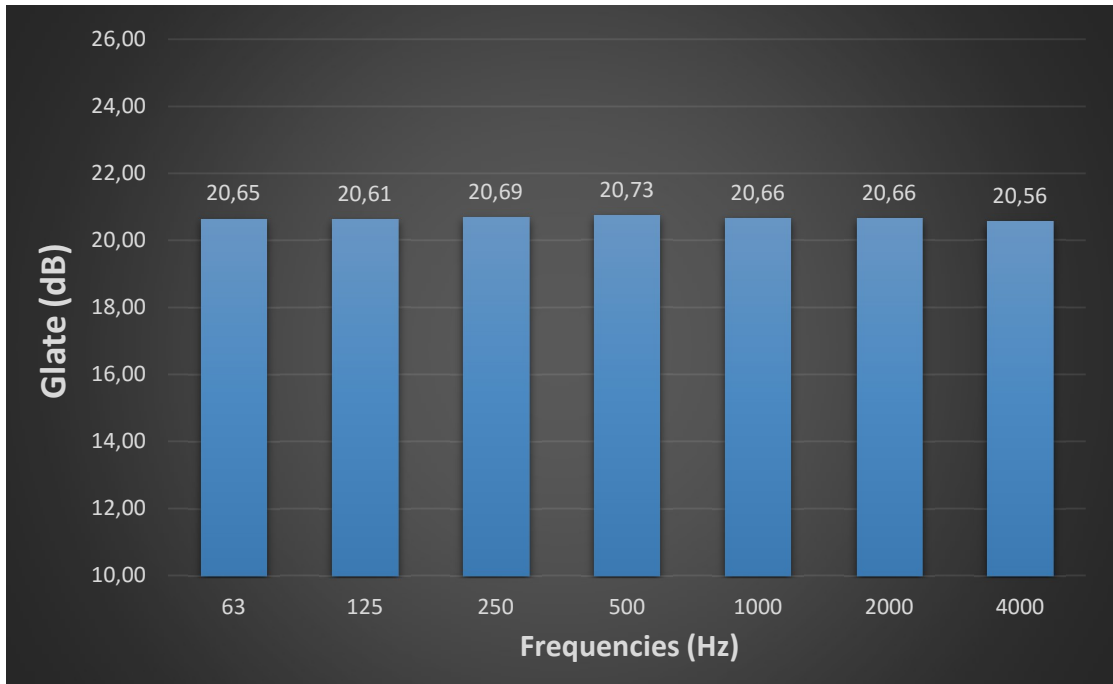


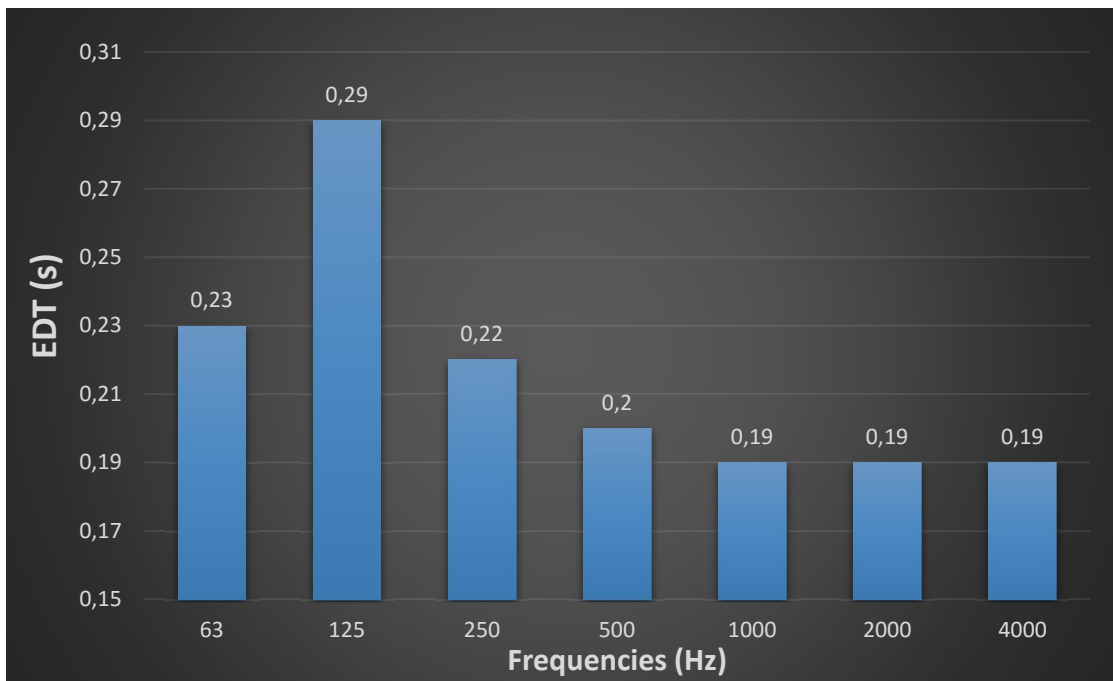
