



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 πρόωρης και της καθυστερημένης 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 πρόωρης ενέργειας, ενώ η καθυστερημένη 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 πρόωρης και της καθυστερημένης 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	Εισαγωγή	1
2	Βιβλιογραφική Αναδρομή	2
3	Πειραματική Μεθοδολογία και Πειραματική Διαδικασία	15
3.1	Επιλογή φυσικών κριτηρίων	15
3.2	Το προσομοιωμένο ηχητικό πεδίο	15
4	Αποτελέσματα	27
4.1	Εύρος Σκηνής	27
4.2	Ύψος οροφής σκηνής	32
4.3	Γωνία πλαϊνών τοίχων σκηνής	37
4.4	Κλίση ανακλαστήρα οροφής	43
4.5	Κλίση πίσω τοίχου σκηνής	49
5	Ερμηνεία και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	56
6	Συμπεράσματα	63
7	Βιβλιογραφία	65

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 8

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

Πίνακας 3.2.1 18

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	21
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	21
Γράφημα 4.1.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 14m.....	27
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.....	28
Γράφημα 4.1.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 12m.....	28
Γράφημα 4.1.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 10m.....	29
Γράφημα 4.1.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 10m.....	29
Γράφημα 4.1.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 8m.....	30
Γράφημα 4.1.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 8m.....	30
Γράφημα 4.1.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 6m.....	31
Γράφημα 4.1.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 6m.	31

Γράφημα 4.2.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 7m.	32
Γράφημα 4.2.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 7m.	32
Γράφημα 4.2.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 6m.	33
Γράφημα 4.2.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 6m.	33
Γράφημα 4.2.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 5m.	34
Γράφημα 4.2.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 5m.	34
Γράφημα 4.2.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 4m.	35
Γράφημα 4.2.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 4m.	35
Γράφημα 4.2.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 3m.	36
Γράφημα 4.2.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 3m.	36
Γράφημα 4.3.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 35°.	37
Γράφημα 4.3.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 35°.	37
Γράφημα 4.3.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 24°.	38
Γράφημα 4.3.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 24°.	38

Γράφημα 4.3.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 15°	39
Γράφημα 4.3.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 15°	39
Γράφημα 4.3.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 0°	40
Γράφημα 4.3.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 0°	40
Γράφημα 4.3.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις -15°	41
Γράφημα 4.3.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις -15°	41
Γράφημα 4.3.11 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις -25°	42
Γράφημα 4.3.12 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις -25°	42
Γράφημα 4.4.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 20°	43
Γράφημα 4.4.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 20°	43
Γράφημα 4.4.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 15°	44
Γράφημα 4.4.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 15°	44
Γράφημα 4.4.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 10°	45
Γράφημα 4.4.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 10°	45

Γράφημα 4.4.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 0°	46
Γράφημα 4.4.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 0°	46
Γράφημα 4.4.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -10°	47
Γράφημα 4.4.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -10°	47
Γράφημα 4.4.11 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -15°	48
Γράφημα 4.4.12 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -15°	48
Γράφημα 4.5.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 30°	49
Γράφημα 4.5.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 30°	49
Γράφημα 4.5.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 20°	50
Γράφημα 4.5.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 20°	50
Γράφημα 4.5.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 10°	51
Γράφημα 4.5.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 10°	51
Γράφημα 4.5.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 0°	52
Γράφημα 4.5.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 0°	52

Γράφημα 4.5.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -10°	53
Γράφημα 4.5.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -10°	53
Γράφημα 4.5.11 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -20°	54
Γράφημα 4.5.12 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -20°	54
Γράφημα 4.5.13 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -30°	55
Γράφημα 4.5.14 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις -30°	55
Γράφημα 5.1 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του εύρους της σκηνης	56
Γράφημα 5.2 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του εύρους της σκηνης	56
Γράφημα 5.3 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του ύψους της οροφής της σκηνης	57
Γράφημα 5.4 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του ύψους της οροφής της σκηνης	57
Γράφημα 5.5 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης των πλαϊνών τόχων της σκηνης	58
Γράφημα 5.6 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης των πλαϊνών τόχων της σκηνης	58
Γράφημα 5.7 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του ανακλαστήρα οροφής της σκηνης	59
Γράφημα 5.8 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του ανακλαστήρα οροφής της σκηνης	59

Γράφημα 5.9 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του τοίχου πίσω από τη σκηνή 60

Γράφημα 5.10 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000Hz σε σχέση με τις μεταβολές του τοίχου πίσω από τη σκηνή 60

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 3.2.1 Αίθουσα ‘Δημήτρης Μητρόπουλος’	16
Εικόνα 3.2.2 Αίθουσα ‘Δημήτρης Μητρόπουλος’	16
Εικόνα 3.2.3 Αίθουσα ‘Δημήτρης Μητρόπουλος’. Βασικές διαστάσεις της σκηνής (τομή).....	17
Εικόνα 3.2.4 Αίθουσα ‘Δημήτρης Μητρόπουλος’. Βασικές διαστάσεις της σκηνής (κάτοψη).....	17
Εικόνα 3.2.5 Θέση πηγής-παραλήπτη στη σκηνή	19
Εικόνα 3.2.6 Μεταβολές του εύρους σκηνής (προοπτικό μοντέλο).	22
Εικόνα 3.2.7 Μεταβολές του εύρους σκηνής (κάτοψη). Το εύρος (W_{rs}) ορίστηκε στα 6m, 8m, 10m, 12m και 14m.....	22
Εικόνα 3.2.8 Μεταβολές στο ύψος οροφής (προοπτικό μοντέλο).....	23
Εικόνα 3.2.9 Μεταβολές στο ύψος οροφής (τομή). Το ύψος (H) ορίστηκε στα 3m, 4m, 5m, 6m και 7m.....	23
Εικόνα 3.2.10 Μεταβολές στην κλίση των πλαϊνών τοίχων σκηνής (προοπτικό μοντέλο)	24
Εικόνα 3.2.11 Μεταβολές στην κλίση των πλαϊνών τοίχων σκηνής (κάτοψη). Η γωνία (Angle) ορίστηκε στις 35°, 24°, 15°, 0°, -15° και -25°.	24
Εικόνα 3.2.12 Μεταβολές στην κλίση του ανακλαστήρα οροφής (προοπτικό μοντέλο)	25
Εικόνα 3.2.13 Μεταβολές στην κλίση του ανακλαστήρα οροφής (τομή). Η γωνία (Tilt) ορίστηκε στις 20°, 15°, 10°, 0°, -10° and -15°.	25
Εικόνα 3.2.14 Μεταβολές στην κλίση του τοίχου πίσω από τη σκηνή (προοπτικό μοντέλο).....	26
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°.	26

1 Εισαγωγή

Ο σχεδιασμός της σκηνής και οι επιρροές του στην ακουστική της σκηνής είναι σχετικά καινούρια στο χώρο στην ακουστική αιθουσών. Ένα ολοκληρωμένο έργο στο οποίο συνοψίστηκαν τα κύρια αποτελέσματα προηγούμενων ερευνών, δημοσιεύθηκε το έτος 2010 από τον Gade [1]. Μετά από διάφορες έρευνες, είτε εργαστηριακές με τη χρήση συνθετικών ηχητικών πεδίων, είτε σε υπάρχουσες αίθουσες μουσικής προτάθηκαν διάφορα ακουστικά κριτήρια που αφορούν τη σκηνή. Εκτός από τα ακουστικά κριτήρια, πραγματοποιήθηκαν διάφορα τεστ αξιολόγησης για την υποκειμενική αντίληψη των μουσικών. Έτσι, προτάθηκαν σχέσεις μεταξύ των κριτηρίων της ακουστικής της σκηνής και τις ακουστικές αντιλήψεις. Υπάρχει η ανάγκη να βρεθούν οι νομοτελειακές τάσεις των πιο σημαντικών (υποκειμενικά) κριτηρίων της ακουστικής της σκηνής (τα οποία αναγράφονται στη βιβλιογραφία) σε σχέση με το σχεδιασμό της σκηνής. Η διερεύνηση του παραπάνω ερωτήματος έχει αποτελέσει το αντικείμενο μιας έρευνας [2], η οποία πραγματοποιήθηκε με τη χρήση ψηφιακής προσομοίωσης.

2 Βιβλιογραφική Αναδρομή

Τα φυσικά κριτήρια που αφορούν την ακουστική της σκηνής, άρχισαν να αναπτύσσονται στα τέλη της δεκαετίας του 1970 [3]. αυτά αφορούν το κλασσικό ρεπερτόριο. Ένας κατάλογος μερικών από αυτά τα κριτήρια παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.1.

Η έρευνα του Gade [4], [5], [6] βρίσκεται ανάμεσα στις πρώτες που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να προταθούν κάποια φυσικά ακουστικά κριτήρια της σκηνής. Ο παραπάνω συγγραφέας πραγματοποίησε συνέντευξη σε 32 έμπειρους μουσικούς κλασσικού ρεπερτορίου στη Σκανδιναβία (ερμηνευτές, πιανίστες, μαέστρους και οργανοπαίχτες διάφορων ορχηστρικών οργάνων), έτσι ώστε να περιγράψει ως «καλές» ή «κακές» τις συνθήκες που αφορούν την ακουστική της σκηνής. Από αυτές τις συνεντεύξεις προέκυψε ένα πλήθος πτυχών, τις οποίες ο Gade ονόμασε «Υποκειμενικές Παραμέτρους» (Subjective Parameters) και είναι οι ακόλουθες: *Αντήχηση (Reverberance)*, *Υποστήριξη (Support)*, *Ηχώχρωμα (Timbre)*, *Δυναμική (Dynamics)*, *Άκουσμα αναμεταξύ των μουσικών (Hearing Each Other)*, και ο *Χρόνος Καθυστέρησης (Time Delay)*. Το 1989, ο Gade πρότεινε την παράμετρο ST (Support) ως την παράμετρο σκηνής για την ακουστική υποστήριξη ενός ανεξάρτητου μουσικού και την παράμετρο EEL (Early Ensemble Level) ως την παράμετρο σκηνής για συνθήκες μουσικού συνόλου (ορχήστρας), βασιζόμενος σε ερωτηματολόγια και συνεντεύξεις που πραγματοποιήθηκαν σε μουσικούς, καθώς και με βάση πειράματα στο χώρο και εργαστηριακές προσομοιώσεις. Αργότερα, ο Gade [7] εισηγήθηκε τρεις αναθεωρημένες εκδοχές της παραμέτρου ST: STearly (για την αντίληψη μουσικού συνόλου), STlate (για την αντίληψη της αντήχησης) και STtotal (για την ακουστική υποστήριξη). Από τα εργαστηριακά πειράματα που πραγματοποίησε, διαπίστωσε πως η καθυστέρηση του απευθείας ήχου στην ορχήστρα, δεν θα πρέπει να υπερβαίνει τα 20ms, ούτως ώστε να επικρατούν καλές ακουστικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, ο Gade διαπίστωσε πως ανάλογα με το μουσικό όργανο δημιουργούνται διαφορετικά κατώτατα όρια της αντίληψης των πρόωρων ηχητικών ανακλάσεων. Για τα πνευστά, το όριο φάνηκε να αντιστοιχεί σε τιμές του STearly μεγαλύτερες των -15dB, ενώ για τα έγχορδα (βιολί και τσέλο) σε τιμές του STearly χαμηλότερες από -9dB. Έτσι, ο Gade κατέληξε στο συμπέρασμα ότι τα έγχορδα είναι πιθανό να μην επωφελούνται από τις πρώτες ανακλάσεις (μεταξύ των 20 και 100ms) σε αίθουσες με χαμηλό STearly· είναι πιο πιθανό να επωφελούνται από τις ανακλάσεις που δημιουργούνται από το δάπεδο και τον τοίχο, εφόσον τοποθετούνται αρκετά κοντά σε αυτόν. Οι μουσικοί που παίζουν φλάουτο, και ίσως οι μουσικοί των υπόλοιπων πνευστών οργάνων, είναι πιο πιθανό να επωφελούνται από τις πρώτες ανακλάσεις [4]. Τόσο ο Gade, όσο και ο Marshall διαπίστωσαν ότι η αντήχηση δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο για την αντίληψη του συνόλου, αλλά προτιμάται μεταξύ των μονωδών [3], [4].

Όσον αφορά τα πειράματα στο χώρο [5], ο Gade διαπίστωσε ότι μόνο η παράμετρος STearly συσχετίζεται με τις υποκειμενικές αντιλήψεις της ‘υποστήριξης’ (support) και του ‘μουσικού συνόλου’ (ensemble), παρόλο που η παράμετρος EEL προτάθηκε αρχικά να μετρείται για τις συνθήκες ορχήστρας. Επίσης, διαπίστωσε ότι οι πρώτες ανακλάσεις είναι κρίσιμες για την επίτευξη της υποστήριξης. Επιπρόσθετα, η χωρητικότητα της σκηνής αποτελεί σημαντικό στοιχείο για τις μετρήσεις σύμφωνα με τον Gade [7].

Πιο κάτω, αναφέρονται οι συστάσεις του Gade για τη μέτρηση της παραμέτρου υποστήριξης (ST) [7]:

- Στη σκηνή θα πρέπει να υπάρχουν καρέκλες και αναλόγια
- Θα πρέπει να απομακρύνονται όλα τα αντικείμενα που βρίσκονται σε ακτίνα 2 μέτρα από τους μετασχηματιστές.
- Οι μετασχηματιστές θα πρέπει να τοποθετούνται σε απόσταση τουλάχιστον 4 μέτρα από οποιαδήποτε ανακλώμενη επιφάνεια της σκηνής
- Για σχετικά μικρές σκηνές, το όριο των 20 ms θα πρέπει να μειώνεται και όλα τα έπιπλα να απομακρύνονται (αφού πολλές ανακλάσεις θα φτάσουν πριν τα 20ms)
- Η απόσταση μεταξύ της ηχητικής πηγής και του μικροφώνου (παραλήπτη) να ορίζεται στο 1 μέτρο καθώς και το ύψος και των δύο να είναι στο 1 μέτρο πάνω από το επίπεδο της σκηνής
- Χρειάζεται βαθμονόμηση στις ζώνες συχνοτήτων όπου η ηχητική πηγή δεν είναι επαρκώς παγκατευθυντική (βλ. [7] για περισσότερες πληροφορίες)

Αντίθετα με τις απόψεις του Gade, ο Dammerud στην εργασία του [8], διαπίστωσε μια υψηλή συσχέτιση τόσο της παραμέτρου Gearly (early strength) όσο και της παραμέτρου Glate (late strength) με την αντίληψη της αντήχησης (ελαφρώς ψηλότερη συσχέτιση από αυτή του STlate). Η εργασία του Dammerud συμπεριλάμβανε φυσικές μετρήσεις και υπολογισμούς σε σκηνές συμφωνικών ορχηστρών, χρησιμοποιώντας πραγματικές αίθουσες, καθώς και μοντέλα κλίμακας και ψηφιακά μοντέλα. Επίσης, αυτή του η εργασία συμπεριλάμβανε τεστ αξιολόγησης για την υποκειμενική αντίληψη των μουσικών μέσω ερωτηματολογίων που διατέθηκαν σε διάφορες ορχήστρες.

Ο Dammerud, με βάση τους θεωρητικούς του υπολογισμούς και τα αποτελέσματα που εξήγαγε από τα μοντέλα κλίμακας, δημιούργησε ένα ψηφιακό ‘μοντέλο ορχήστρας’, το οποίο χρησιμοποίησε σε ψηφιακά μοντέλα, ούτως ώστε να διερευνήσει διάφορες παραμέτρους, όπως: το εύρος και το ύψος της σκηνής, το σχήμα και τις κλίσεις των ανακλαστών, καθώς και τη διάχυση των πλαϊνών τοίχων. Διαπιστώθηκε ότι οι στενές σκηνές με διεύρυνση των πλαϊνών τοίχων και οι ψηλές σκηνές προσφέρουν καλές ακουστικές συνθήκες· προσφέρουν ισορροπία (σε χρόνο και ένταση) μεταξύ των πρώτων ανακλάσεων που προέρχονται από διαφορετικές ομάδες μουσικών οργάνων, καθώς και ισορροπία μεταξύ των πρώτων και των καθυστερημένων ανακλάσεων· επίσης, η αντήχηση στη σκηνή επωφελείται από την παραπάνω γεωμετρία, αφού επιτυγχάνεται η απαραίτητη διαύγεια (clarity).

Σχετικά με τα τεστ αξιολόγησης της υποκειμενικής αντίληψης των μουσικών, ο Dammerud έστειλε ερωτηματολόγια σε μουσικούς-μέλη ορχήσων συμφωνικών ορχηστρών (δύο στη Νορβηγία και έξι στο Ηνωμένο Βασίλειο)· 180 μουσικοί αποκρίθηκαν. Τα ερωτηματολόγια αυτά, αναφέρονταν στην ακουστική της σκηνής 45 αιθουσών μουσικής. Ο Dammerud κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ένα συγκεκριμένο ποσοστό της αντήχησης είναι σημαντικό για την ακουστική της σκηνής. Διαπιστώθηκε επίσης ότι μερικοί μουσικοί προτιμούν ανακλαστές οροφής. Ακόμη, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μια γενική προτίμηση σε ψηλές οροφές στη σκηνή.

Από τις 45 αίθουσες, ο Dammerud επέλεξε τα υποκειμενικά δεδομένα 12 αιθουσών για τη διερεύνηση των συσχετίσεων μεταξύ του ΟΑΙ (Overall Acoustic Impression) και των διαθέσιμων αντικειμενικών παραμέτρων. Δεν παρατηρήθηκε καμία σημαντική συσχέτιση με τις φυσικές ακουστικές παραμέτρους. Παρ' όλ' αυτά, διαπιστώθηκε μια θετική συσχέτιση του ΟΑΙ με τις στενές σκηνές και τις ψηλές οροφές. Αυτή η διαπίστωση, επιβεβαιώθηκε και σε μια μεταγενέστερη εργασία του Dammerud [8], όπου ερωτηματολόγια ίδιου τύπου είχαν σταλεί σε μέλη μιας τοπικής ορχήστρας, έτσι ώστε να αξιολογηθούν 8 αίθουσες μουσικής στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Σε μια άλλη μελέτη, ο Dammerud [9] προτείνει τις ακόλουθες φυσικές παραμέτρους: ST, RT, G, C80, Gearly και Glate, τόσο για την ακουστική σκηνής, όσο και για την ακουστική στη θέση του ακροατηρίου.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Dammerud, ο Gade [1] επιχείρησε να αναλύσει εκ νέου τα δικά του δεδομένα [5]. Ο παραπάνω συγγραφέας κατέληξε στο συμπέρασμα ότι κάποιες σημαντικές γεωμετρικές παράμετροι από τις έρευνες του Dammerud (εύρος σκηνής και ύψος οροφής), δεν βρέθηκαν να είναι σημαντικές στην μελέτη του Gade· επιπρόσθετα, κάποιες υποκειμενικά σημαντικές φυσικές παράμετροι που διαπιστώθηκαν στα τεστ αξιολόγησης του Dammerudm δεν επιβεβαιώθηκαν ως τόσο σημαντικές στις εργασίες του Gade.

Κάποιες άλλες, παρόμοιες μελέτες οι οποίες είχαν σα στόχο τη διερεύνηση της ακουστικής της σκηνής, χρησιμοποιώντας είτε εργαστηριακά πειράματα (συνθετικά ηχητικά πεδία), είτε πειράματα στο χώρο, περιγράφονται πιο κάτω.

Οι Meyer και Biassoni de Serra [10], βασιζόμενοι στα εργαστηριακά πειράματα που πραγματοποίησαν, δημοσίευσαν αποτελέσματα σχετικά με την ανεξαρτησία του ορίου της αντίληψης του ήχου για τους μουσικούς που παίζουν διάφορα όργανα. Ο Meyer χρησιμοποίησε τα αποτελέσματα αυτά και εισηγήθηκε μια μετατροπή των ανακλαστών πάνω από τους μουσικούς, ώστε να επιτυγχάνεται καλύτερη ισορροπία μεταξύ των 'αδύναμων' εγχόρδων και των 'δυνατών' πνευστών οργάνων τα οποία τοποθετούνται στο πίσω μέρος της σκηνής.

Μια τεράστια συνεισφορά στο χώρο της ακουστικής της σκηνής που αξίζει να αναφερθεί αποτελεί η εργασία του Naylor [11]. Από τα εργαστηριακά πειράματα που πραγματοποίησε, διαπίστωσε ότι τόσο η ένταση του ήχου από το «μουσικό όργανο του ίδιου μουσικού», όσο και η ένταση του ήχου από «την υπόλοιπη ορχήστρα» θα μπορούσε να ακουστεί επαρκώς, εάν η ένταση του ήχου «της υπόλοιπης ορχήστρας» κυμαίνεται μεταξύ των -15dB και -8dB σε σχέση με αυτή που παράγεται από «τον ίδιο μουσικό».

Μία από τις πιο πρωτοποριακές εργασίες είναι αυτή της Ueno [12], [13]. Χρησιμοποίησε ένα ηχητικό σύστημα προσομοίωσης 6 καναλιών, ούτως ώστε να αξιολογήσει την ακουστική της σκηνής από διάφορους μουσικούς. Η Ueno διαπίστωσε ότι για τους μονωδούς, η πρόωρη ενέργεια συχνά καλύπτεται από τον απ' ευθείας ήχο. Διαπίστωσε επίσης ότι το πολύ υψηλό επίπεδο της ηχητικής ενέργειας (που αντιστοιχεί στο ST_{early} σε τιμές από -7dB μέχρι -10dB) δεν επωφελεί τους περισσότερους μουσικούς διότι καλύπτει την αντήχηση. Για μουσικά σύνολα (δύο μουσικοί), διαπίστωσε ότι το ψηλότερο επίπεδο της πρόωρης ενέργειας δεν προσφέρει πάντα καλή ακουστική για τα σύνολα. Τέλος, ένας σχετικά μεγάλος χρόνος αντήχησης ήταν προτιμότερος από τους περισσότερους μουσικούς.

Παρά τα πλεονεκτήματά που προσφέρουν τα εργαστηριακά πειράματα, έχουν και κάποια μειονεκτήματα. Αποτυγχάνουν να αναπαραστήσουν την πολυπλοκότητα της πραγματικής κατάστασης στη σκηνή. Για την αντιμετώπιση αυτού του μειονεκτήματος, αρκετοί ερευνητές ασχολήθηκαν με πειράματα σε υπάρχουσες αίθουσες με τους μουσικούς επί σκηνής.

Για παράδειγμα, ο Chiang [14] πραγματοποίησε τέτοια πειράματα, με τη βοήθεια μουσικών οι οποίοι έπαιξαν σε πέντε διαφορετικές αίθουσες. Από τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε υψηλή συσχέτιση μεταξύ όλων των κλιμάκων απόκρισης, όπως διαπίστωσε και ο Gade στις έρευνες του. Ο Chiang επίσης, παρατήρησε μέτριες συσχετίσεις μεταξύ των αντιλήψεων *άκουσμα του ενός οργάνου/γενική εντύπωση* και των παραμέτρων των πρώτων ανακλάσεων, ST_{early} , T_{20} και ED_{100} . Η συσχέτιση με τις παραμέτρους αυτές, παρουσιάστηκε αρνητική. Τέλος, διαπίστωσε ότι η βέλτιστη τιμή του ST_{early} είναι περίπου γύρω στα -12dB, την ίδια τιμή που βρήκε ο Gade στις δικές του έρευνες για πλήρεις ορχήστρες.

Ο Cederlöf [15] έστειλε ερωτηματολόγια σε 5 ορχήστρες στη Σουηδία και ρώτησε τα μέλη της να σχολιάσουν τις προτιμήσεις τους στην ακουστική των δικών τους μόνο αιθουσών. Η προτιμότερη αίθουσα ήταν αυτή που είχε το υψηλότερο ST_{early} . Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι προτιμήθηκαν οι αίθουσες που αποτελούνταν από σχετικά μικρές σκηνές και ψηλή οροφή, όπως και οι αίθουσες που είχαν τοποθετημένους ανακλαστήρες ψηλά πάνω από τη σκηνή.

Στη Νέα Ζηλανδία, ο Sanders [16] διαπίστωσε υψηλή συσχέτιση μεταξύ των υποκειμενικών αντιλήψεων. Η υψηλότερη συσχέτιση παρατηρήθηκε μεταξύ της 'υποστήριξης' (για μουσική δωματίου) και της 'γενικής αντίληψης'. Εκτός αυτού, δεν προτιμήθηκαν οι αίθουσες που είχαν χαμηλό χρόνο αντήχησης και χαμηλά επίπεδα αντήχησης.

Μια νέα αντικειμενική παράμετρος, LQ_{7-40} εισηγήθηκε από τους Luxembourg et al [17]. Η παράμετρος αυτή περιγράφει το είδος της διαύγειας (clarity) εξαιρουμένου του απ' ευθείας ήχου. Όμως, μετά από την αξιολόγηση των αντιλήψεων των μουσικών από μια πανεπιστημιακή ορχήστρα που έκανε περιοδεία σε 7 αίθουσες στην Ολλανδία δεν βρέθηκε να υπάρχει καλή συσχέτιση με την παράμετρο LQ_{7-40} , ούτε με κάποια άλλη παράμετρο, συμπεριλαμβανομένων και των ST_{early} και ST_{late} . Σε περαιτέρω ανάλυση [18], δεν έχει αναφερθεί καμία βελτίωση στις συσχετίσεις με τις αντιλήψεις των μουσικών.

Στην Ιταλία, ο Giannini [19], μετά την αξιολόγηση των αποκρίσεων 4 διαφορετικών ορχηστρών που έπαιξαν σε 5 αίθουσες μουσικής, διαπίστωσε ότι η αντήχηση σχετίζεται με την φυσική παράμετρο T_{20} . Επίσης, το ST_{early} φάνηκε να συσχετίζεται θετικά με το ηχώχρωμα (Timbre). Επιπρόσθετα, ο Giannini διαπίστωσε ότι η προτιμότερη από τις 5 αίθουσες ήταν αυτή που είχε μια σχετικά στενή σκηνή των 18m και με ανακλαστές τοποθετημένους στα 10m περίπου πάνω από τη σκηνή. Τέλος, αναφέρει ότι η αύξηση της γωνίας των πλαϊνών τοίχων στο Queens Hall στη Δανία, προκάλεσε μια αύξηση στις τιμές του ST_{early} [20].

Όσο αφορά την ακουστική της σκηνής και τα αρχιτεκτονικά στοιχεία, ο Dammerud [21] εισηγήθηκε το λόγο Ύψος/Πλάτος (H/W ratio). Η σημαντικότητα αυτού του λόγου διαπιστώθηκε επίσης σε προηγούμενες έρευνες. Όπως αναφέρει ο Gade [1], οι ψηλές και στενές σκηνές μειώνουν την καθυστέρηση των ανακλάσεων από τους πλαϊνούς τοίχους και επιτρέπουν τους απομακρυσμένους μουσικούς εγχόρδων που βρίσκονται στην κάθε πλευρά της σκηνής, να ακούν ο ένας τον άλλο. Επίσης, ο Gade σχολιάζει ότι οι ψηλές οροφές προφέρουν καλή αντίληψη της αντήχησης που βελτιώνει την ισορροπία μεταξύ των μελών της ορχήστρας.

Γενικά, υπάρχει μια προτίμηση σε ψηλούς λόγους H/W. Αυτή η προϋπόθεση υποστηρίζεται από διάφορους ερευνητές. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι Barron [22] και Jaffe [23], διαπίστωσαν μια προτίμηση για ύψος οροφής μεταξύ 7-10m, ενώ ο Gade εισηγείται ύψος οροφής 6-8m αν αυτό είναι δυνατό [4], [5]. Ο Meyer [24] στις δικές του έρευνες, βρήκε πως οι ψηλές σκηνές προτιμώνται από τους μαέστρους. Επίσης, μετά από προσομοιώσεις με σολίστες, βρέθηκε και πάλι να προτιμάται ο υψηλός λόγος H/W [25]. Ο Dammerud εξήγησε ότι οι ψηλές και στενές σκηνές δεν επιτρέπουν στα πνευστά όργανα να καλύπτουν σε ένταση τα έγχορδα, όπως γίνεται σε σκηνές με χαμηλότερο λόγο H/W. Και γι' αυτό το λόγο, υπάρχει η προτίμηση σε ψηλό λόγο H/W από τις ορχήστρες.

Στην εργασία του [1], ο Gade υπενθυμίζει ότι οι πρώτες ανακλάσεις επηρεάζουν τις συνθήκες *συνόλου*, ενώ οι καθυστερημένες ανακλάσεις επηρεάζουν την *υποστήριξη* μεταξύ των μουσικών, καθώς και την *αντήχηση*. Γι' αυτό το λόγο, εισηγήθηκε την πρακτική λύση της εγκατάστασης μικρότερων ανακλαστών πάνω από τη σκηνή, οι οποίοι θα ρυθμίζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του ρεπερτορίου από κάθε ορχήστρα.

Όπως είναι γνωστό, μεγάλη τιμή της αντήχησης σημαίνει έλλειψη διαύγειας. Διάφορες έρευνες που πραγματοποιήθηκαν σε σκηνές αιθουσών μουσικής δείχνουν πως η υπερβολική αντήχηση αποτελεί συνήθως πρόβλημα. Ο Gade [1] σημειώνει ότι σε μικρές αίθουσες με όγκο μικρότερο από $6000m^3$, ένας χρόνος αντήχησης πάνω από 1.6-1.8 δευτερόλεπτα θα μπορούσε να αποτελεί πρόβλημα. Σε μεγαλύτερες αίθουσες, όπως για παράδειγμα στην αίθουσα Aarhus με όγκο περίπου $15000m^3$, ένας χρόνος αντήχησης πάνω από 2 δευτερόλεπτα ήταν ελαφρώς προβληματικός για την ακουστική της σκηνής.

Με την ανάπτυξη της ψηφιακής τεχνολογίας, η μέθοδος των συνθετικών ηχητικών πεδίων τείνει να αντικατασταθεί από διάφορα ψηφιακά πειράματα· τα τελευταία, προφανώς, σε σχέση με τα συνθετικά ηχητικά πεδία, προσφέρουν το πλεονέκτημα ότι δίνουν τη δυνατότητα στον ερευνητή για ποικίλες μετατροπές στη

σκηνή και να πραγματοποιήσει ακουστικές μετρήσεις αντίστοιχα για κάθε μετατροπή, εύκολα και με μηδενικό κόστος. Επιπλέον, η προηγμένη ψηφιακή τεχνολογία προσφέρει ποιοτικό σήμα προσομοίωσης του ήχου· το τελευταίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εναλλακτική λύση στις συναυλίες και τα τεστ αξιολόγησης της αντίληψης των μουσικών, προφανώς με συγκριτική ευελιξία.

Την τελευταία δεκαετία, ανάμεσα στις λιγοστές μελέτες που ασχολήθηκαν με τη διερεύνηση της σημαντικότητας των φυσικών κριτηρίων της ακουστικής της σκηνής, χρησιμοποιώντας ψηφιακή προσομοίωση, είναι η εργασία των Chiang και Shu [2]. Αυτοί οι συγγραφείς διερεύνησαν τις νομοτελειακές τάσεις της πρόωρης και της καθυστερημένης ενέργειας, ανάλογα με τη θέση των μουσικών και τη γεωμετρία της σκηνής. Τα πειράματά τους διεξήχθησαν σε μια εικονική αίθουσα, όπου ο χρόνος αντήχησης κυμαινόταν ανάμεσα στα 0.9 και 1.9 δευτερόλεπτα, και διερευνήθηκαν 72 μετασχηματισμοί. Τα φυσικά χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι η γεωμετρία της σκηνής, τα υλικά των επιφανειών γύρω από τη σκηνή και η εγκατάσταση ανακλαστικών επιφανειών. Επιπρόσθετα, διερευνήθηκαν δύο διαφορετικές θέσεις ηχητικής πηγής και παραλήπτη στην εικονική σκηνή, καθώς και 2 διαφορετικοί προσανατολισμοί της πηγής για κάθε μία από τις θέσεις αυτές. Τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας παρουσιάζονται πιο κάτω.

Διαπιστώθηκε ότι η πρόωρη ενέργεια συσχετίζεται με τον όγκο της σκηνής, τις γωνίες των πλαϊνών τοίχων της σκηνής, τη μετακίνηση της ηχητικής πηγής, καθώς και την εισαγωγή ανακλαστήρων για τις οκταβικές ζώνες των 1000 και 2000Hz.

Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η καθυστερημένη ενέργεια συσχετίζεται κυρίως με τα υλικά των επιφανειών γύρω από τη σκηνή και την κλίση των πλαϊνών τοίχων της σκηνής για τις οκταβικές ζώνες των 1000 και 2000Hz.

Η εργασία του Chiang βασίστηκε σε μια εικονική αίθουσα, η οποία συγκρίθηκε με ένα μοντέλο κλίμακας· μια διερεύνηση των μετατροπών της σκηνής μιας υπάρχουσας αίθουσας χρησιμοποιώντας ψηφιακή προσομοίωση θα έδινε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

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. 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

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		
	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]

CATEGORY	ASSOCIATED 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}	$10 \log \frac{\int_0^{80} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p_{10}^2(t) dt} = G + 10 \log \frac{1}{1 + 10^{c_{80}/10}} [dB]$ <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		
	PERCEIVED SUPPORT	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]
		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}

contd (6 of 7)

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		
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 Πειραματική Μεθοδολογία και Πειραματική Διαδικασία

3.1 Επιλογή φυσικών κριτηρίων

Αρχικά, τα φυσικά κριτήρια που αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία, ταξινομήθηκαν (Πίνακας 2.1). Έπειτα, τα κριτήρια αυτά, επιλέχθηκαν στην παρούσα ανάλυση, έτσι ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά για κάθε κατηγοριοποίηση και εύκολο να μετρηθούν. Επίσης, στον Πίνακα 2.1, δίνονται οι βέλτιστες τιμές, οι προτιμώμενες τιμές και διακυμάνσεις του κάθε κριτηρίου.

3.2 Το προσομοιωμένο ηχητικό πεδίο

Στην παρούσα διπλωματική, υιοθετείται η ψηφιακή προσομοίωση της γεωμετρίας της σκηνής. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα έναντι οποιασδήποτε άλλης παρόμοιας μεθόδου, ότι επιτρέπει την γρήγορη και με μηδενικό κόστος μεταβλητότητα της σκηνής. Ένας από τους περιορισμούς κάθε μεθόδου που χρησιμοποιεί προσομοίωση είναι ότι δεν μπορεί να αναπαρασταθεί πλήρως η πολυπλοκότητα του πραγματικού ηχητικού πεδίου· ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα που εξάγονται από έρευνες οι οποίες χρησιμοποιούν ακουστική προσομοίωση, χρειάζεται να επιβεβαιωθούν σε πραγματικές συνθήκες. Στην παρούσα έρευνα χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πρόγραμμα *Odeon Room Acoustics software* (Παράρτημα Α).

Για τις εικονικές μετρήσεις στη σκηνή, χρησιμοποιήθηκε μόνο μία θέση ηχητικής πηγής και παραλήπτη αντίστοιχα. Η υπόθεση αυτή ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, αφού μόνο σχετικά μικρές σκηνές λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα έρευνα.

Σκηνές μικρού μεγέθους μπορούν να φιλοξενήσουν μικρά μουσικά σύνολα, όπως είναι η ορχήστρα δωματίου οι οποίες έχουν μαέστρο, αλλά και μουσικά σύνολα χωρίς μαέστρο, όπως είναι η ορχήστρα jazz κτλ. Το τελευταίο καθιστά τον ρόλο του περιβλήματος της σκηνής πολύ σημαντικό, αφού το περίβλημα αυτό καλείται να συντονίσει την ορχήστρα και τα μέλη της μεταξύ τους και γενικά να αντικαταστήσει το ρόλο του μαέστρου.

Πραγματοποιήθηκε μια ακουστική ανάλυση χρησιμοποιώντας το λογισμικό *Odeon 10.1*, το οποίο κυκλοφόρησε από το Πολυτεχνείο της Δανίας (Παράρτημα Α). Στην παρούσα εργασία προσομοιάστηκε το γεωμετρικό σχήμα μιας υπάρχουσας αίθουσας, η οποία είναι η αίθουσα 'Δημήτρης Μητρόπουλος' (Εικόνα 3.2.1, Εικόνα 3.2.2) (Παράρτημα Β), η οποία βρίσκεται στο 'Μέγαρο Μουσικής Αθηνών' στην

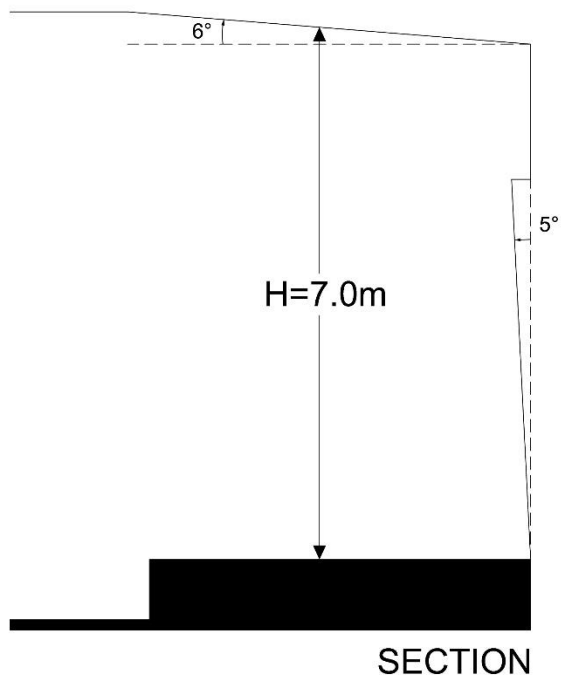
Αθήνα. Οι εικόνες 3.2.3 και 3.2.4 δείχνουν τα αρχικά βασικά αρχιτεκτονικά στοιχεία της σκηνής της προσομοιωμένης αίθουσας.



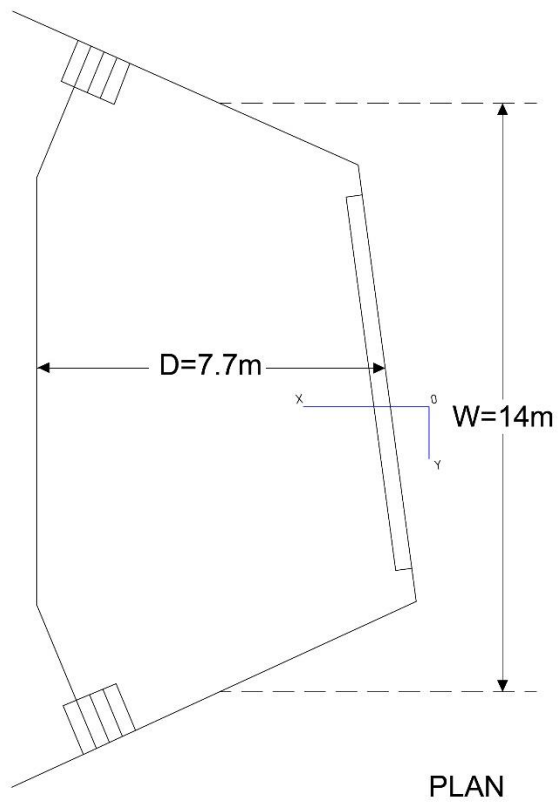
Εικόνα 3.2.1 Αίθουσα 'Δημήτρης Μητρόπουλος'.



Εικόνα 3.2.2 Αίθουσα 'Δημήτρης Μητρόπουλος'.



Εικόνα 3.2.3 Αίθουσα 'Δημήτρης Μητρόπουλος'. Βασικές διαστάσεις της σκηνής (τομή).

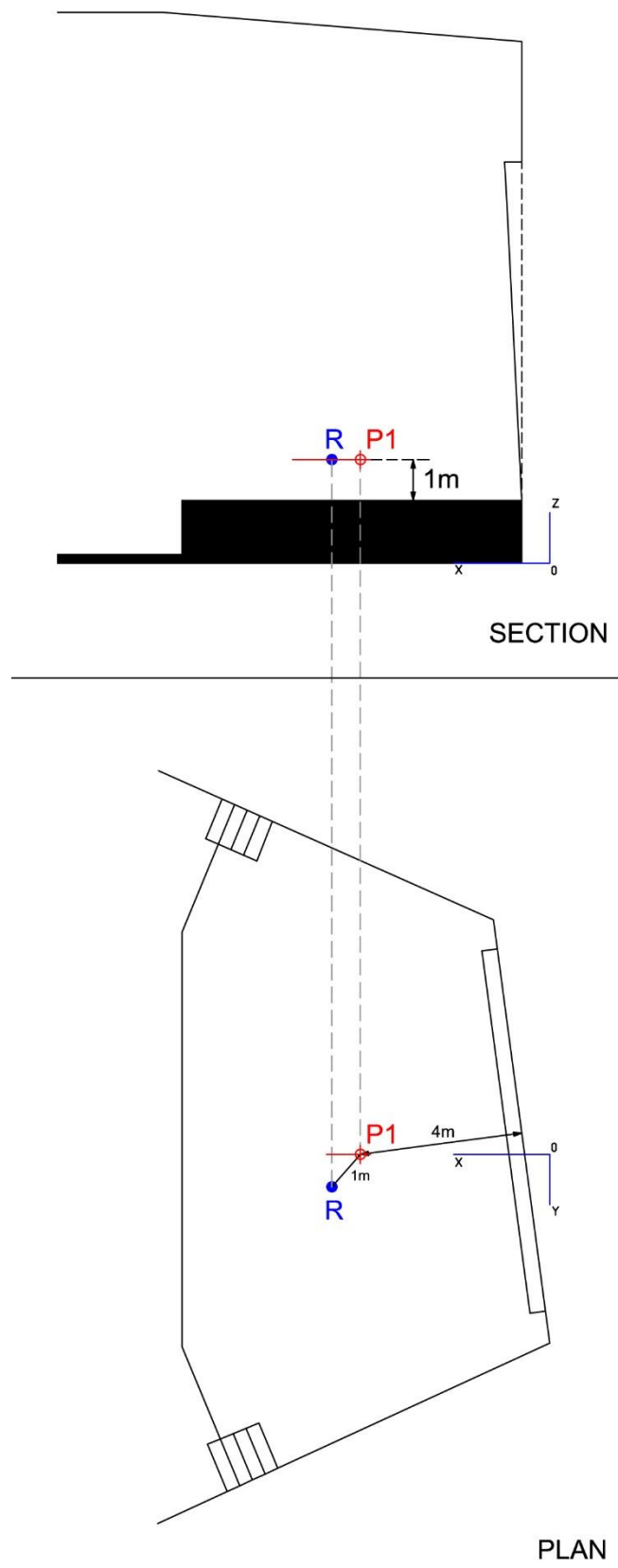


Εικόνα 3.2.4 Αίθουσα 'Δημήτρης Μητρόπουλος'. Βασικές διαστάσεις της σκηνής (κάτοψη).

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τον παραλήπτη (receiver) να βρίσκεται σε απόσταση 1m από την ηχητική πηγή (source) σε μια κεντρική θέση στη σκηνή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.2.5. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν οι περισσότερες από τις ακουστικές παραμέτρους που παρέχονται από το λογισμικό 'Odeon': αυτές είναι: ST_{early} (early support), ST_{late} (late support), G (strength), C_{80} (clarity stage), T_{30} (κλασσικός χρόνος αντήχησης), και EDT (Early Decay Time). Εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους τις οποίες παρέχει το 'Odeon' μετρήθηκαν δύο επιπλέον παράμετροι. Οι G_{early} (early strength) και G_{late} (late strength) υπολογίστηκαν βάσει των παραμέτρων G και C_{80} (Πίνακας 2.1). Η προσθήκη των δύο αυτών παραμέτρων έγινε λόγω των εισηγήσεων του Dammerud [9]. Αυτός ο συγγραφέας διαπίστωσε ότι οι παράμετροι G_{early} και G_{late} παρουσίασαν καλύτερη συσχέτιση με την υποκειμενική αντίληψη, σε σχέση με τις παραμέτρους υποστήριξης (ST_{early} και ST_{late}). Πιο κάτω, ο πίνακας 3.2.1. δείχνει τις ακουστικές παραμέτρους και τα όρια αντίληψής τους όπως δίνονται από τον Bork [35] και τον Bradley [36]. Αν η διαφορά δύο τιμών είναι μικρότερη από το όριο αντίληψης, τότε η διαφορά δεν είναι αντιληπτή στο αυτί.

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 %

Πίνακας 3.2.1 Πίνακας ακουστικών παραμέτρων με τα αντίστοιχά τους όρια αντιληπτής διαφοράς, όπως δίνονται από τους Bork [35] και Bradley [36].



Εικόνα 3.2.5 Θέση πηγής-παραλήπτη στη σκηνή.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε παραγοντική ανάλυση για την περιγραφή της μεταβλητότητας ανάμεσα στις παρατηρούμενες μεταβλητές (οκτώ ακουστικές παράμετροι), ώστε να εξαχθεί το χαμηλότερο δυνατό πλήθος κάποιων μη παρατηρούμενων μεταβλητών που ονομάζονται παράγοντες. Η Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (Principal Component Analysis) βασιζόμενη στα δεδομένα που εξήχθησαν από τις διάφορες μεταβολές στη σκηνή, έδειξε μόνο δύο κοινούς παράγοντες ανάμεσα στις οκτώ ακουστικές παραμέτρους που διερευνήθηκαν και οι οποίες αναφέρθηκαν πιο πάνω (Παράρτημα Γ και Παράρτημα Δ).

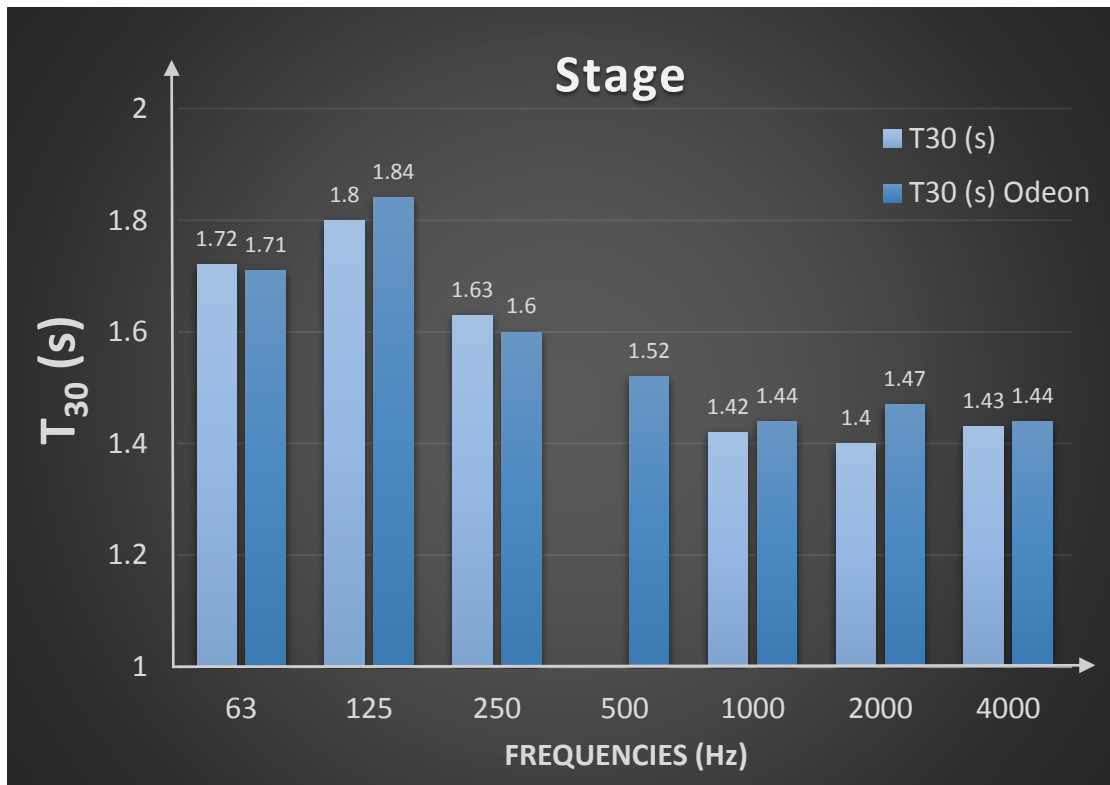
Λόγω του ότι η έρευνα κυμάνθηκε στα πλαίσια μιας διπλωματικής εργασίας, στην παρούσα εργασία αναλύονται τα αποτελέσματα των δύο παραμέτρων υποστήριξης, ST_{early} και ST_{late} . Η επιλογή των δύο αυτών παραμέτρων προς ανάλυση είναι αιτιολογημένη, αφού με αυτό τον τρόπο περιγράφονται και οι δύο παράγοντες (πρώρη και καθυστερημένη ενέργεια αντίστοιχα), οι οποίοι προέκυψαν από την Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών. Για τις υπόλοιπες ακουστικές παραμέτρους, μπορείτε να ανατρέξετε στα Παραρτήματα Ε και ΣΤ.

Η συχνότητα Schroeder (Schroeder frequency) πάνω από την οποία οι ακουστικές παράμετροι θεωρούνται αξιόπιστες, για την παρούσα αίθουσα που εξετάστηκε είναι 45Hz ($fc = 2000 * \sqrt{T/V}$, όπου V: ο όγκος της αίθουσας, και T: ο χρόνος αντήχησης).

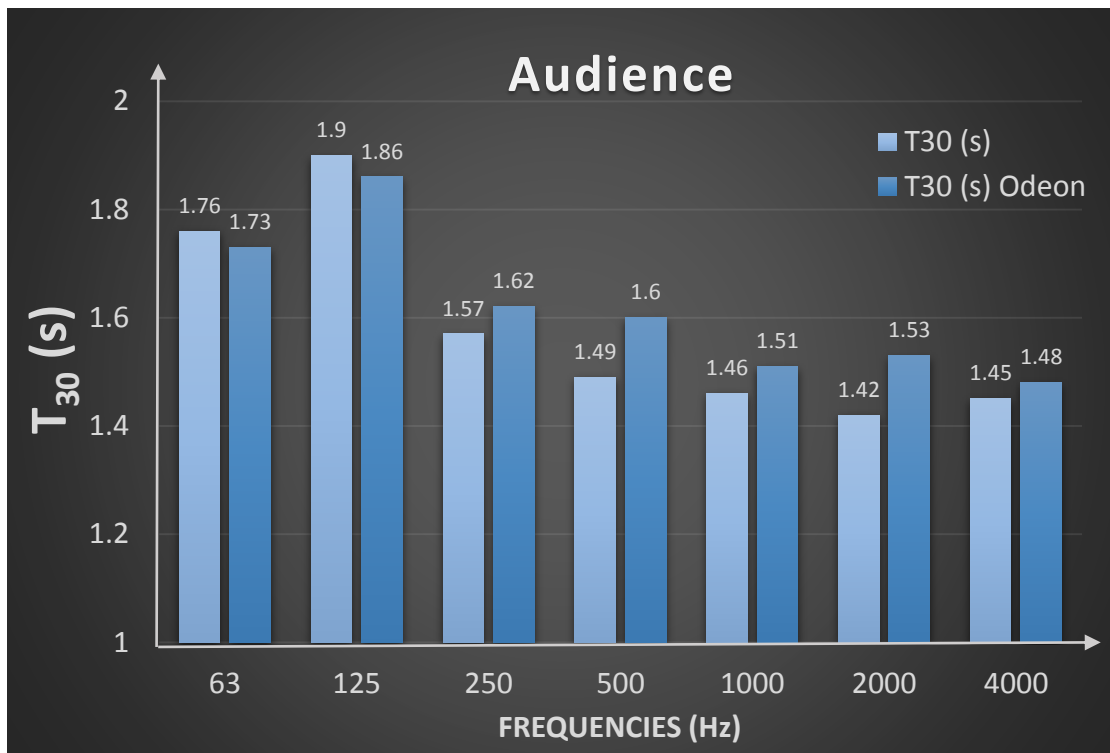
Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια σύγκριση μεταξύ του ψηφιακά προσομοιωμένου μοντέλου με την υπάρχουσα αίθουσα, ούτως ώστε να επαληθευτεί η αξιοπιστία του προσομοιωμένου μοντέλου της αίθουσας. Για το ψηφιακό μοντέλο, η διάχυση στο ακροατήριο ορίστηκε στο 0.7 όπως αναγράφεται στο εγχειρίδιο του λογισμικού 'Odeon'. Όλες οι επιφάνειες ήταν μεγάλες και η μελέτη βασίστηκε σε κατοπτρικές ανακλάσεις. Επίσης, επιτράπηκε ένα μικρό ποσοστό διάχυσης (0.05) στο προσομοιωμένο ηχητικό πεδίο.

Διαπιστώθηκε πολύ καλή επαλήθευση στις τιμές του κλασσικού χρόνου αντήχησης (T_{30}), μεταξύ του προσομοιωμένου μοντέλου και της υπάρχουσας αίθουσας 'Δημήτρης Μητρόπουλος', τόσο στη θέση του ακροατηρίου, όσο και στη θέση της σκηνής στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) (Γράφημα 3.2.1. και 3.3.2.).