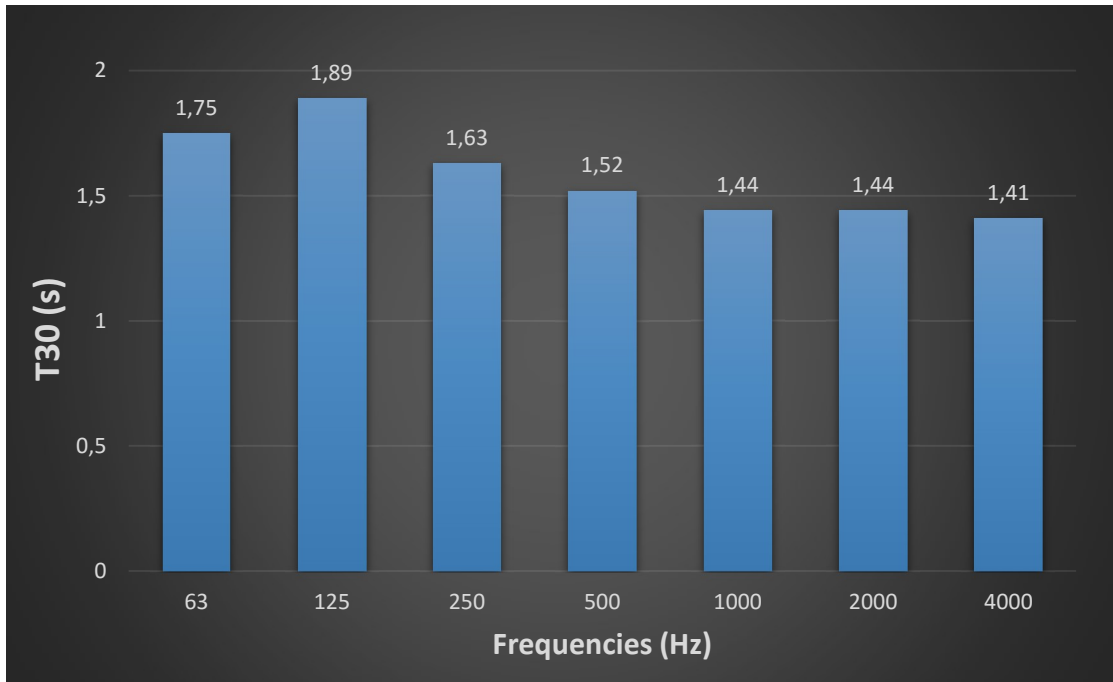




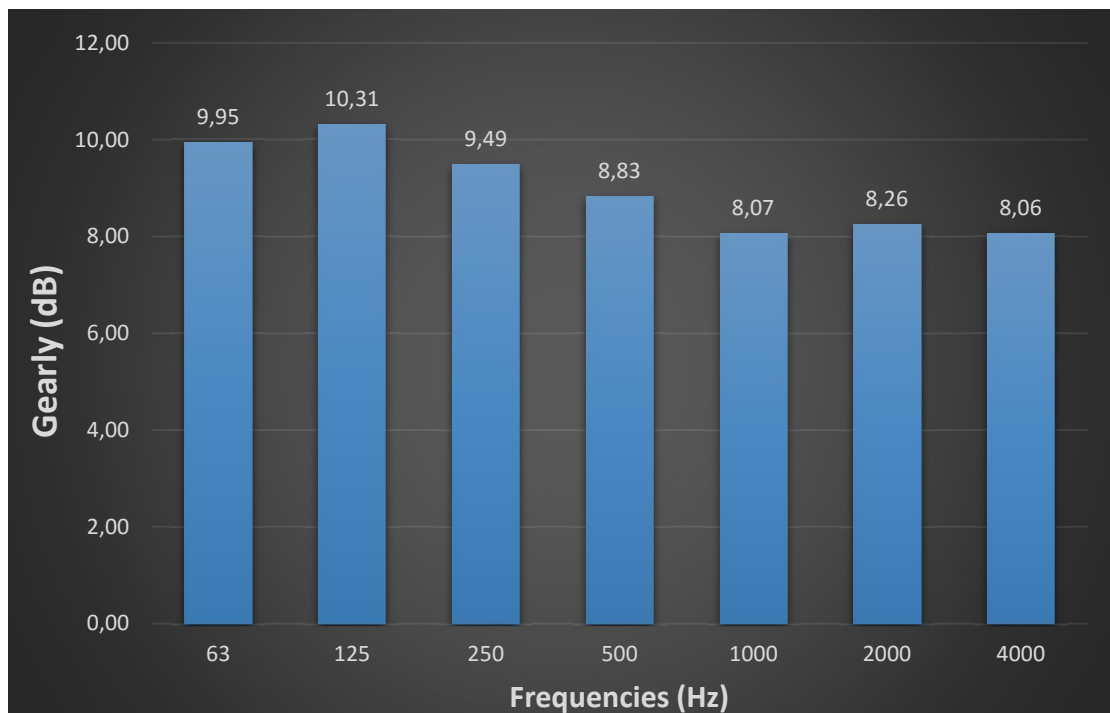