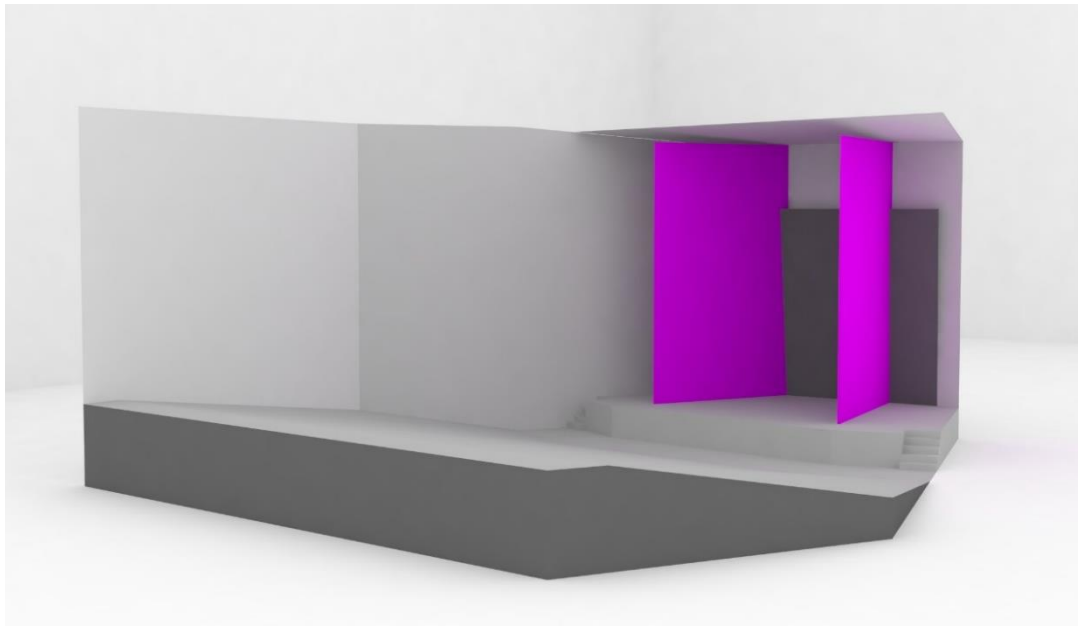
Οι επιρροές πέντε γεωμετρικών παραμέτρων, οι οποίες είναι το εύρος της σκηνής, το ύψος της σκηνής, η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής, η κλίση του ανακλαστήρα οροφής και η κλίση του πίσω τοίχου της σκηνής, διερευνήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Οι μεταβολές που πραγματοποιήθηκαν για κάθε γεωμετρική παράμετρο φαίνονται σχηματικά στις Εικόνες 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. Τα βασικότερα ευρήματα της εργασίας συνοψίζονται στο τελευταίο κεφάλαιο 'Συμπεράσματα'.



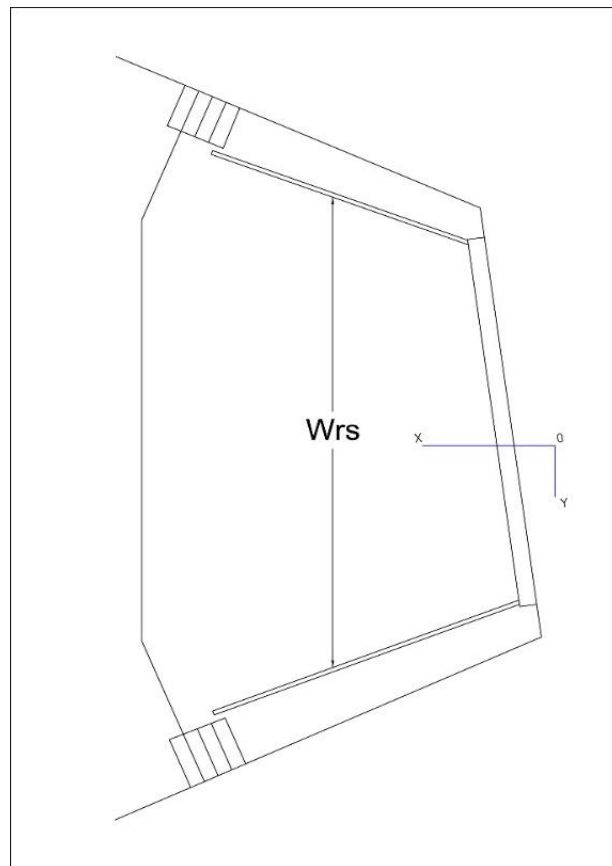
Γράφημα 3.2.1 Μετρήσεις T₃₀ στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) στη θέση της σκηνής. Σύγκριση υπάρχουσας αίθουσας με το ψηφιακά προσομοιωμένο της μοντέλο.



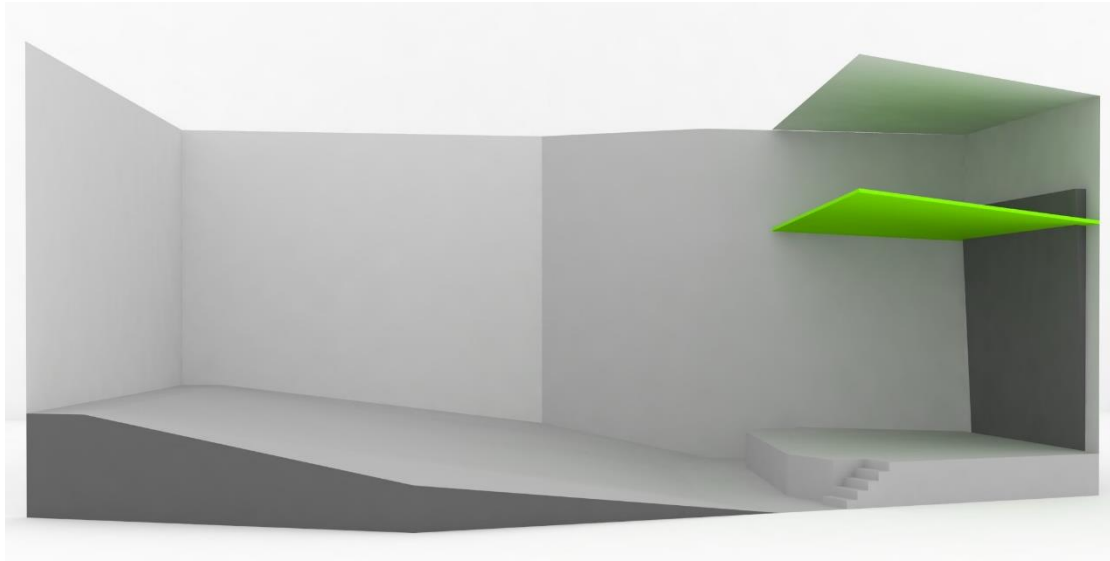
Γράφημα 3.2.2 Μετρήσεις T₃₀ στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) στη θέση του ακροατηρίου. Σύγκριση υπάρχουσας αίθουσας με το ψηφιακά προσομοιωμένο της μοντέλο.



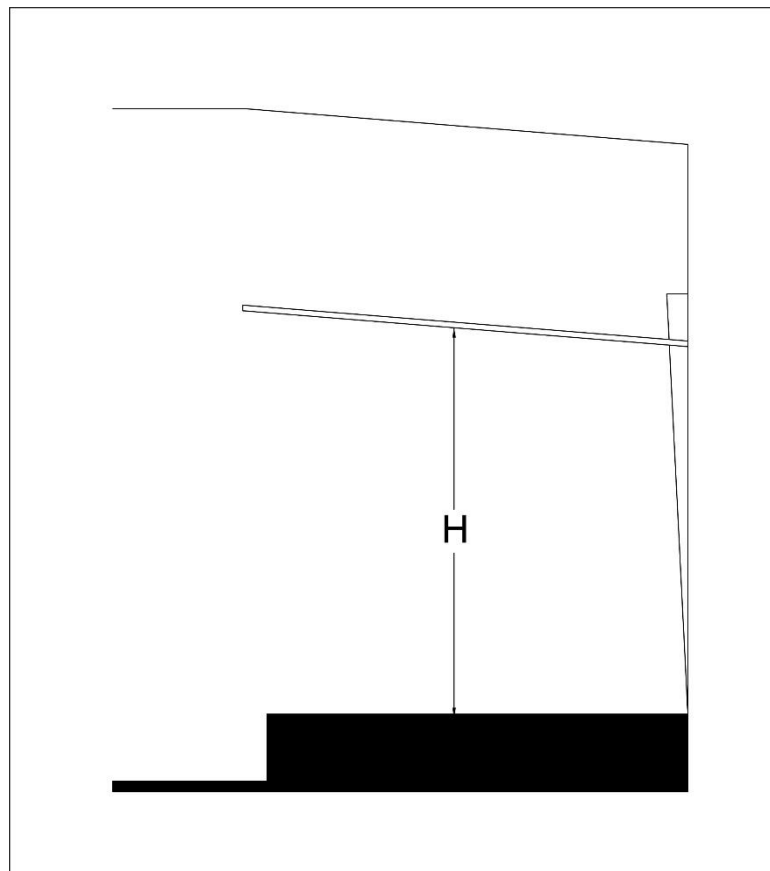
Εικόνα 3.2.6 Μεταβολές του εύρους σκηνής (προοπτικό μοντέλο).



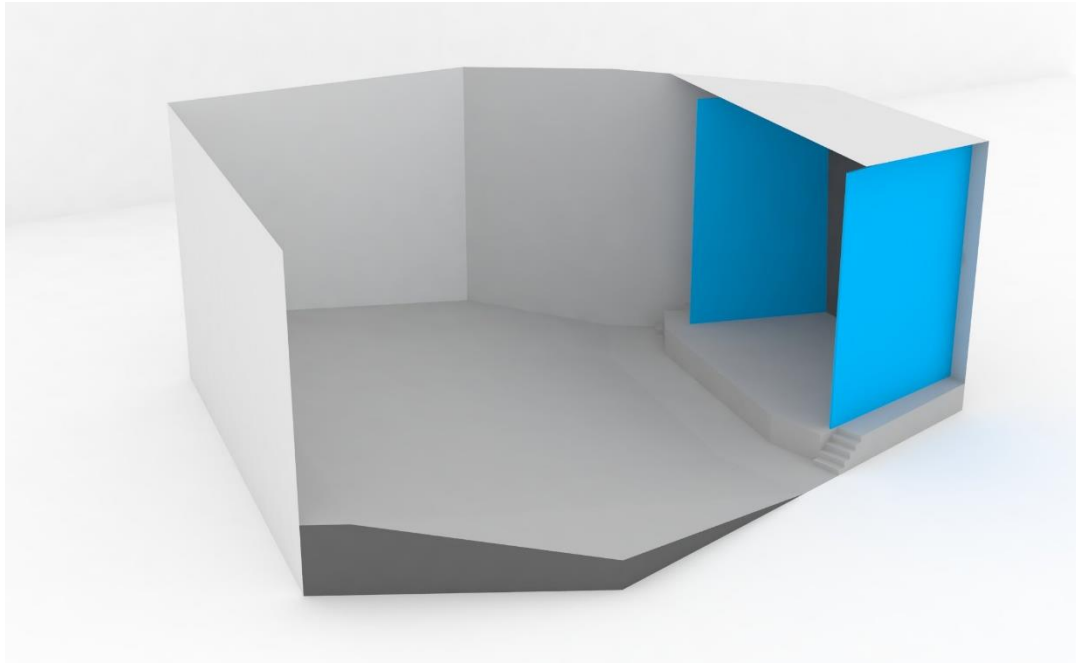
Εικόνα 3.2.7 Μεταβολές του εύρους σκηνής (κάτοψη). Το εύρος (Wrs) ορίστηκε στα 6m, 8m, 10m, 12m και 14m.



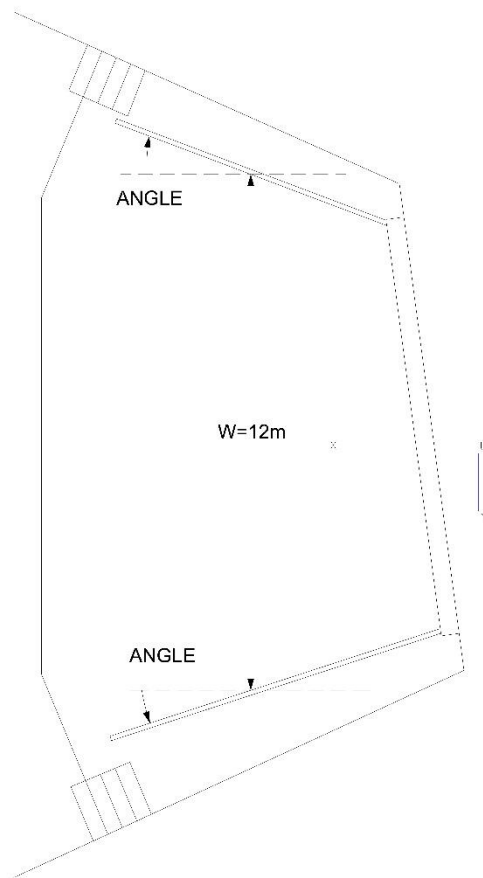
Εικόνα 3.2.8 Μεταβολές στο ύψος οροφής (προοπτικό μοντέλο).



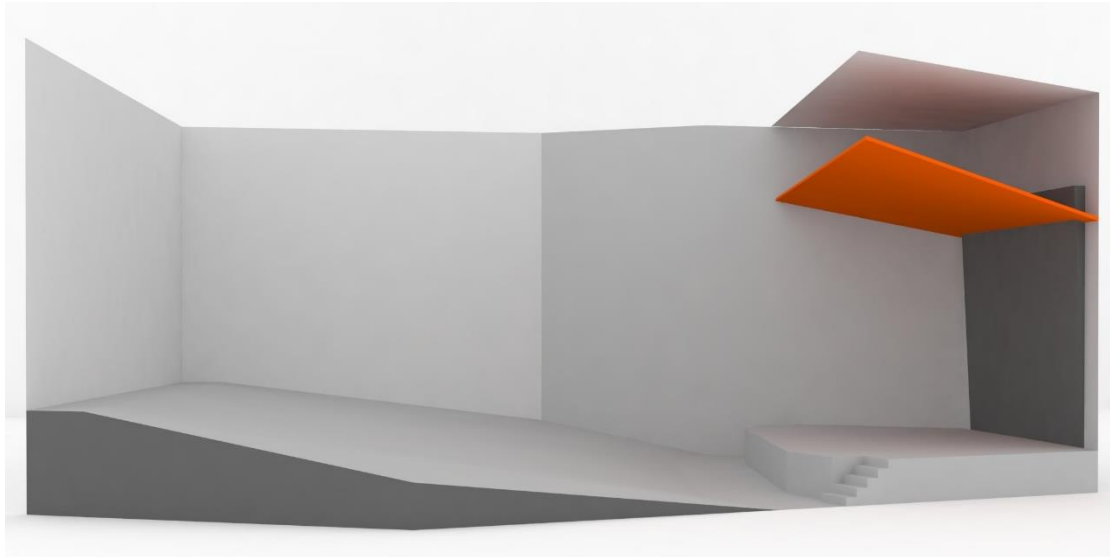
Εικόνα 3.2.9 Μεταβολές στο ύψος οροφής (τομή). Το ύψος (H) ορίστηκε στα 3m, 4m, 5m, 6m και 7m.



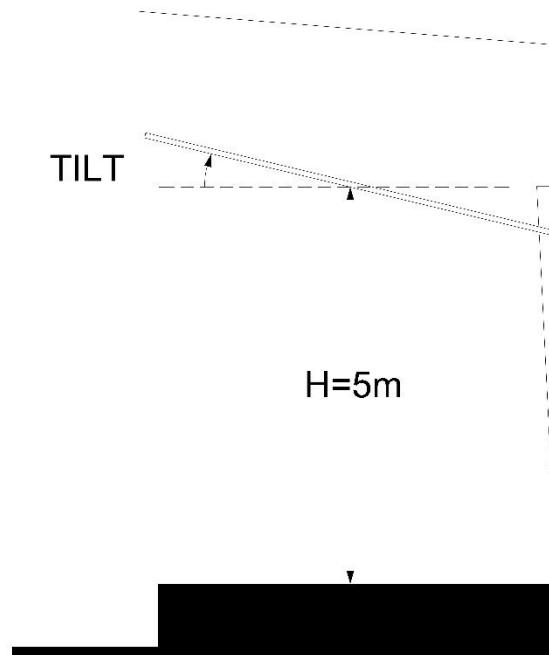
Εικόνα 3.2.10 Μεταβολές στην κλίση των πλαϊνών τοίχων σκηής (προοπτικό μοντέλο).



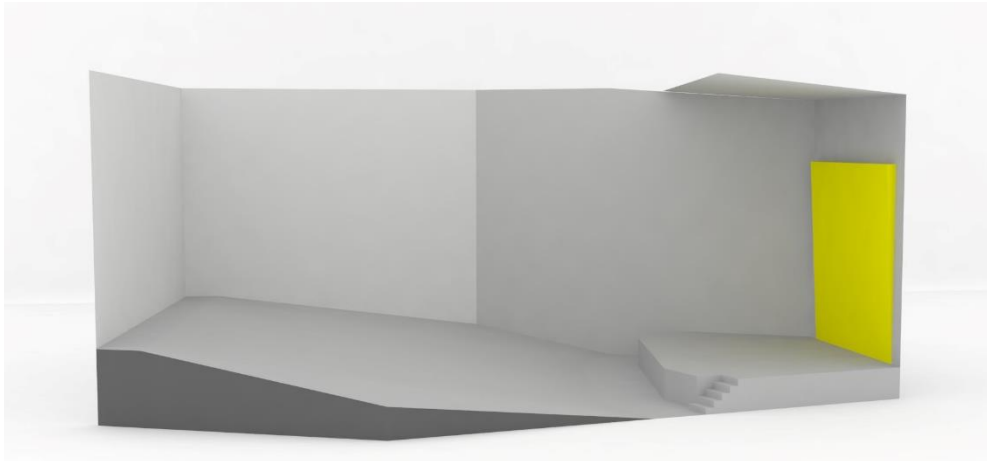
Εικόνα 3.2.11 Μεταβολές στην κλίση των πλαϊνών τοίχων σκηής (κάτοψη). Η γωνία (Angle) ορίστηκε στις 35° , 24° , 15° , 0° , -15° και -25° .



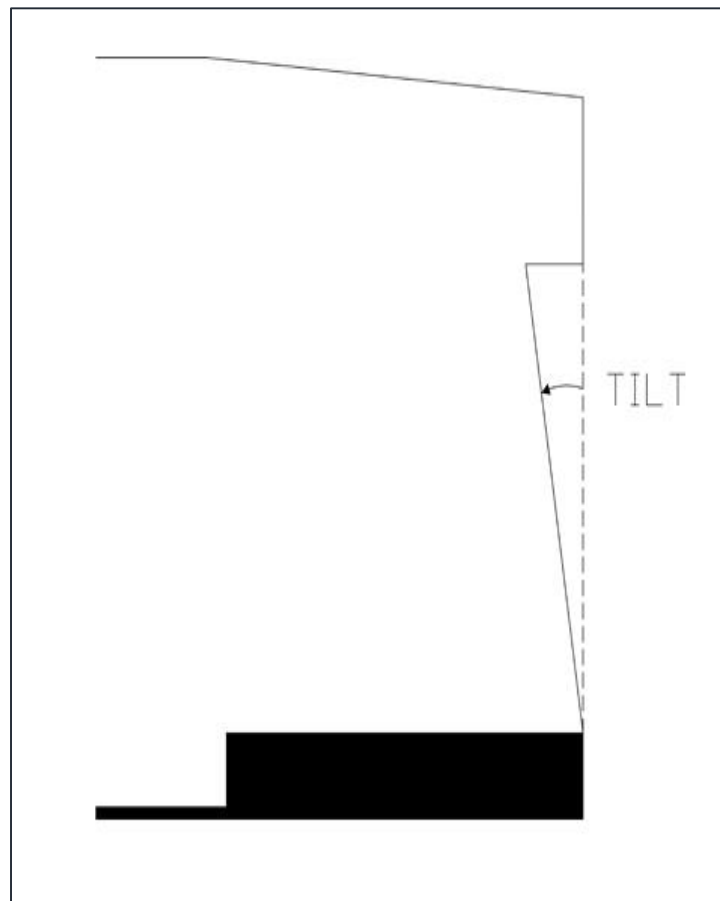
Εικόνα 3.2.12 Μεταβολές στην κλίση του ανακλαστήρα οροφής (προοπτικό μοντέλο).



Εικόνα 3.2.13 Μεταβολές στην κλίση του ανακλαστήρα οροφής (τομή). Η γωνία (Tilt) ορίστηκε στις 20°, 15°, 10°, 0°, -10° and -15°.



Εικόνα 3.2.14 Μεταβολές στην κλίση του τοίχου πίσω από τη σκηνή (προοπτικό μοντέλο).

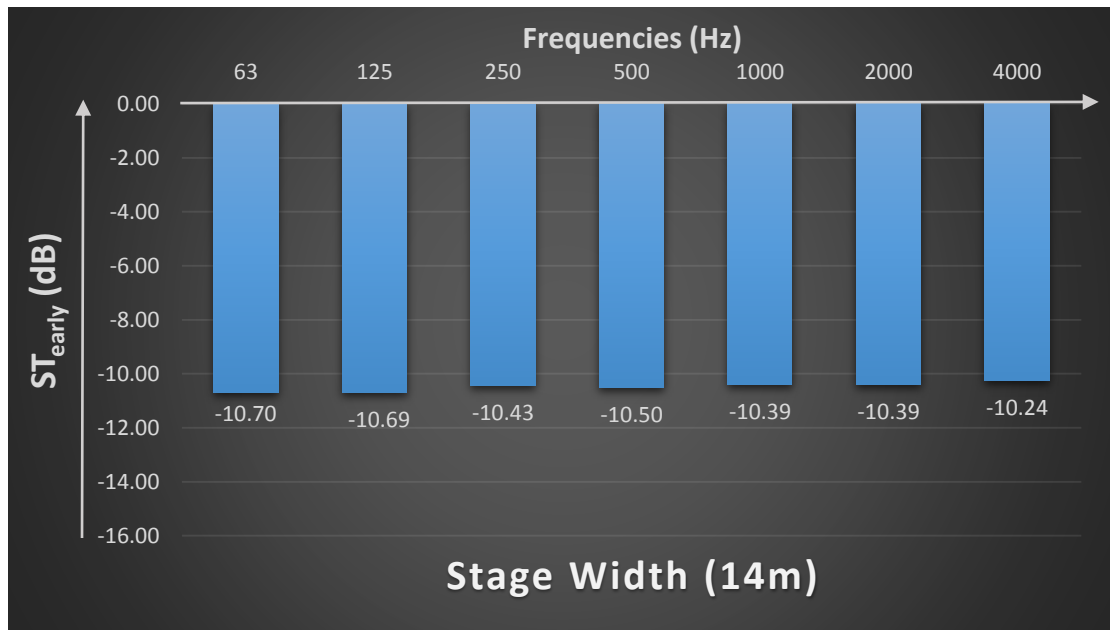


Εικόνα 3.2.15 Μεταβολές στην κλίση του τοίχου πίσω από τη σκηνή (τομή). Η γωνία (Tilt) ορίστηκε στις 30° , 20° , 10° , 5° , 0° , -10° , -20° and -30° .

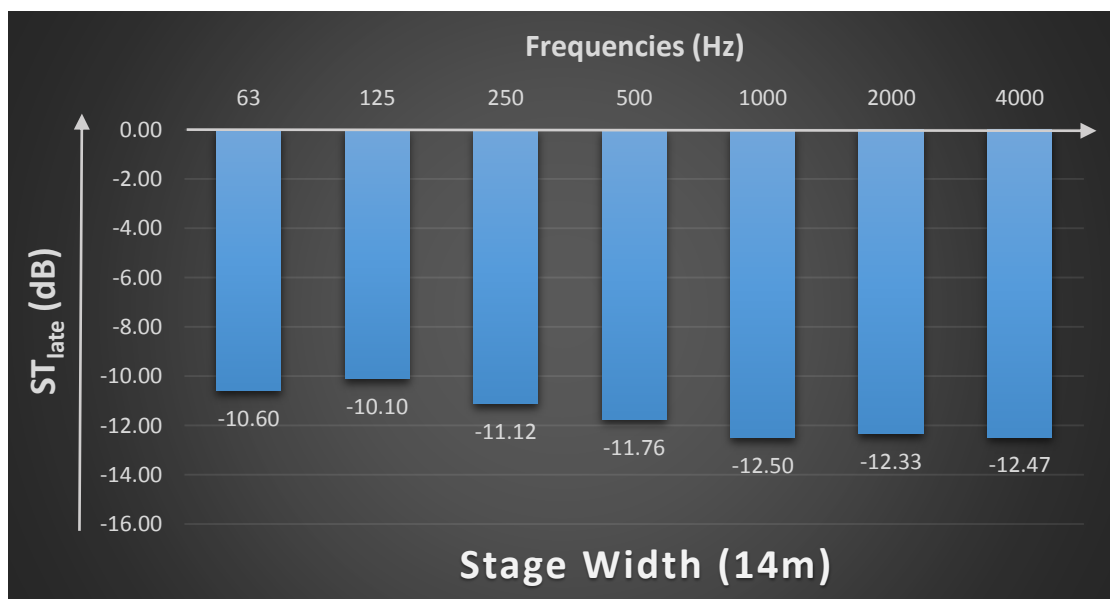
4 Αποτελέσματα

4.1 Εύρος Σκηνής

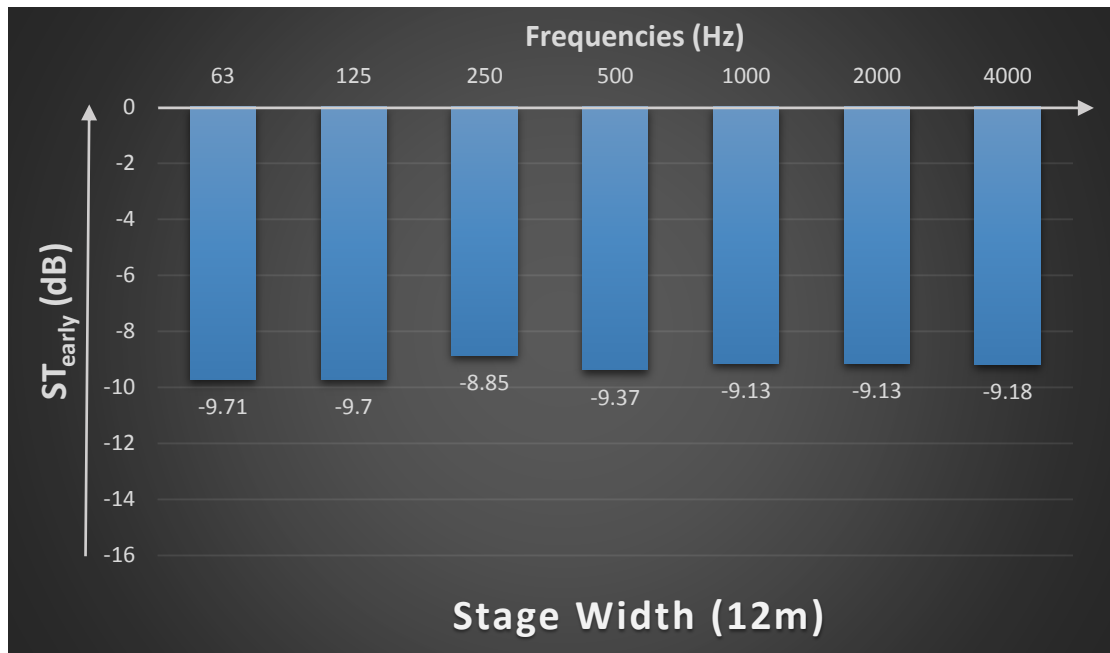
Τα αποτελέσματα των ST_{early} και ST_{late} σε σχέση με τις μεταβολές του εύρους της σκηνής στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) φαίνονται πιο κάτω στα Γραφήματα 4.1.1 – 4.1.10.



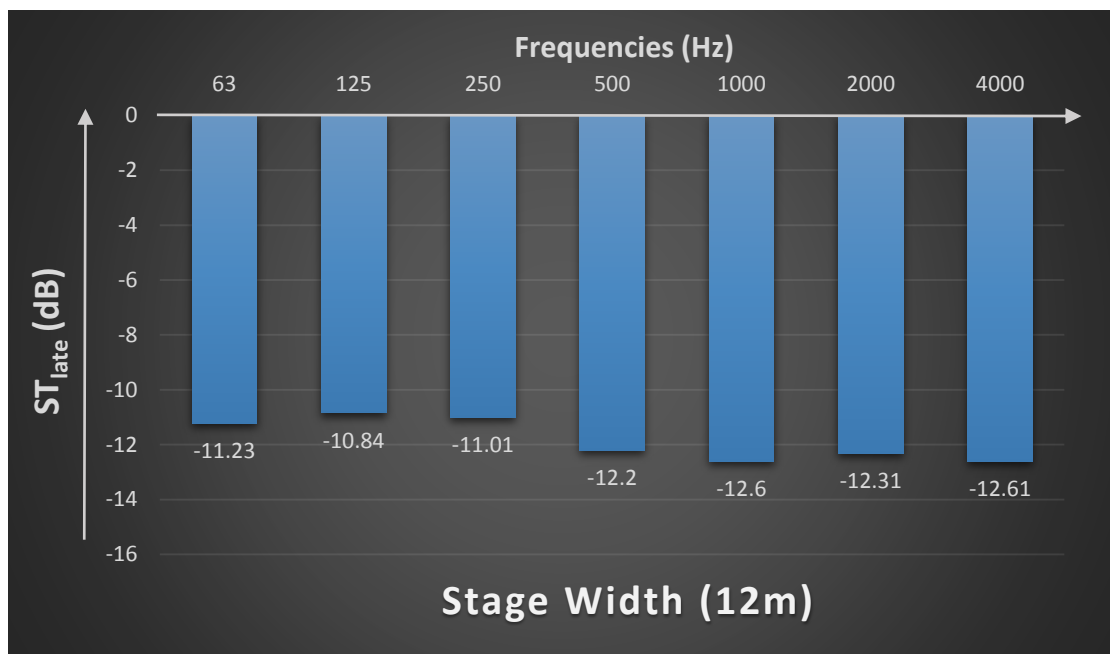
Γράφημα 4.1.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 14m.



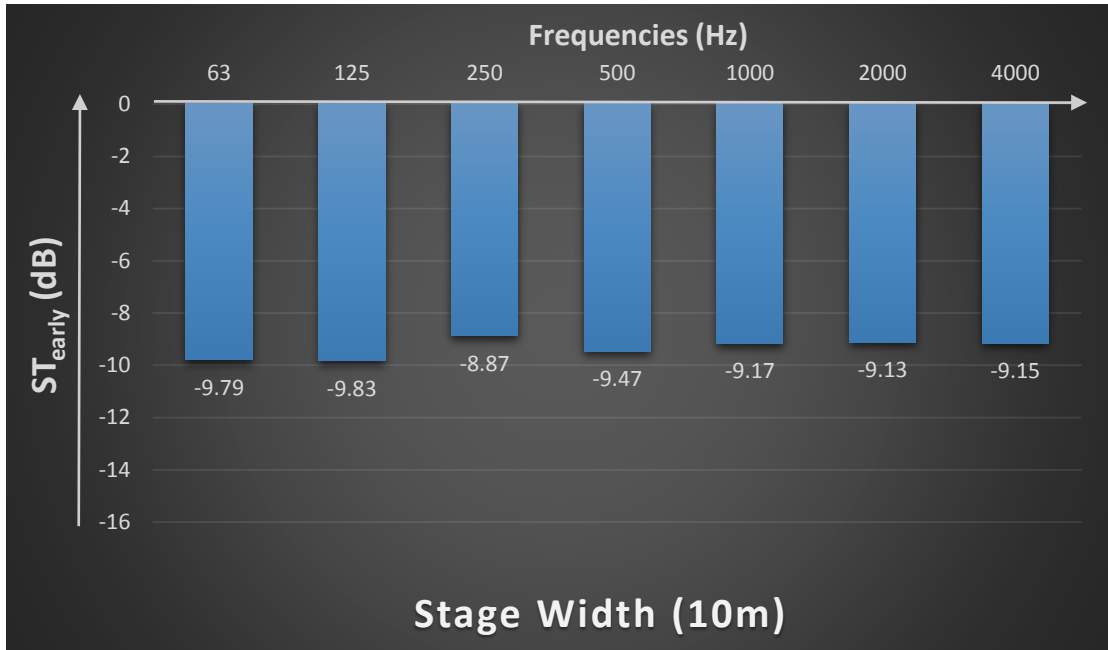
Γράφημα 4.1.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 14m.



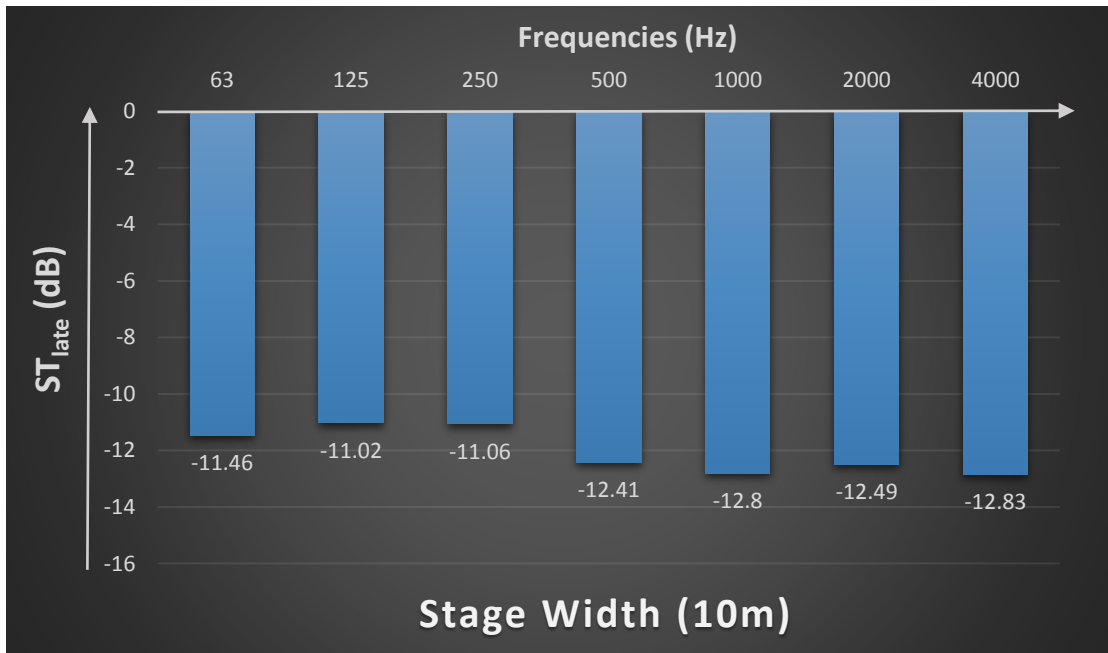
Γράφημα 4.1.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 12m.



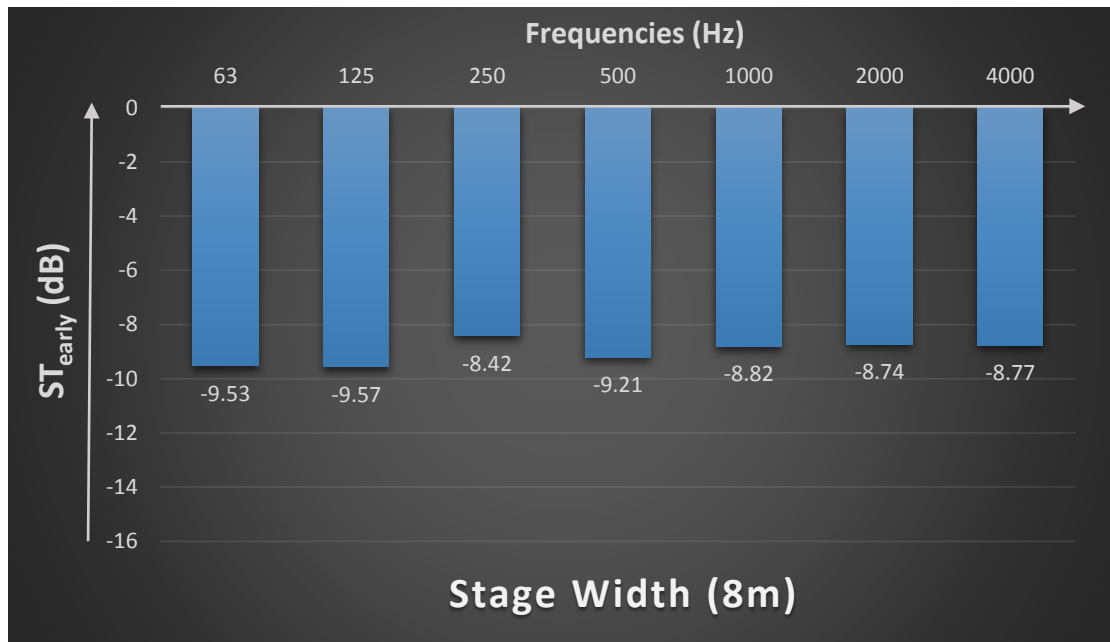
Γράφημα 4.1.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 12m.



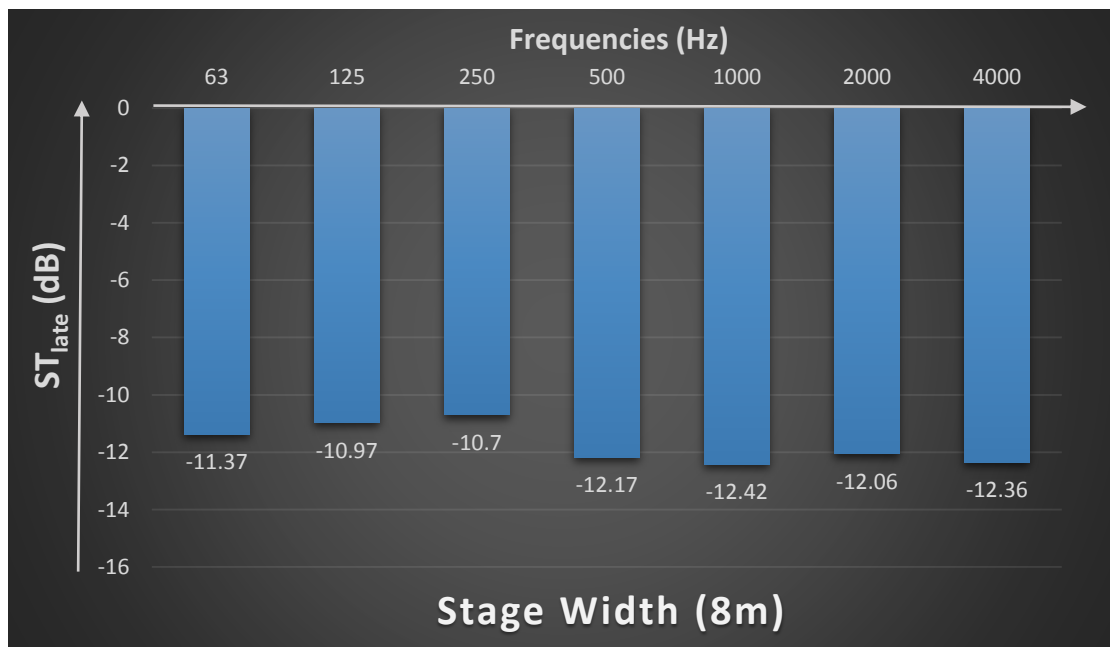
Γράφημα 4.1.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 10m.



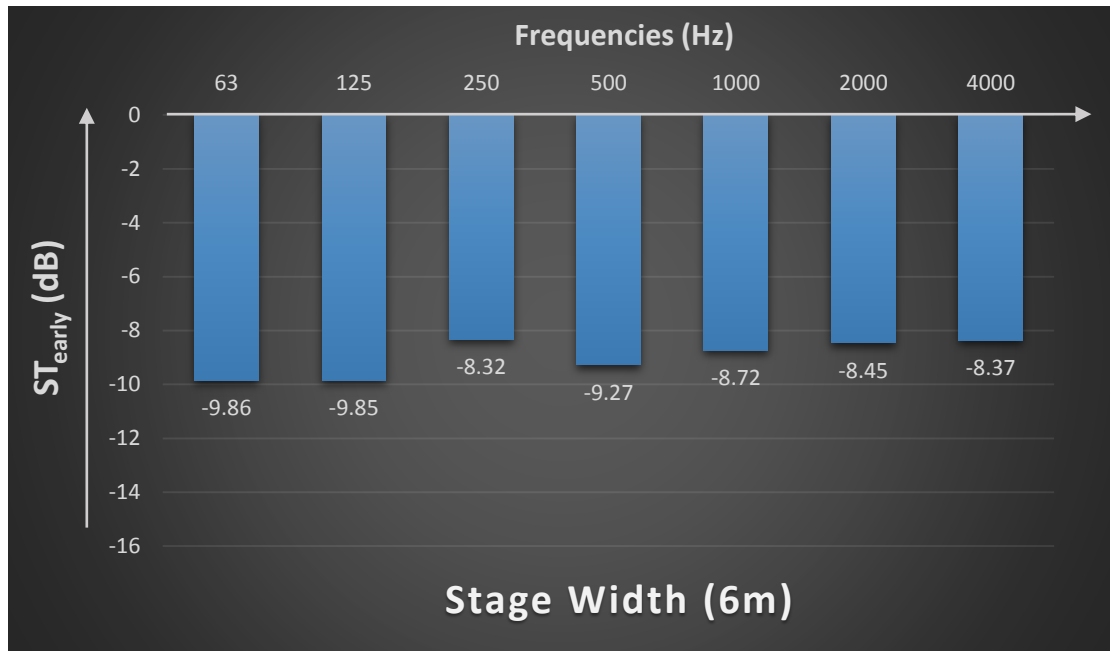
Γράφημα 4.1.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 10m.



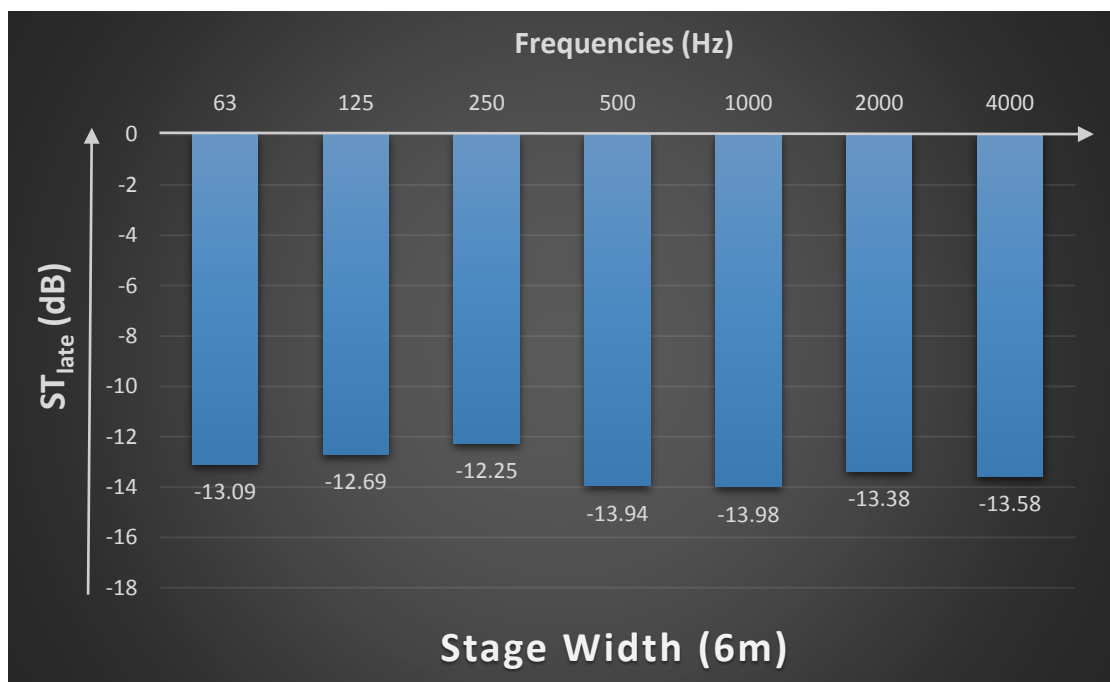
Γράφημα 4.1.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 8m.



Γράφημα 4.1.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 8m.



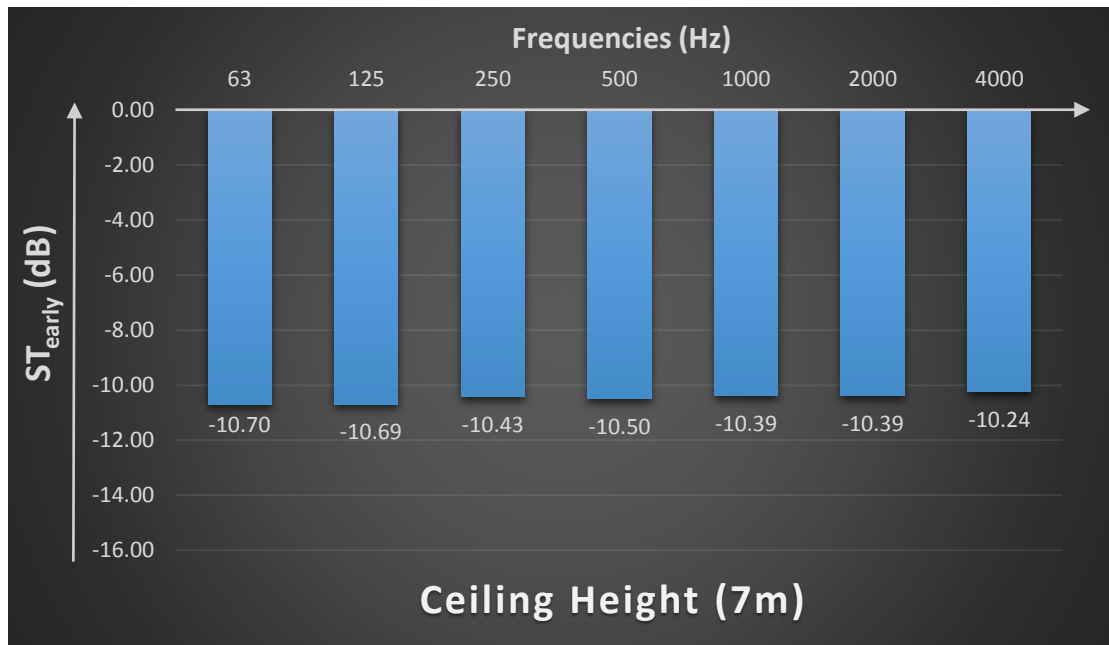
Γράφημα 4.1.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 6m.



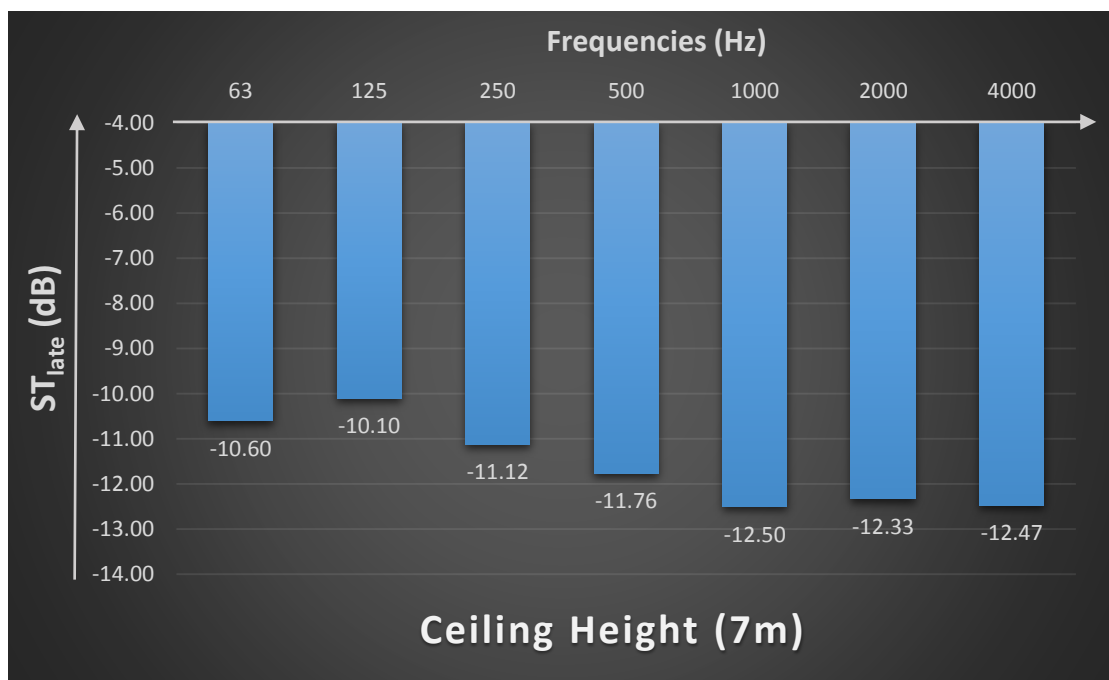
Γράφημα 4.1.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 6m.

4.2 Ύψος οροφής σκηνής

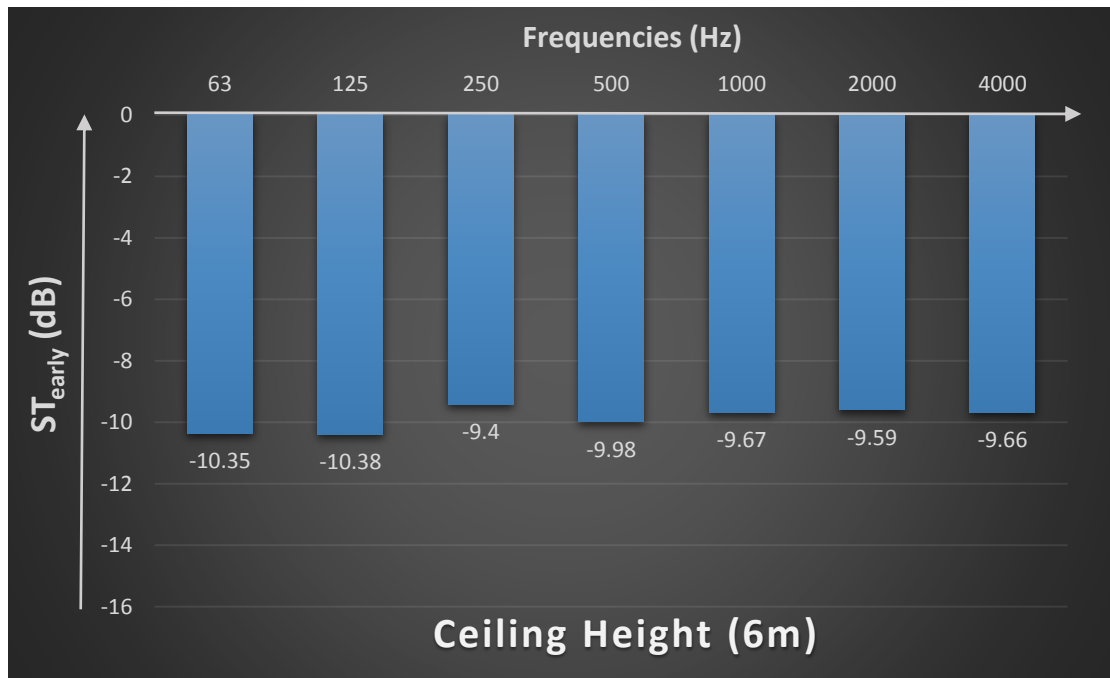
Τα αποτελέσματα των ST_{early} και ST_{late} σε σχέση με τις μεταβολές του ύψους της οροφής της σκηνής στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) φαίνονται πιο κάτω στα Γραφήματα 4.2.1 – 4.2.10.