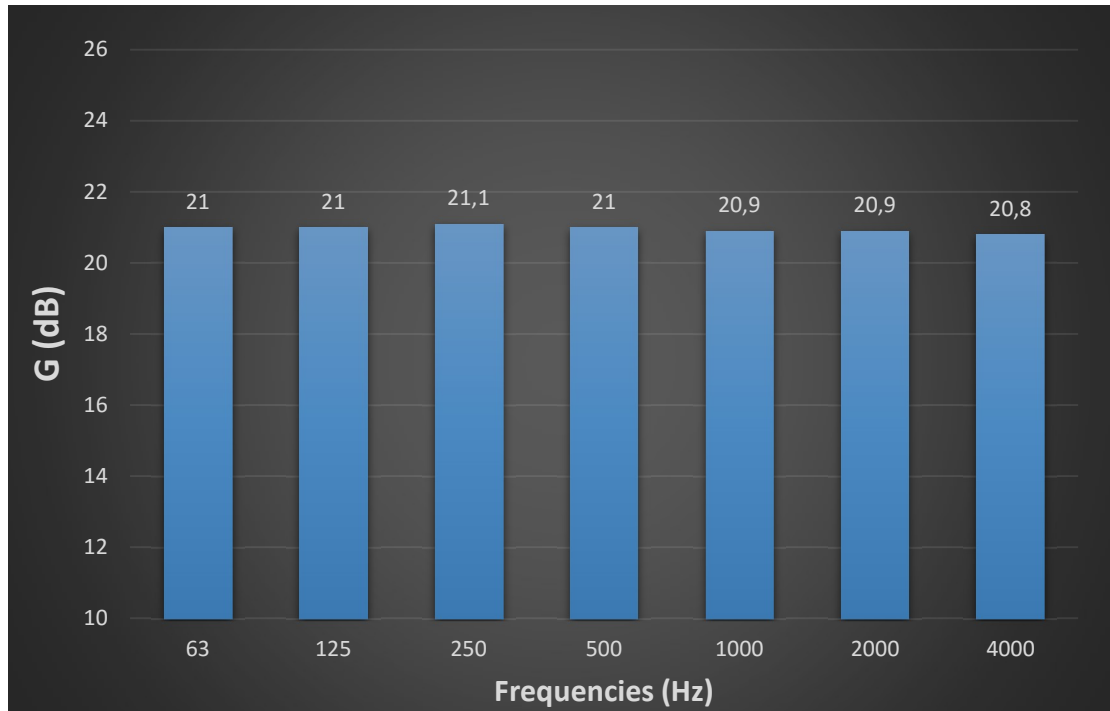
F.5.5. Κλίση 0°

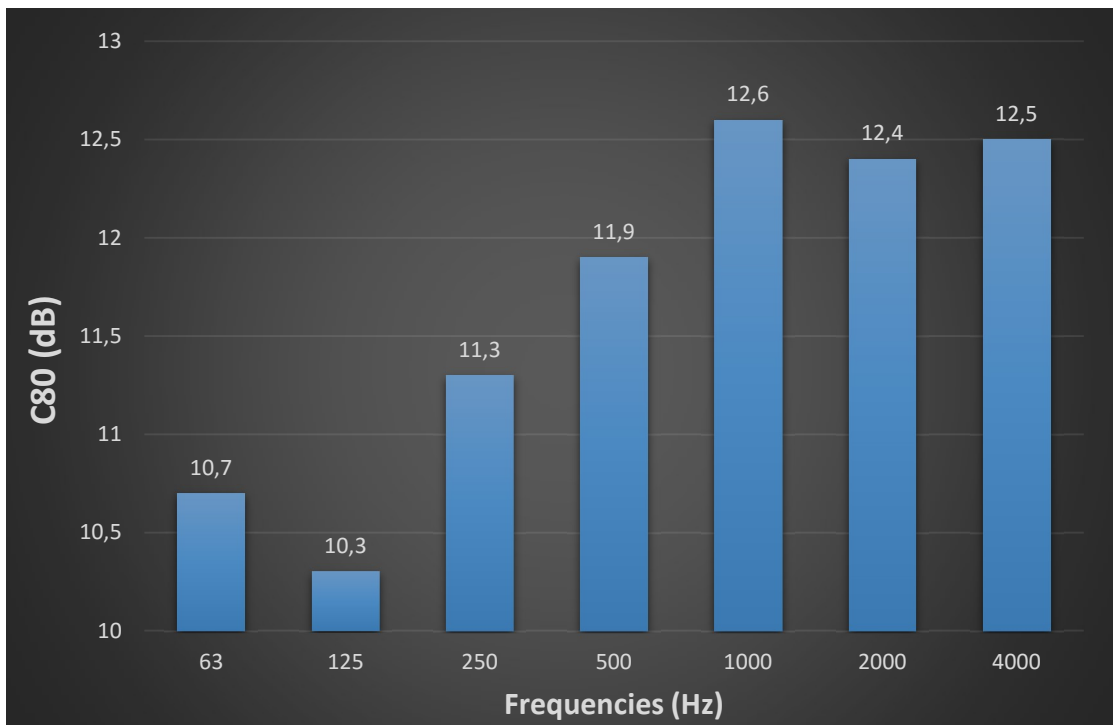
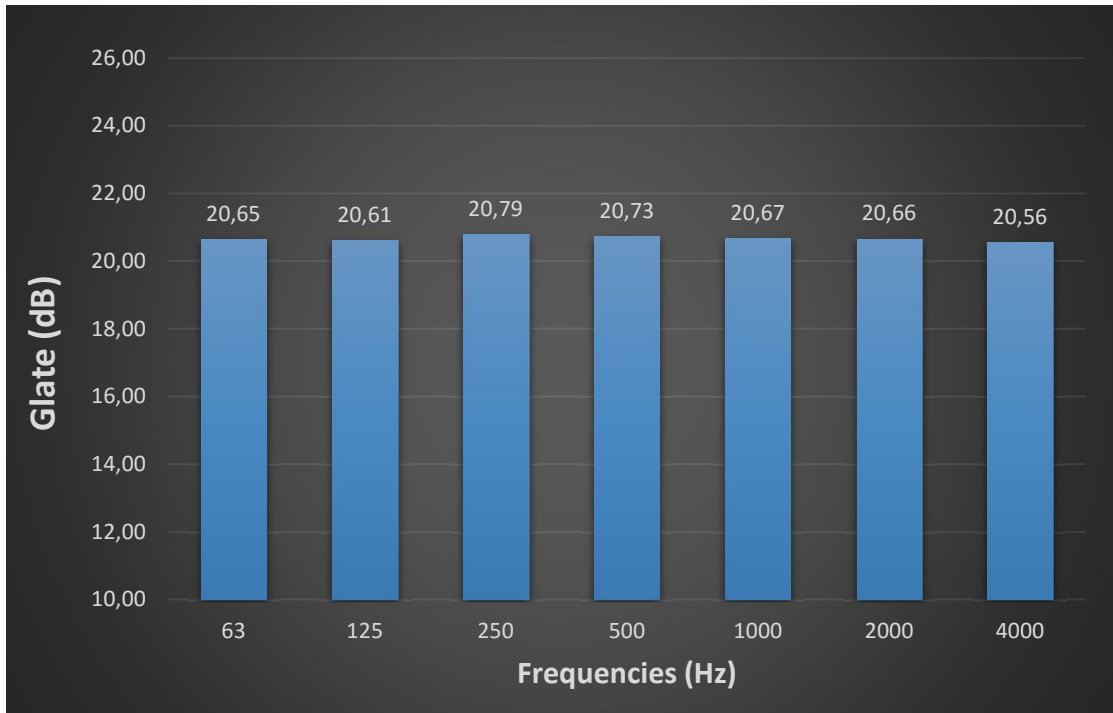


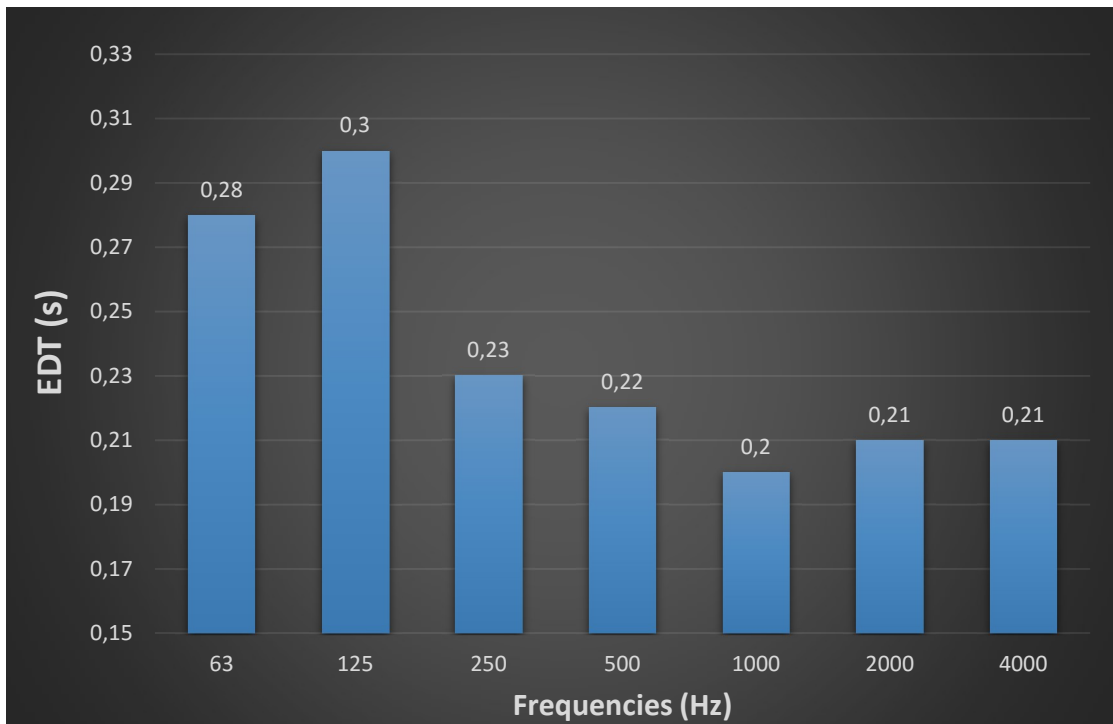