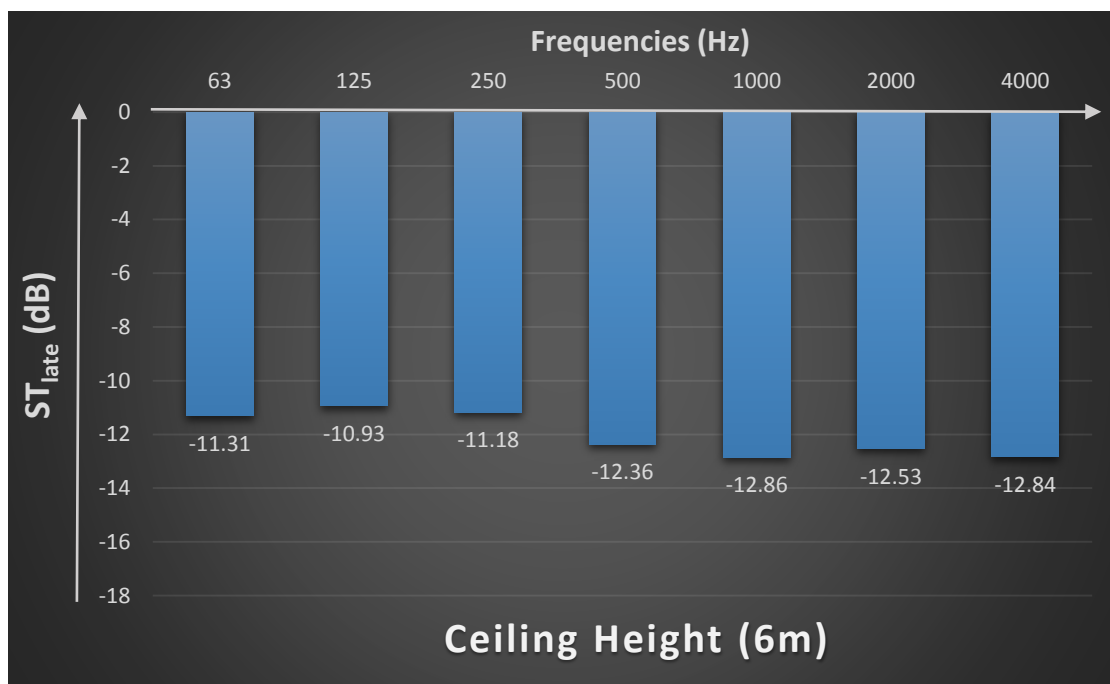
Γράφημα 4.2.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 7m.



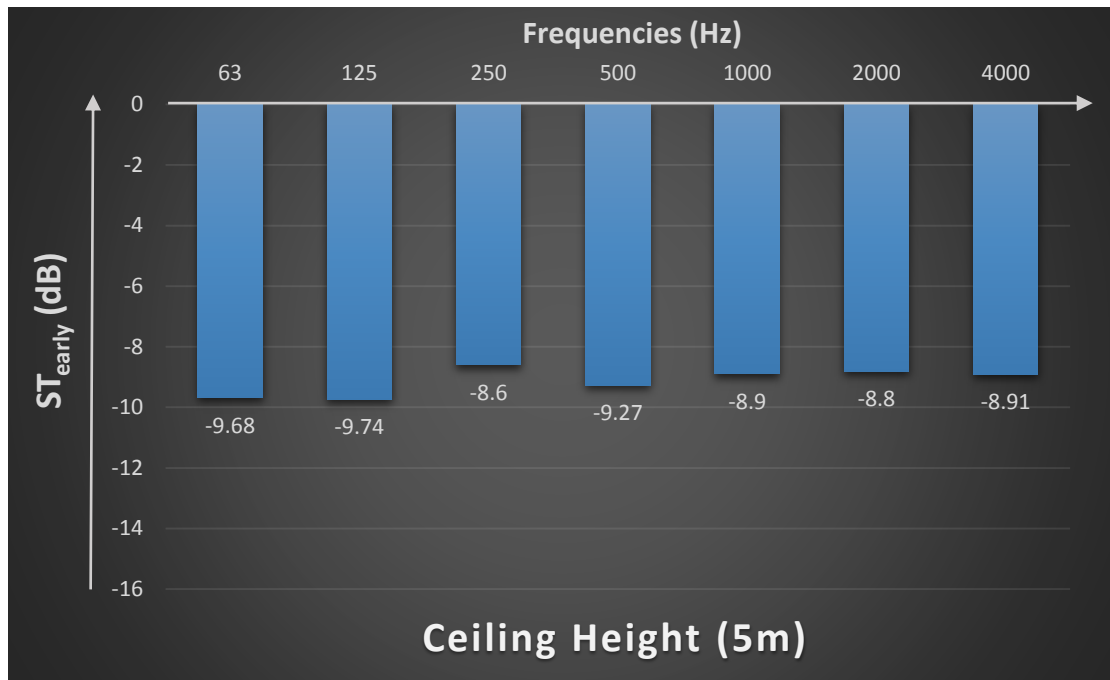
Γράφημα 4.2.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 7m.



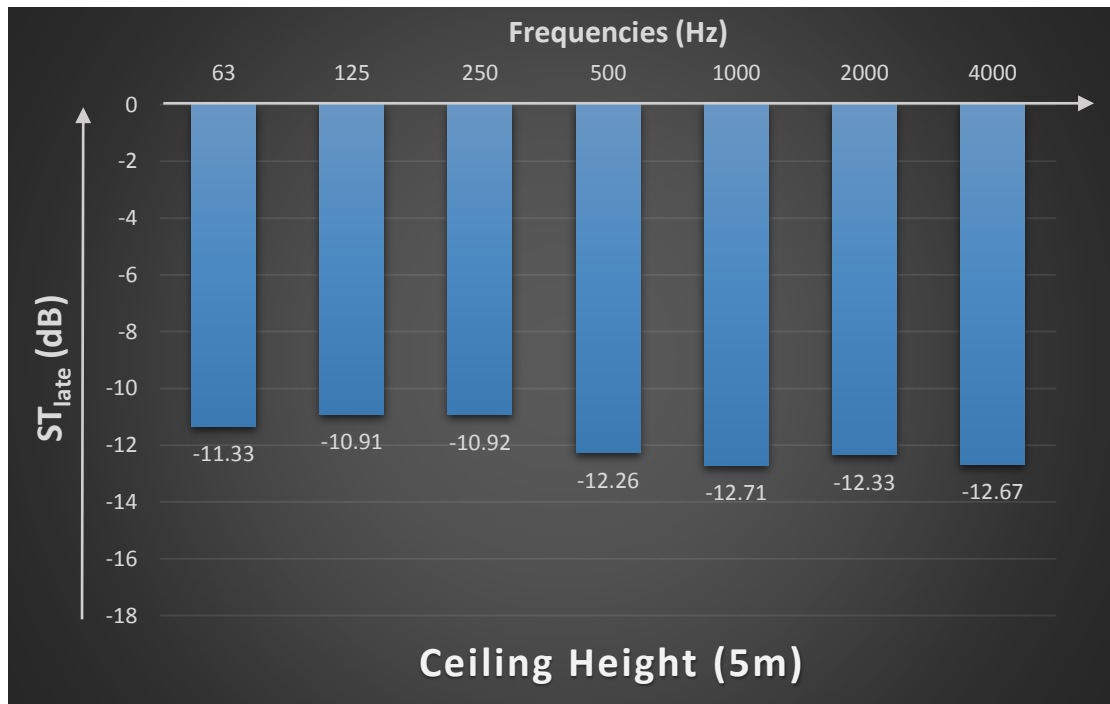
Γράφημα 4.2.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 6m.



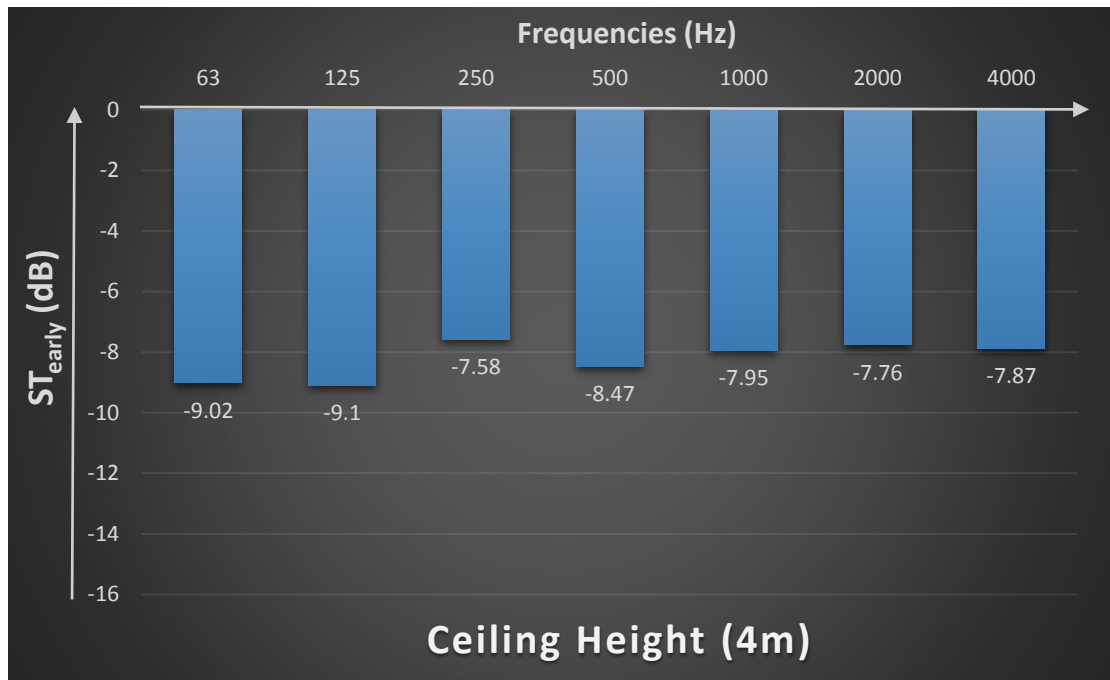
Γράφημα 4.2.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 6m.



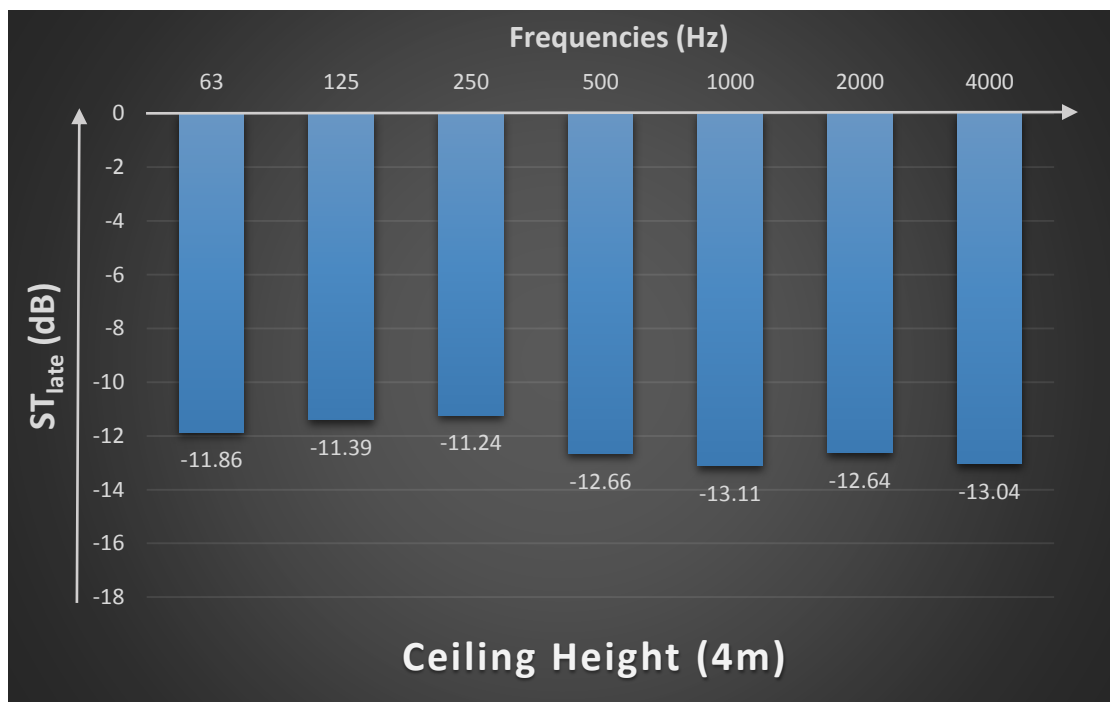
Γράφημα 4.2.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 5m.



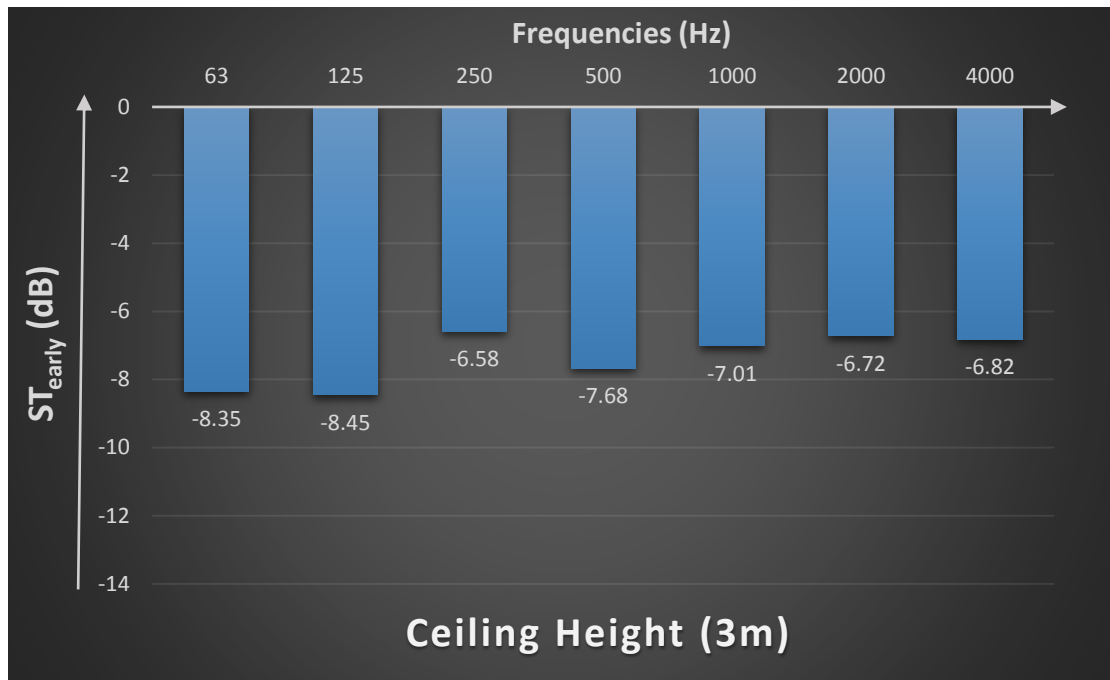
Γράφημα 4.2.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 5m.



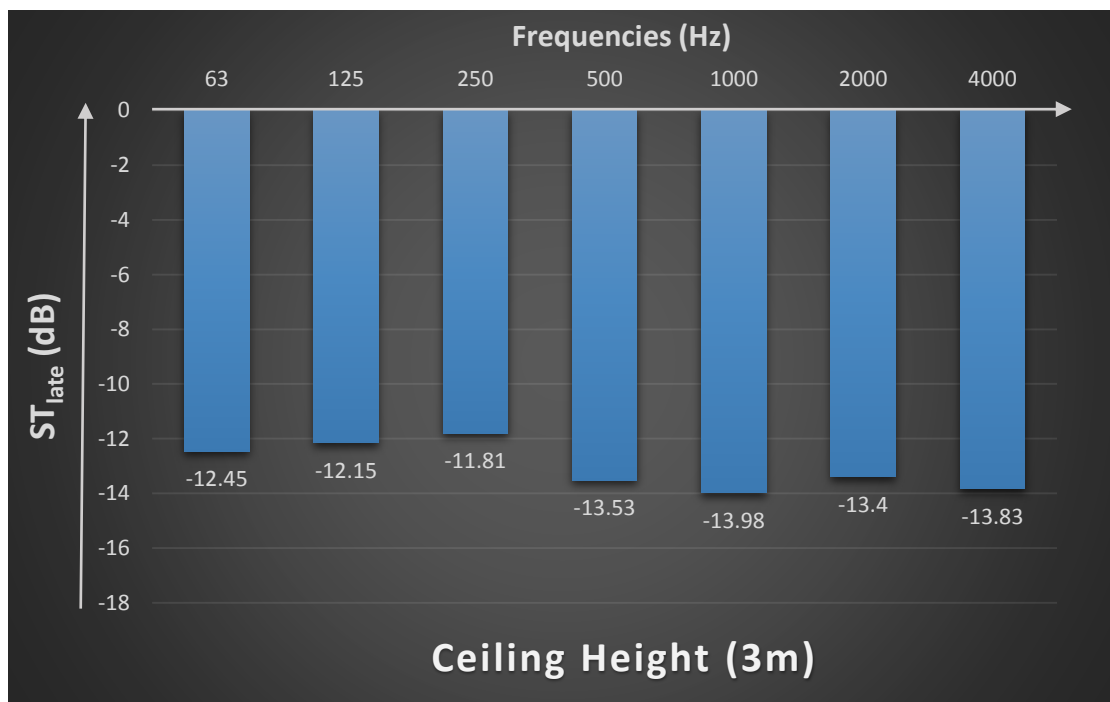
Γράφημα 4.2.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 4m.



Γράφημα 4.2.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 4m.



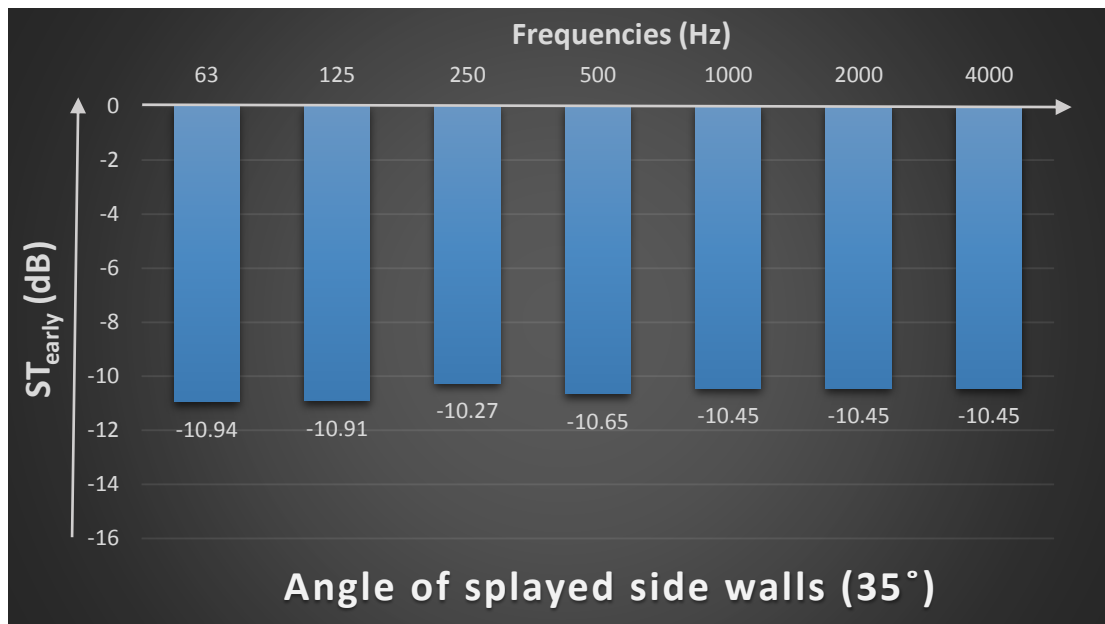
Γράφημα 4.2.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 3m.



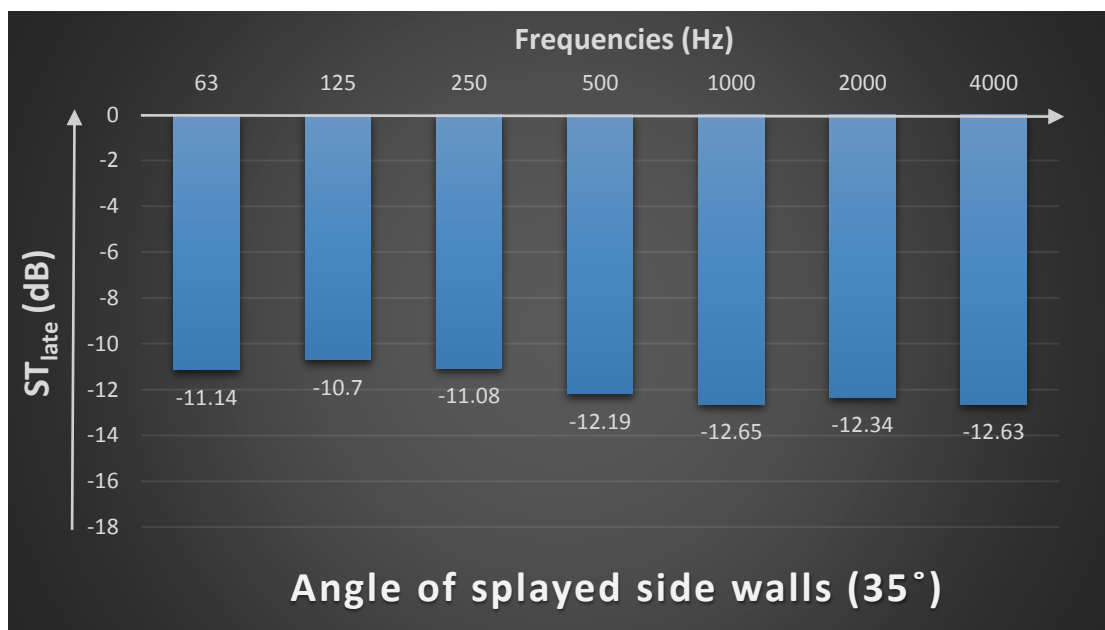
Γράφημα 4.2.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν το ύψος της οροφής της σκηνής ορίστηκε στα 3m.

4.3 Γωνία πλαϊνών τοίχων σκηνής

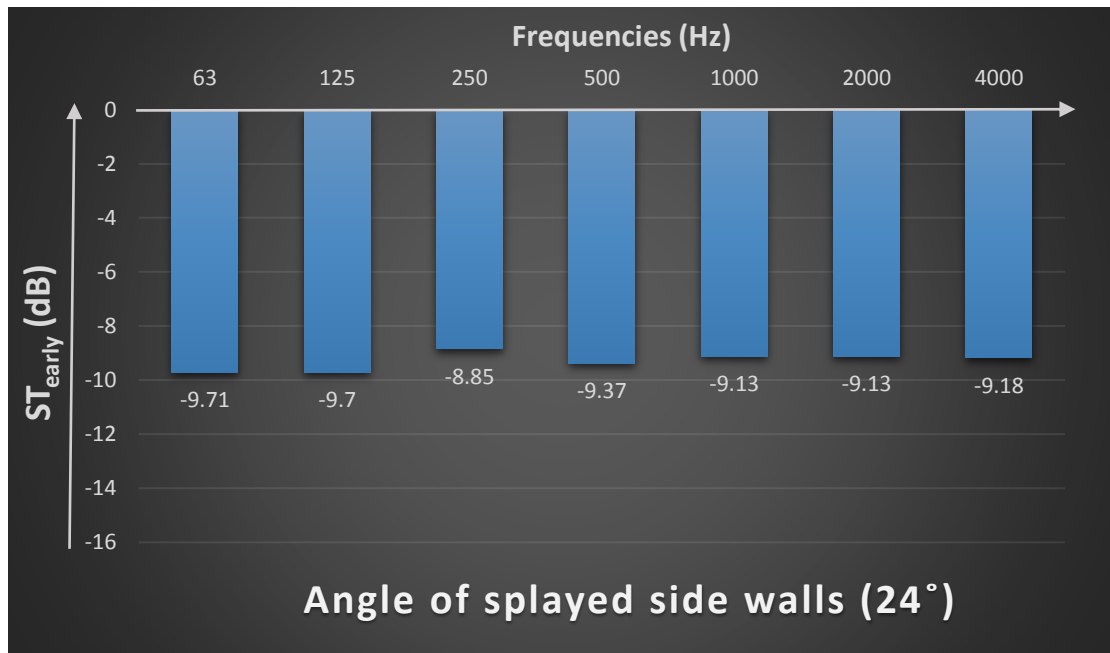
Τα αποτελέσματα των ST_{early} και ST_{late} σε σχέση με τις μεταβολές της γωνίας των πλαϊνών τοίχων σκηνής της σκηνής στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) φαίνονται πιο κάτω στα Γραφήματα 4.3.1 – 4.3.12.



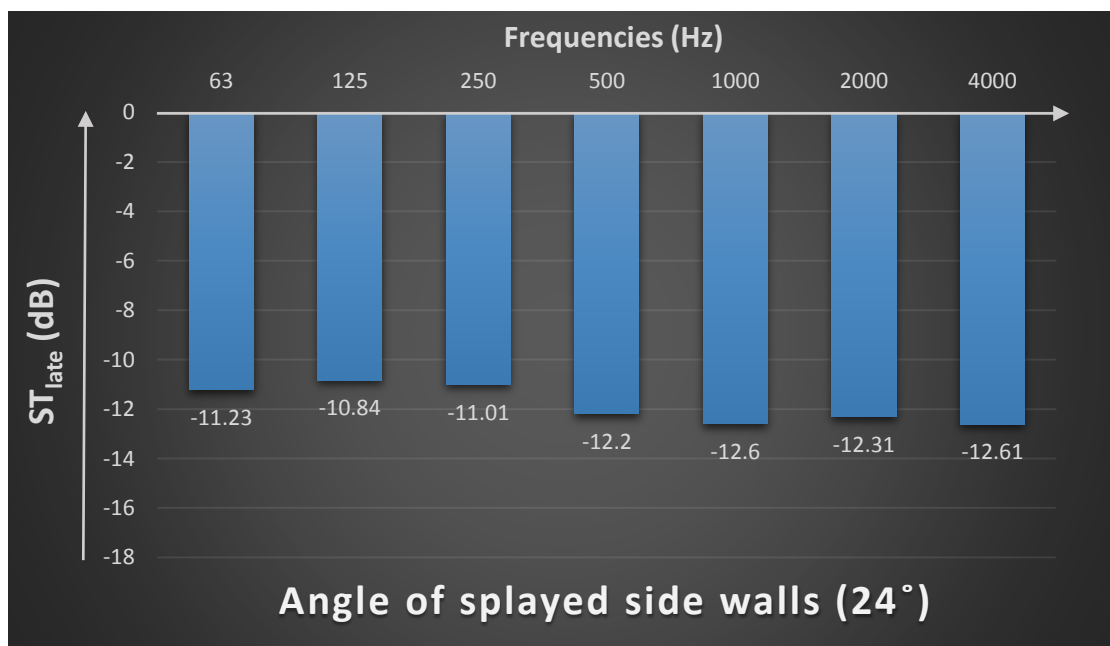
Γράφημα 4.3.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 35°.



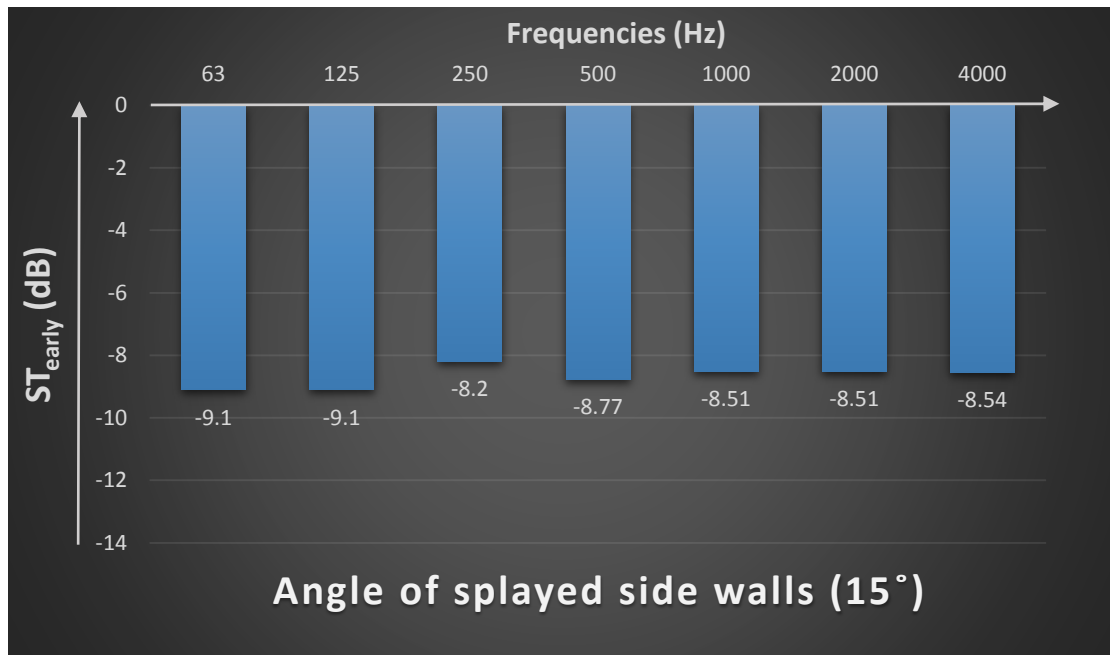
Γράφημα 4.3.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 35°.



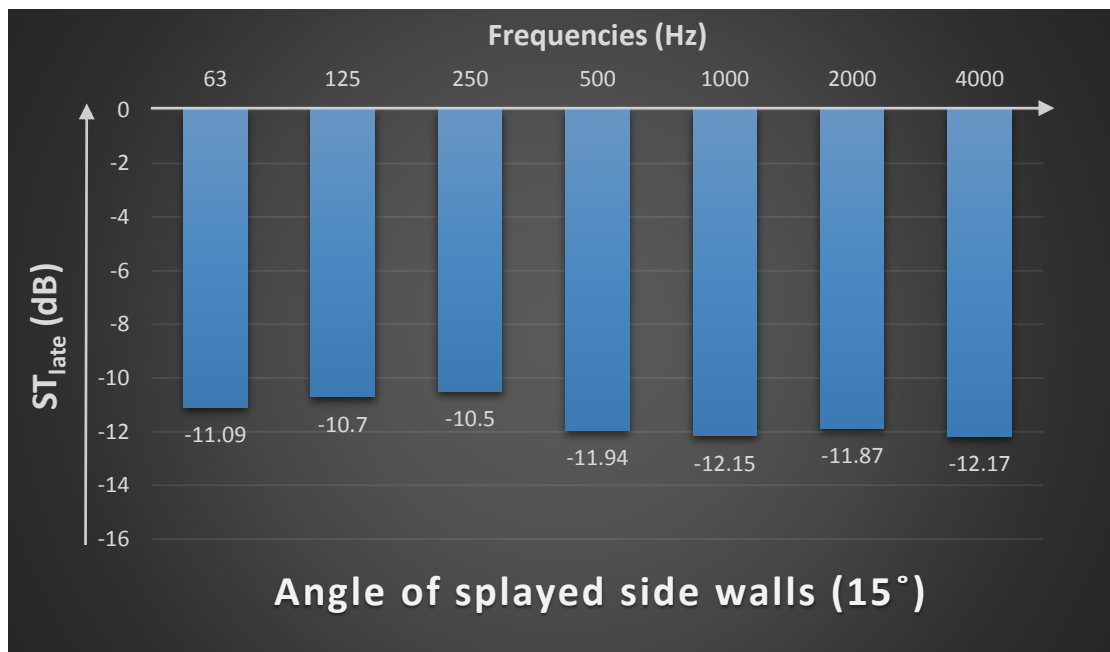
Γράφημα 4.3.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 24°.



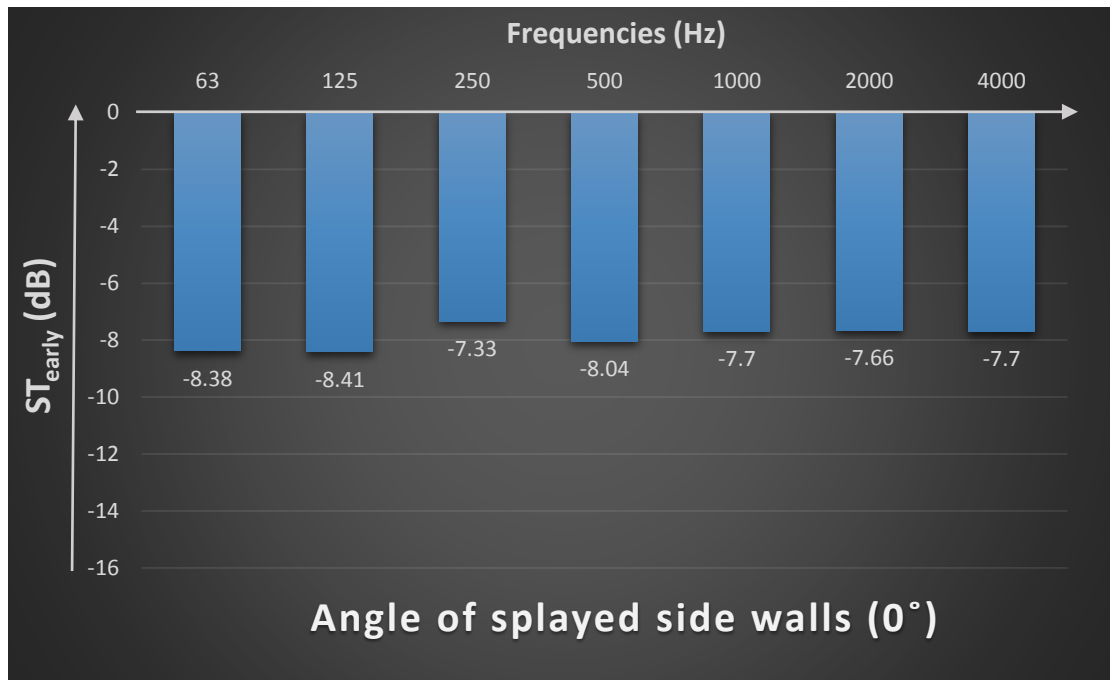
Γράφημα 4.3.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 24°.



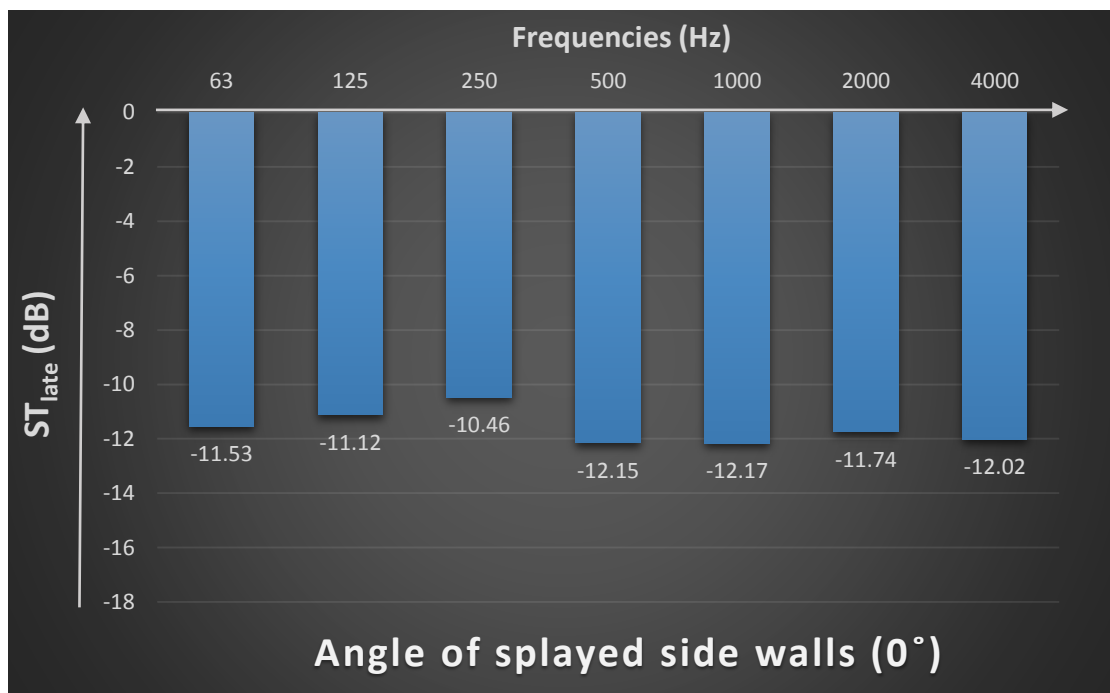
Γράφημα 4.3.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις 15°.



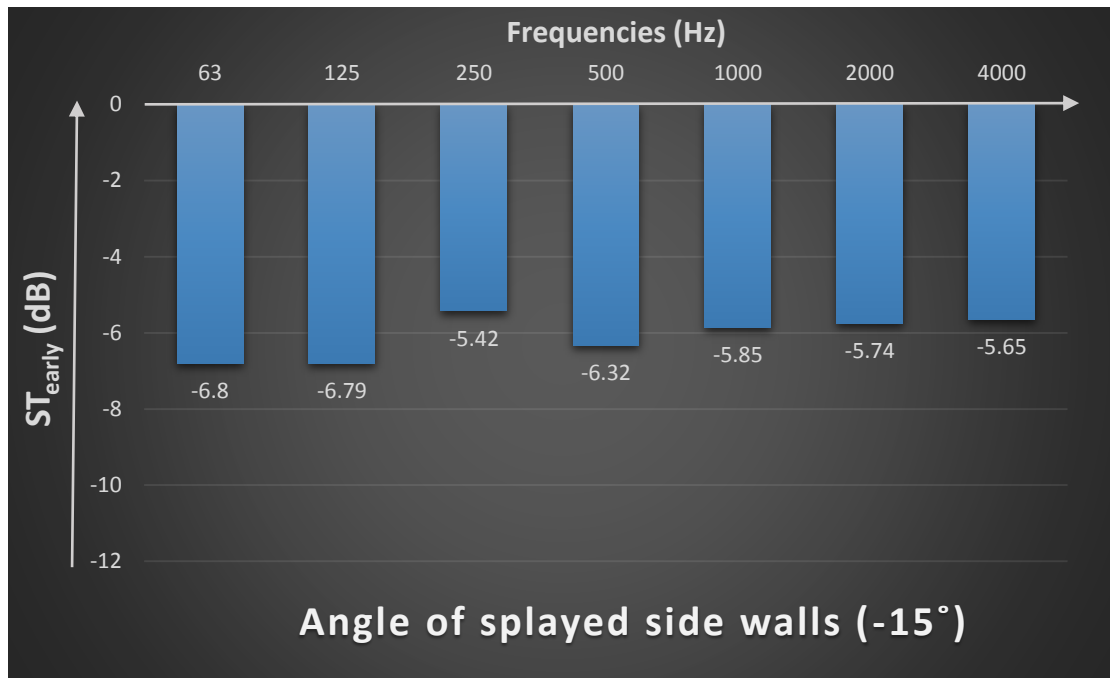
Γράφημα 4.3.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις 15°.



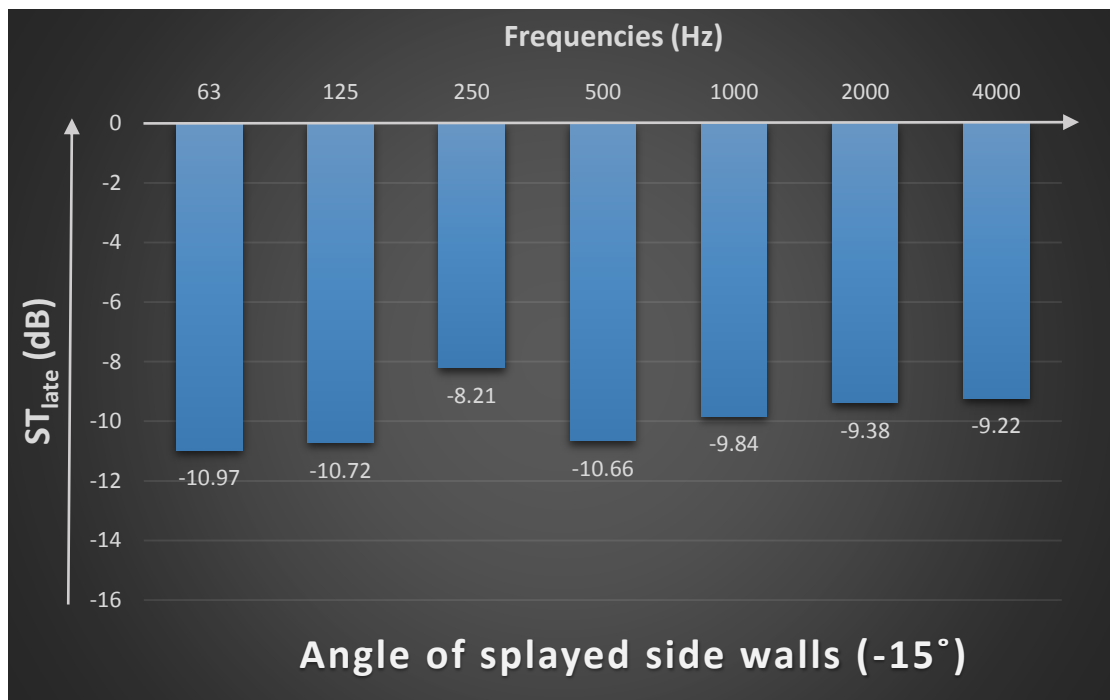
Γράφημα 4.3.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 0°.



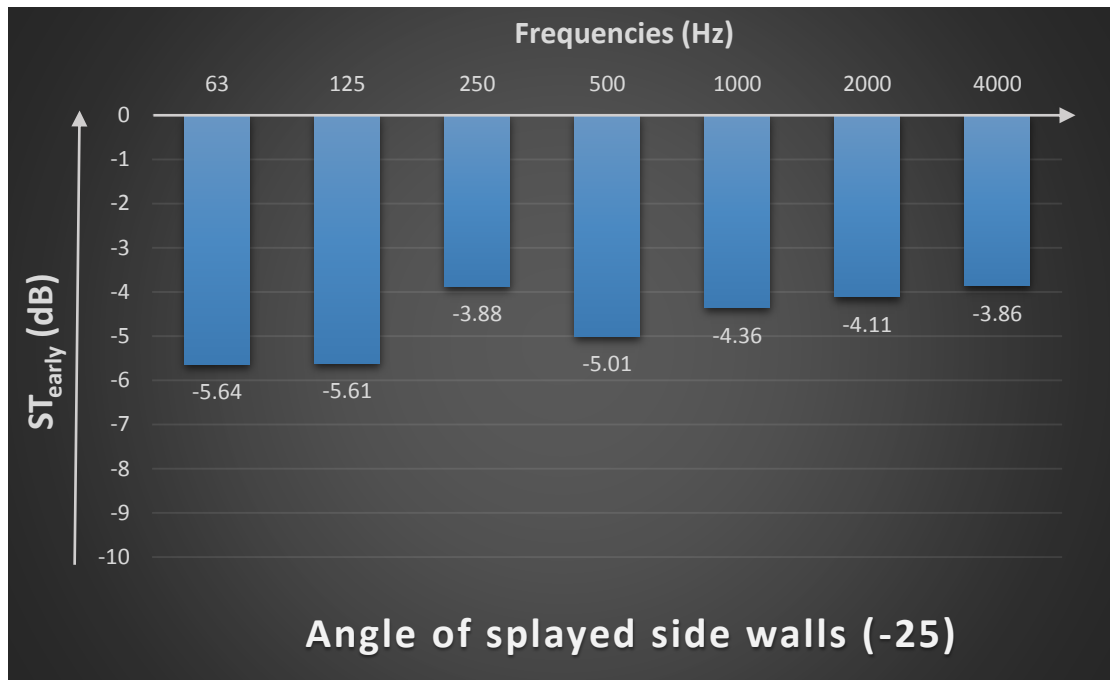
Γράφημα 4.3.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις 0°.



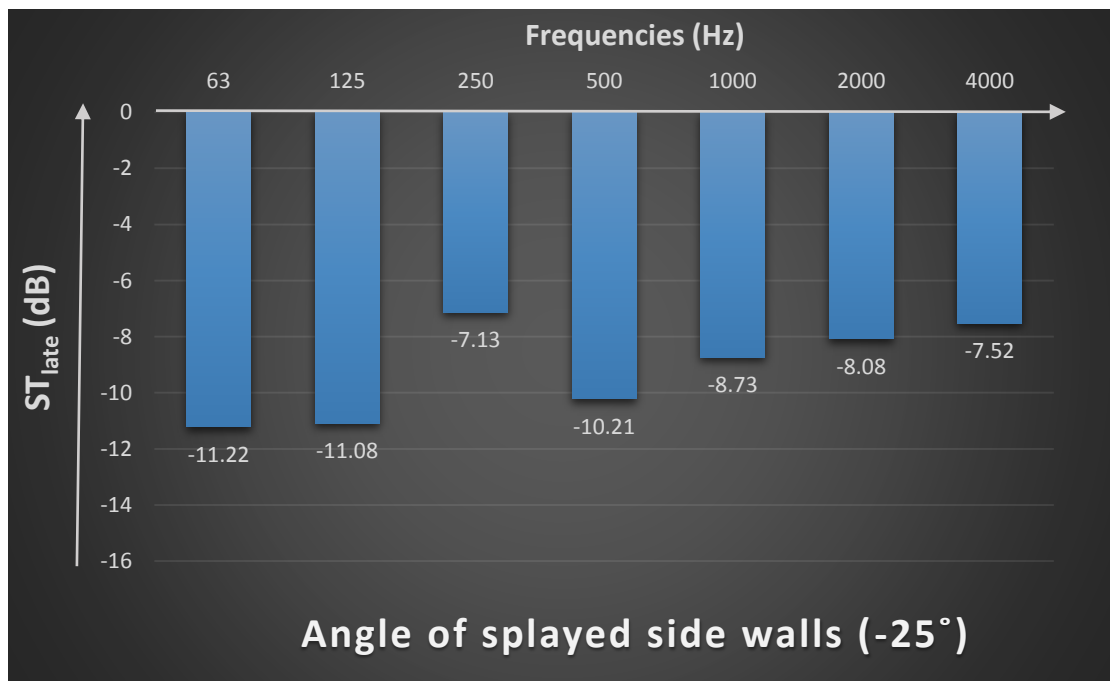
Γράφημα 4.3.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις -15°.



Γράφημα 4.3.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνής ορίστηκε στις -15°.



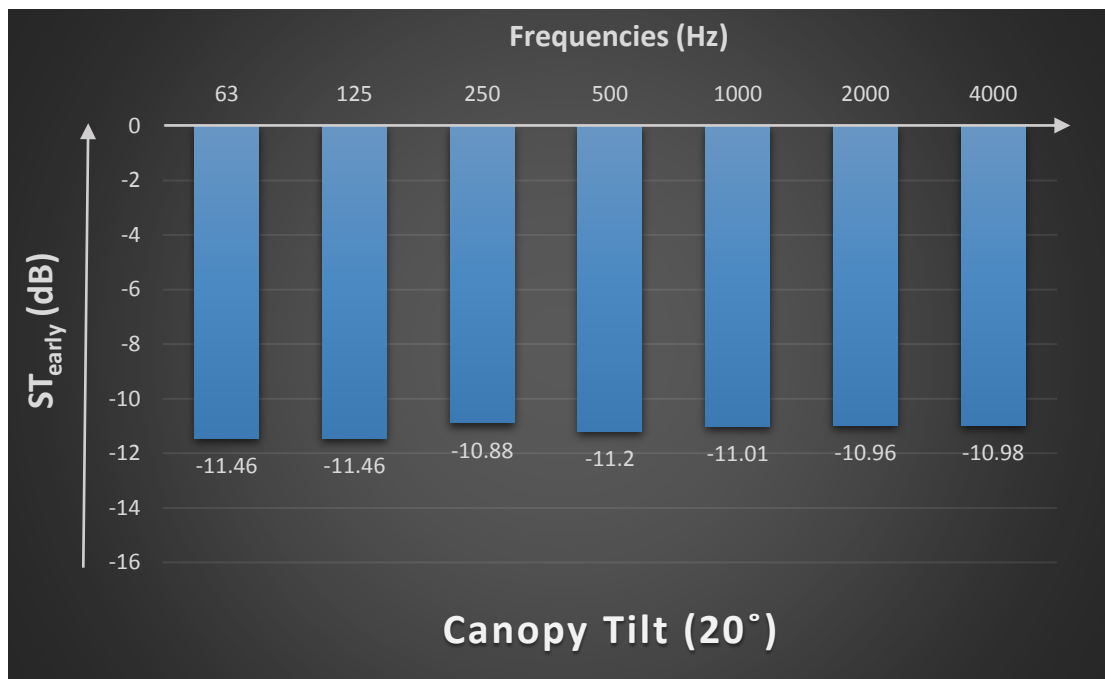
Γράφημα 4.3.11 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις -25° .



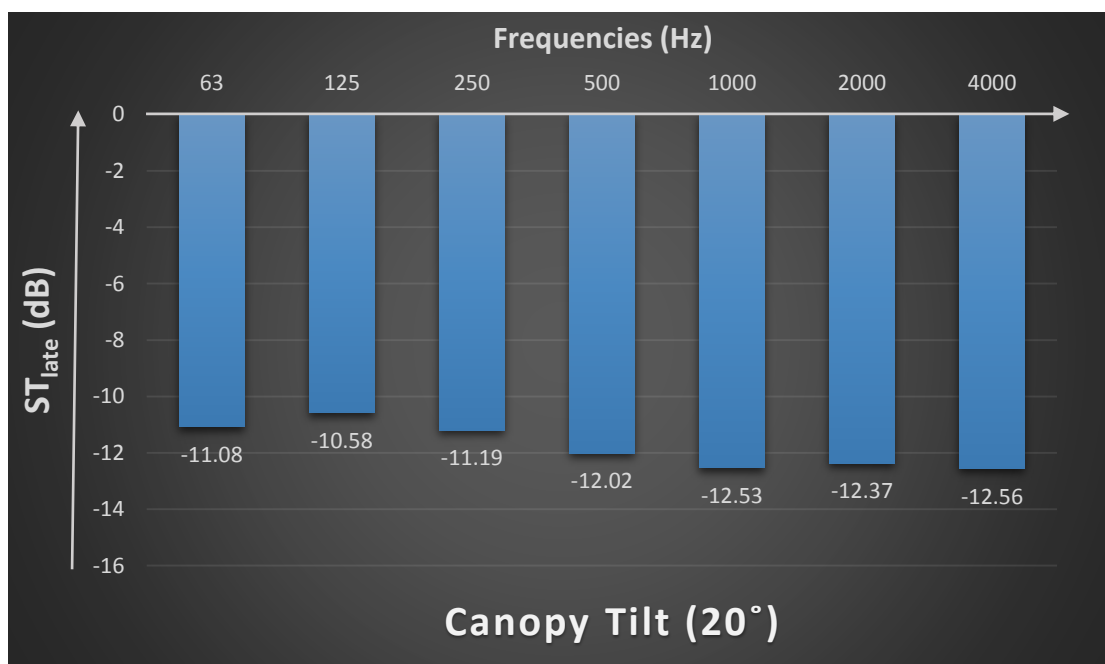
Γράφημα 4.3.12 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία των πλαϊνών τοίχων της σκηνης ορίστηκε στις -25° .

4.4 Κλίση ανακλαστήρα οροφής

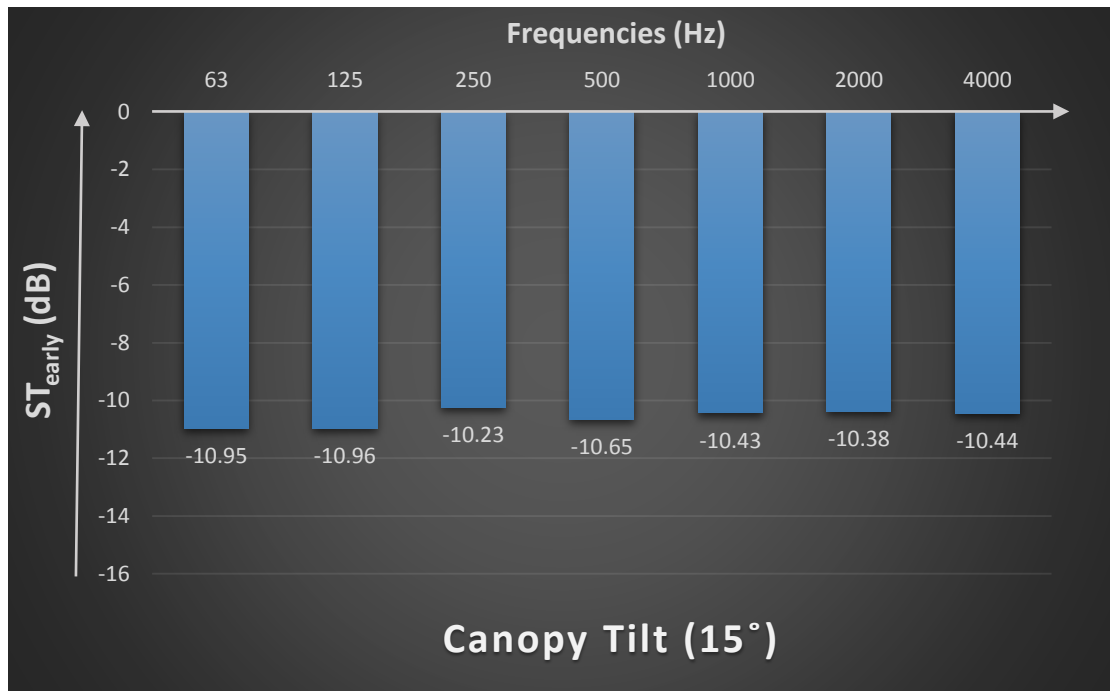
Τα αποτελέσματα των ST_{early} και ST_{late} σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) φαίνονται πιο κάτω στα Γραφήματα 4.4.1 – 4.4.12.



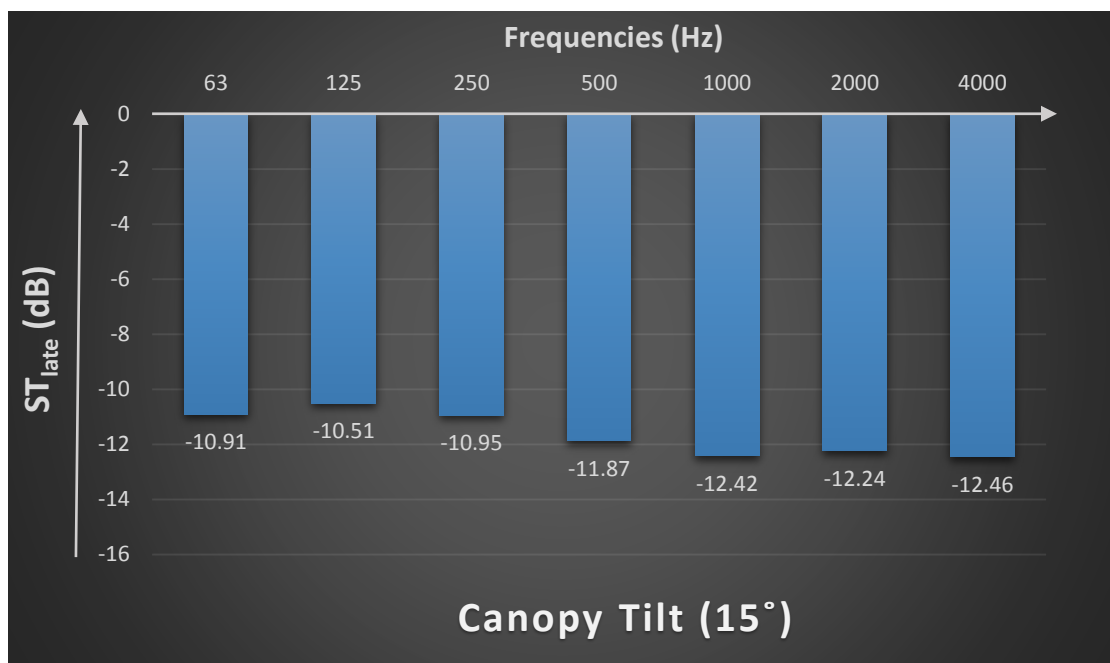
Γράφημα 4.4.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 20°.



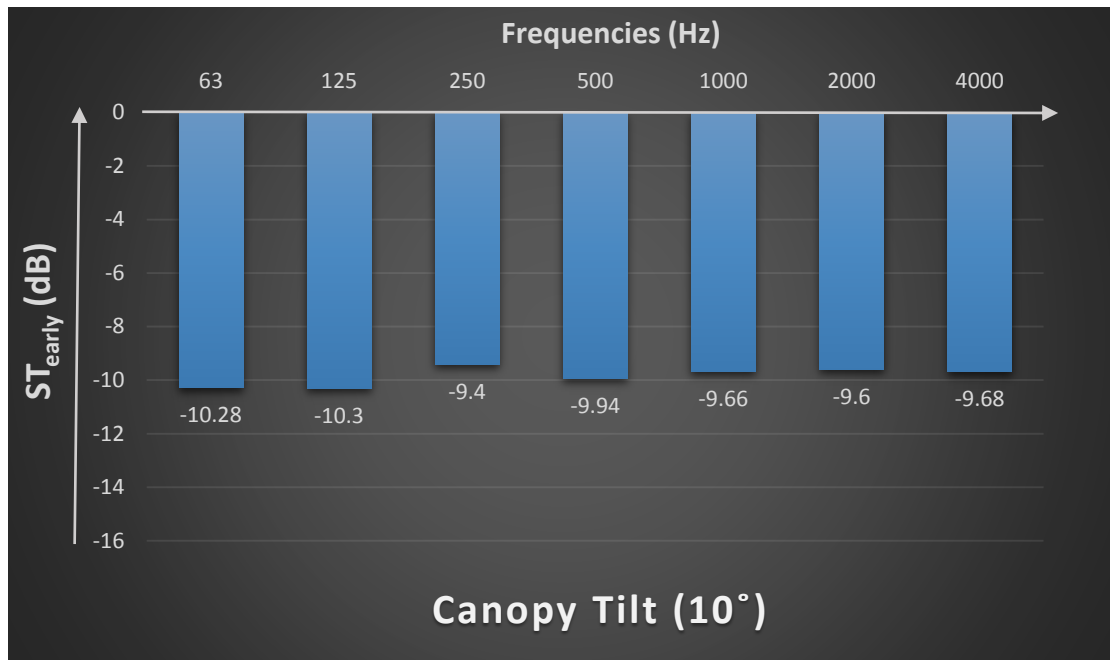
Γράφημα 4.4.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 20°.



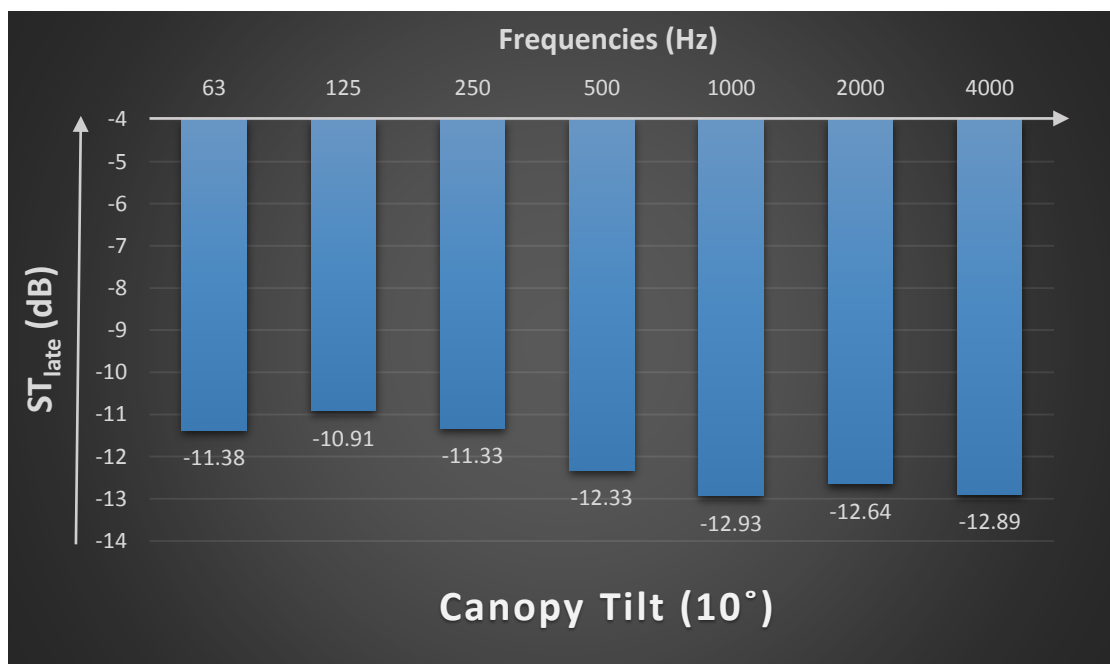
Γράφημα 4.4.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 15°.



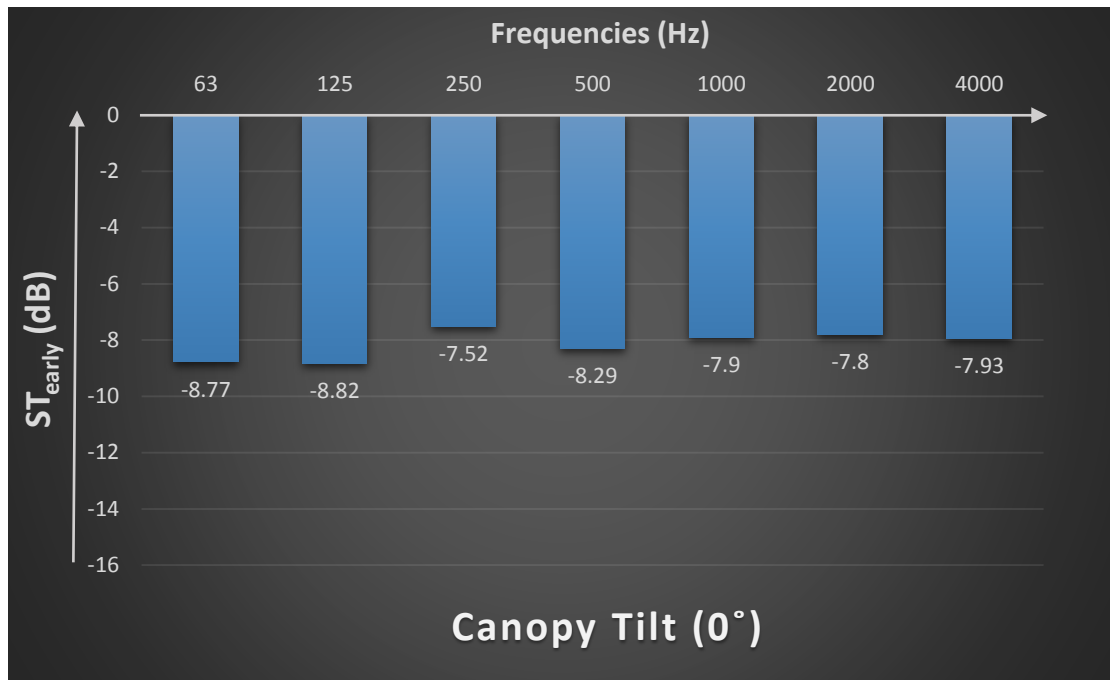
Γράφημα 4.4.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 15°.



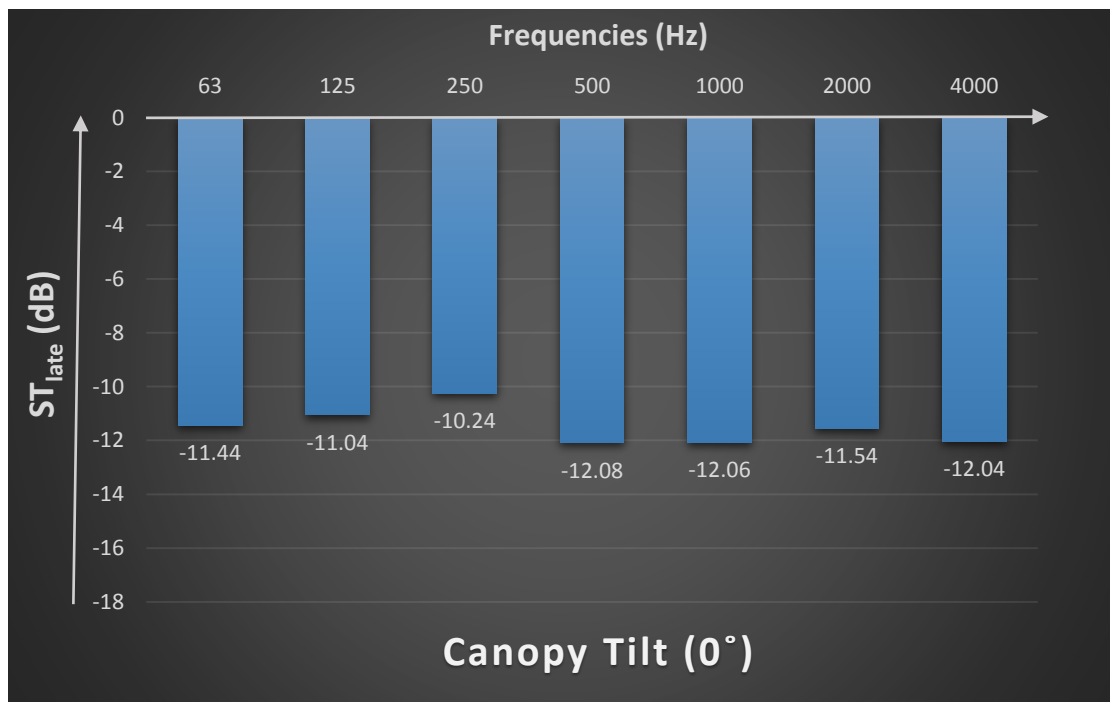
Γράφημα 4.4.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 10° .



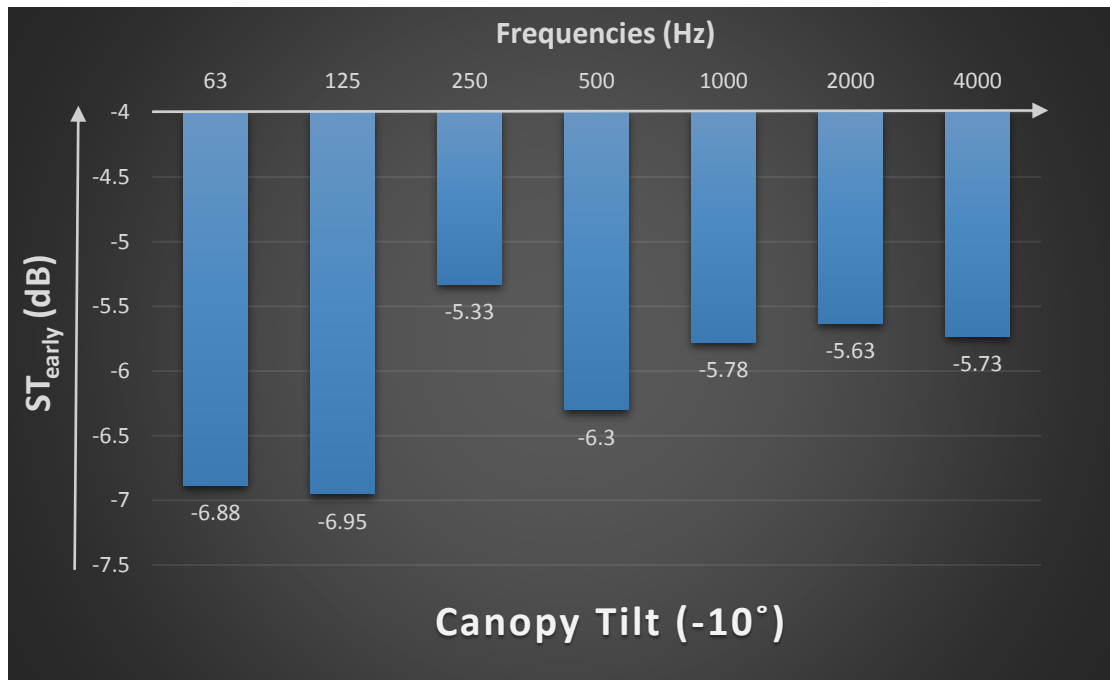
Γράφημα 4.4.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 10° .



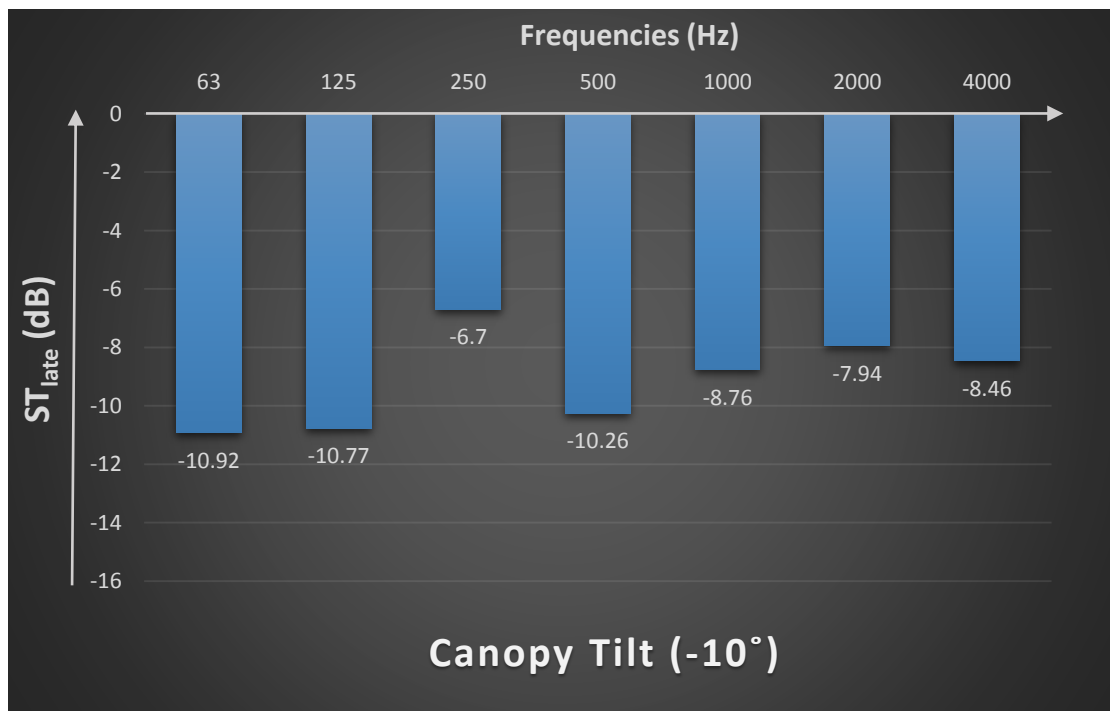
Γράφημα 4.4.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 0° .



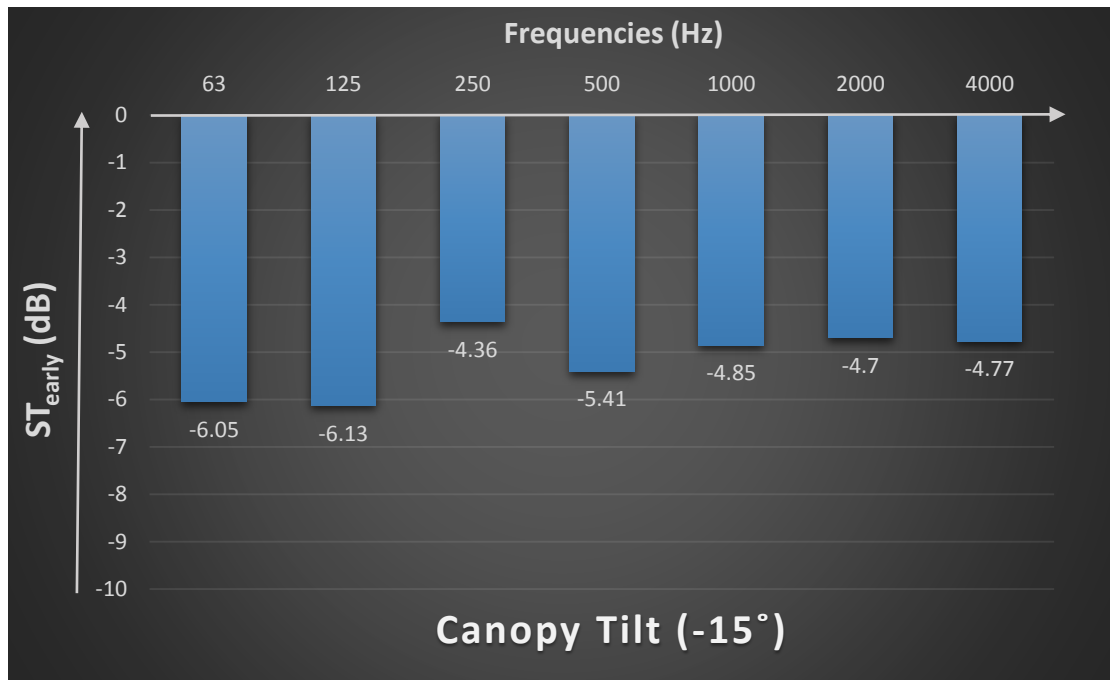
Γράφημα 4.4.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις 0° .



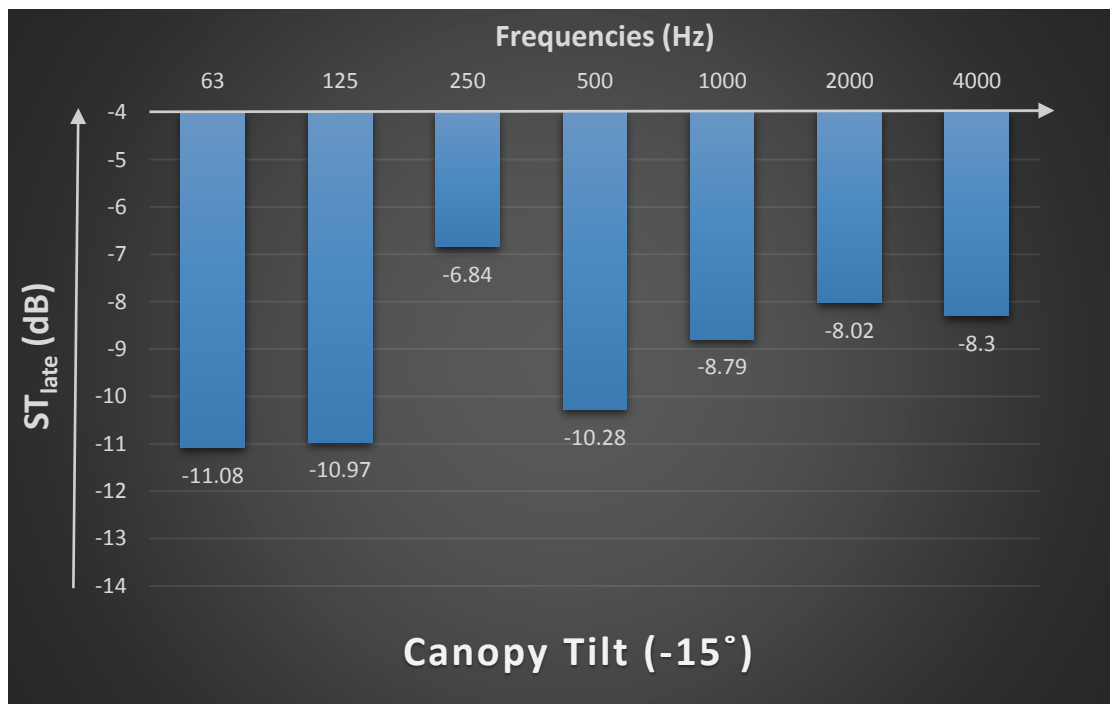
Γράφημα 4.4.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -10° .



Γράφημα 4.4.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -10° .



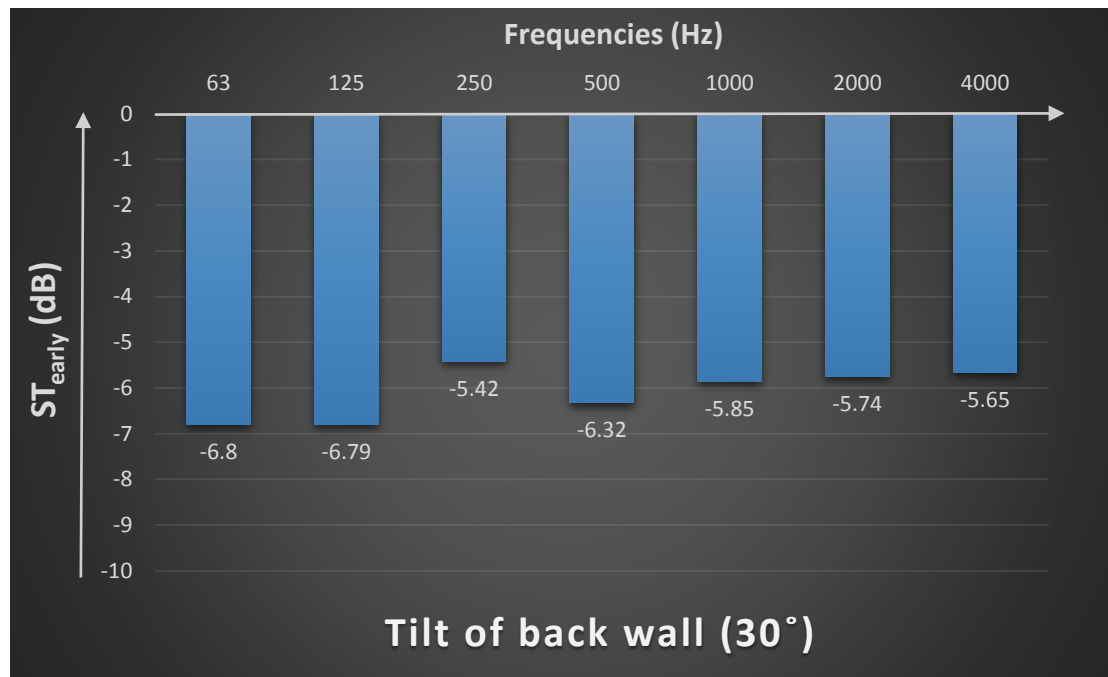
Γράφημα 4.4.11 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -15° .



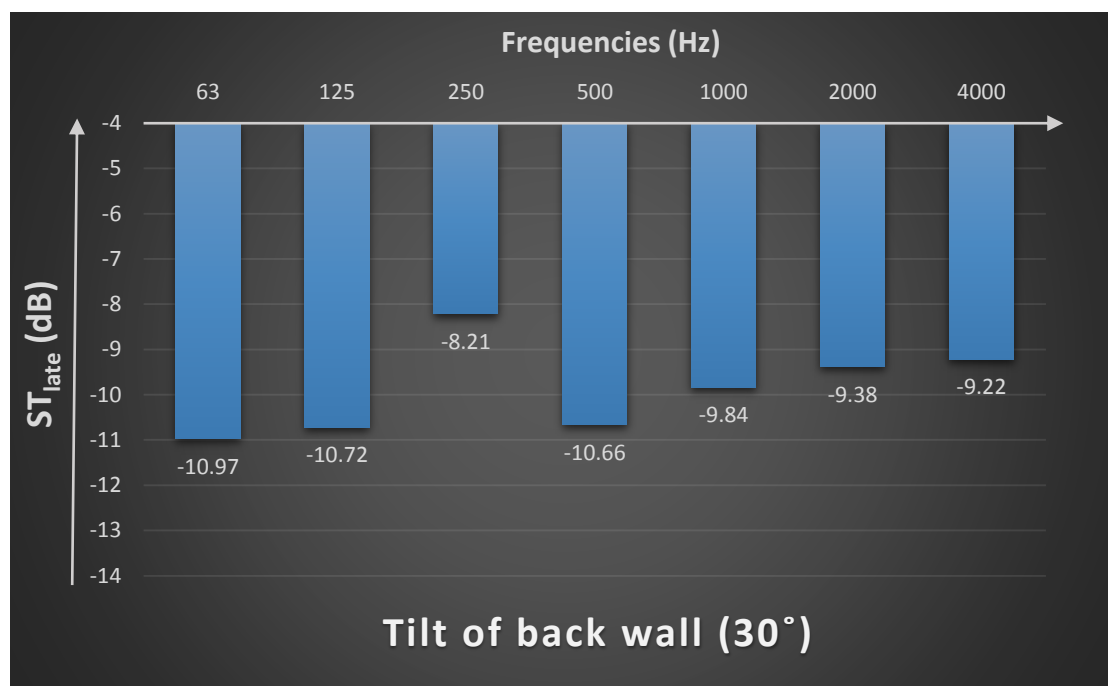
Γράφημα 4.4.12 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής ορίστηκε στις -15° .

4.5 Κλίση πίσω τοίχου σκηνής

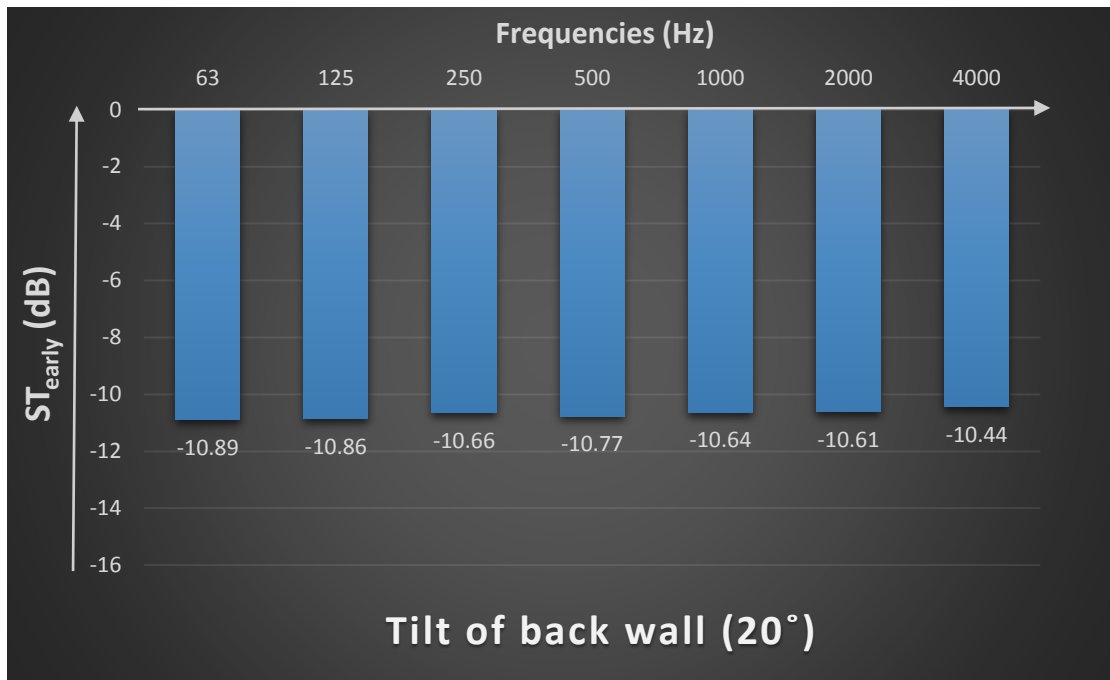
Τα αποτελέσματα των ST_{early} και ST_{late} σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του πίσω τοίχου της σκηνής στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) φαίνονται πιο κάτω στα Γραφήματα 4.2.1 – 4.2.14.



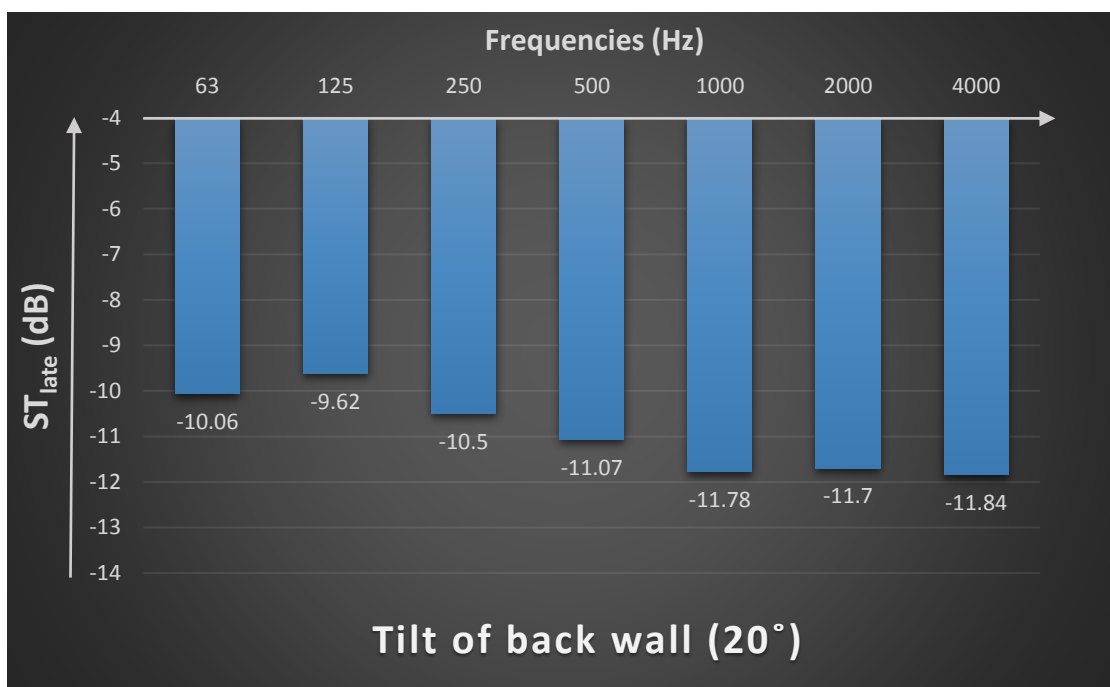
Γράφημα 4.5.1 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 30°.



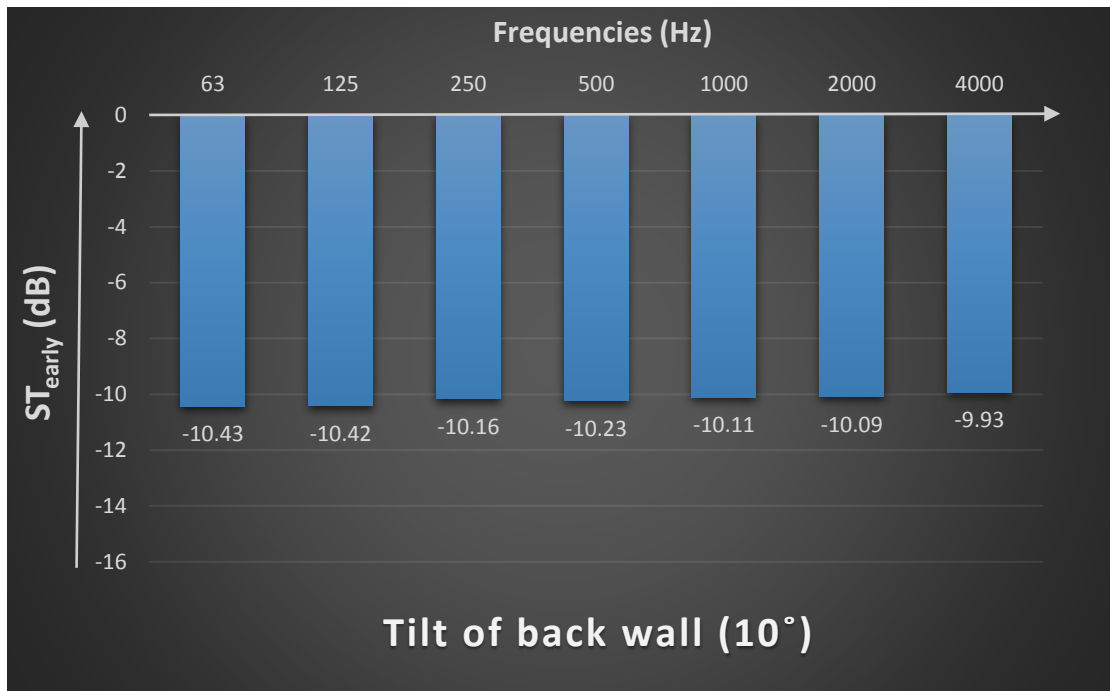
Γράφημα 4.5.2 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 30°.



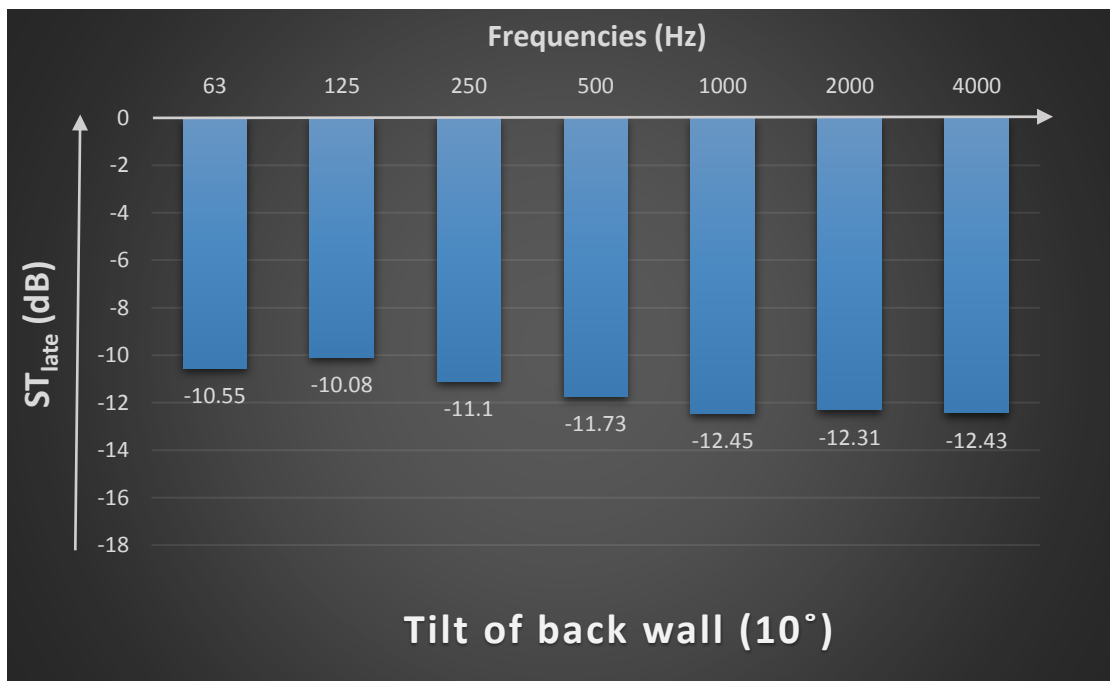
Γράφημα 4.5.3 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 20°.



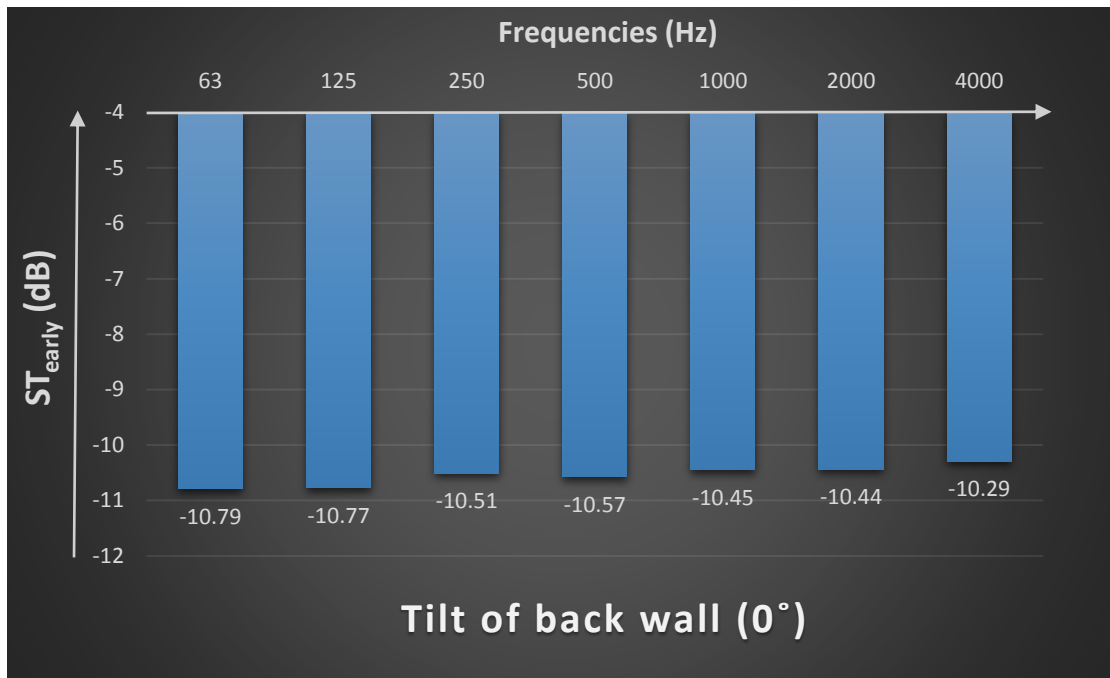
Γράφημα 4.5.4 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 20°.



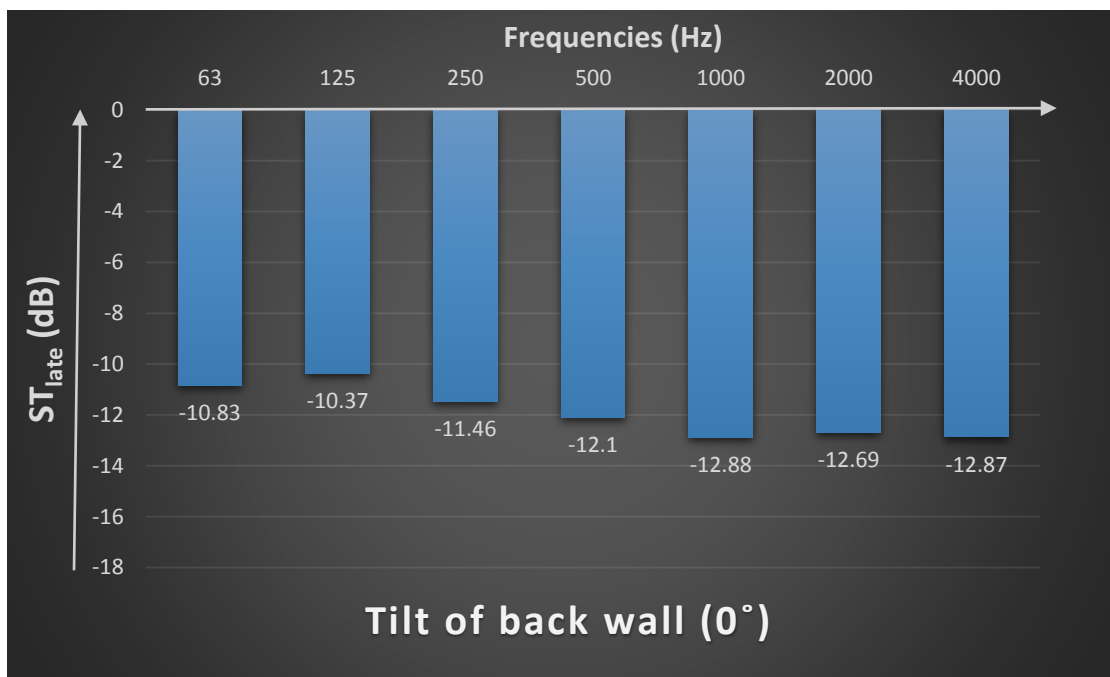
Γράφημα 4.5.5 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 10° .



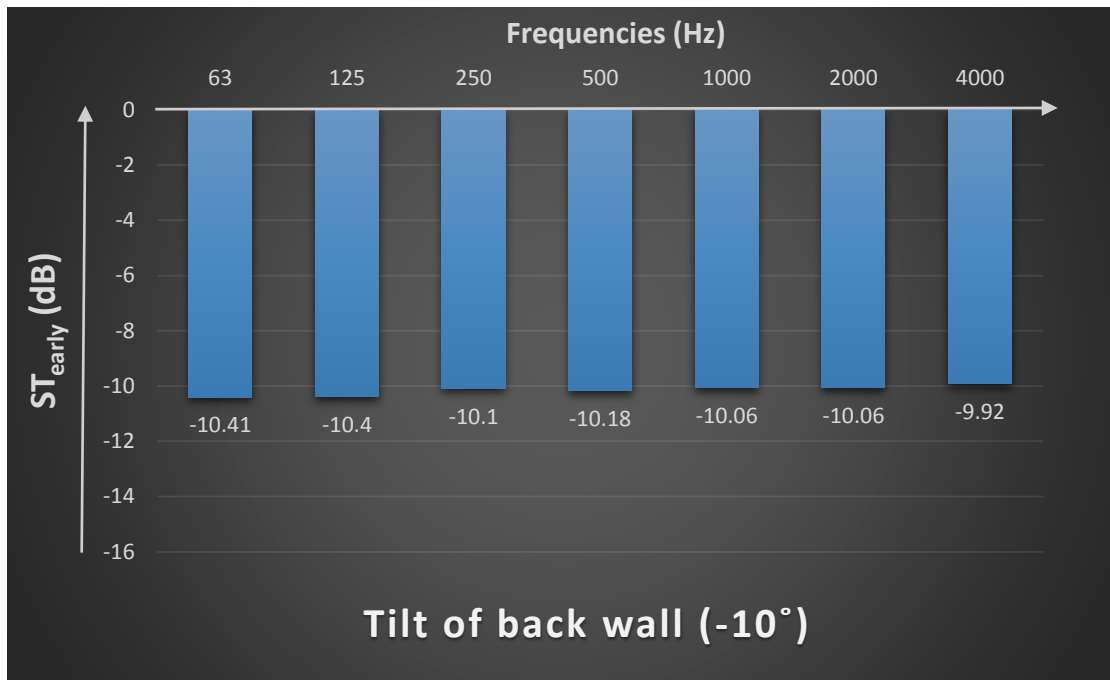
Γράφημα 4.5.6 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις 10° .



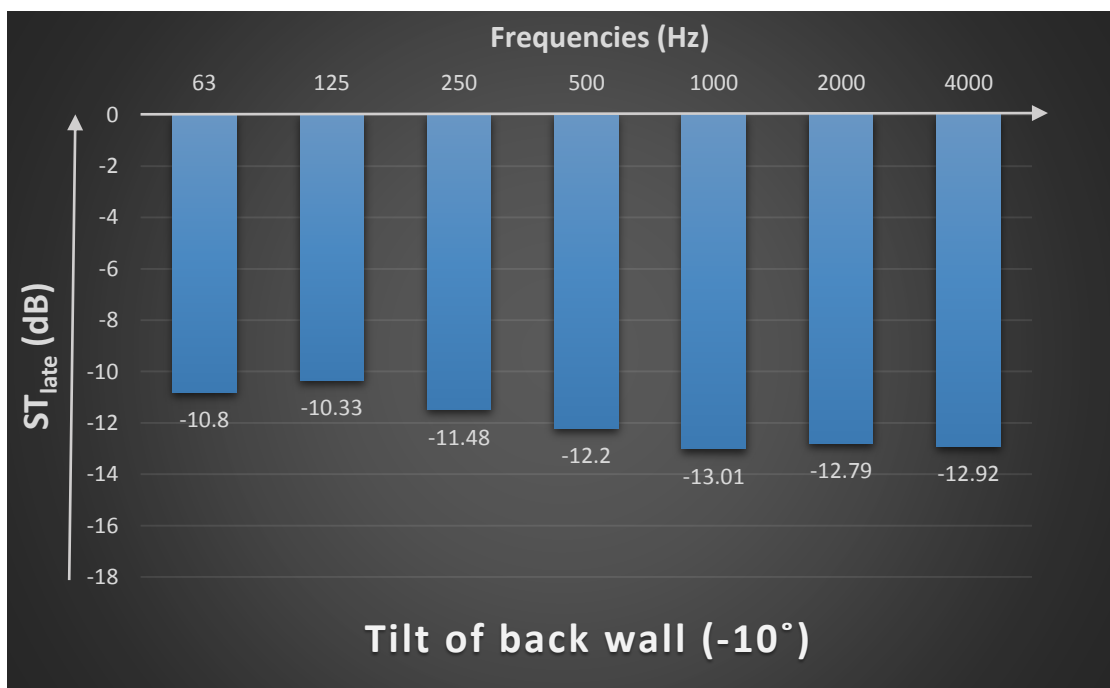
Γράφημα 4.5.7 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις 0° .



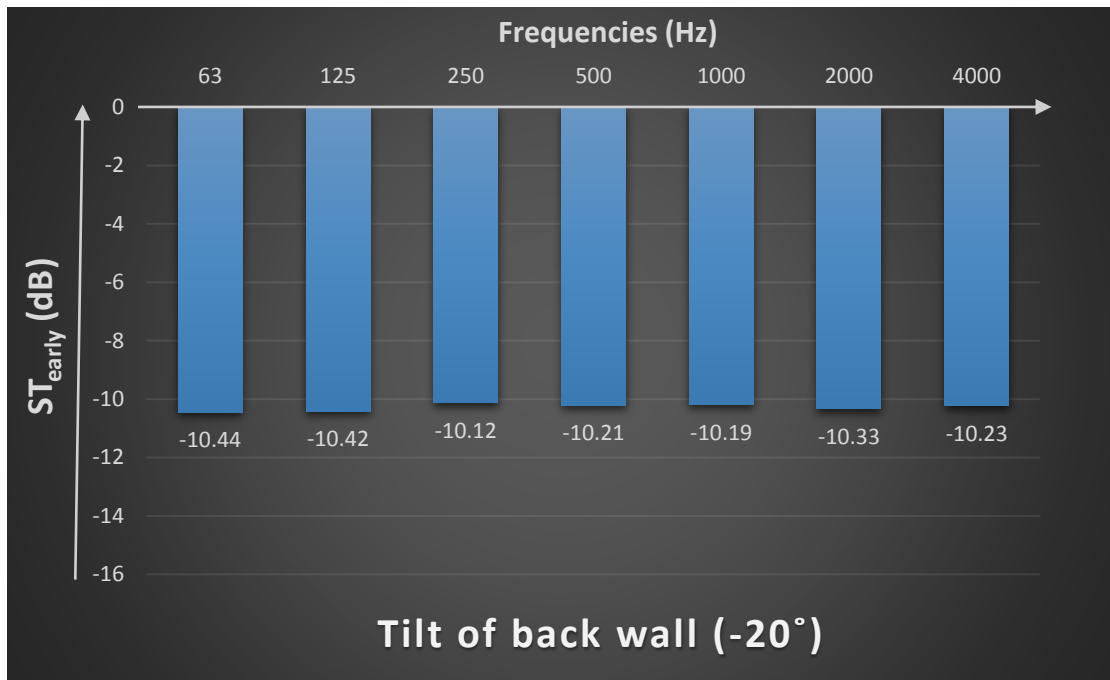
Γράφημα 4.5.8 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνης ορίστηκε στις 0° .



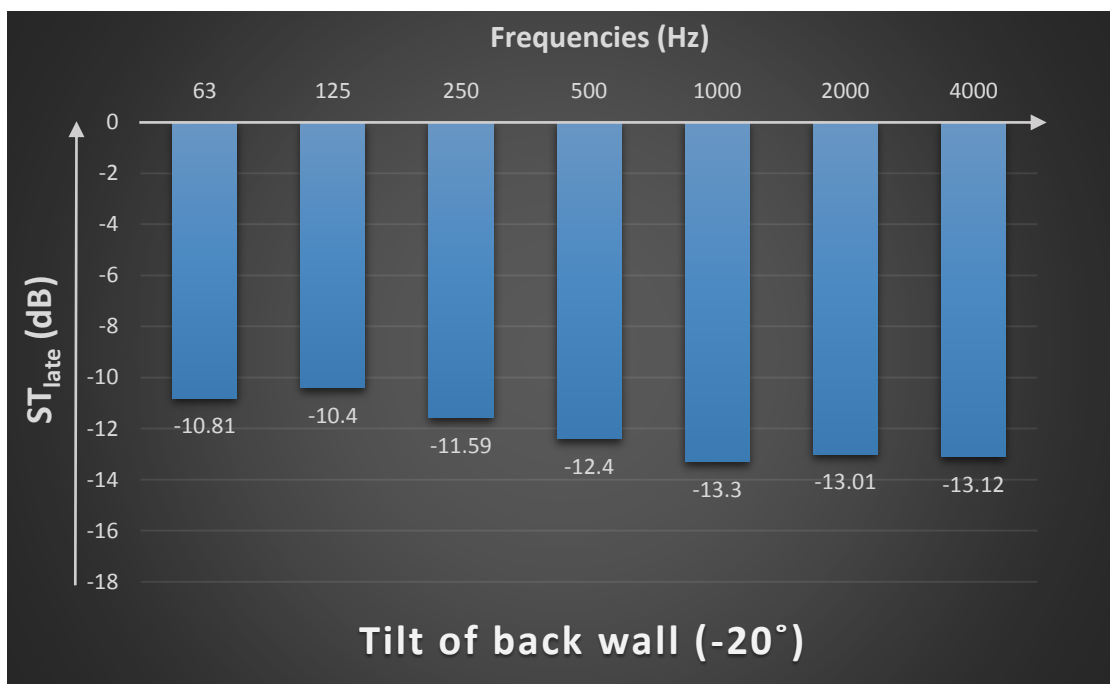
Γράφημα 4.5.9 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις -10° .