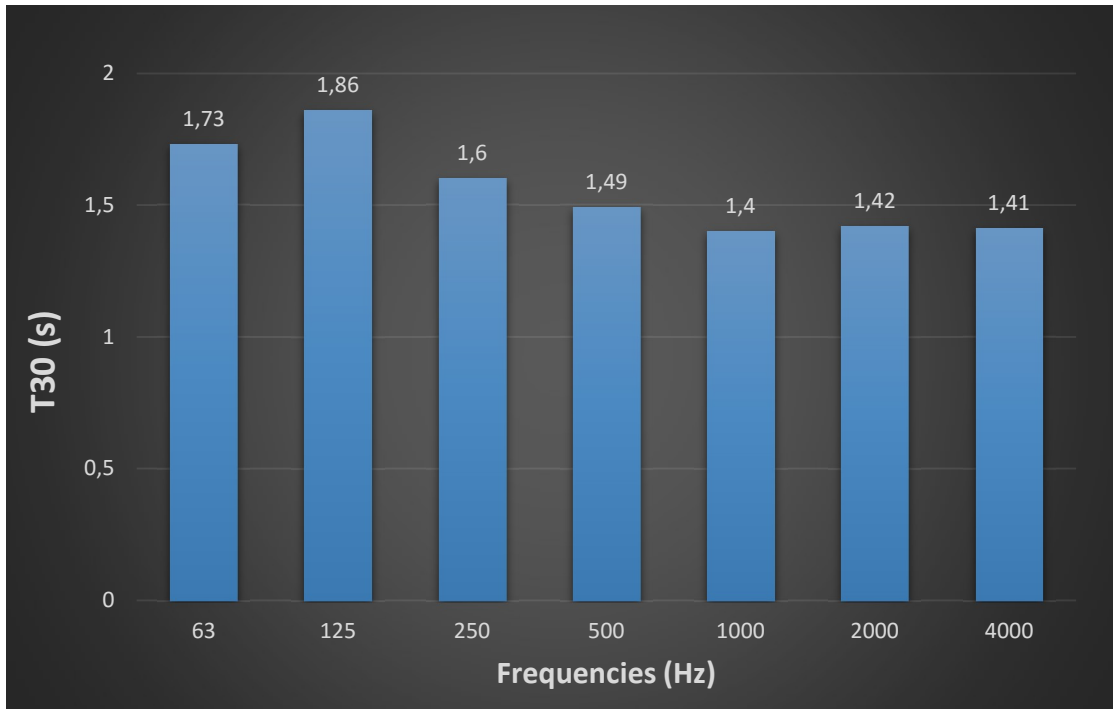




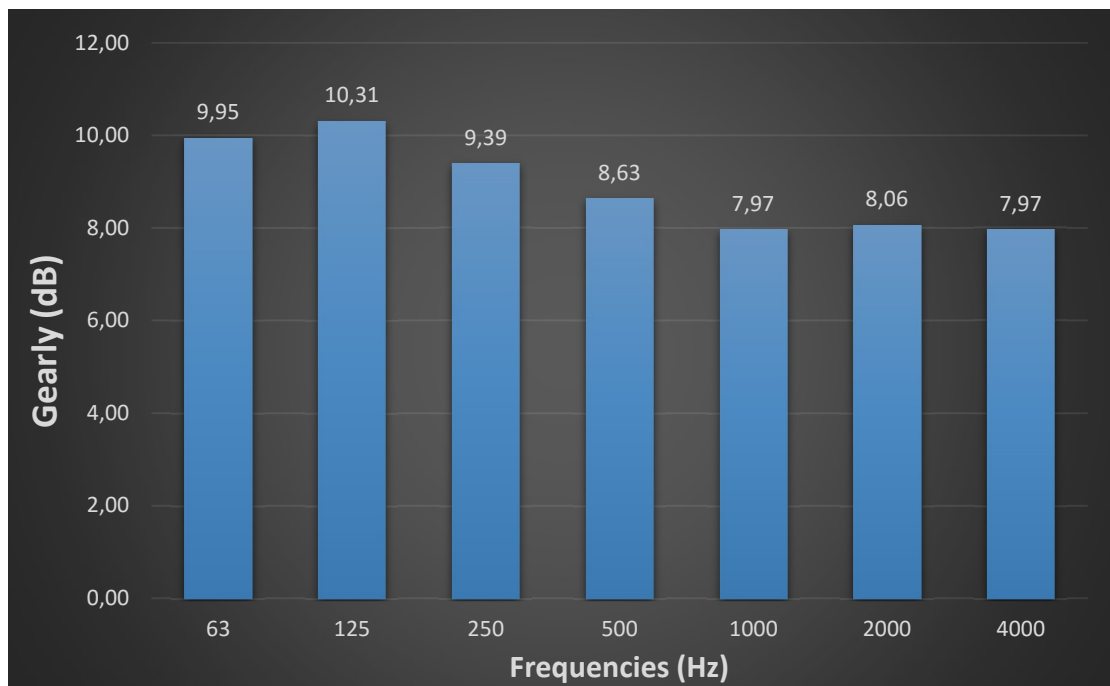