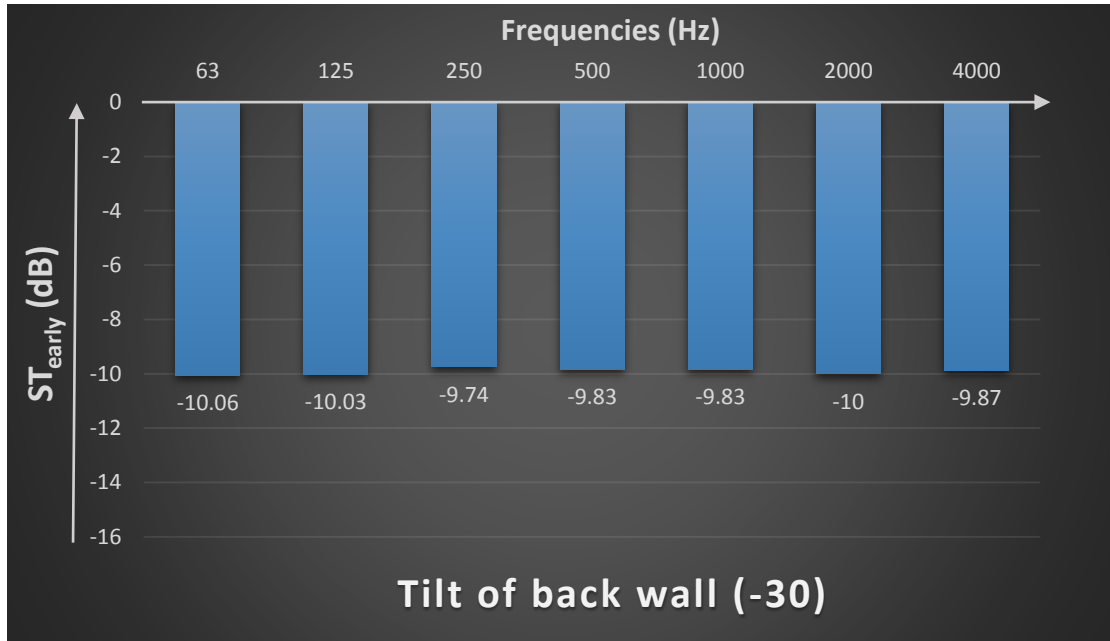
Γράφημα 4.5.10 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις -10° .



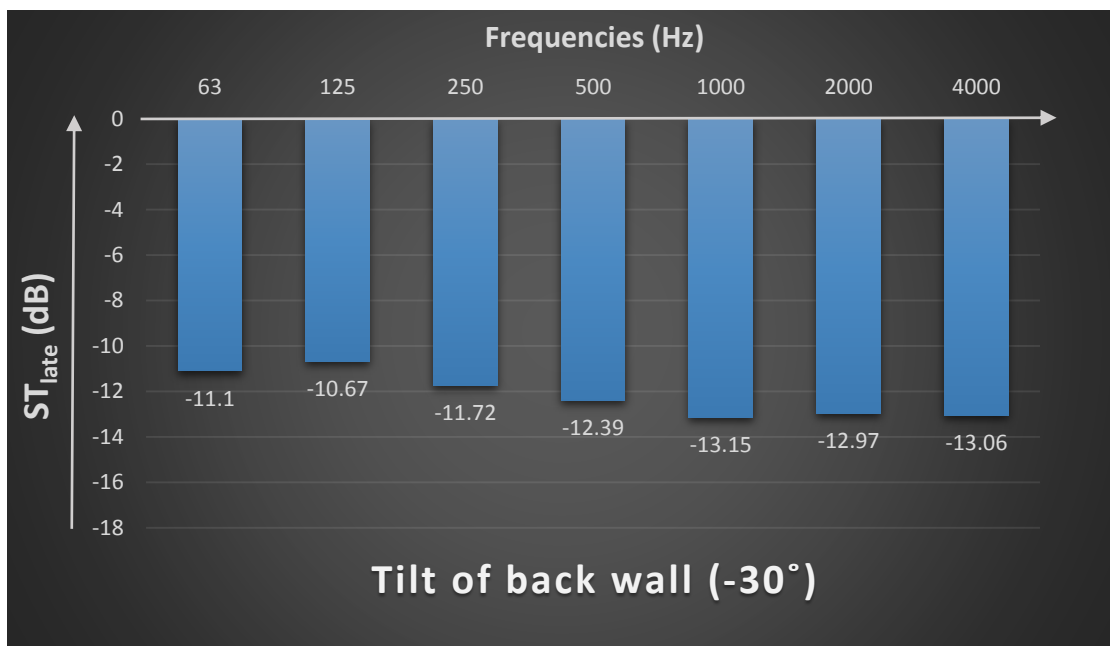
Γράφημα 4.5.11 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις -20° .



Γράφημα 4.5.12 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις -20° .



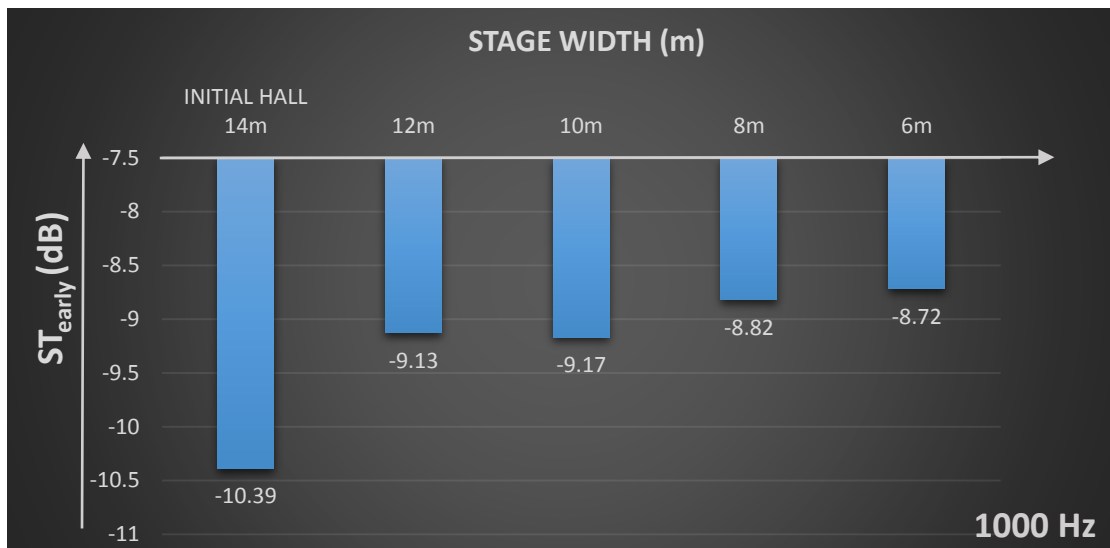
Γράφημα 4.5.13 Μετρήσεις του ST_{early} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις -30° .



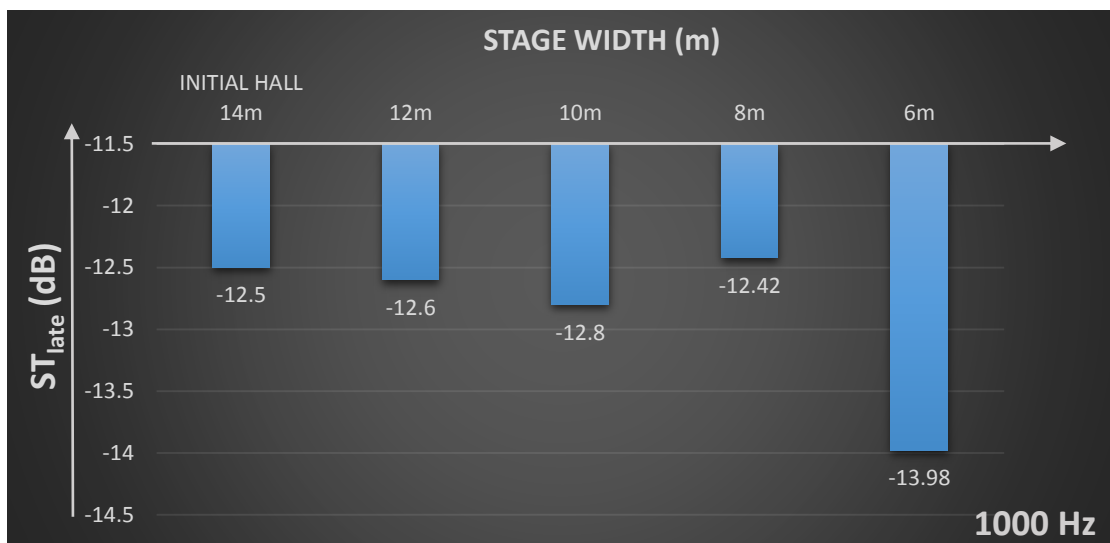
Γράφημα 4.5.14 Μετρήσεις του ST_{late} στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz) όταν η γωνία του πίσω τοίχου της σκηνής ορίστηκε στις -30° .

5 Ερμηνεία και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

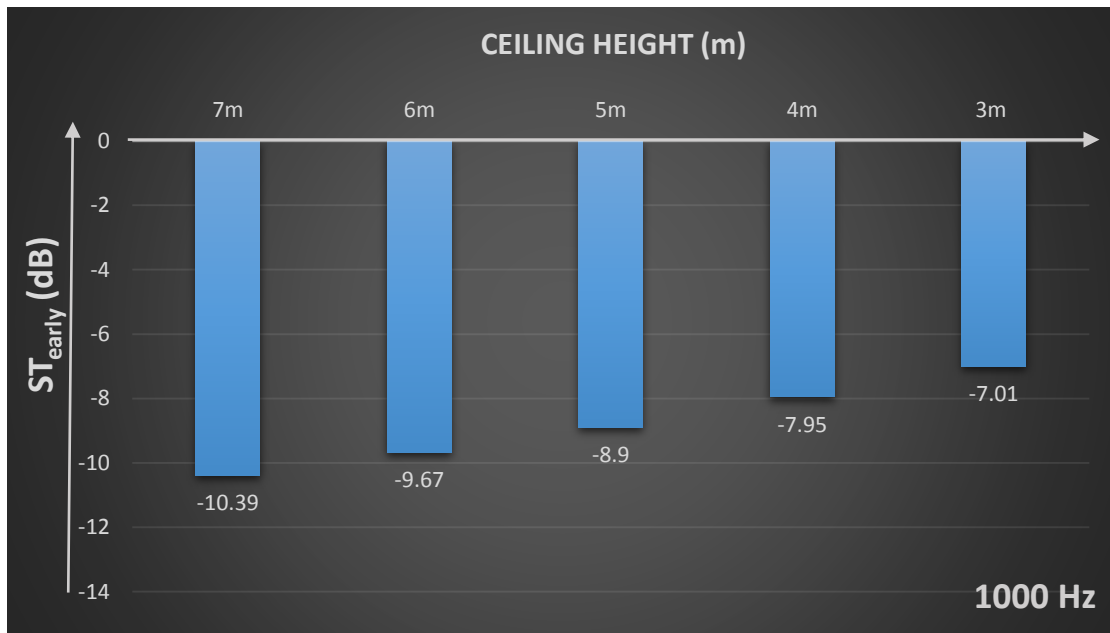
Στο προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των παραμέτρων ST_{early} και ST_{late} σε σχέση με τις αλλαγές πέντε γεωμετρικών παραμέτρων στο φάσμα συχνοτήτων (63-4000Hz). Στο παρών κεφάλαιο, τα παραπάνω αποτελέσματα θα ερμηνευτούν και θα αξιολογηθούν σε σχέση και με τα ευρήματα της σχετικής βιβλιογραφίας. Για να έχουμε μια καλύτερη εικόνα των αποτελεσμάτων και για να γίνει ευκολότερα η ερμηνεία και η αξιολόγησή τους, αυτά παρουσιάζονται πιο κάτω μόνο στη συχνότητα των 1000Hz σε σχέση με τις μετατροπές κάθε γεωμετρικής παραμέτρου. Η επιλογή των 1000Hz είναι δικαιολογημένη, αφού διαπιστώθηκε ότι οι δύο αυτές παράμετροι μεταβάλλονταν αναλογικά σε όλο το φάσμα συχνοτήτων που εξετάστηκε. Επιπλέον, η ζώνη των 1000Hz επισημάνθηκε ως σημαντική από τους Marshall et al [3].



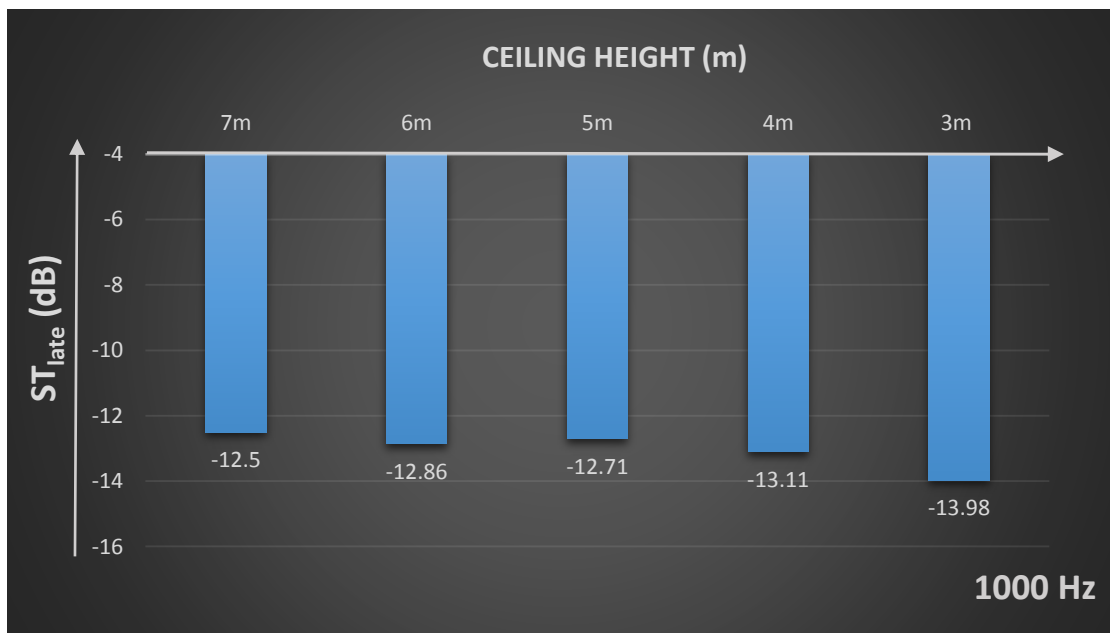
Γράφημα 4.5.1 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του εύρους της σκηνής.



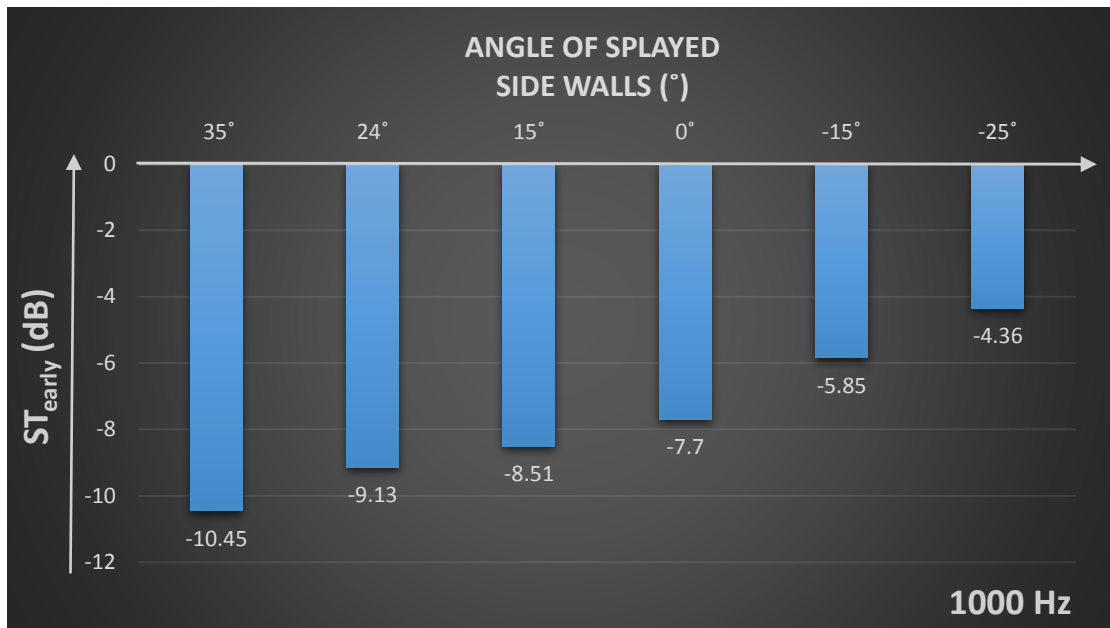
Γράφημα 4.5.2 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του εύρους της σκηνής.



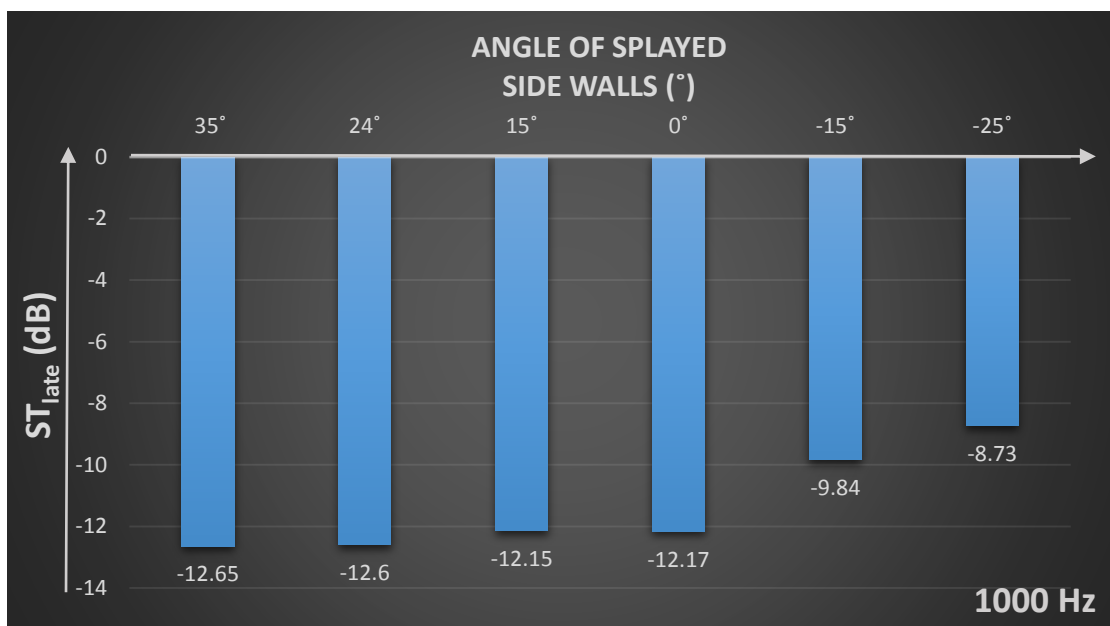
Γράφημα 4.5.3 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του ύψους της οροφής της σκηνής.



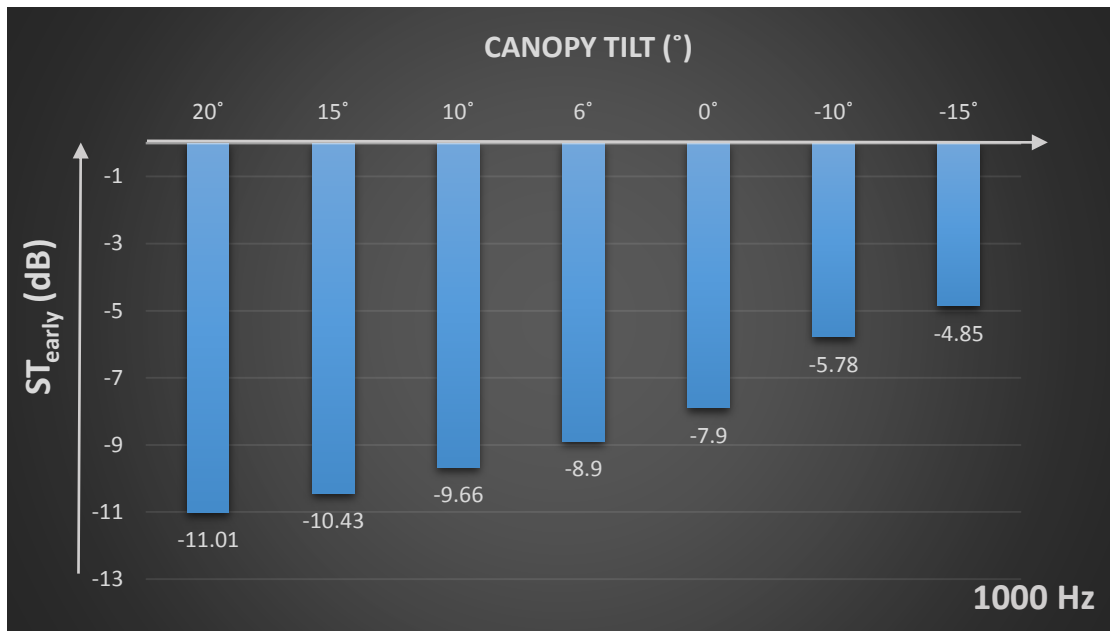
Γράφημα 4.5.4 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές του ύψους της οροφής της σκηνής.



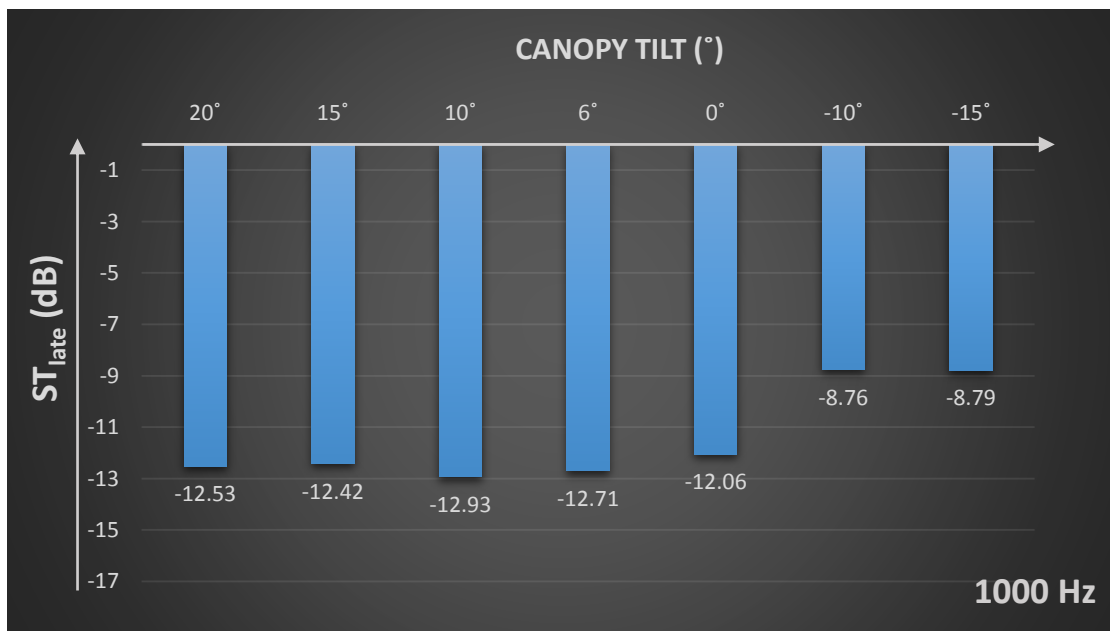
Γράφημα 4.5.5 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης των πλαϊνών τοίχων της σκηνής.



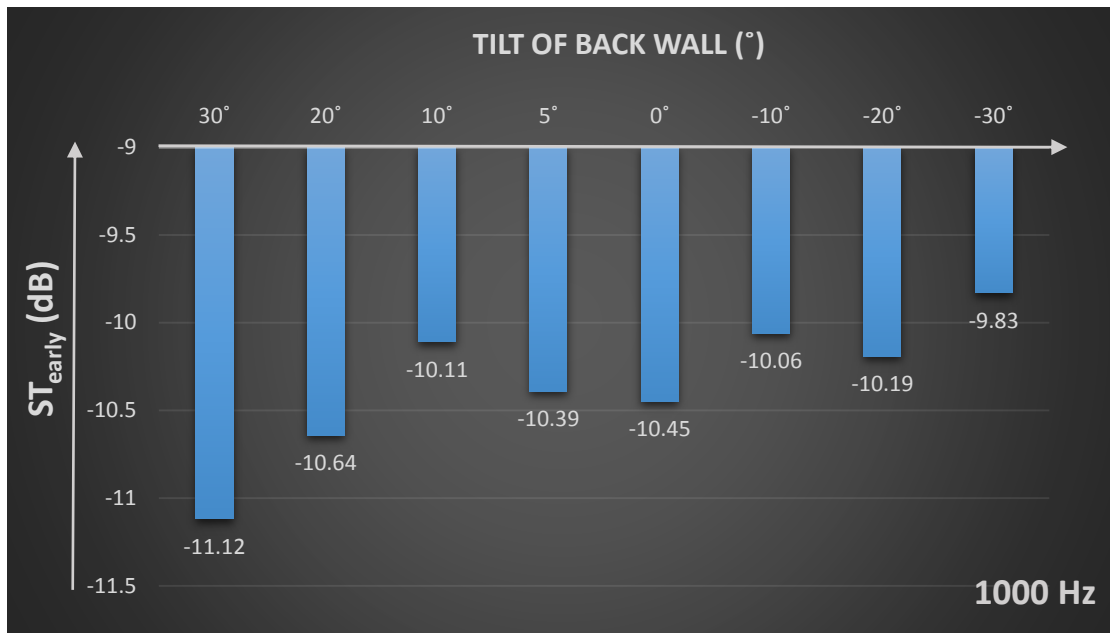
Γράφημα 4.5.6 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης των πλαϊνών τοίχων της σκηνής.



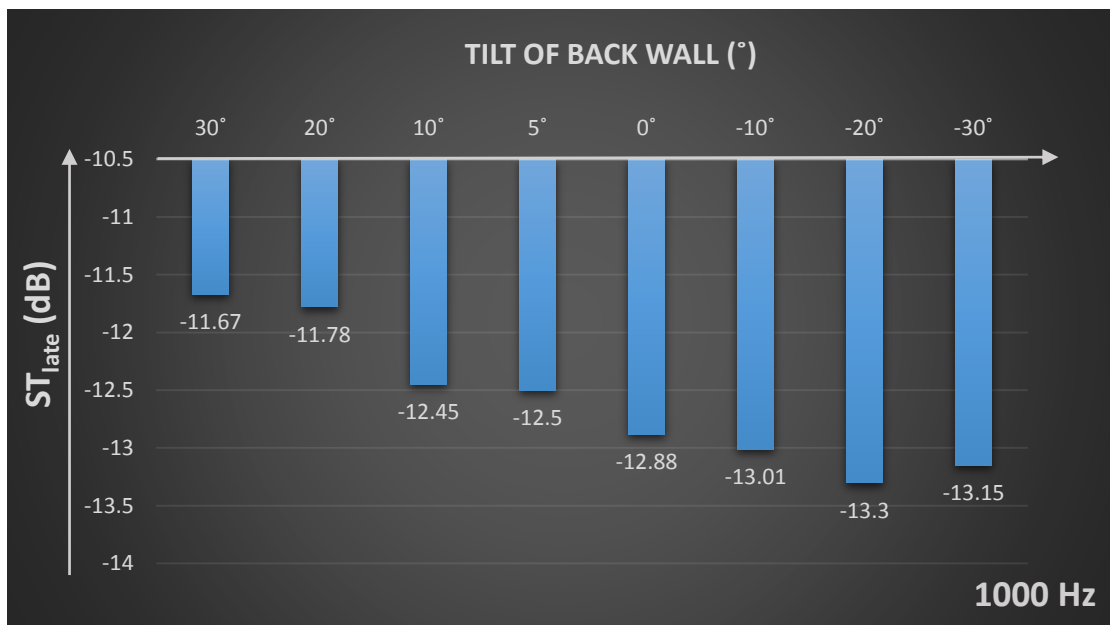
Γράφημα 4.5.7 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής.



Γράφημα 4.5.8 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του ανακλαστήρα οροφής της σκηνής.



Γράφημα 4.5.9 Μετρήσεις του ST_{early} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του τοίχου πίσω από τη σκηνή.



Γράφημα 4.5.10 Μετρήσεις του ST_{late} στα 1000 Hz σε σχέση με τις μεταβολές της κλίσης του τοίχου πίσω από τη σκηνή.

Η παρούσα εργασία επιβεβαίωσε ευρήματα προηγούμενων ερευνών, [1], [21], [24], [25], στις οποίες φαίνεται να προτιμώνται οι στενές σκηνές με ψηλή οροφή. Συγκεκριμένα, οι επιθυμητές τιμές του ST_{early} (-11dB) διαπιστώθηκε στην παρούσα έρευνα να συνδέεται με το συνδυασμό σχετικά στενών σκηνών και ψηλών οροφών (λόγος H/W γύρω στο 0.6) (βλ. Εικόνα 3.2.7, Γράφημα 5.1, Εικόνα 3.2.9 και Γράφημα 5.3). Αυτά τα αποτελέσματα επιβεβαιώνονται σε όλο το φάσμα συχνοτήτων. Από την άλλη, η παράμετρος ST_{late} παρατηρήθηκε να είναι ανεξάρτητη από το εύρος της σκηνής, για σχετικά μικρές σκηνές, δηλαδή για εύρος που κυμαίνεται μεταξύ 14 και 6m (Εικόνα 3.2.7, Γράφημα 5.2). Ομοίως, το ST_{late} βρέθηκε ότι είναι ανεξάρτητο από τις μεταβολές του ύψους της οροφής της σκηνής, δηλαδή σε ύψη που κυμάνθηκαν μεταξύ 7 και 3m (Εικόνα 3.2.9, Γράφημα 5.4). Ο λόγος H/W πάνω από 0.7 δεν φαίνεται να συνδέεται με τις επιθυμητές τιμές των ST_{early} και ST_{late} (Πίνακας 2.1).

Οι πιο πάνω διαπιστώσεις επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα της έρευνας των Chiang και Shu [2], δηλαδή ότι η πρόωρη ενέργεια επηρεάζεται από την αυξομείωση του όγκου της σκηνής. Συγκεκριμένα, αυτοί οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι μειώνοντας τον όγκο της σκηνής στο μισό, η πρόωρη ενέργεια αυξήθηκε κατά 2-3dB. Ομοίως, στην παρούσα εργασία παρατηρήθηκε μια αύξηση του ST_{early} γύρω στα 1.5-2.5dB, όταν ο όγκος της σκηνής μειώθηκε από τα 730m³ στα 400m³. Επιπρόσθετα, οι Chiang και Shu διαπίστωσαν ότι η καθυστερημένη ενέργεια δεν επηρεάστηκε όσο μεταβαλλόταν ο όγκος της σκηνής. Αυτό επιβεβαιώνεται και στην παρούσα έρευνα· το ST_{late} βρέθηκε να είναι ανεξάρτητο του όγκου της σκηνής.

Το ST_{early} φάνηκε να επηρεάζεται από την αλλαγή της κλίσης των πλαϊνών τοίχων της σκηνής. Συγκεκριμένα, καθώς η γωνία αυτή μειωνόταν, δηλαδή καθώς οι πλαϊνοί τοίχοι έτειναν να γίνουν παράλληλοι μεταξύ τους, το ST_{early} παρουσίασε αύξηση (Εικόνα 3.2.11, Γράφημα 5.5). Η γωνία των 24° με εύρος σκηνής 14m (διαστάσεις αρχικής αίθουσας) διαπιστώθηκε ότι ανταποκρίνεται στις βέλτιστες τιμές του ST_{early} (-11dB)· στη βιβλιογραφία υπάρχει μια εισήγηση [37] για γωνία των πλαϊνών τοίχων γύρω στις 16° (αυτή η εισήγηση όμως ανταποκρίνεται σε σκηνές μεγάλου μεγέθους και όχι στις σκηνές που εξετάστηκαν στην παρούσα μελέτη). Εκτός από το ST_{early} , και το ST_{late} παρατηρήθηκε να επηρεάζεται από τις μεταβολές της γωνίας των πλαϊνών τοίχων. Συγκεκριμένα, καθώς η γωνία αυτή μειωνόταν και έπαιρνε αρνητικές τιμές, το ST_{late} αυξανόταν (Εικόνα 3.2.11, Γράφημα 5.6). Γωνίες που κυμαίνονται μεταξύ 35 και 0 διαπιστώθηκε ότι ανταποκρίνονται σε μεγάλο βαθμό στις επιθυμητές τιμές του ST_{late} (-14dB). Όμως, η προϋπόθεση που πρέπει να υπάρχει μεταξύ πρόωρης και καθυστερημένης ενέργειας ($ST_{early}-ST_{late} = 3dB$ (Πίνακας 2.1)), βρέθηκε να συνδέεται με γωνίες των πλαϊνών τοίχων μεταξύ 35° και 24°, όταν το εύρος της σκηνής ορίστηκε στα 12m.

Άρα, διαπιστώθηκε ότι η επιθυμητή γωνία των πλαϊνών τοίχων εξαρτάται από το εύρος της σκηνής. Ειδικότερα, για σχετικά μεγάλο εύρος σκηνής (14m) η γωνία των 24° έδωσε τις βέλτιστες τιμές των ST_{early} και ST_{late} . Παρ' όλα αυτά, για πιο στενές σκηνές (12m) μια ευρύτερη γωνία (35°) φάνηκε να συνδέεται με τις επιθυμητές τιμές των ST_{early} και ST_{late} . Με τα παραπάνω, φαίνεται ότι σε σχετικά μικρές σκηνές, μια μεγαλύτερη γωνία είναι η βέλτιστη σε σχέση με τη γωνία των 16° που αναφέρεται στη βιβλιογραφία.

Επιπρόσθετα, στην παρούσα εργασία, οι επιθυμητές τιμές του ST_{early} (-11dB) βρέθηκε να συνδέονται με κλίση 20° του ανακλαστήρα οροφής (Εικόνα 3.2.13, Γράφημα 5.7) όταν το ύψος της οροφής ορίστηκε στα 5m από το επίπεδο της σκηνής. Η φυσική αυτή παράμετρος αυξήθηκε και συγκεκριμένα έτεινε να απομακρύνεται από τις επιθυμητές τιμές όσο ο ανακλαστήρας οροφής έτεινε να γίνει οριζόντιος. Επίσης, οι επιθυμητές τιμές του ST_{late} (-14dB) διαπιστώθηκε ότι συνδέονται με γωνίες του ανακλαστήρα που κυμαίνονται μεταξύ 20° και 0° (Εικόνα 3.15, Γράφημα 5.8) με το ύψος οροφής στα 5m. Η παράμετρος αυτή αυξήθηκε και συγκεκριμένα έτεινε να απομακρύνεται από τις επιθυμητές τιμές όσο η γωνία του ανακλαστήρα οροφής έτεινε να έχει αρνητικές τιμές. Όμως, η προϋπόθεση της ισορροπίας της πρόωρης-καθυστερημένης ενέργειας που δίνεται στη βιβλιογραφία, βρέθηκε να συνδέεται με κλίση ανακλαστήρα οροφής που κυμαίνεται σε γωνίες μεταξύ 20° και 15° , με το ύψος του ανακλαστήρα οροφής να βρίσκεται στα 5m από το επίπεδο της σκηνής.

Άρα, διαπιστώθηκε ότι η επιθυμητή γωνία του ανακλαστήρα οροφής εξαρτάται από το ύψος της οροφής από τη σκηνή. Ειδικότερα, για σχετικά μεγάλο ύψος σκηνής (7m) η γωνία των 6° έδωσε τις βέλτιστες τιμές των ST_{early} και ST_{late} . Για πιο χαμηλές οροφές (5m) μια μεγαλύτερη γωνία (15° και 20°) φάνηκε να συνδέεται με τις επιθυμητές τιμές των ST_{early} και ST_{late} .

Τέλος, όσο αφορά την κλίση του πίσω τοίχου της σκηνής, είναι ανεξάρτητη με τις τιμές του ST_{early} (Εικόνα 3.15, Γράφημα 3.9). Όμως, στην παρούσα εργασία, η προϋπόθεση της ισορροπίας μεταξύ πρόωρης και καθυστερημένης ενέργειας φάνηκε να ικανοποιείται για τιμές γωνιών του πίσω τοίχου, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 10° και -20° (Εικόνα 3.15, Γράφημα 5.10).

6 Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο να συνεισφέρει στο πεδίο της ακουστικής της σκηνής, δίνοντας 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 πρόωρης και της καθυστερημένης 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 730m³ στα 290m³) παρατηρήθηκε μια ανεπιθύμητη αύξηση της πρόωρης ενέργειας, ενώ η καθυστερημένη 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 πρόωρης και της καθυστερημένης 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 800m³ 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 σηνές.

7 Βιβλιογραφία

- [1] A. C. Gade, «Acoustics for Symphony Orchestras; status after three decades of experimental research,» σε *Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA*, Melbourne, Australia, 2010.
- [2] W. Chiang και 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 και H. Alrutz, «Acoustical conditions preferred for ensemble,» *J. Acoust. Soc. Am.*, αρ. 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*, αρ. 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*, αρ. 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,» σε *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 και E. C. Biassoni de Serra, «Zum Verdeckungseffekt bei Instrumentalmusikern,» *Acustica* 46, pp. 130-140, 1980.
- [11] G. M. Naylor και R. Craik, «Effects of Level Difference and Musical Texture on Ease of Ensemble,» *Acustica* 65, pp. 95-100, 1988.
- [12] K. Ueno και 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 και T. Kanamori, «Experimental Study on Stage Acoustics for Ensemble Performance in Orchestra,» σε *Proceedings of 18th ICA*, Japan, 2004.
- [14] W. Chiang, S.-T. Chen και S.-T. Huang, «Subjective assessment of Stage acoustics for Solo and Chamber Music Performances,» *Acustica* 89, αρ. 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 και M. Kivits, «Stage acoustics: experiments on 7 stages of concert halls in the Netherlands,» σε *Proceedings of Internoise Ottawa*, Canada, 2009.
- [18] R. van Luxemburg, R. Wenmaekers, C. Hak και M. Kivits, «Stage acoustics, further development of parameter LQ7-40,» σε *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 και A. Gade, «Acoustical evaluation of different acoustic conditions in The Queen's Hall - The Royal Library, Copenhagen,» σε *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,» σε *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,» σε *Master's Thesis in collaboration with Arup NY*, Ecole Centrale de Lyon, 2005.
- [28] M. Skalevic, «Orchestra Canopy Arrays - Some Significant Features,» σε *Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting* , Gothenburg, Sweden, 2006.

- [29] R. H. C. Wenmaekers, C. C. J. M. Hak και 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 και J. J. Dammerud, «Stage acoustics in concert halls-Early investigations,» σε *Institute of Acoustics*, 2006.
- [31] W. Reichardt και U. Lehmann, «Sind Rauneindruck and Durchsichtigkeit des Horerlebnisses im Konzertsaal Gegensatze?,» *Applied Acoustics*, αρ. 9, p. 139.
- [32] V. Jordan, «Einige Bemerkungen uber Anhall und Anfangsnachhall in Musikraumen,» *Applied Acoustics*, 1, p. 29, 1968.
- [33] U. Eysholdt, Subjective investigations and digital simulations of sound fields from concert halls, Dissertation, Georg-August-Universitat Gottingen.
- [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*, τόμ. 86, pp. 943-956, 2000.
- [36] J. S. Bradley, «Predictors of speech intelligibility in rooms,» *J. Acoust. Soc. Am*, τόμ. 80, αρ. 3, pp. 837-845, 1986.
- [37] S. Kan, K. Takaku και S. Nakamura, «A report on the relationship between orchestra shell design and musicians' acoustical impression,» 15th ICA Trondheim, 1995, pp. 525-528.

Παράρτημα Α

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

Παράρτημα Β

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

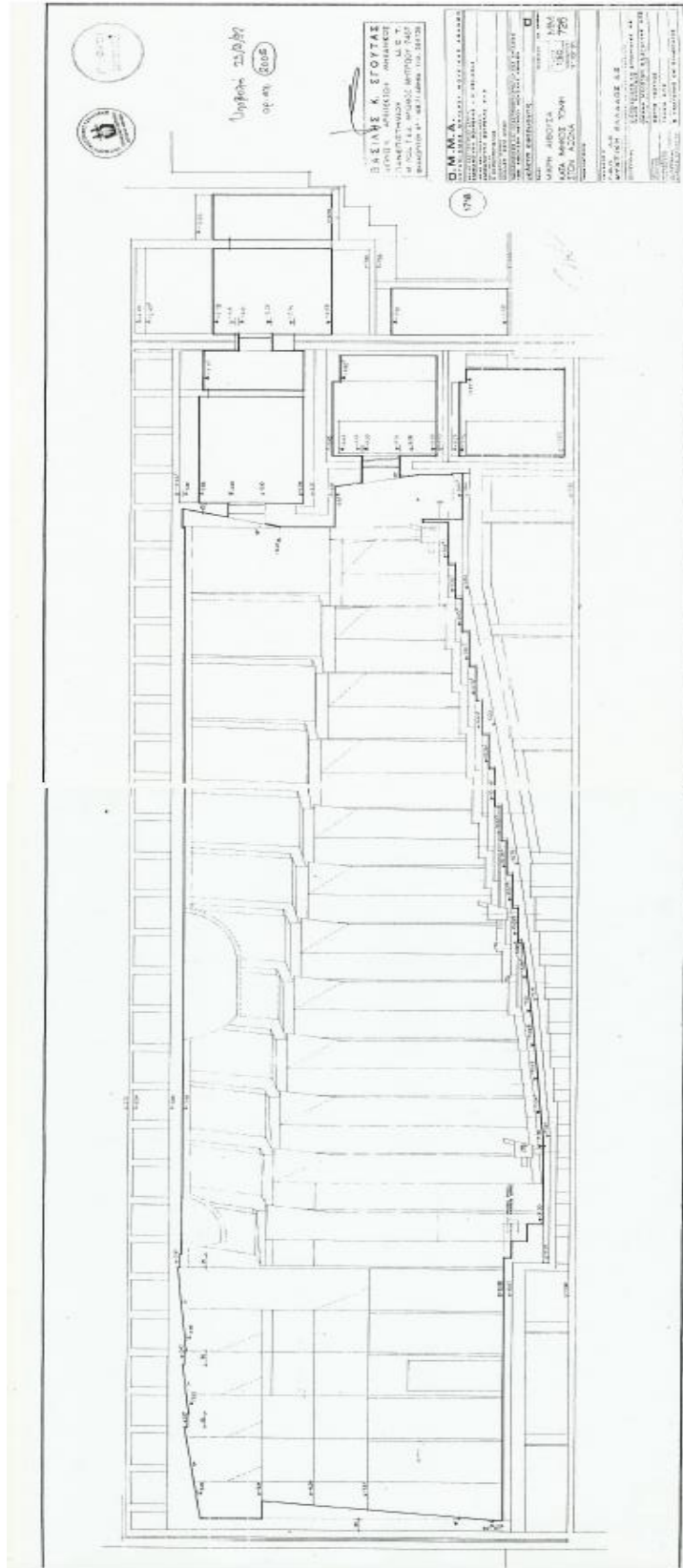
Β.1. Σχετικά με την Αίθουσα Δημήτρης Μητρόπουλος



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.1.2. Τομή Αίθουσας Δημήτρη Μητρόπουλου



Παράρτημα Γ

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

Γ.1. ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ (Factor Analysis)

Γ.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.

Γ.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.

Γ.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.

Γ.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.

Παράρτημα Δ

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

Δ.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.

Δ.2. Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Δ.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.

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

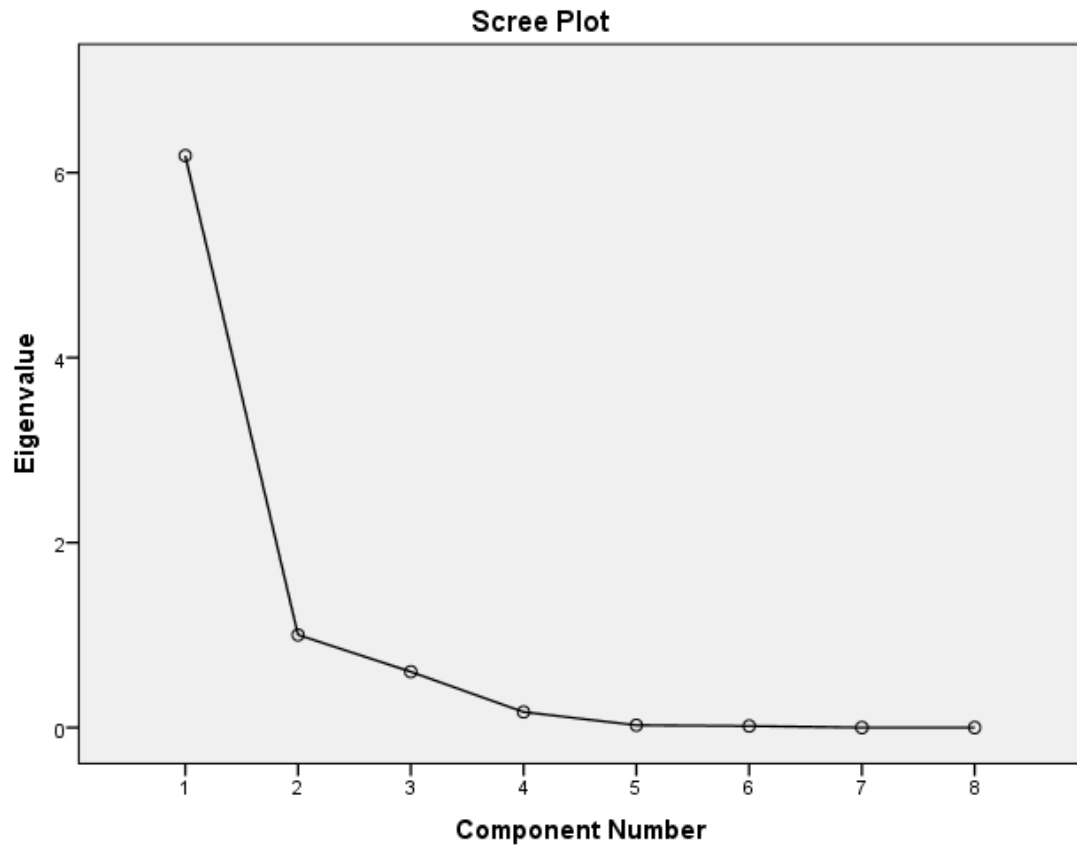
Εδώ παρουσιάζονται οι ιδιοτιμές και τα ποσοστά διακύμανσης των παραγόντων. Σημειώνεται ότι παράγοντες με ιδιοτιμή μικρότερη της μονάδας αγνοούνται καθώς αποτελούνται από διακύμανση σφάλματος που είναι δύσκολο να ερμηνευθεί. Όπως είναι φανερό και στον παρακάτω πίνακα, η διακύμανση εξηγείται σε ποσοστό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



4.2.3. 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.

Δ.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

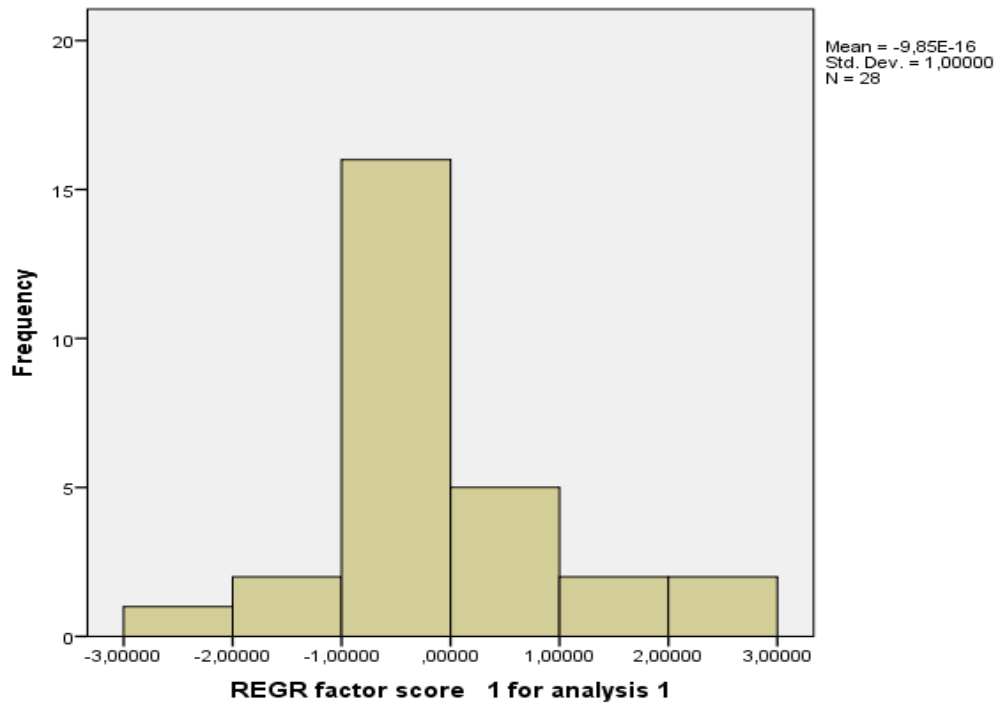
Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.^a

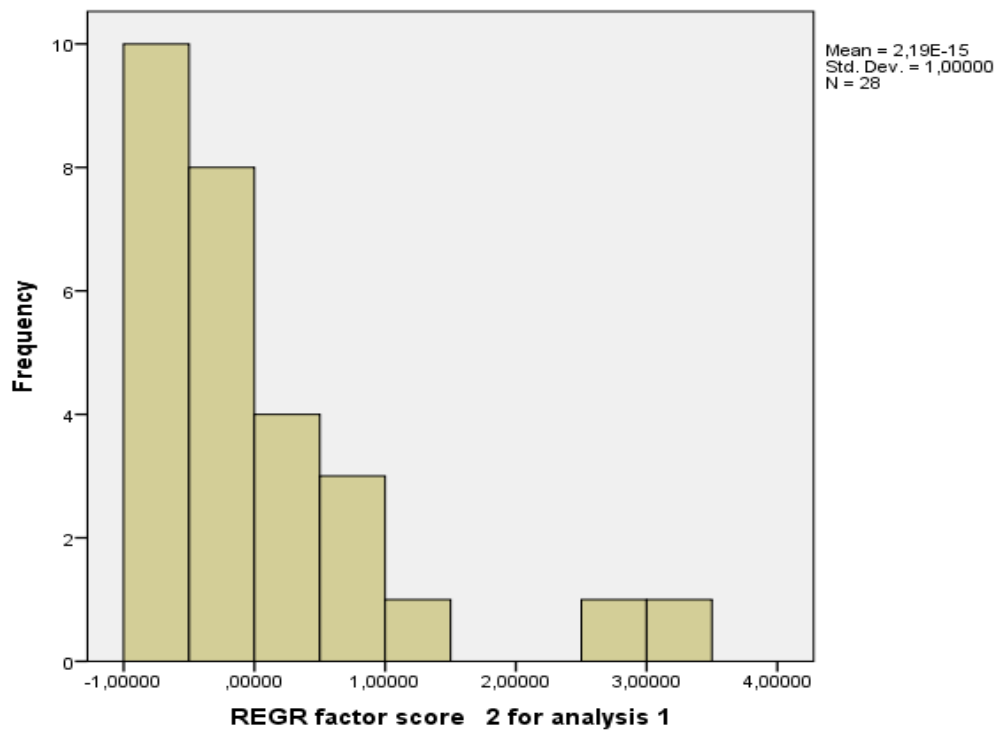
a. Rotation converged in 3 iterations.

Δ.2.5. Factor scores (Τιμές Συνιστωσών)

Graph



Graph



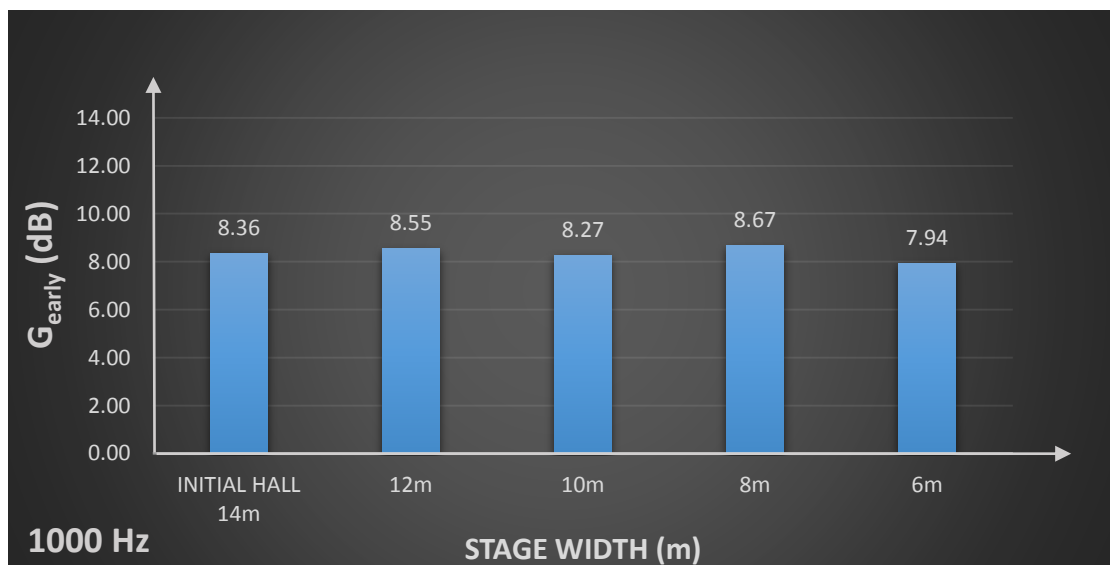
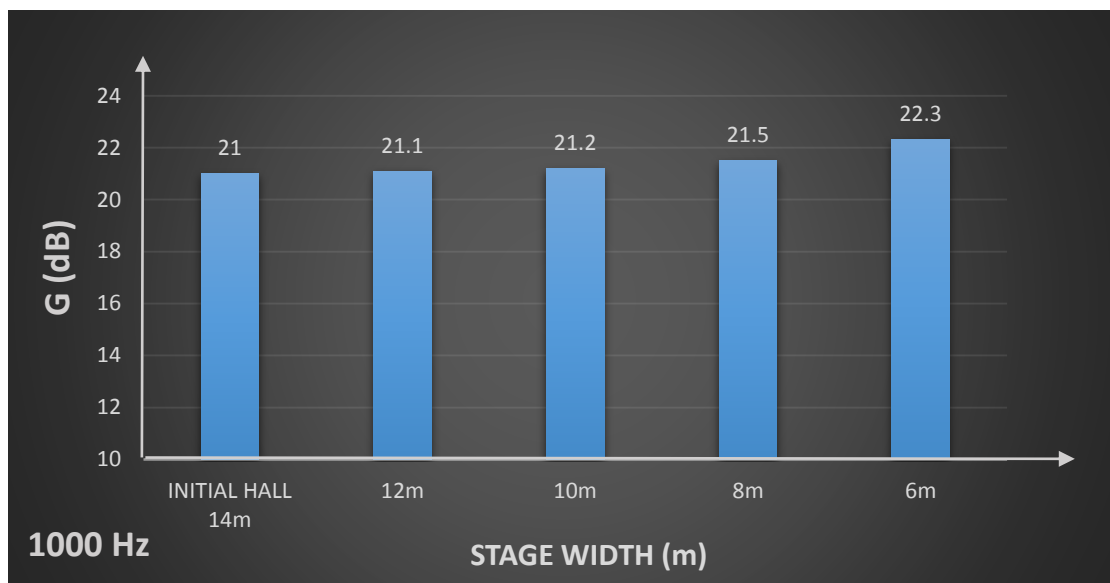
A/A	Factor_1 Score	Factor_2 Score
1	-0.18412	-0.11857
2	-0.47186	0.14971
3	-0.34663	0.274
4	-2.24927	2.63421
5	-0.25446	-0.58755
6	-0.37072	-0.20872
7	-1.06106	0.97348
8	-1.43365	0.8236
9	-0.03645	-0.85353
10	-0.18412	-0.11857
11	0.04982	0.34023
12	1.52154	1.1068
13	1.6395	3.00536
14	0.05239	-0.35541
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

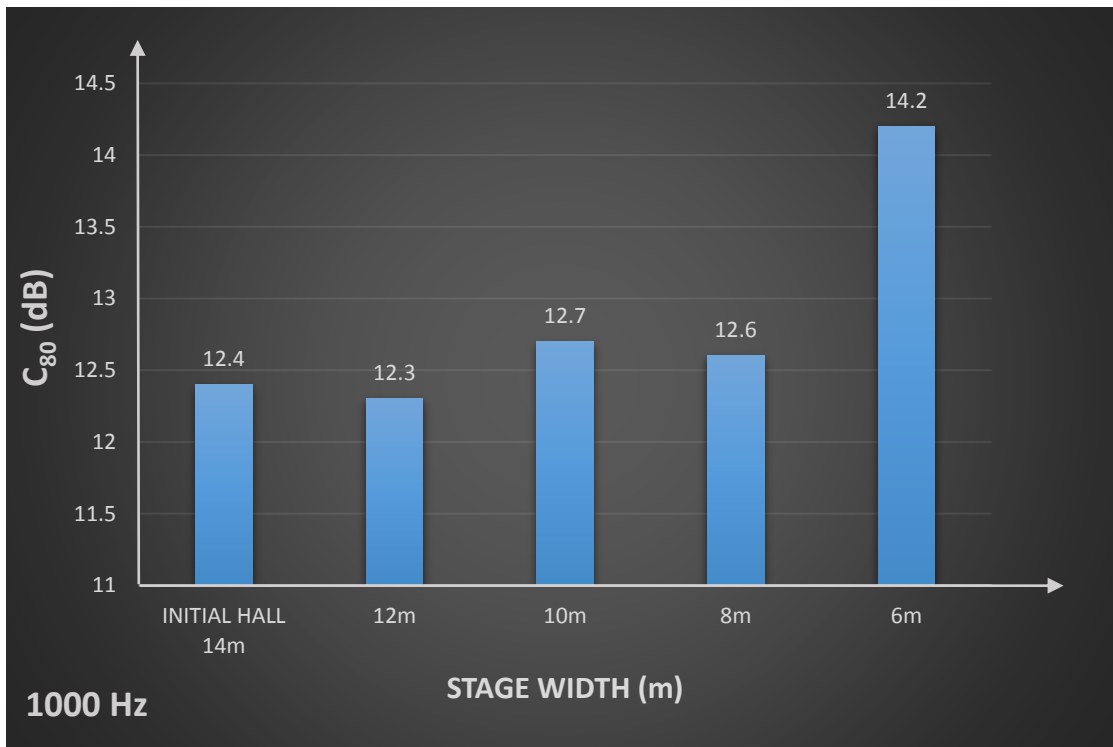
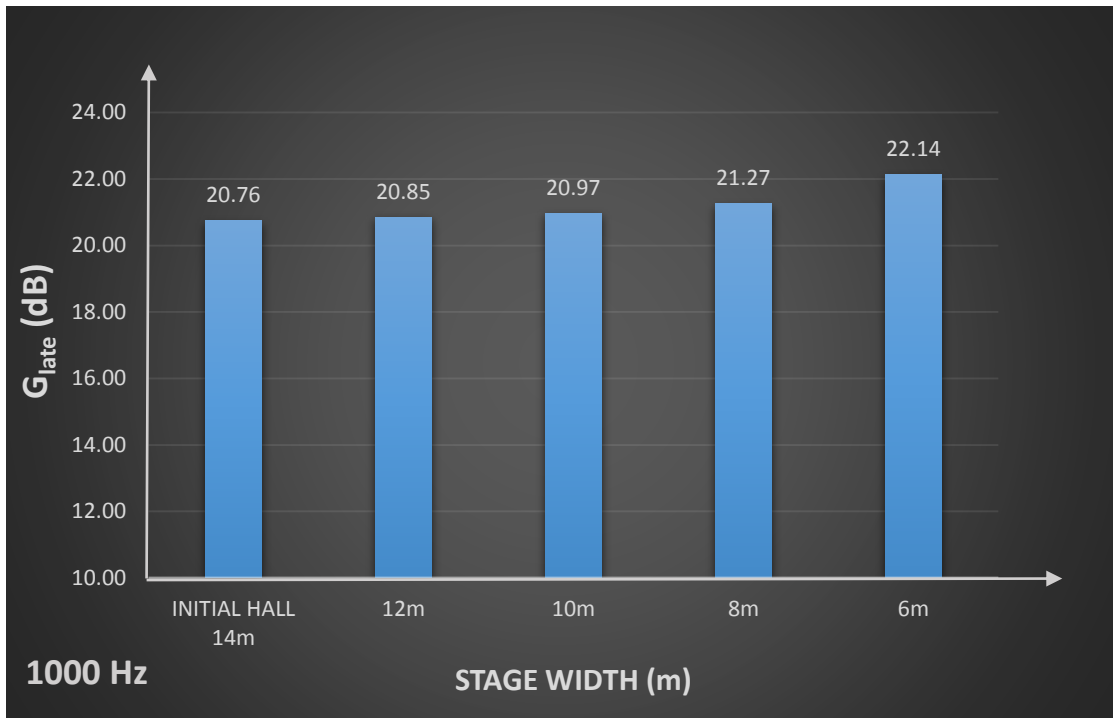
Factor scores are composite variables which provide information about an individual's placement on the **factor(s)**.

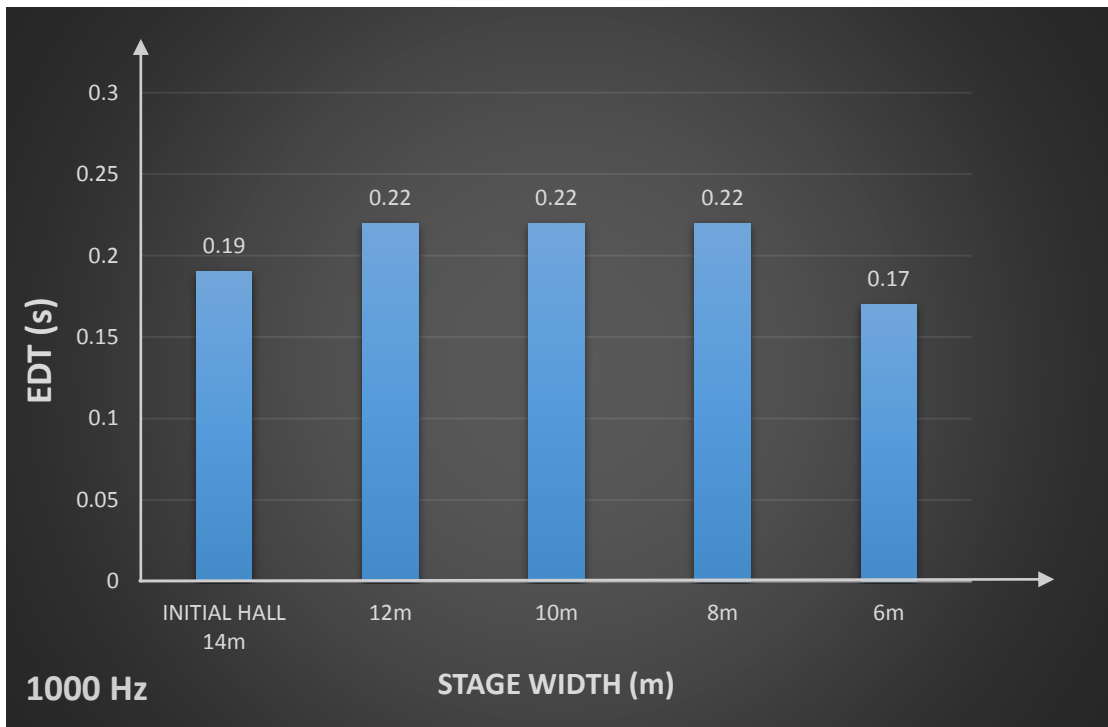
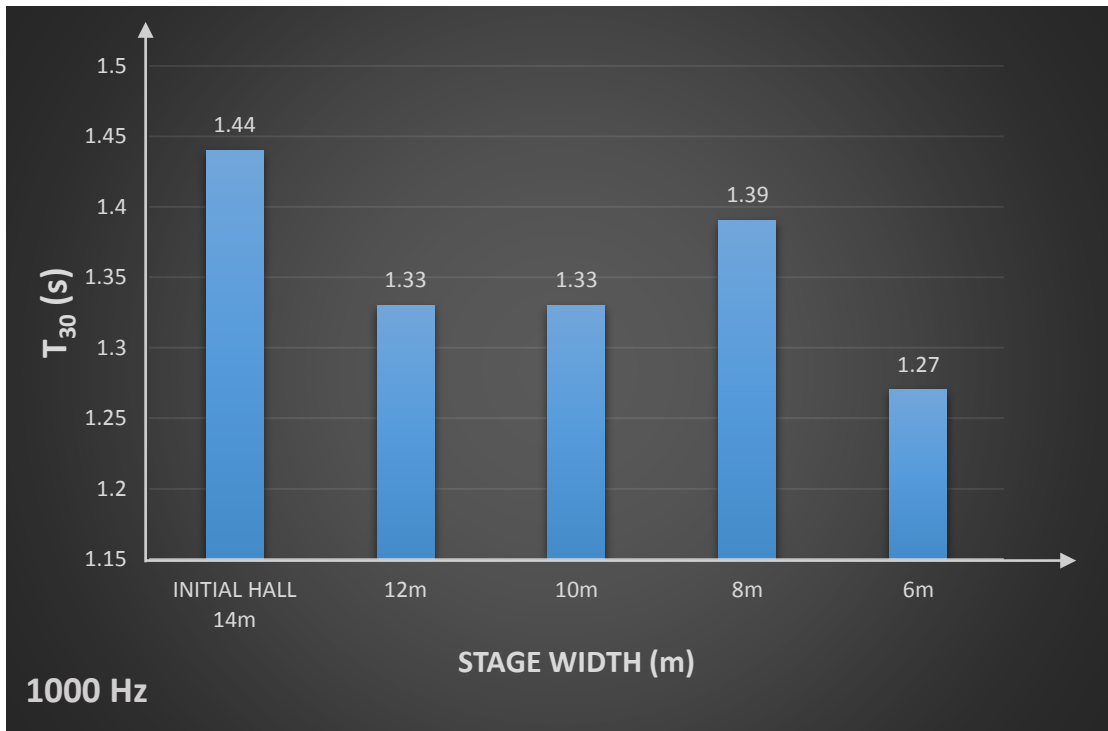
Παράρτημα Ε

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 Ζ.

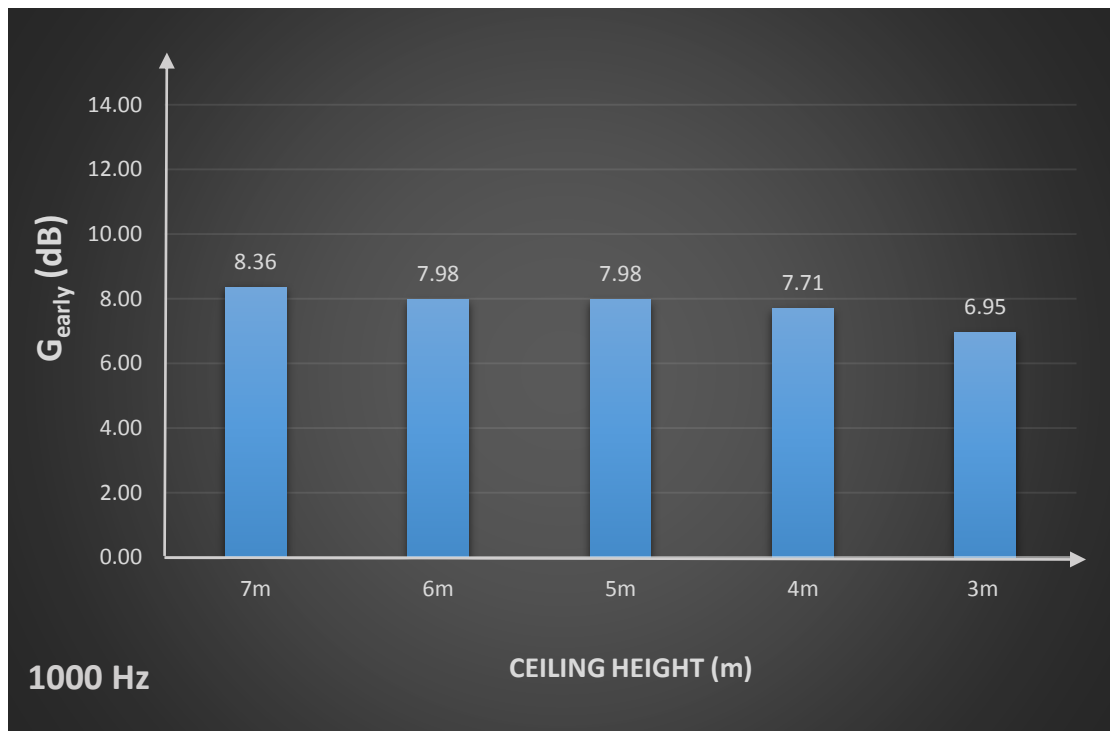
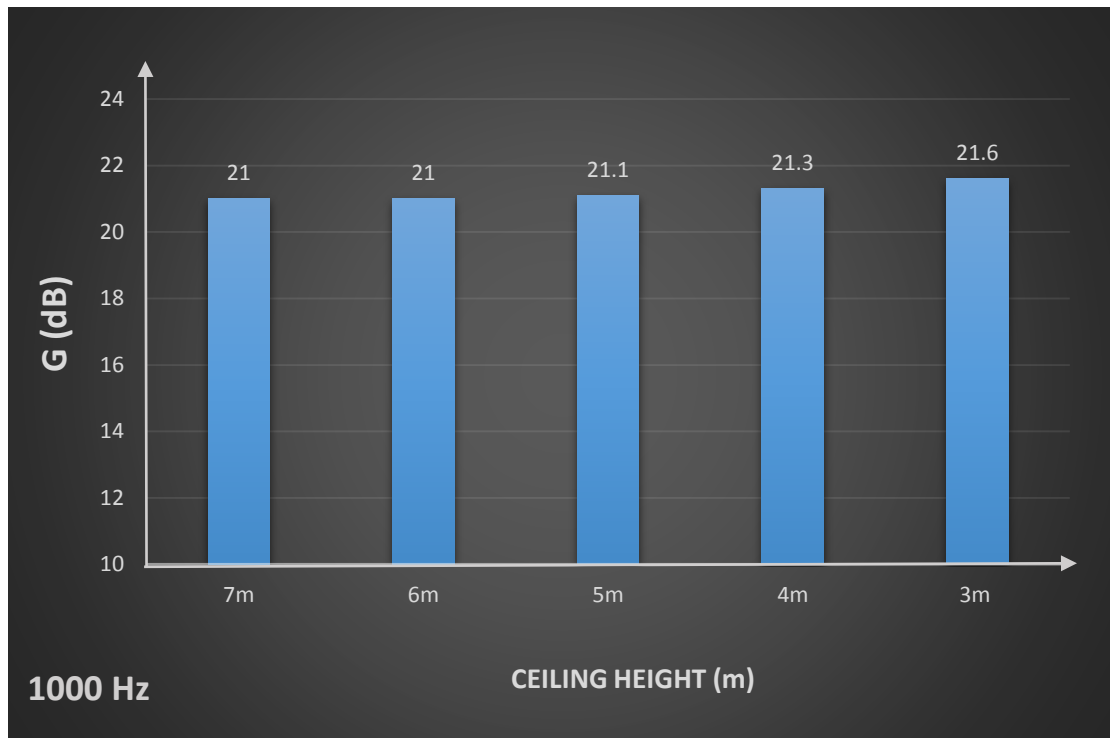
E.1. Stage width

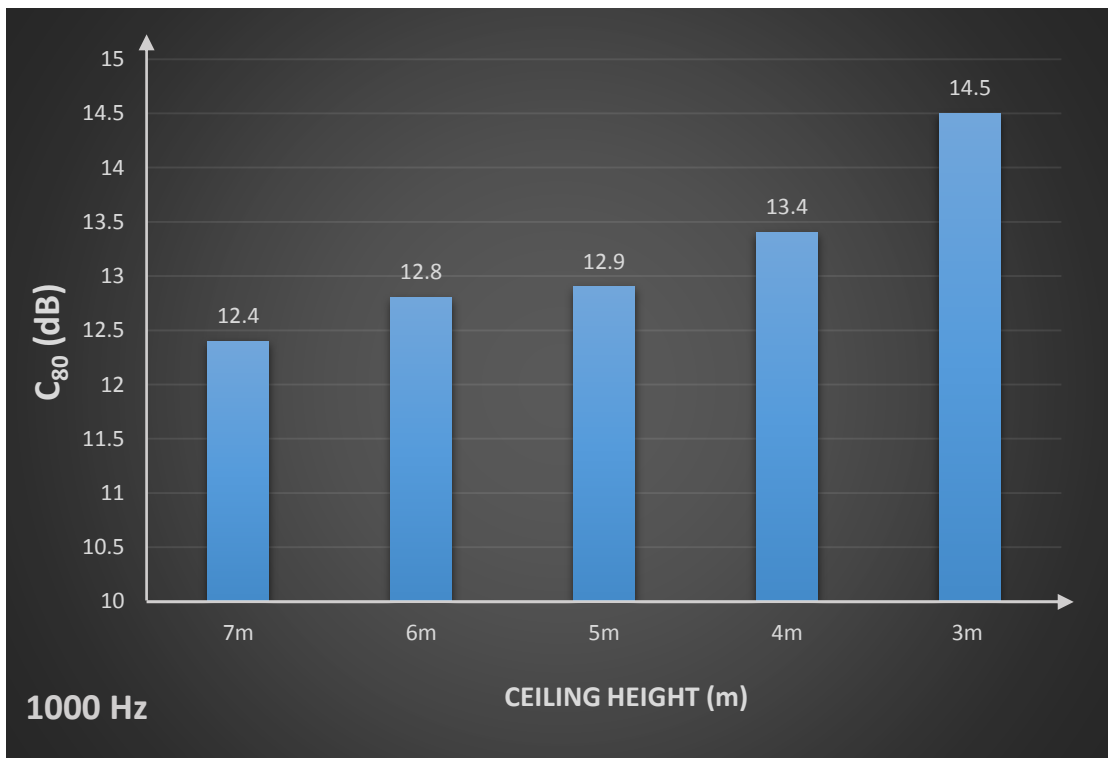
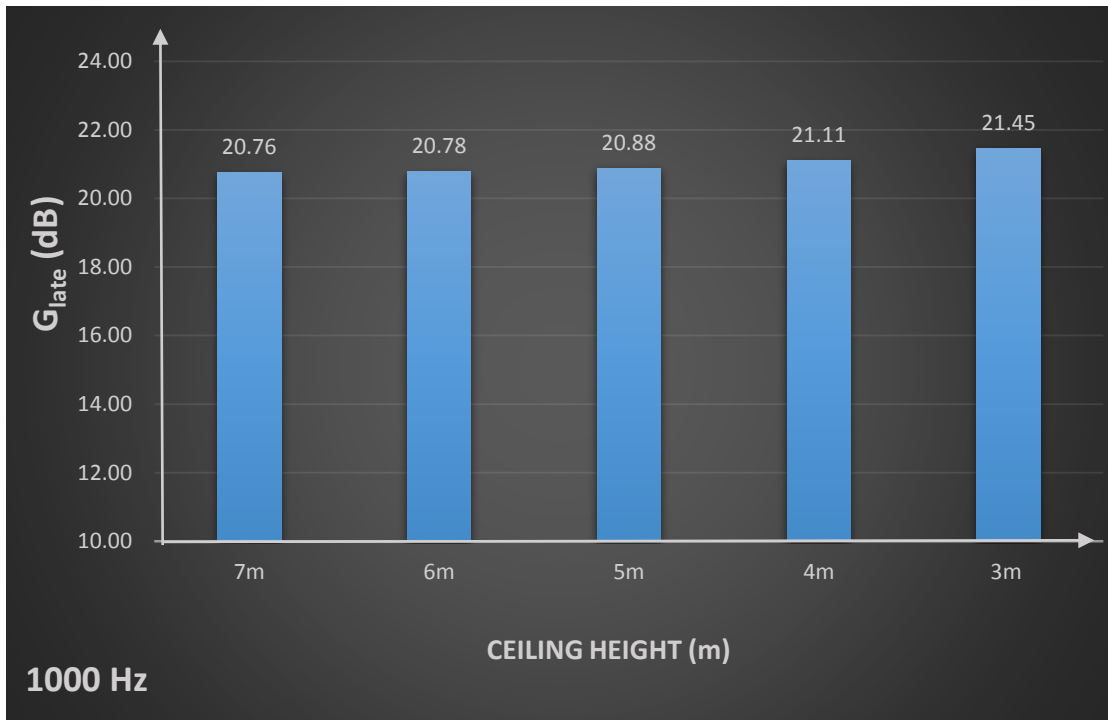


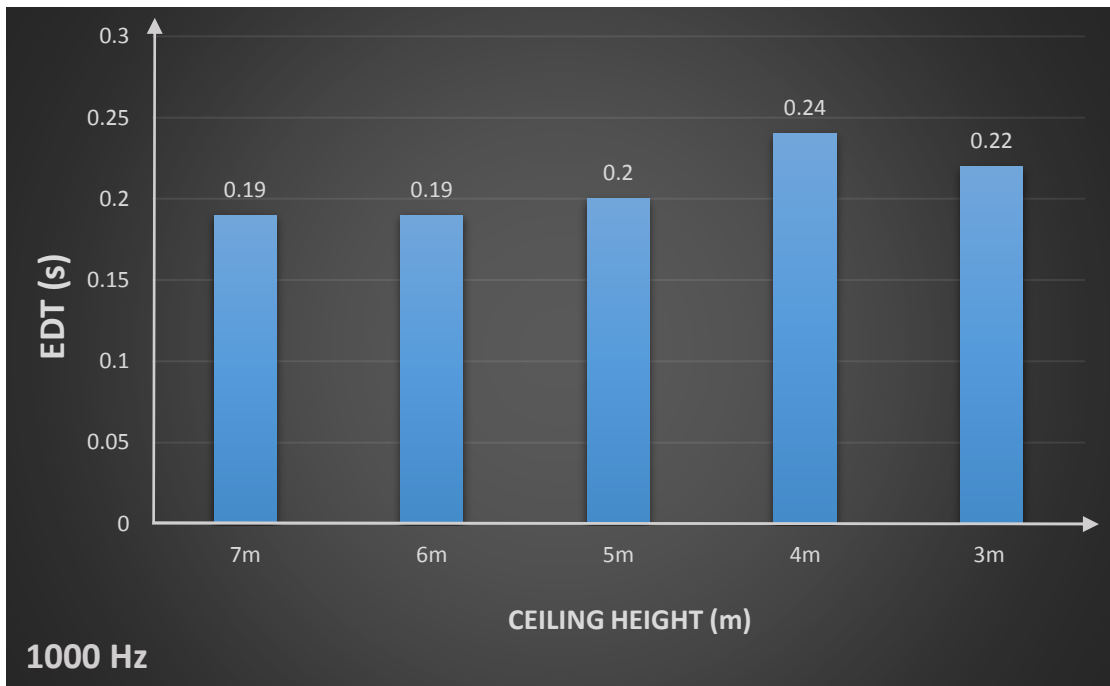
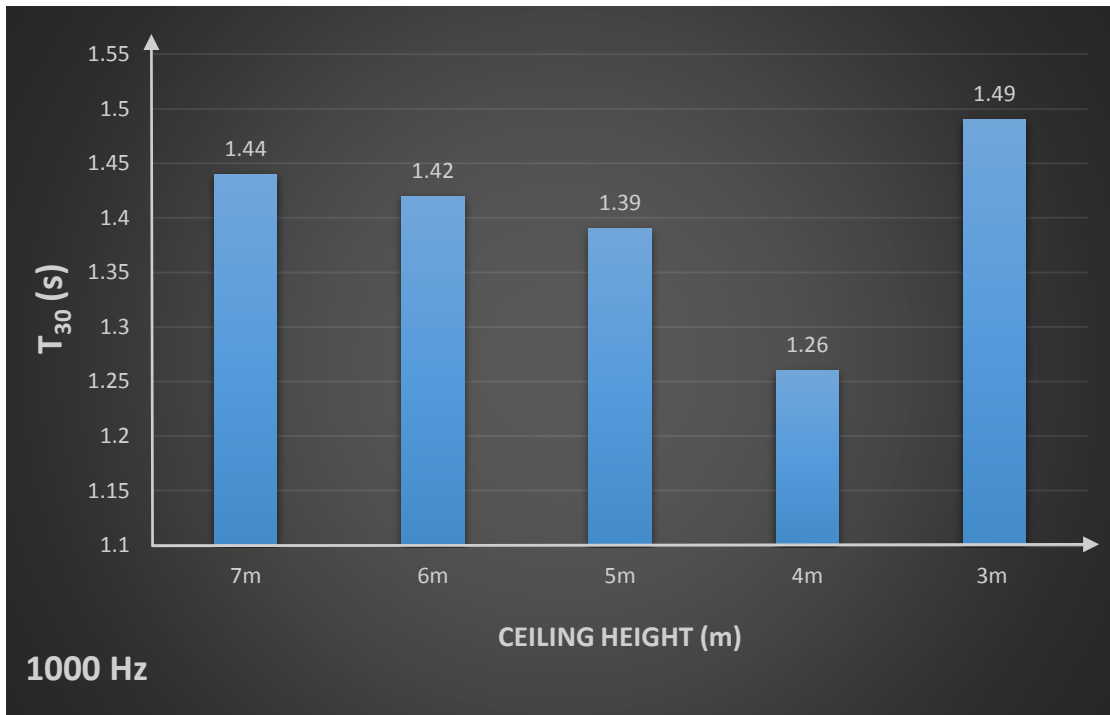




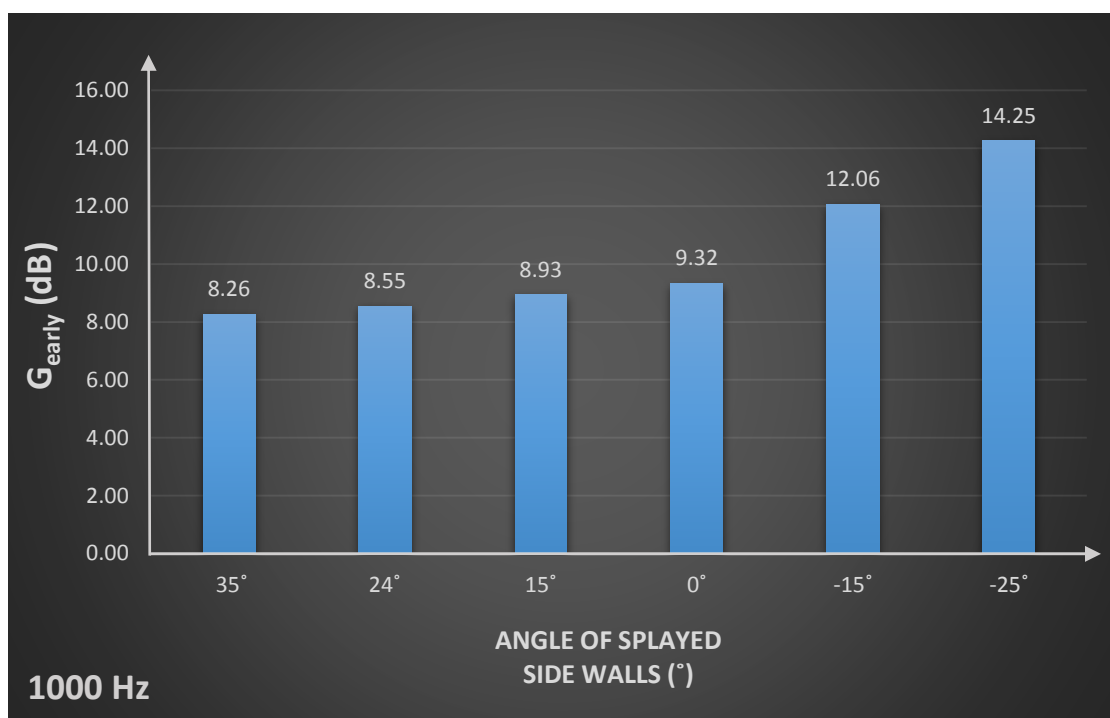
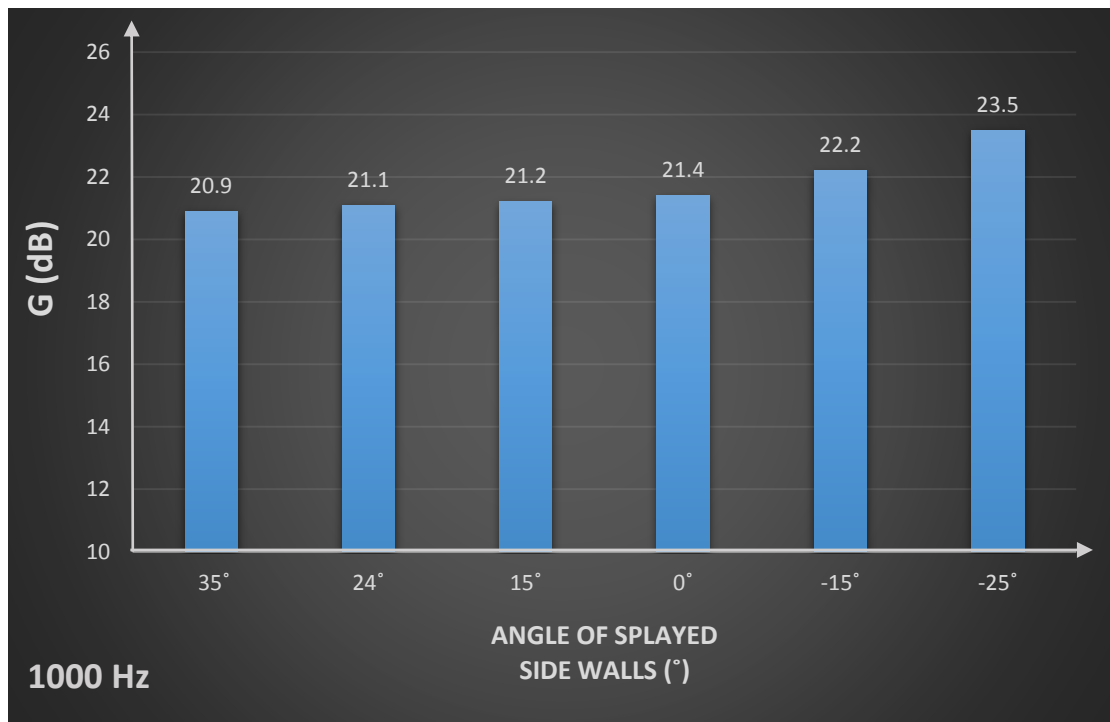
E.2. Ceiling height

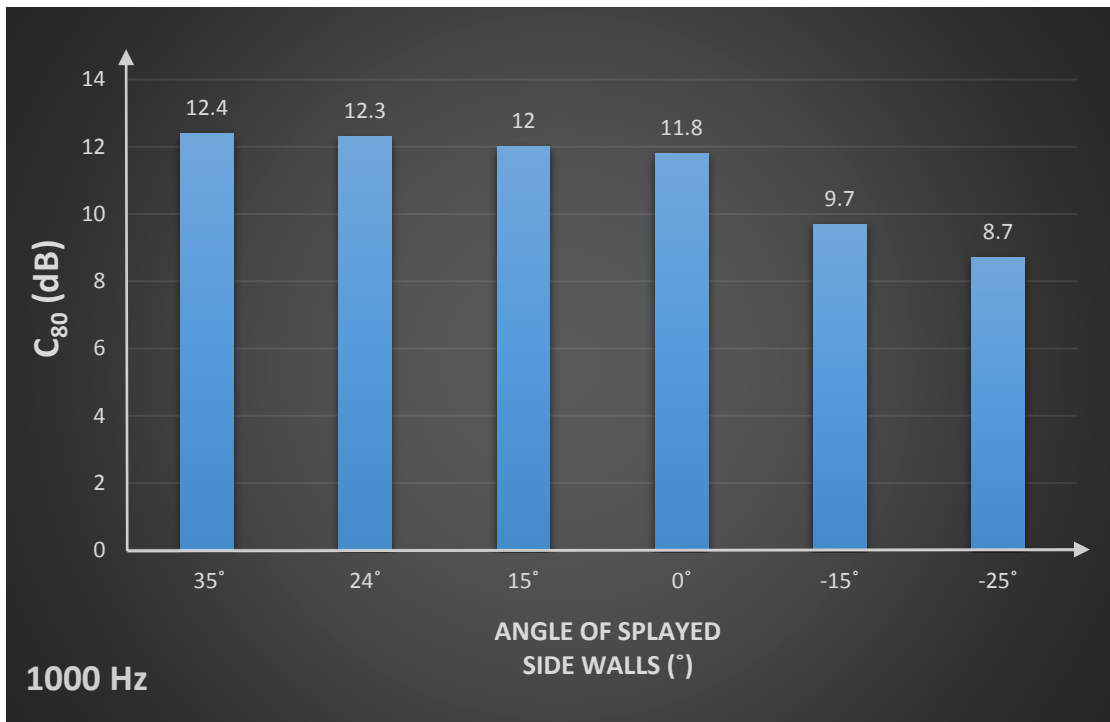
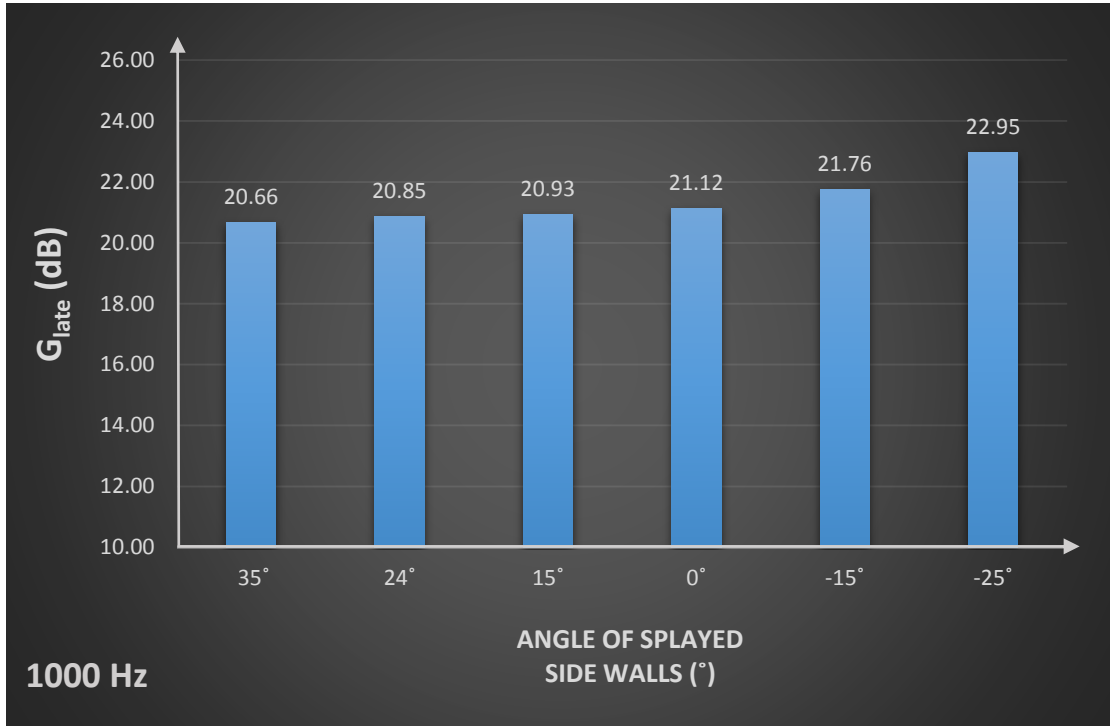


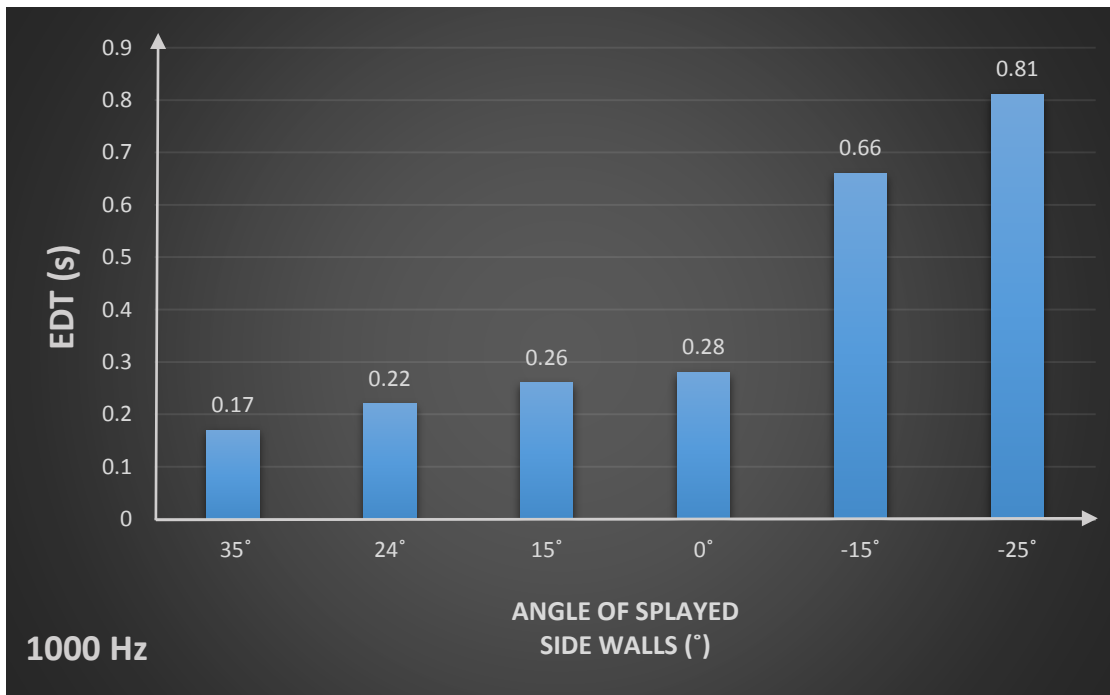
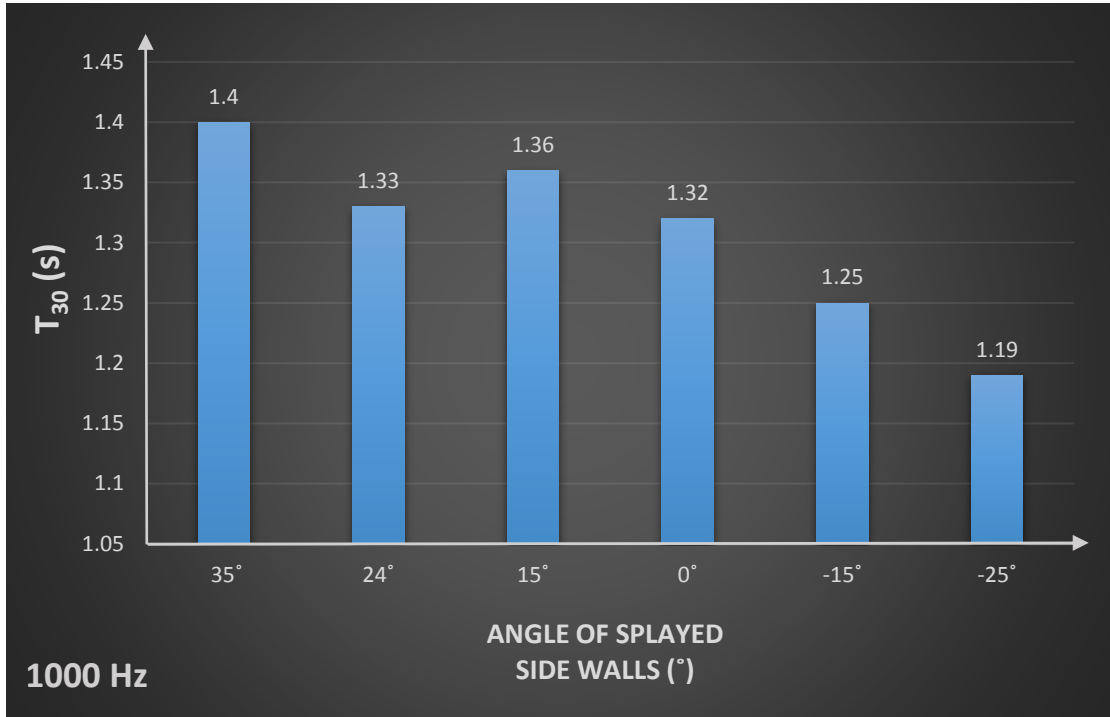




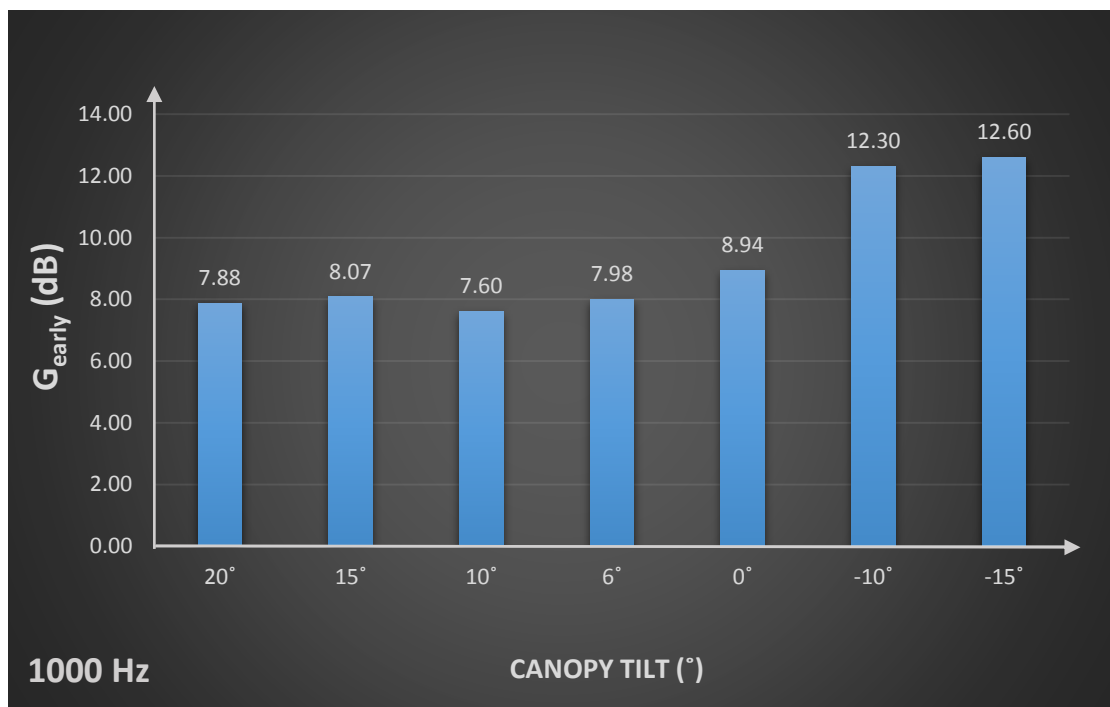
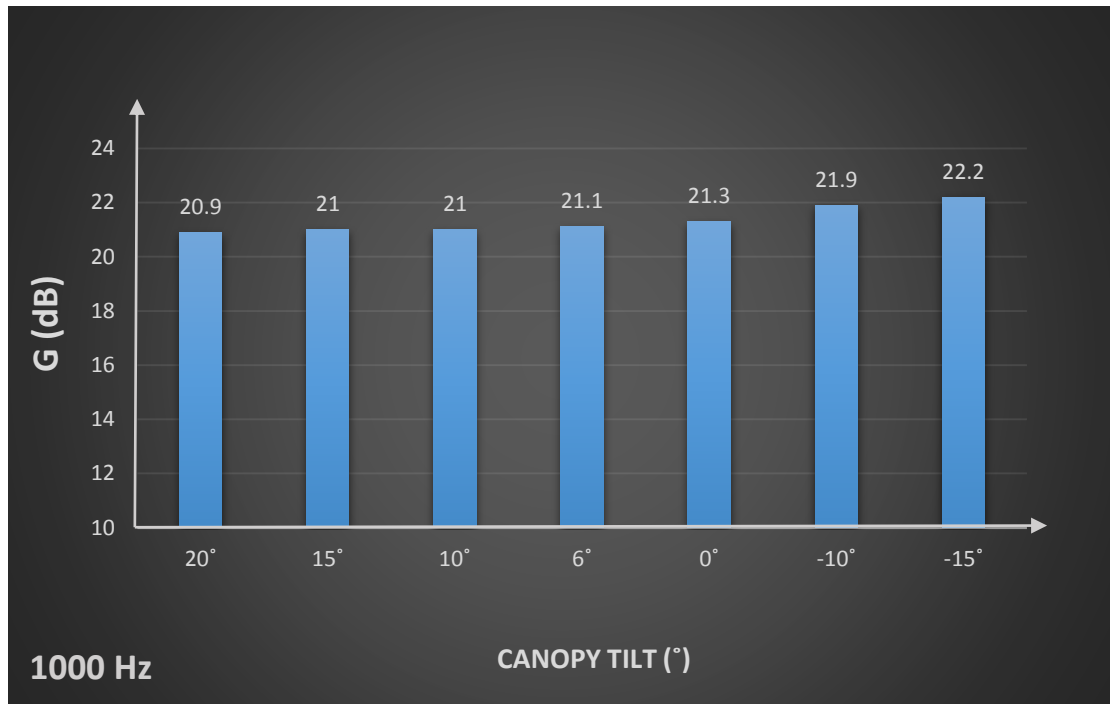
E.3. Angle of splayed side walls

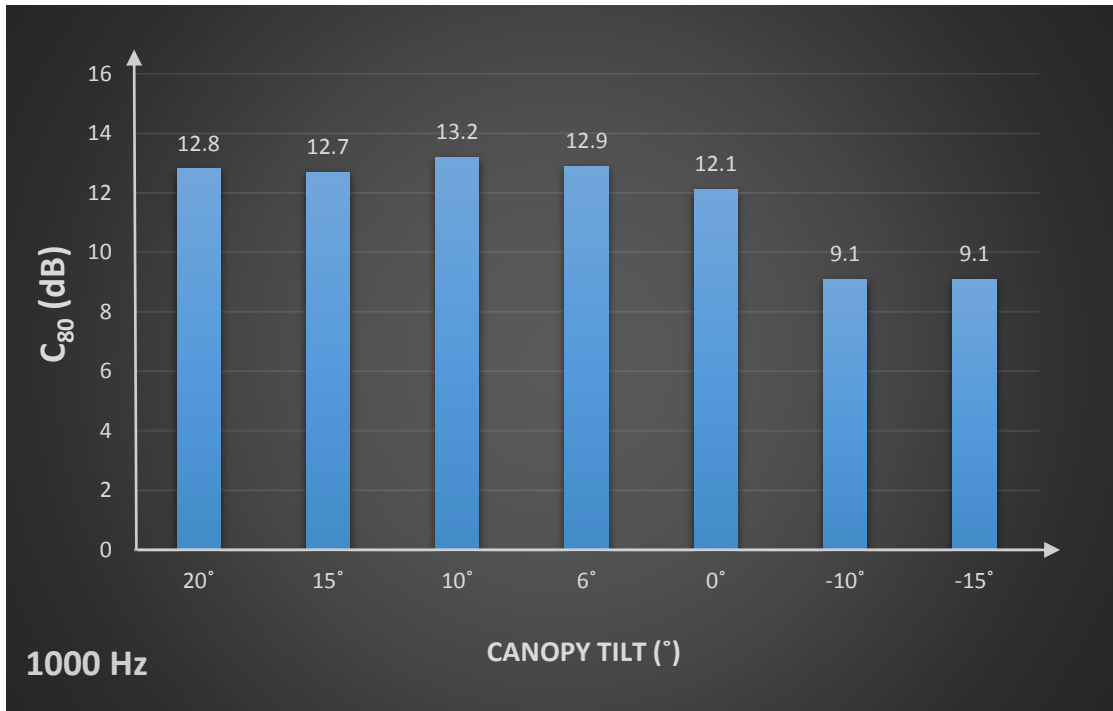
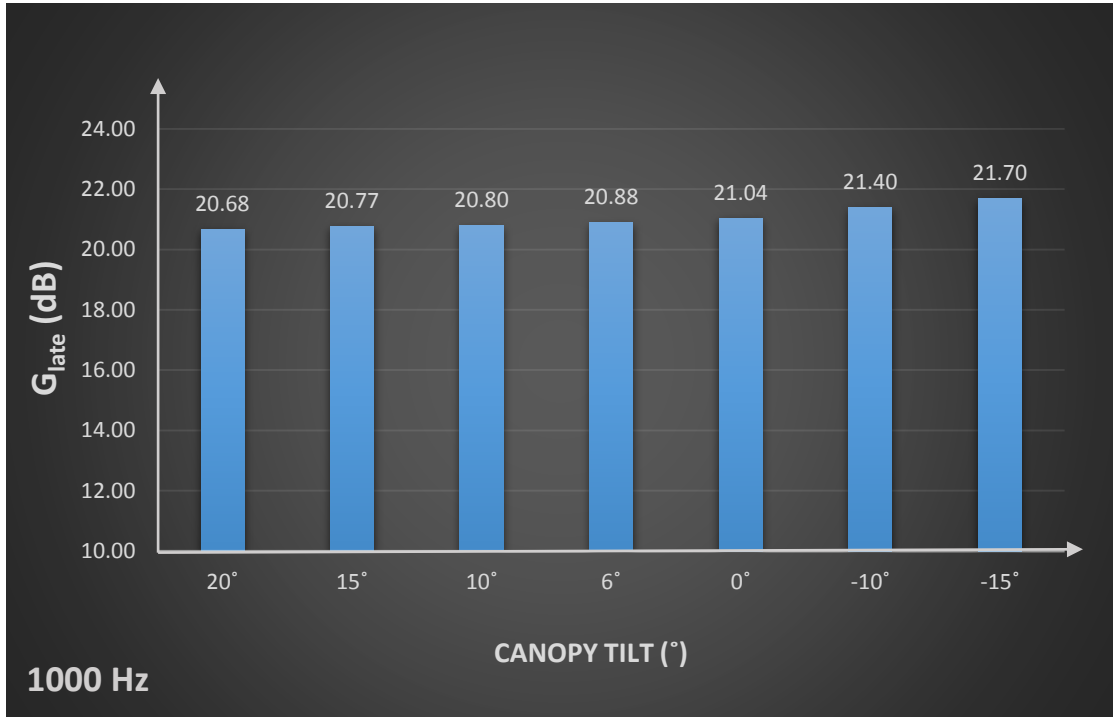