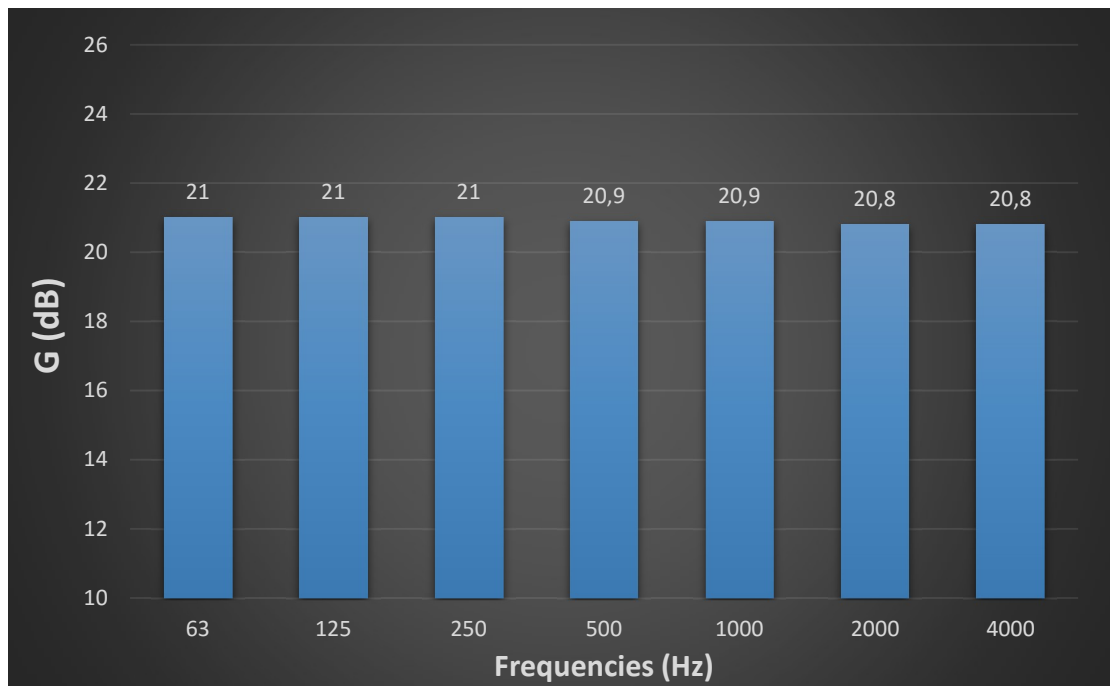
F.5.6. Κλίση -10°

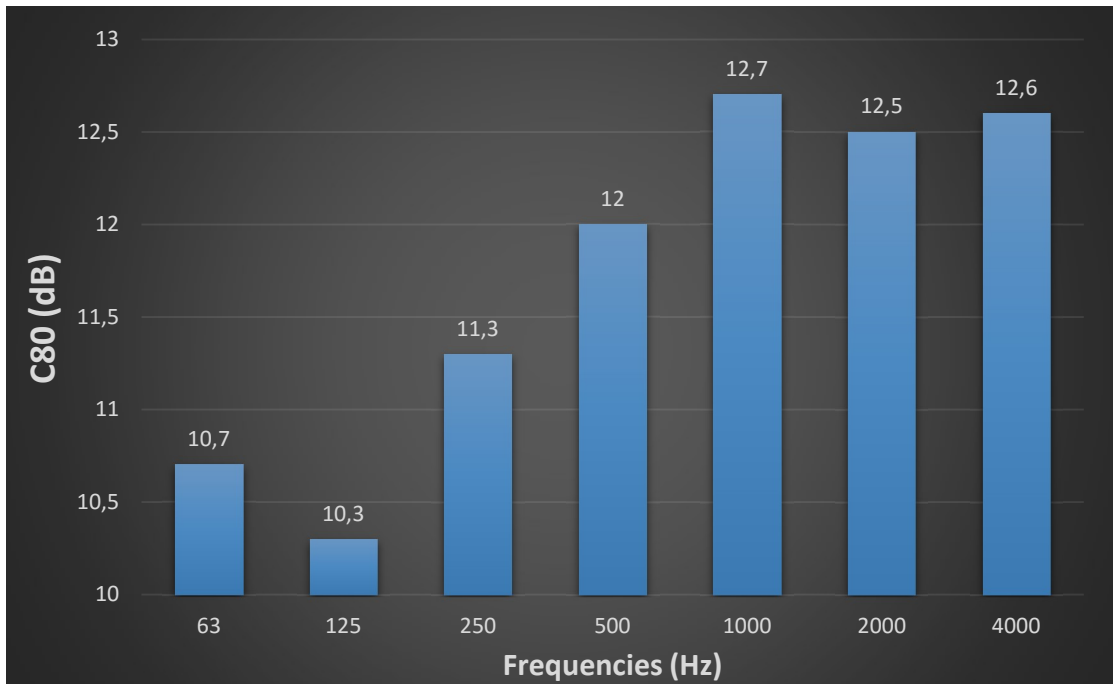