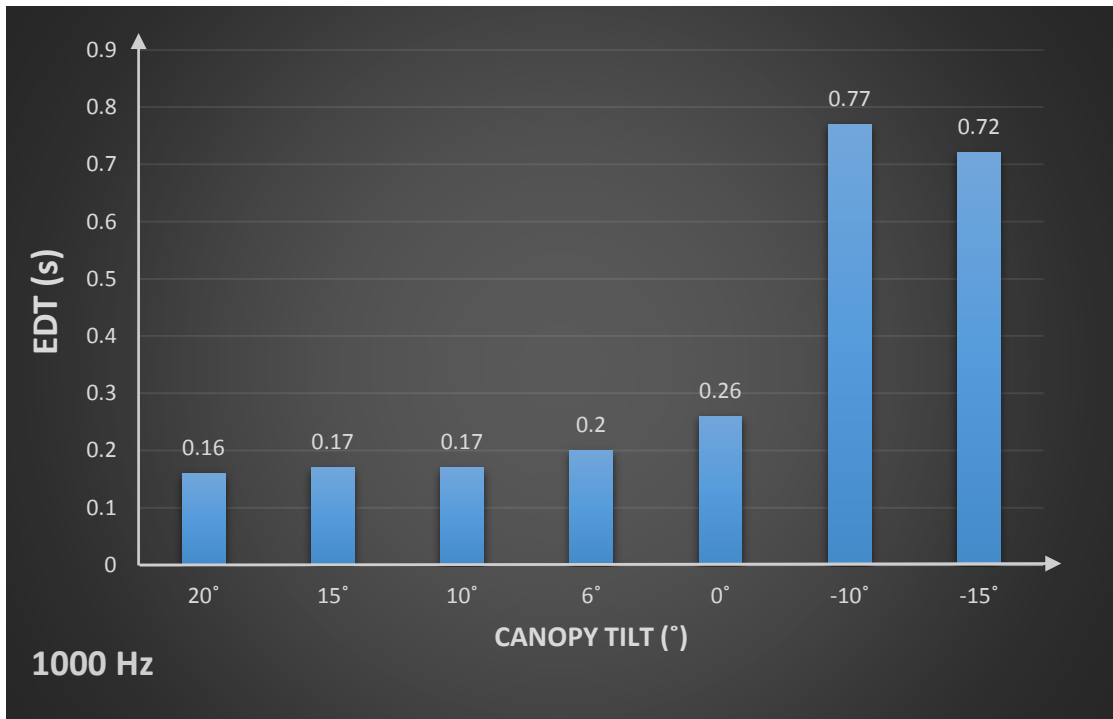
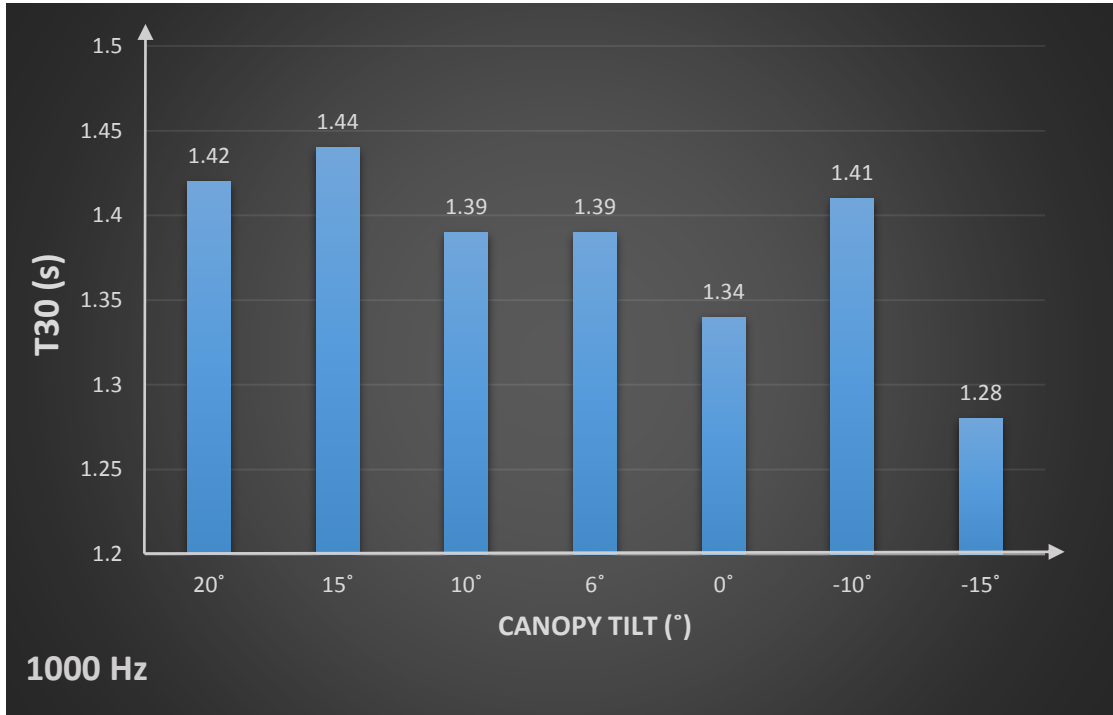




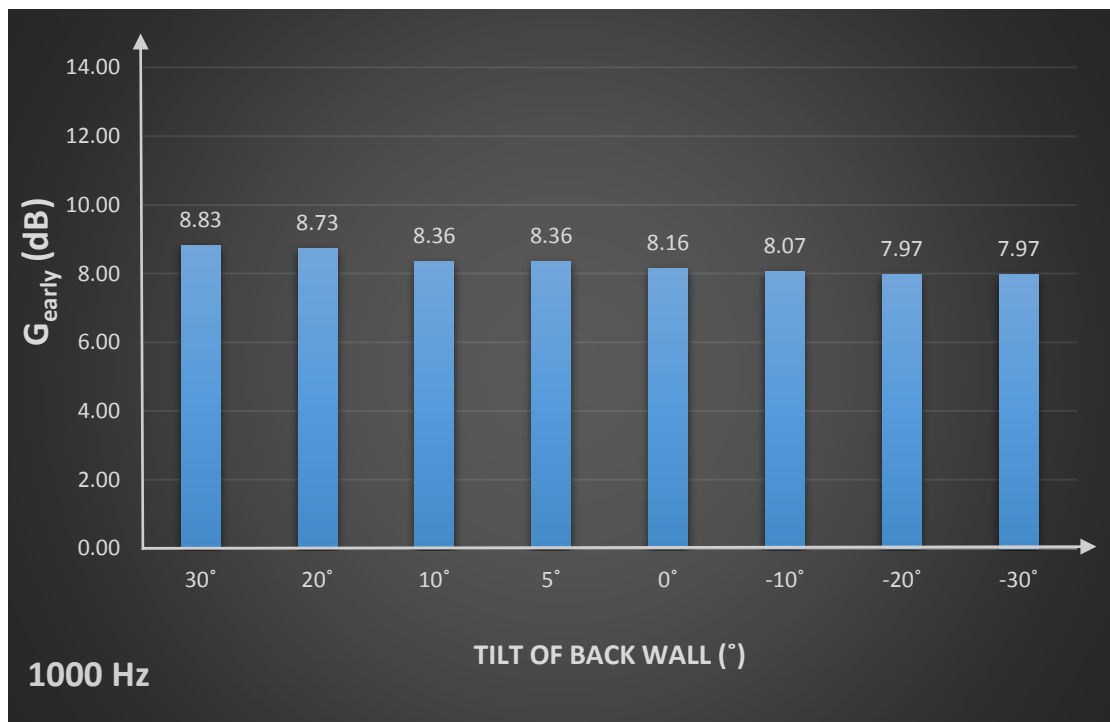
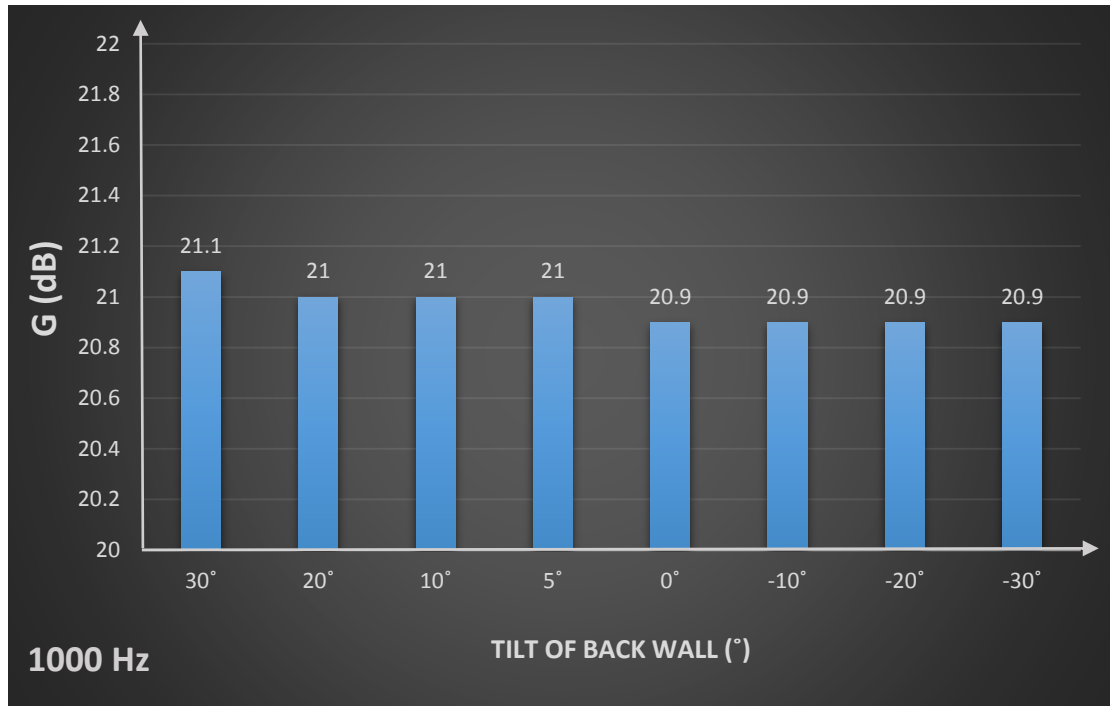
E.4. Canopy tilt

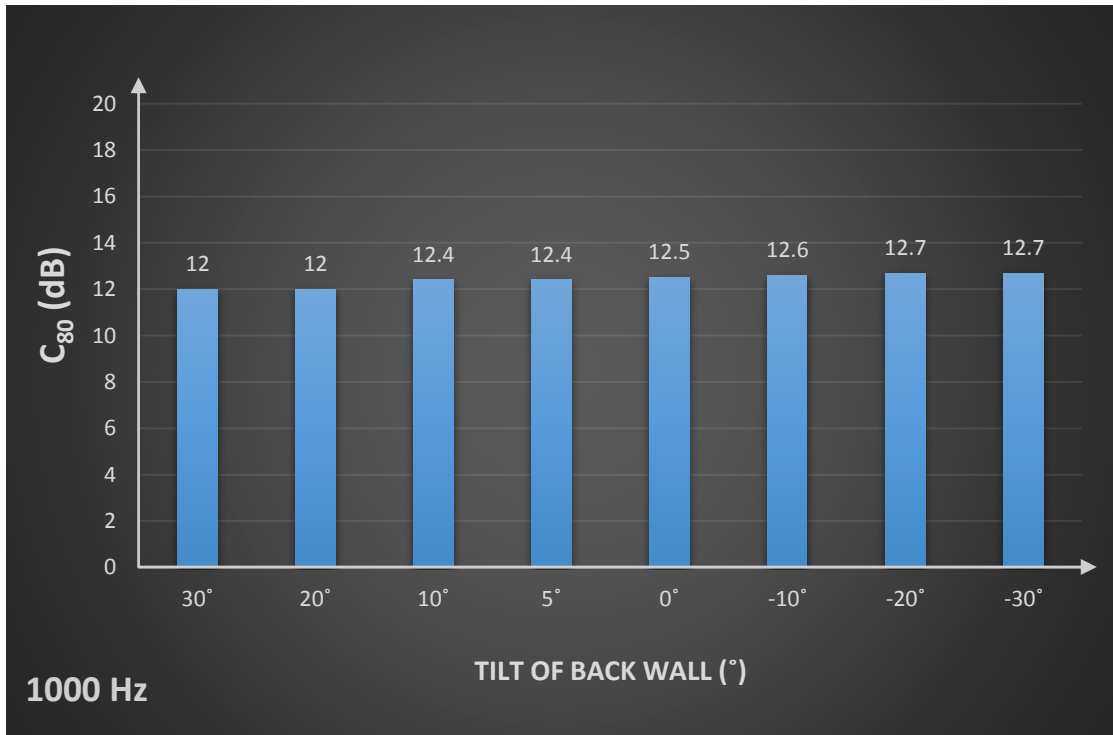
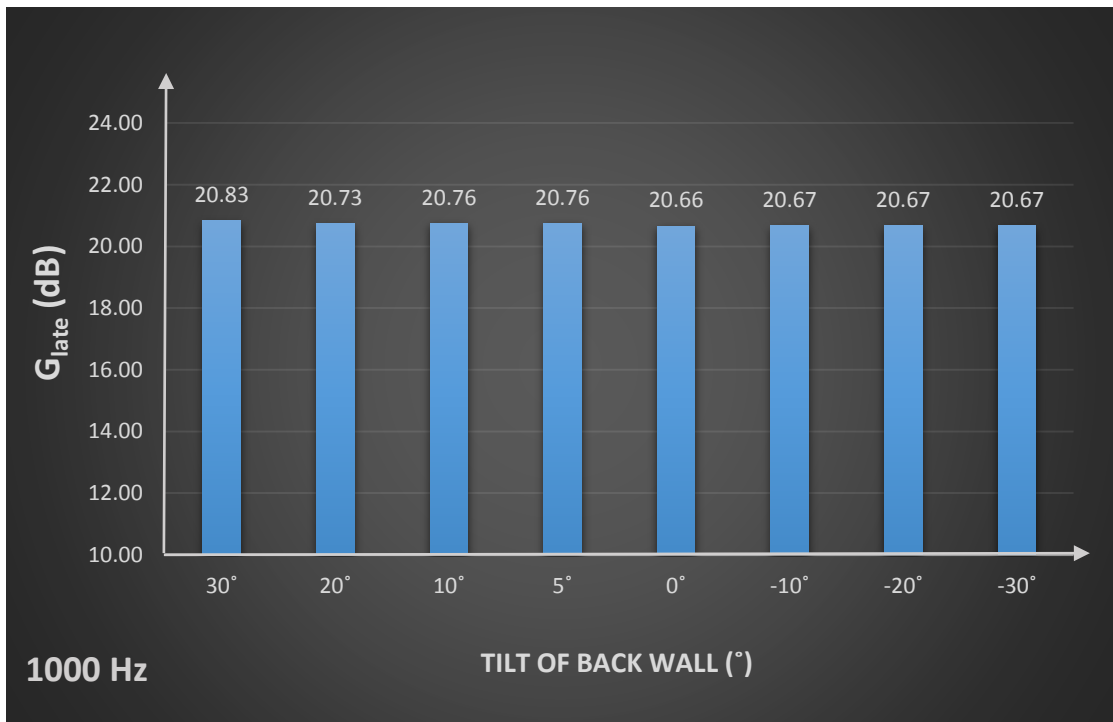


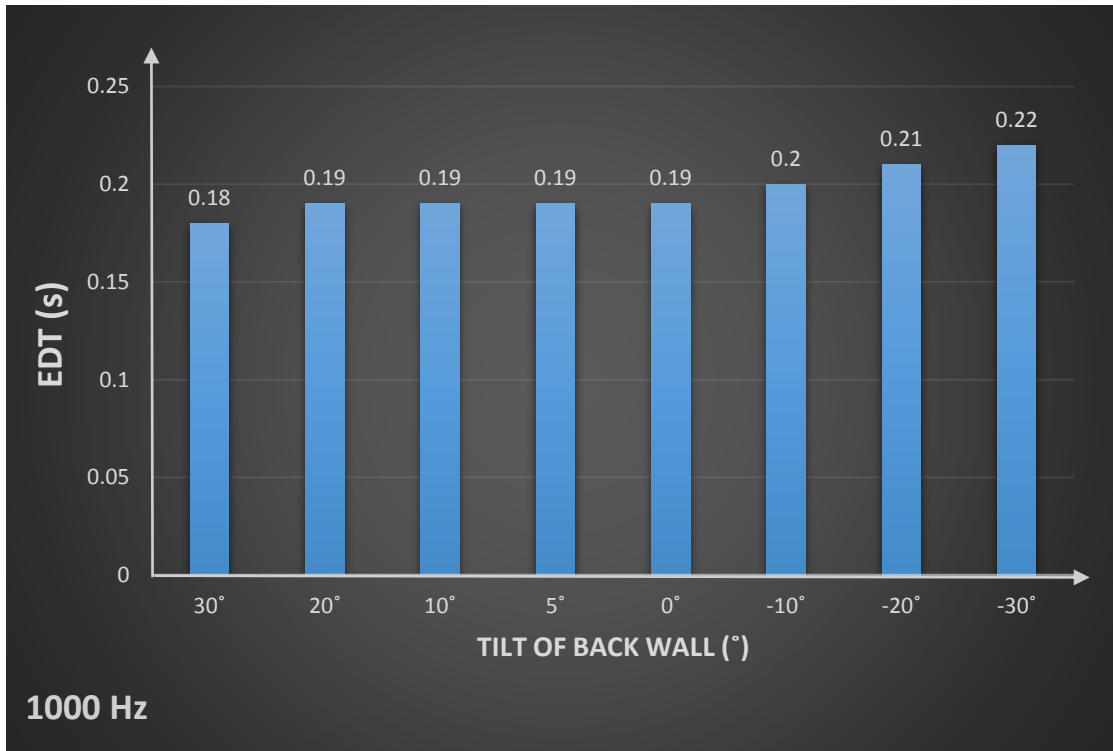
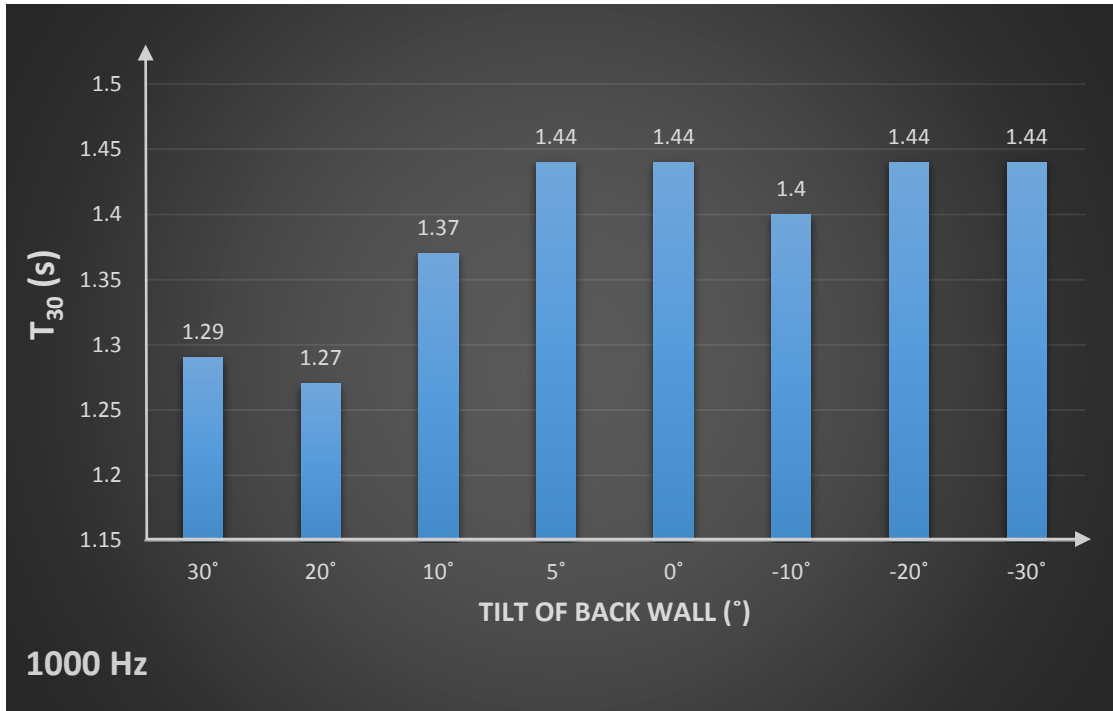




E.5. Tilt of back wall





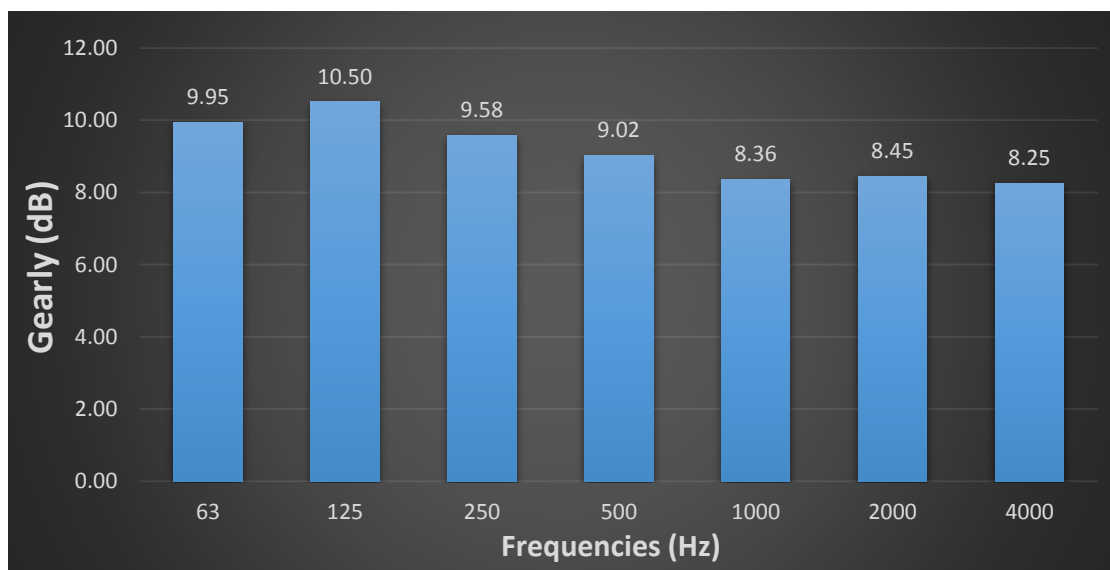
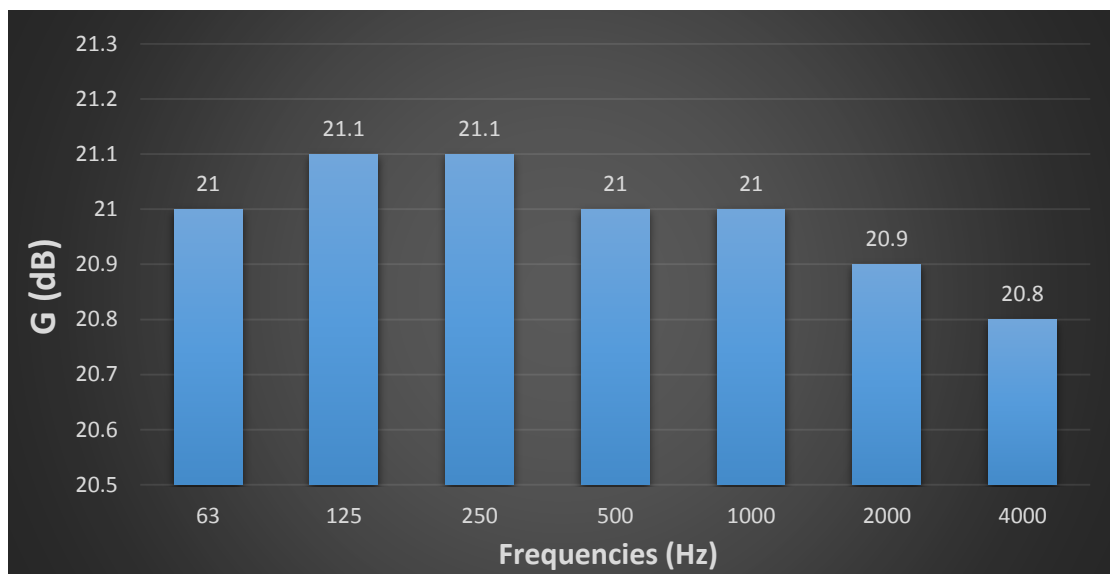


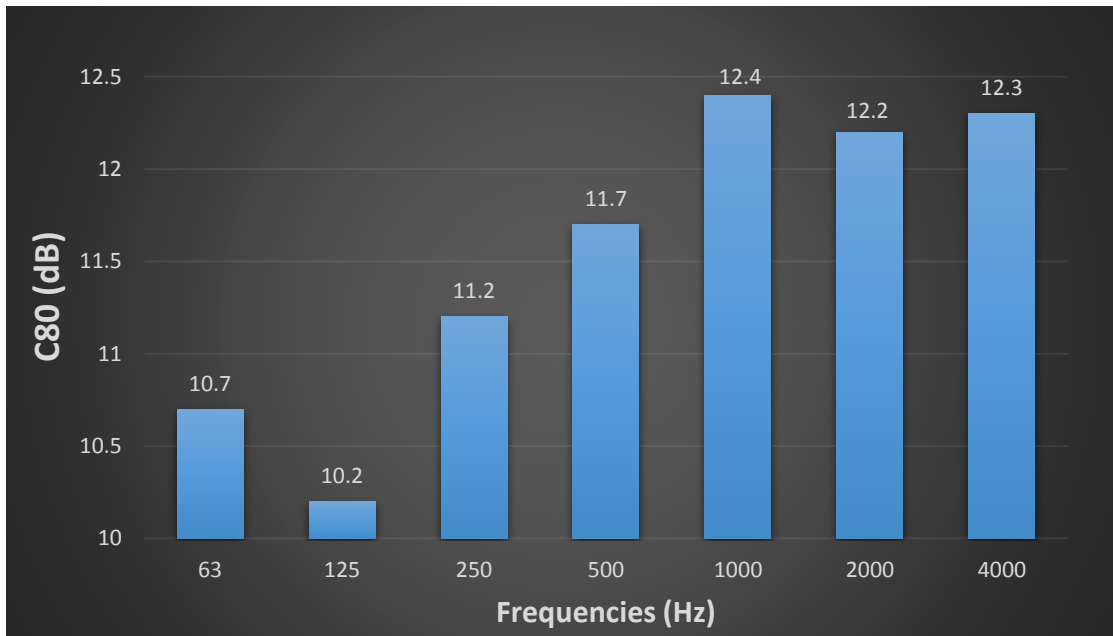
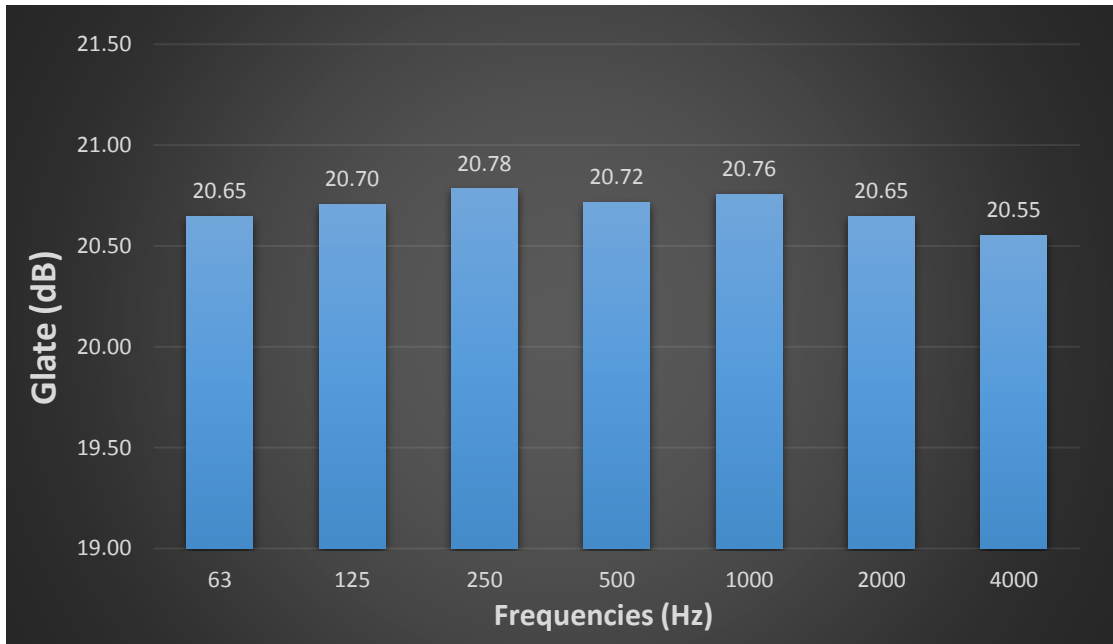
Παράρτημα ΣΤ

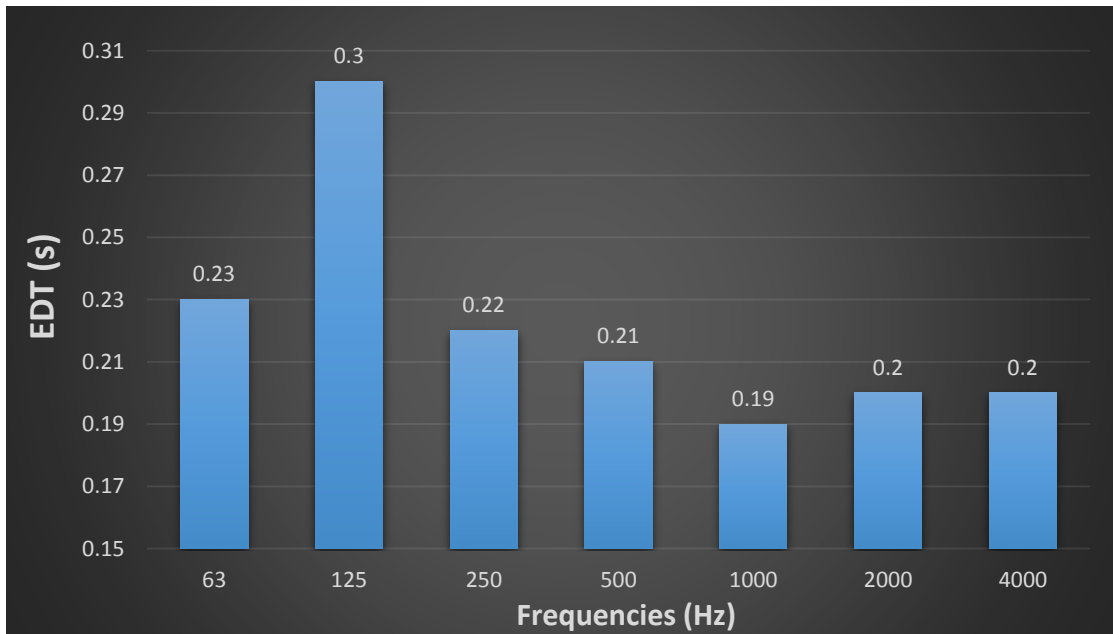
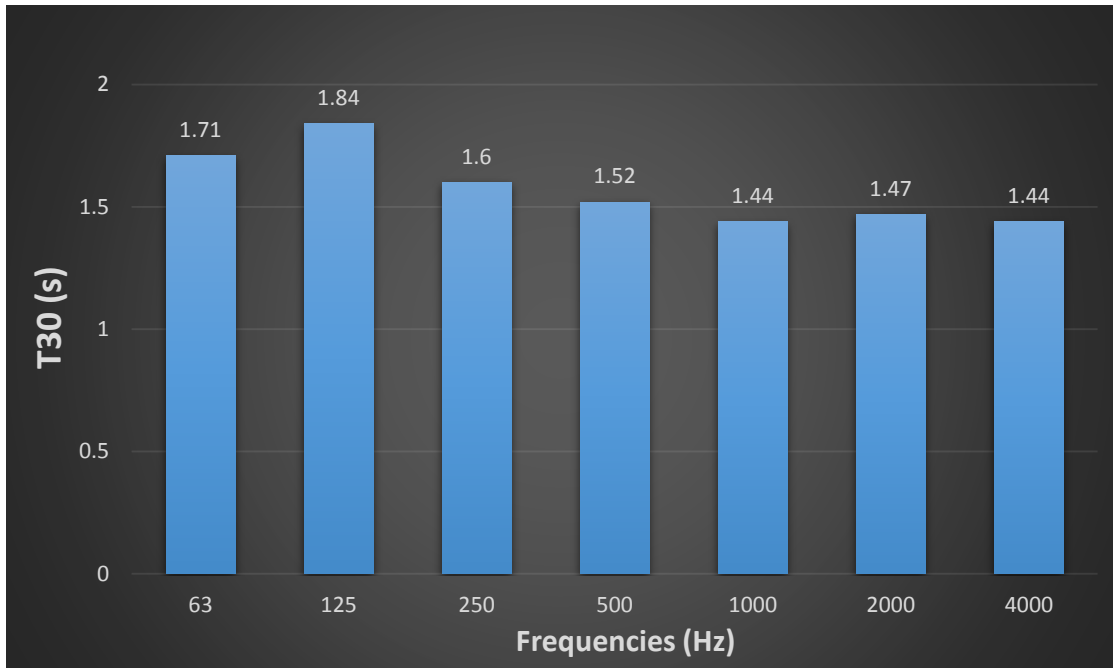
Στο παρών παράρτημα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αντικειμενικών παραμέτρων G, Gearly, Glate, C80, T30 και EDT για τις 28 γεωμετρικές αλλαγές στο φάσμα συχνοτήτων (63Hz - 4000Hz).

ΣΤ.1. Εύρος σκηής

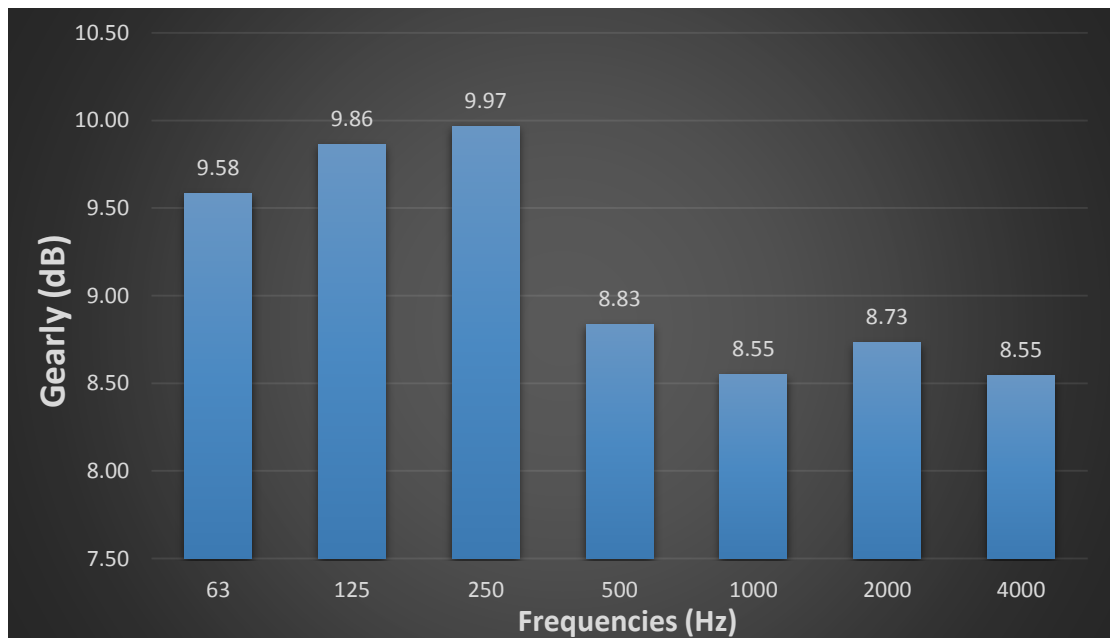
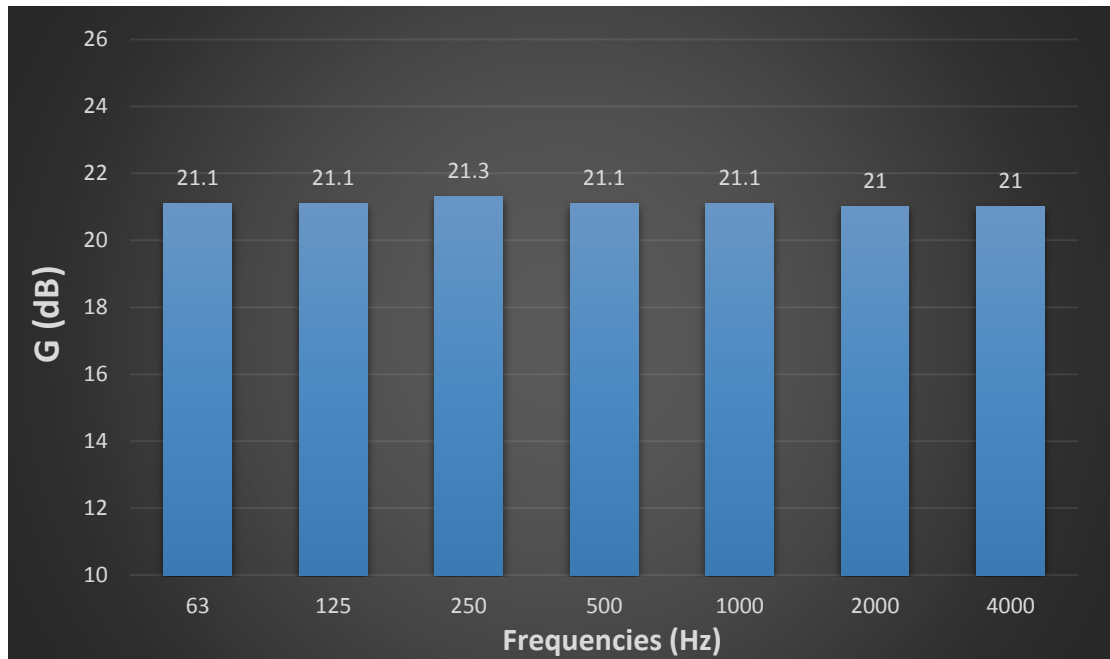
ΣΤ.1.1. Εύρος σκηής 14m

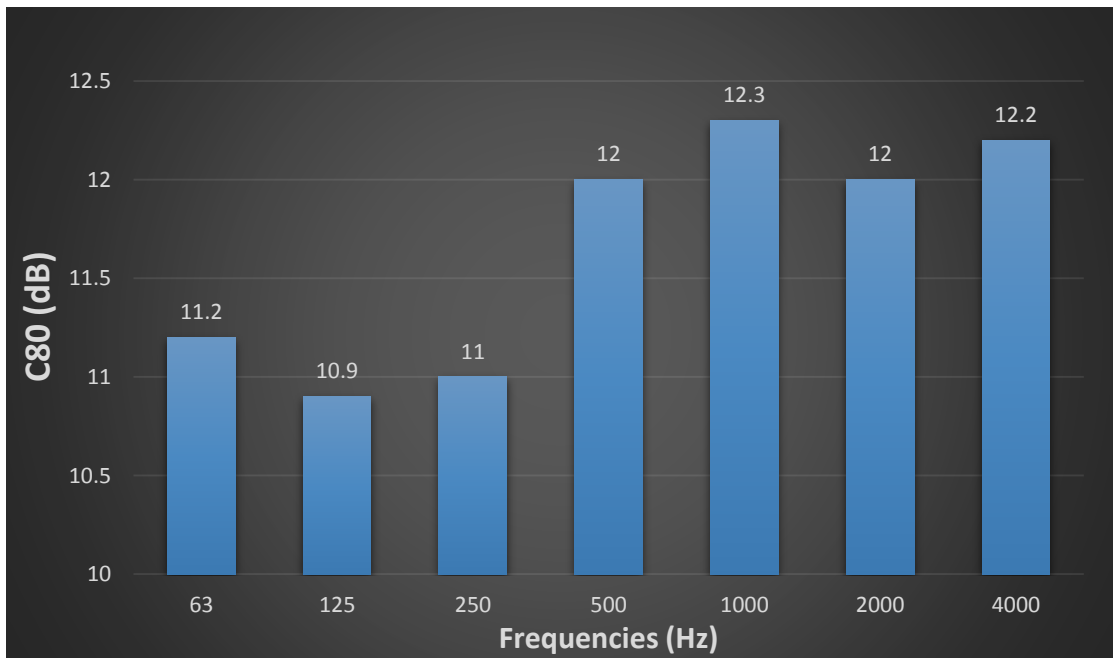
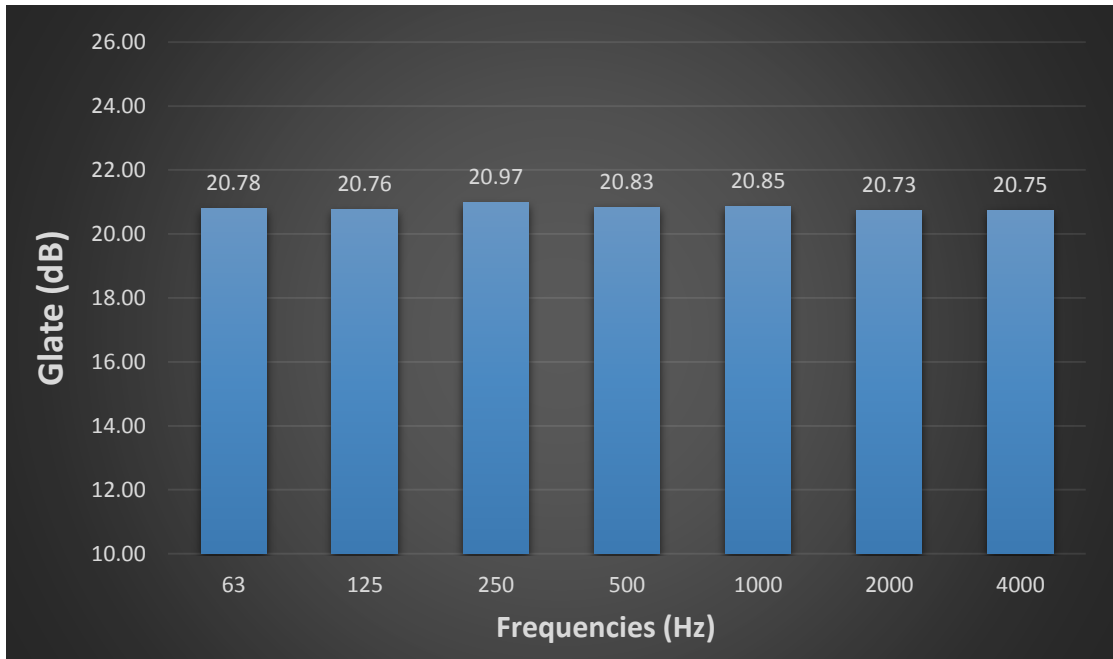


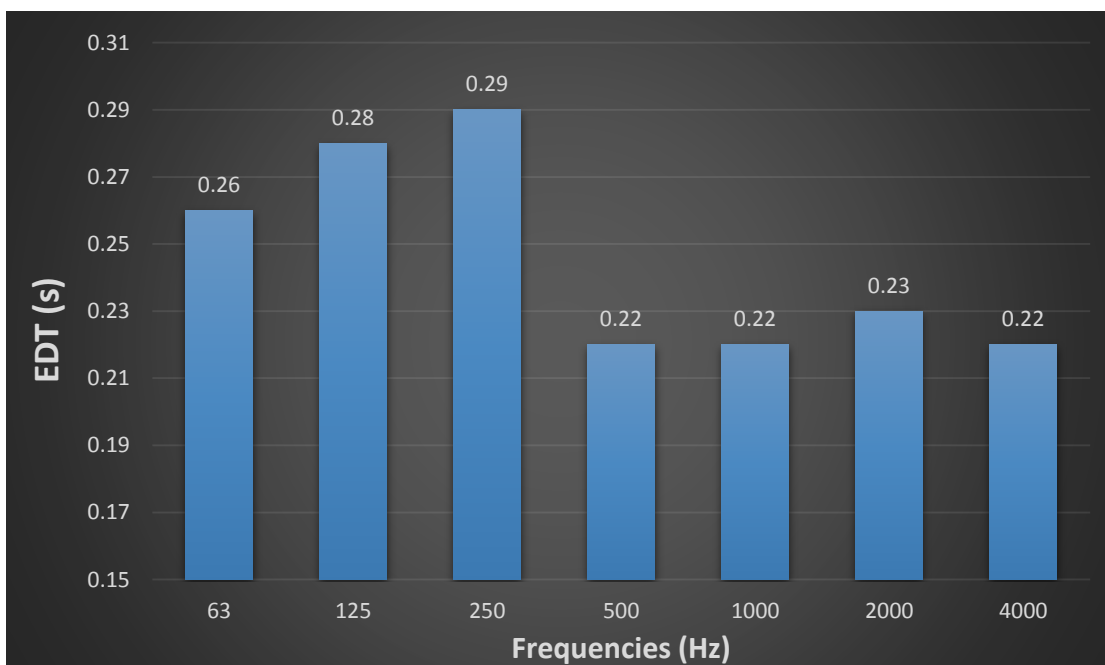
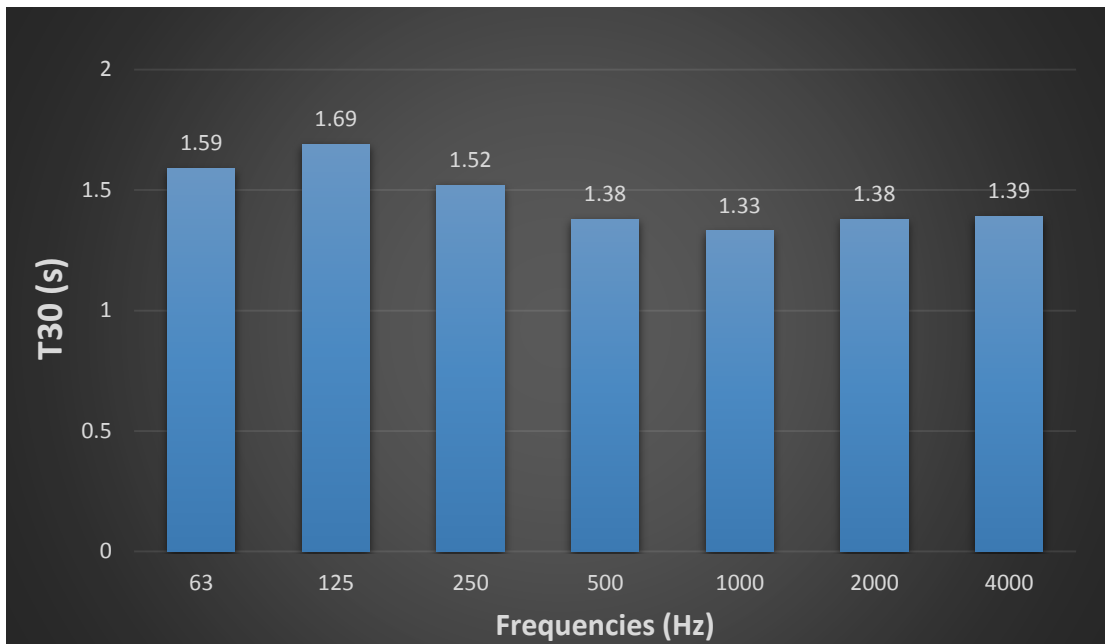




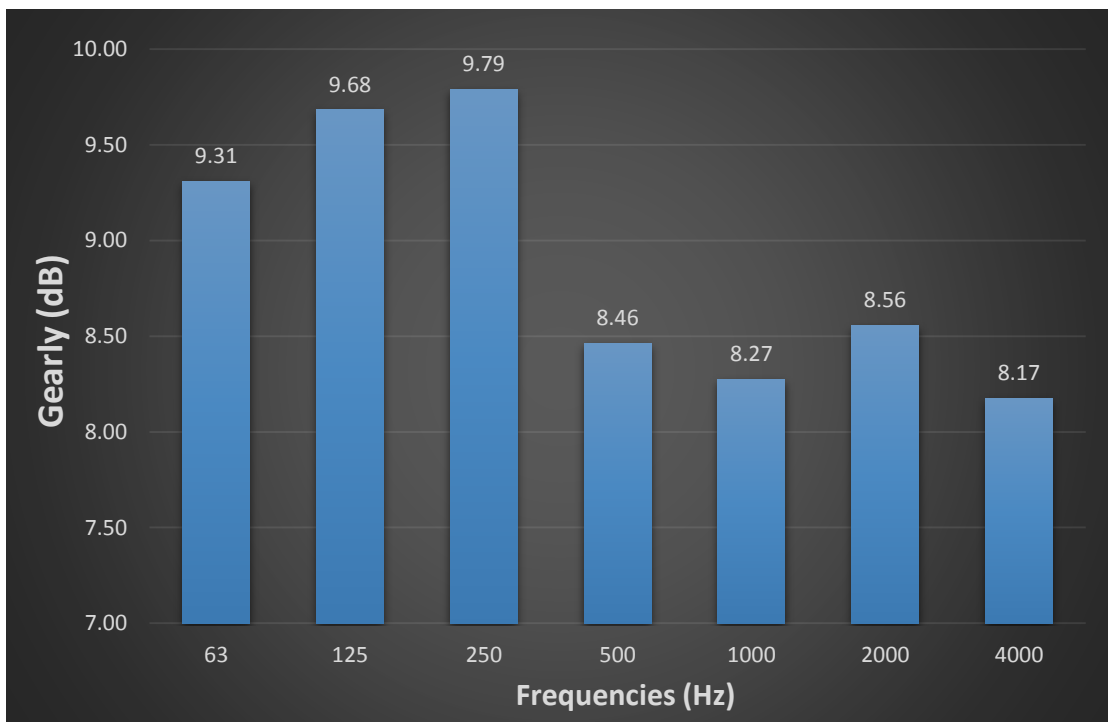
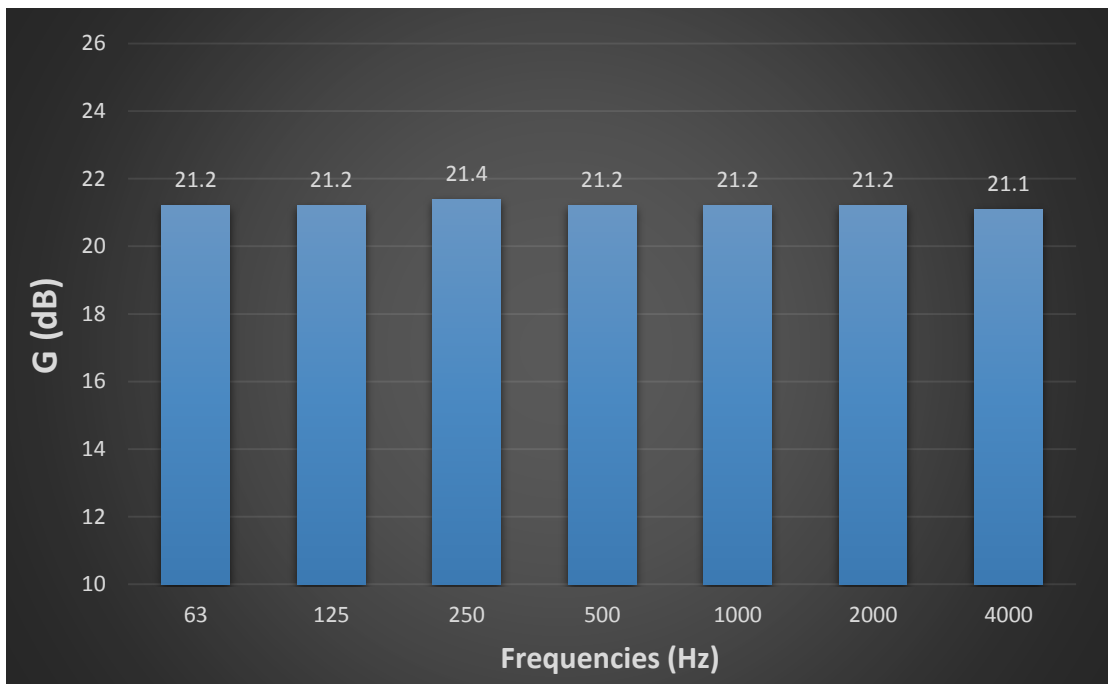
ΣΤ.1.2. Εύρος σκηής 12m