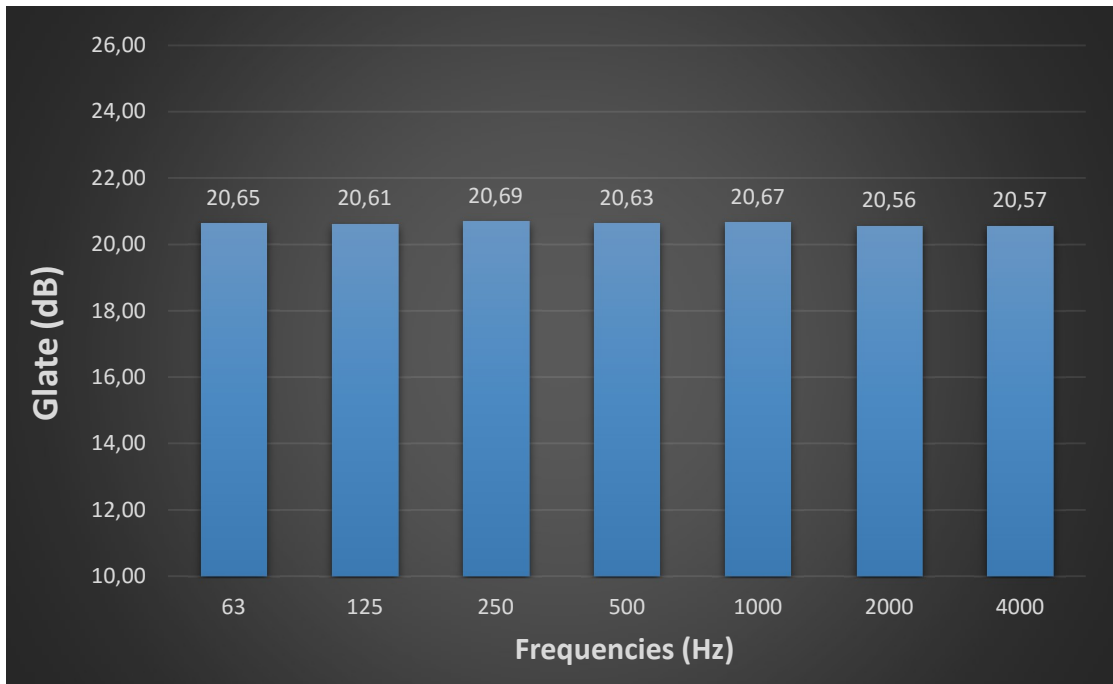


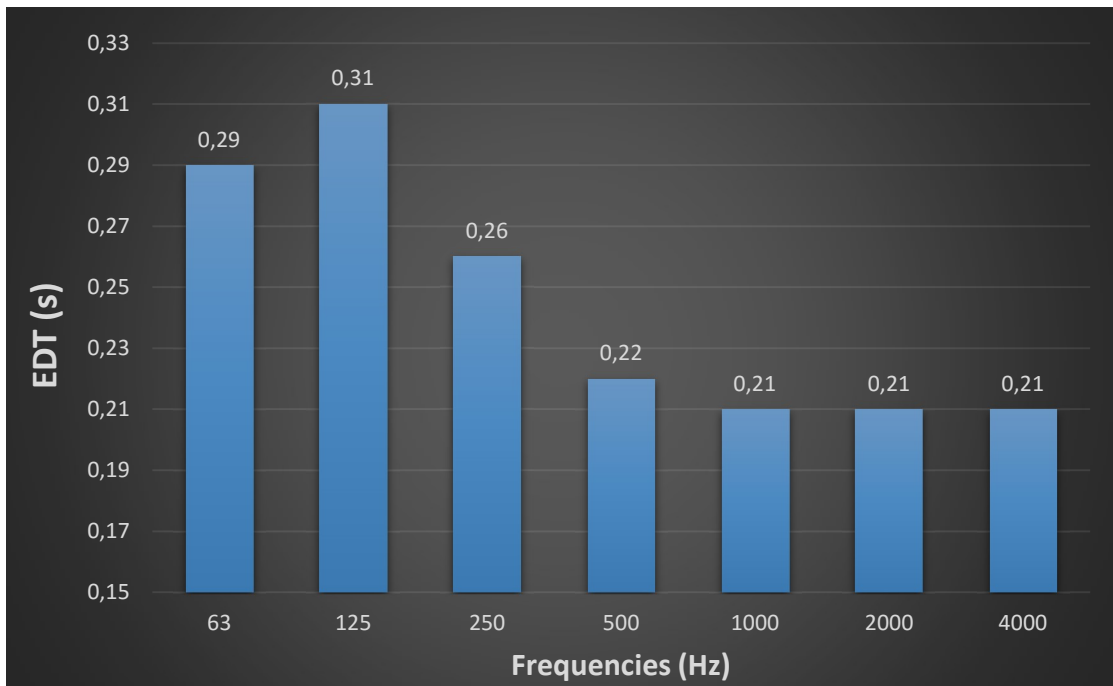
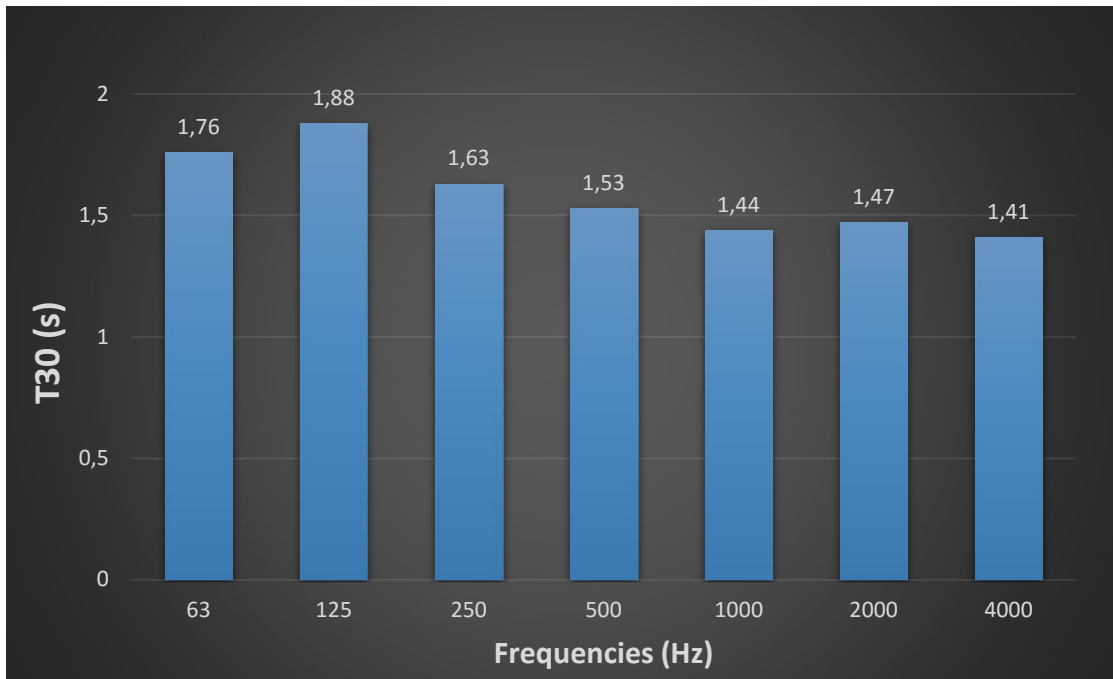




F.5.7. Κλίση -20°







F.5.8. Κλίση -30°