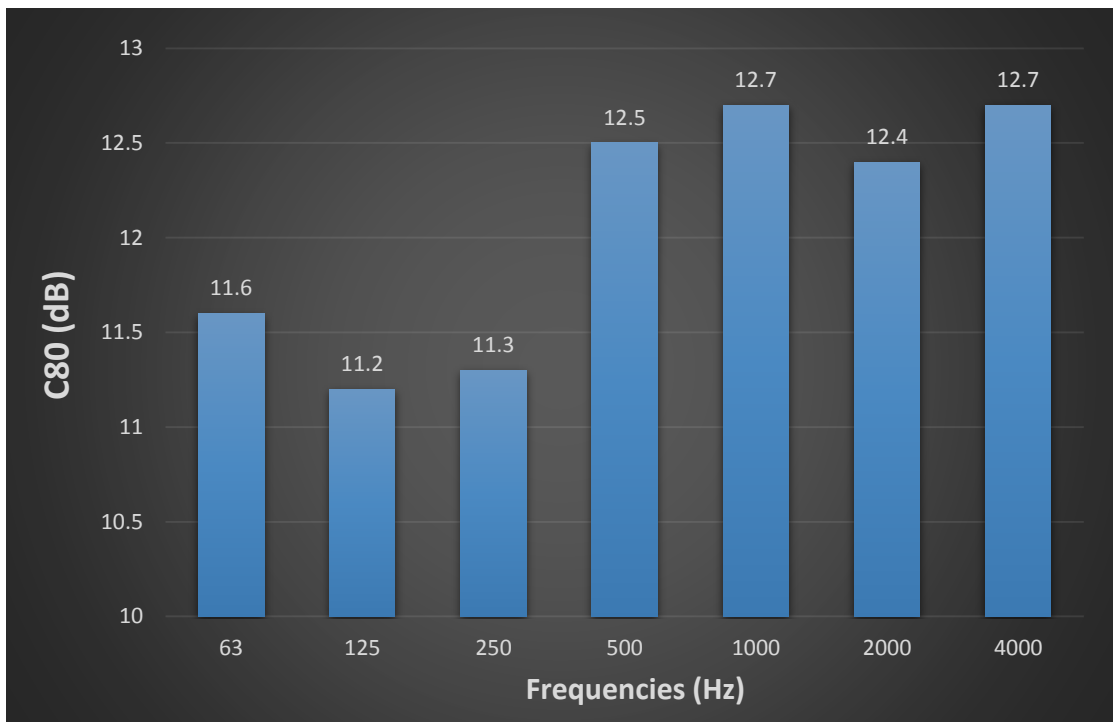
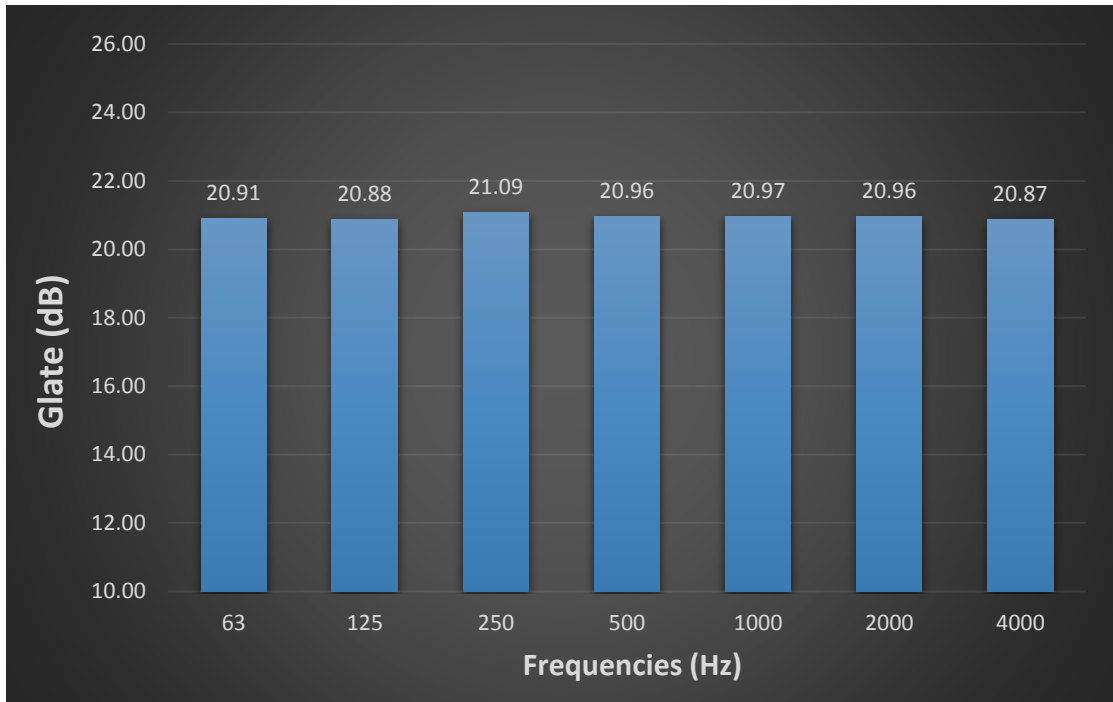


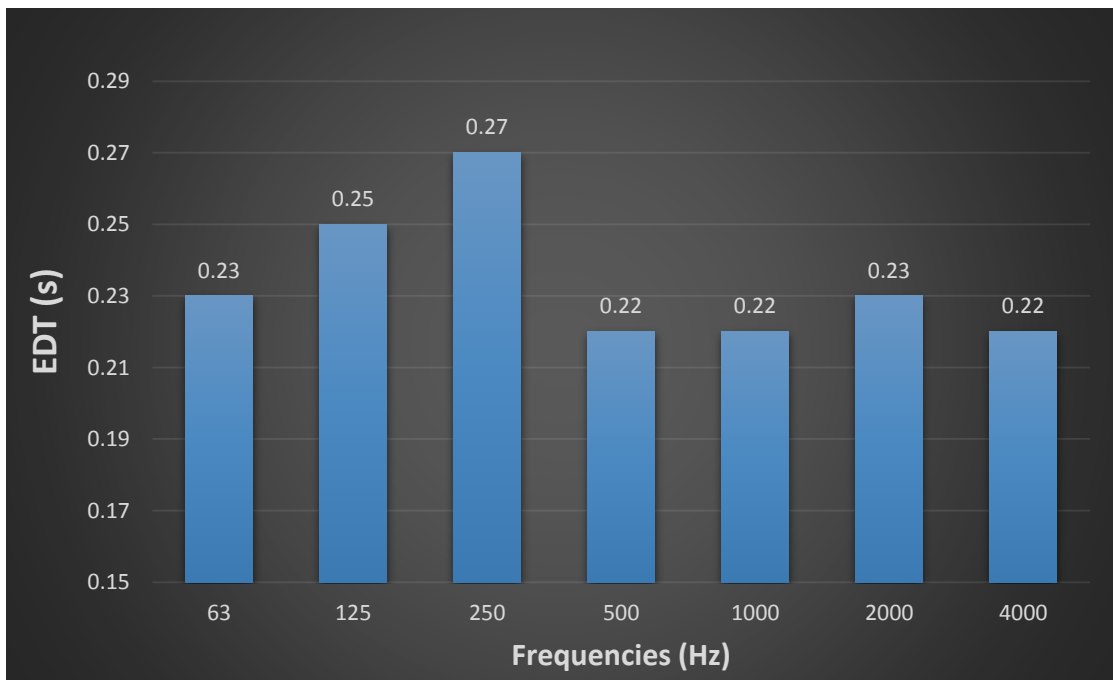
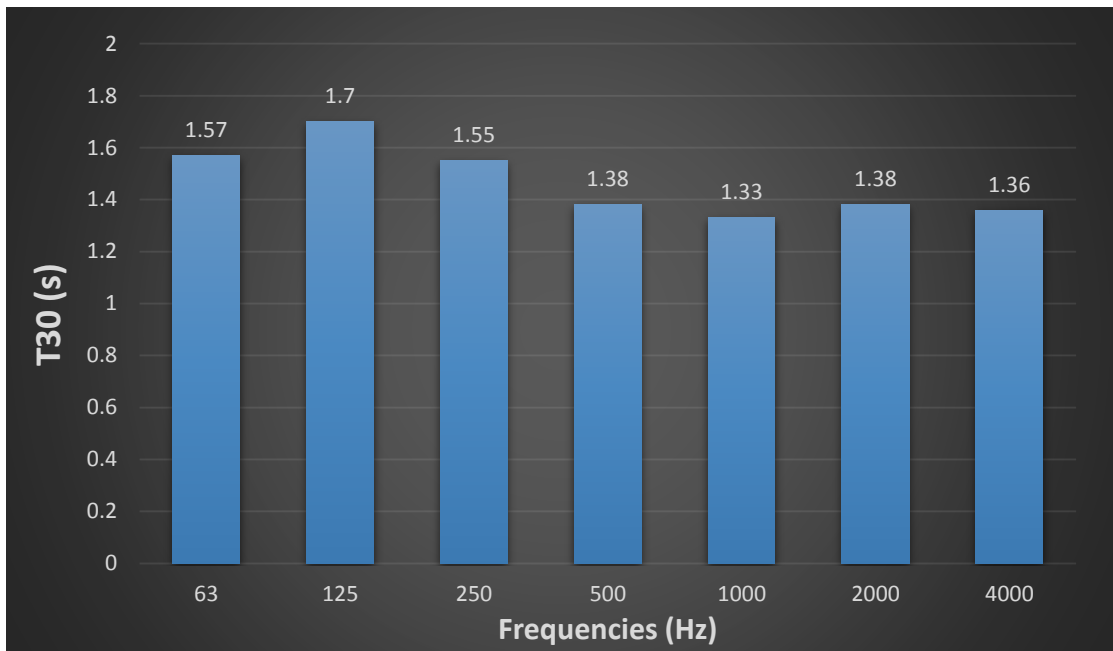




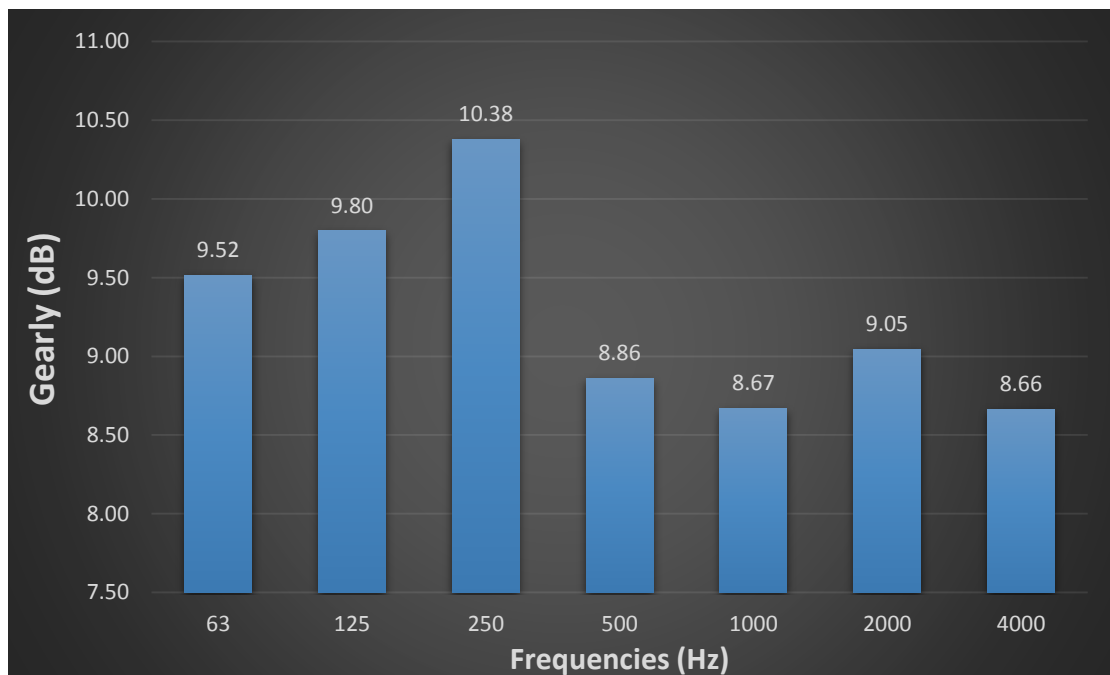
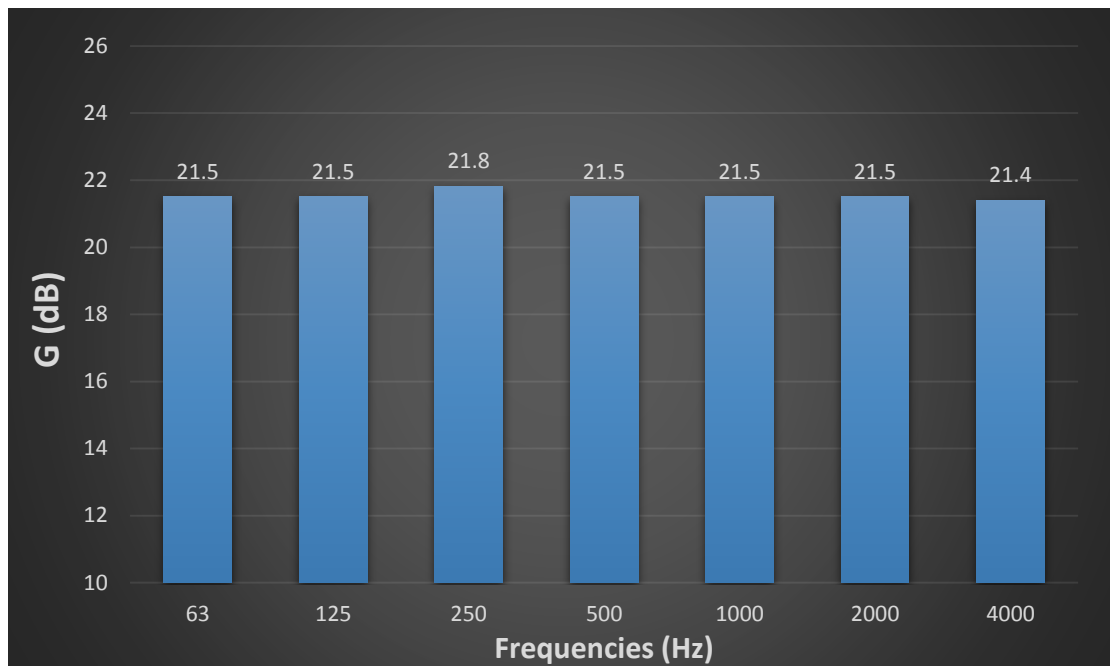
ΣΤ.1.3. Εύρος σκηής 10m

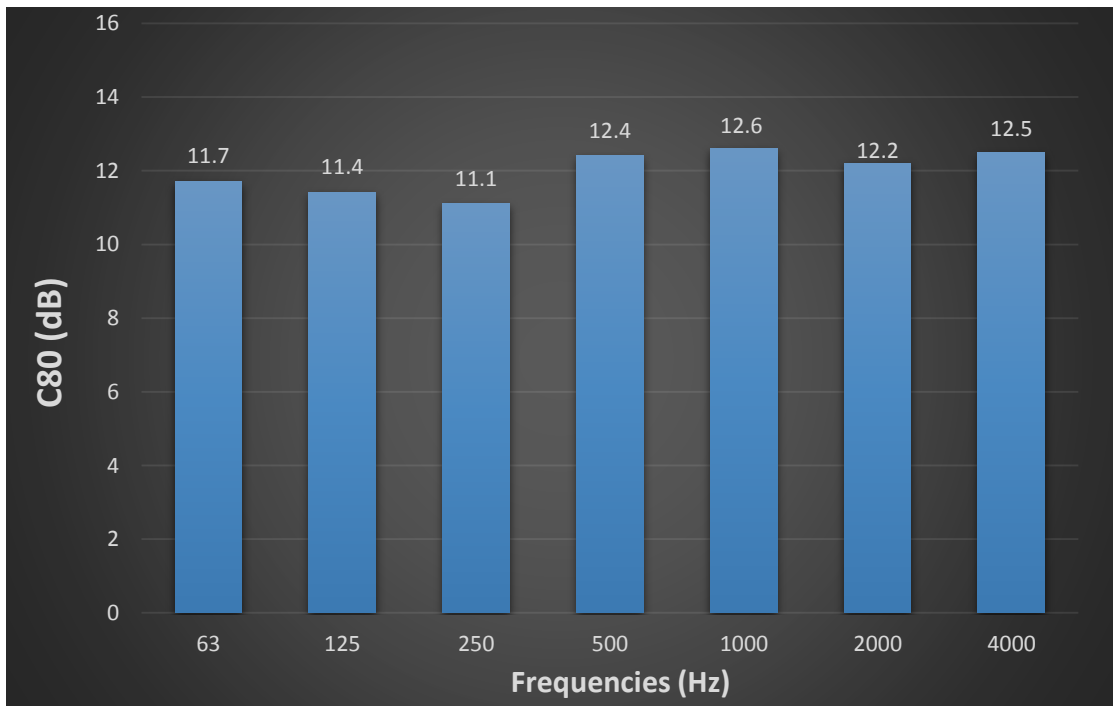
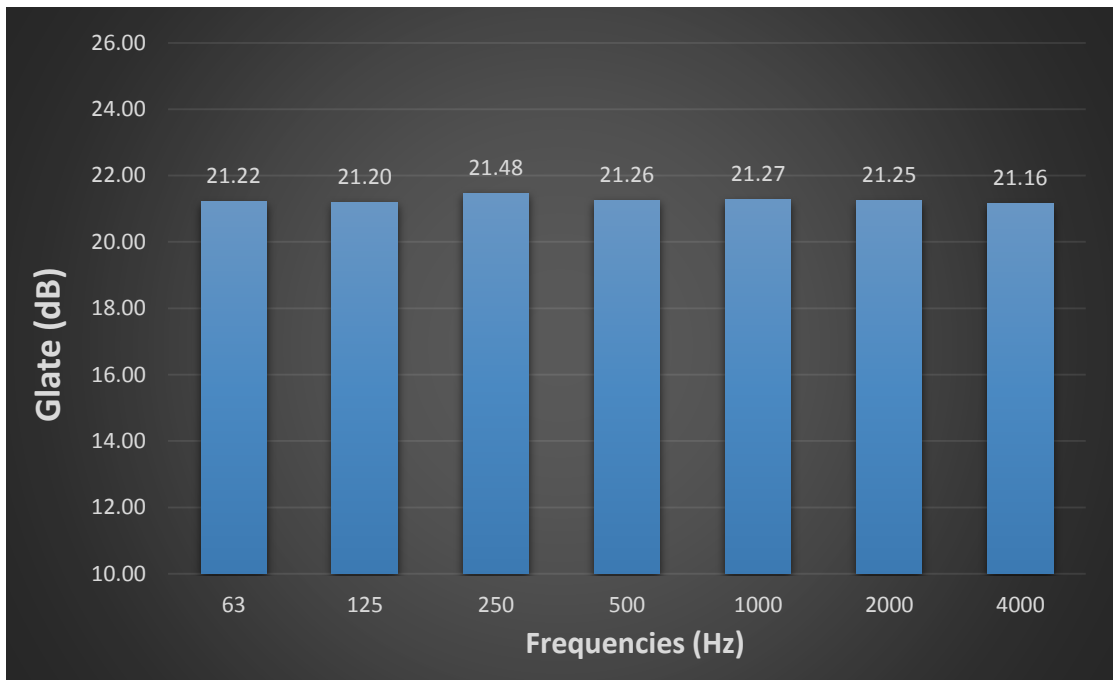


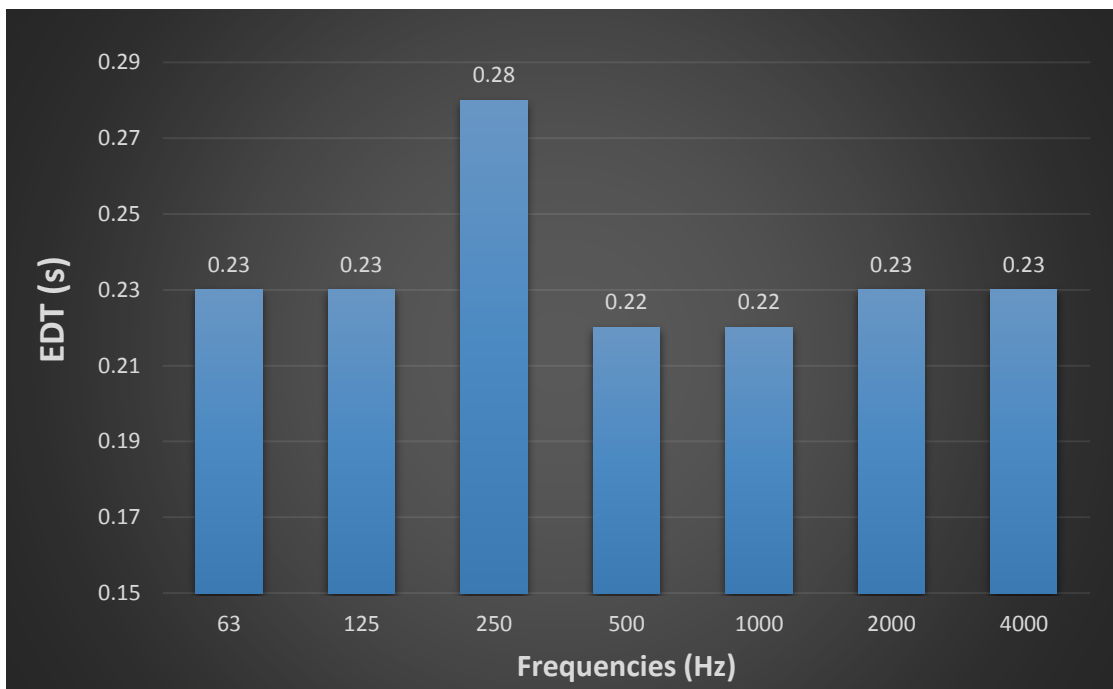
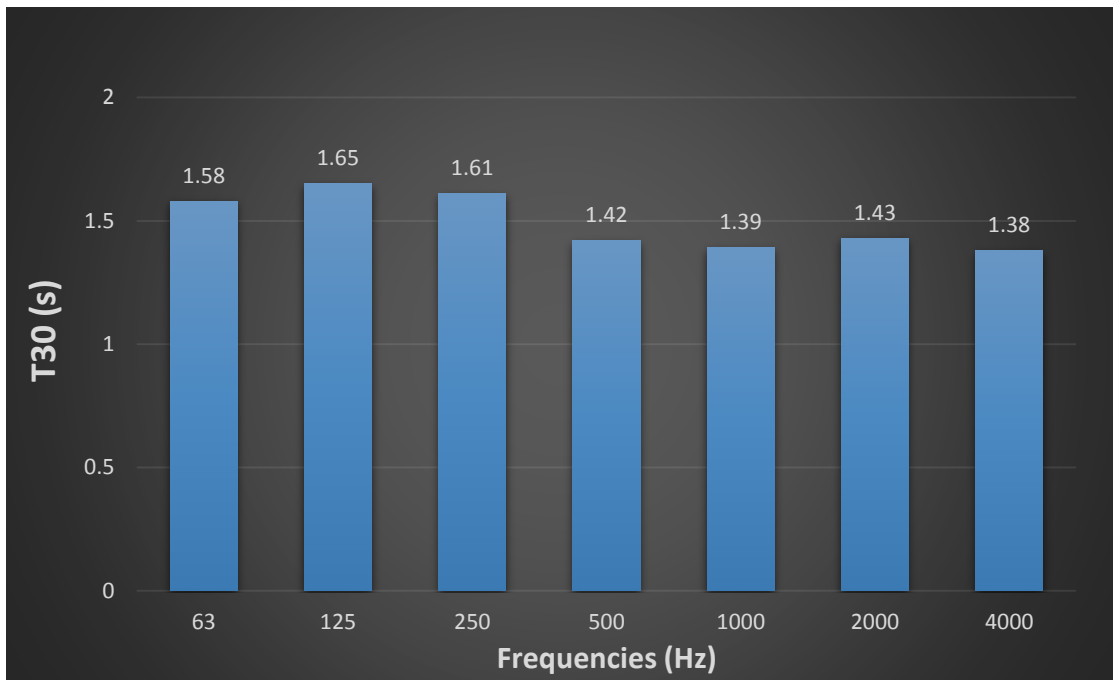




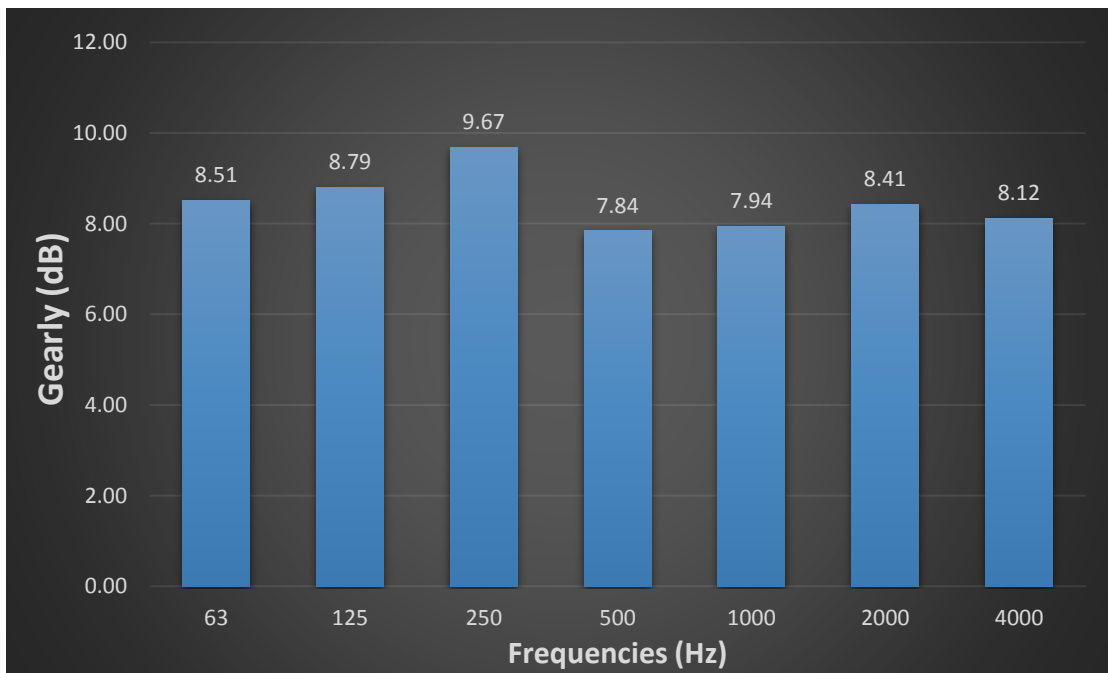
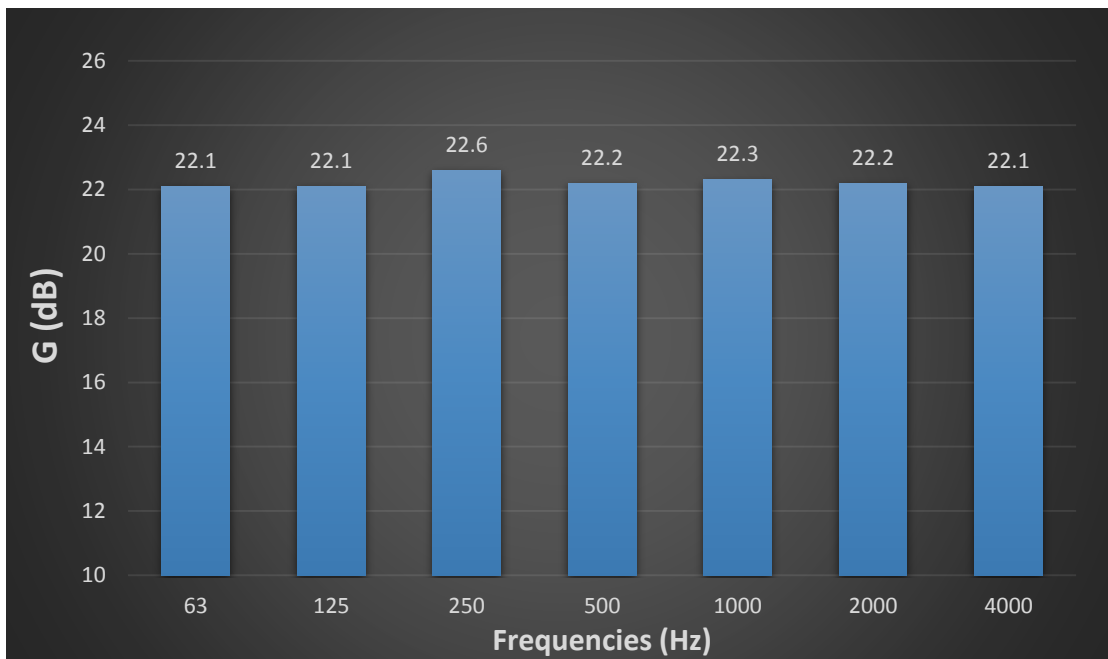
ΣΤ.1.4. Εύρος σκηνής 8m

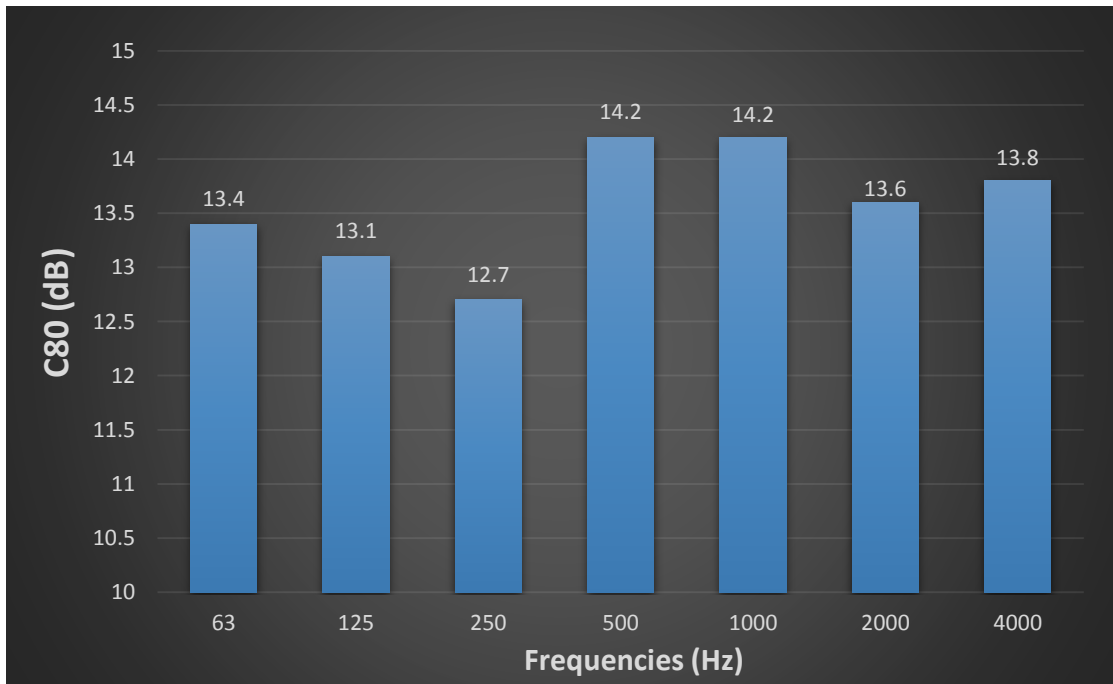
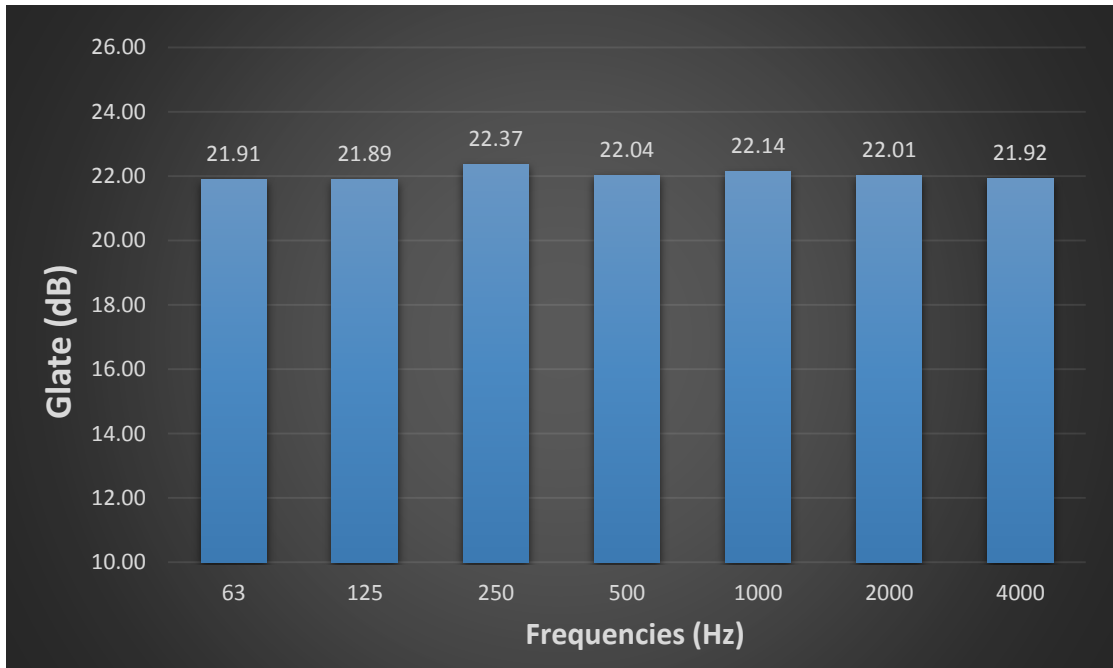


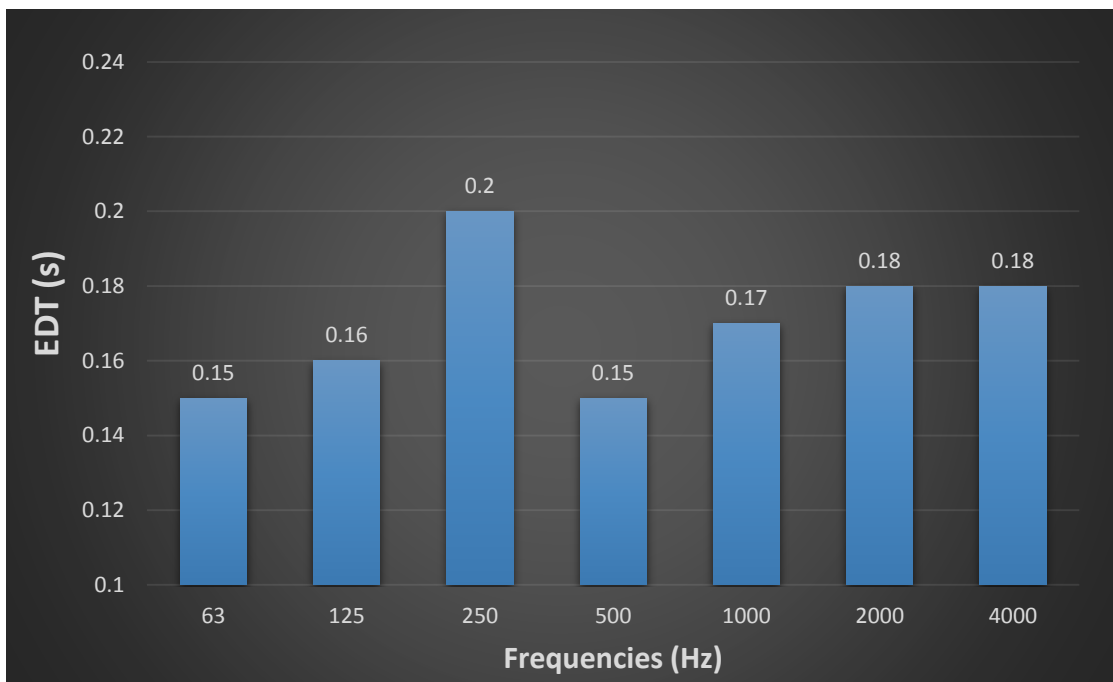
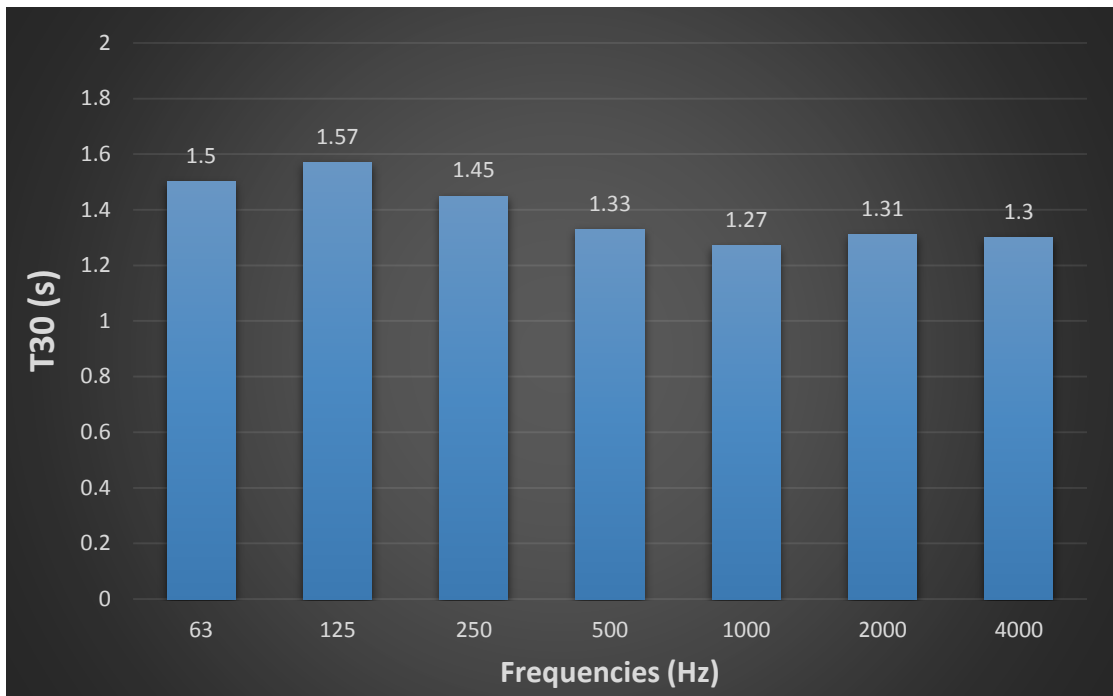




ΣΤ.1.5. Εύρος σκηής 6m

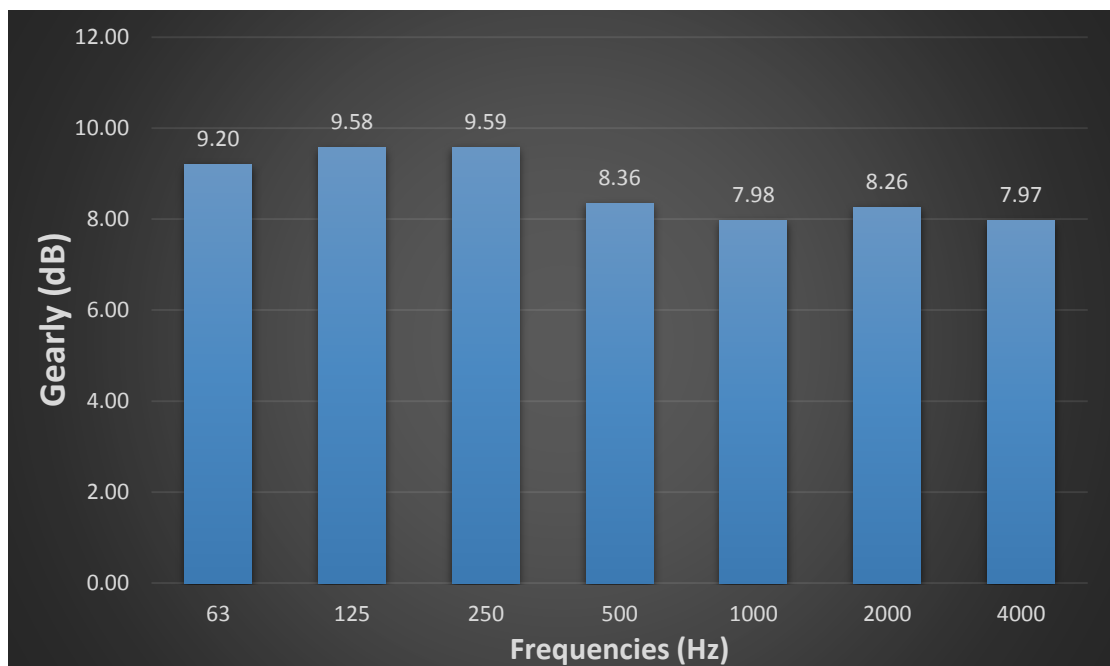
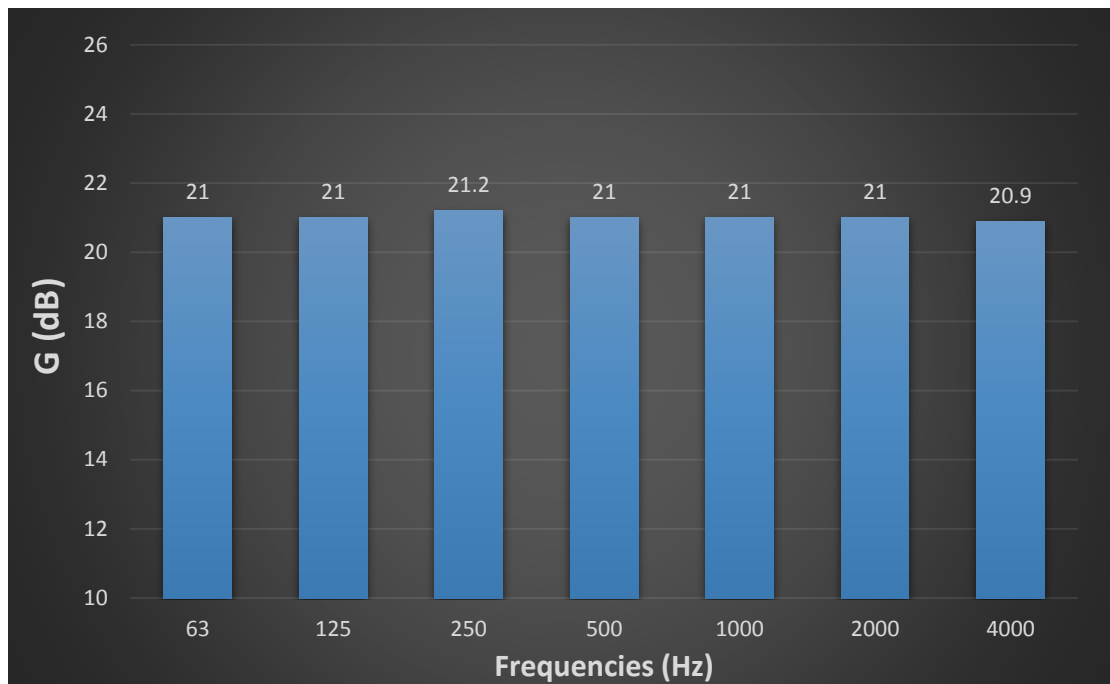


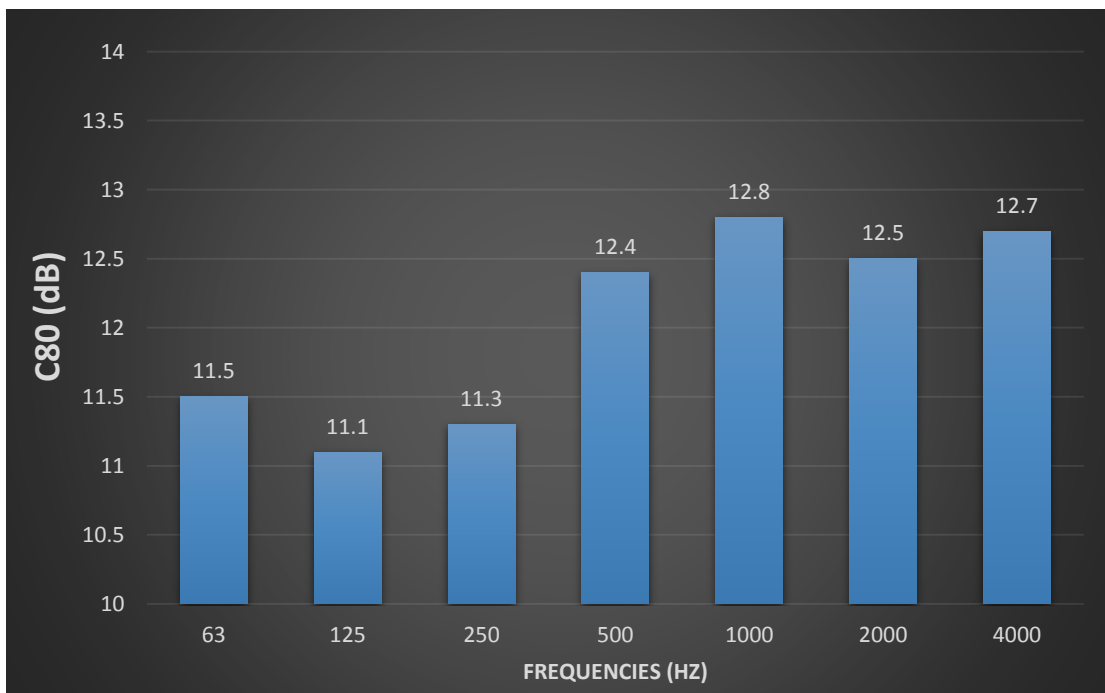
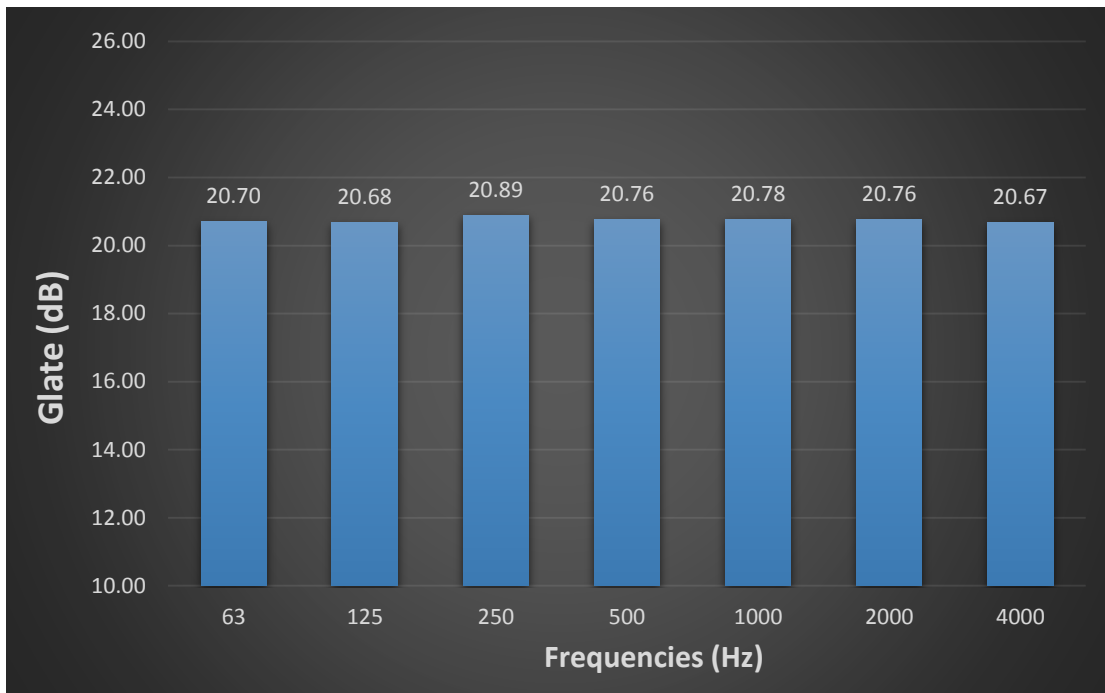


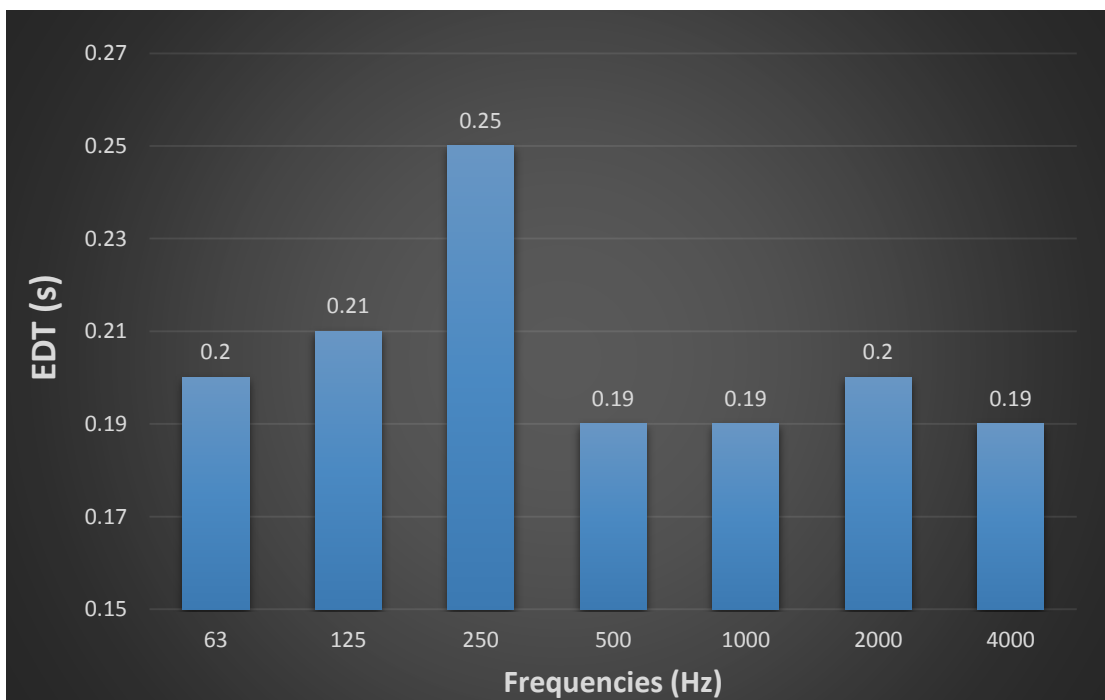
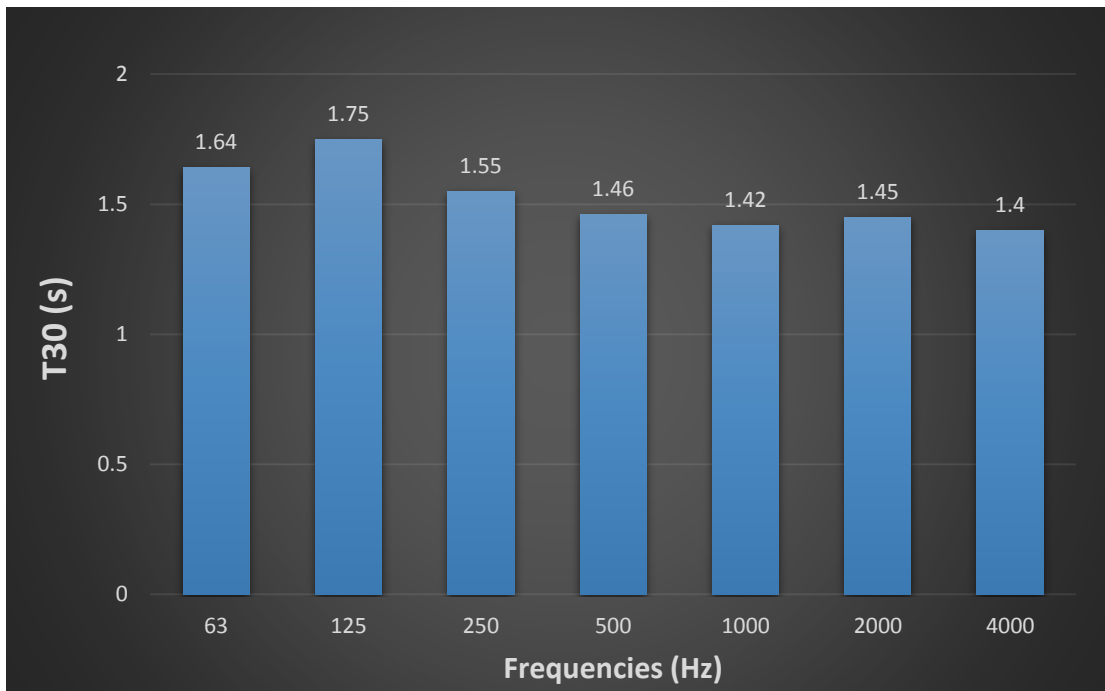


ΣΤ.2. Ύψος οροφής σκηνής

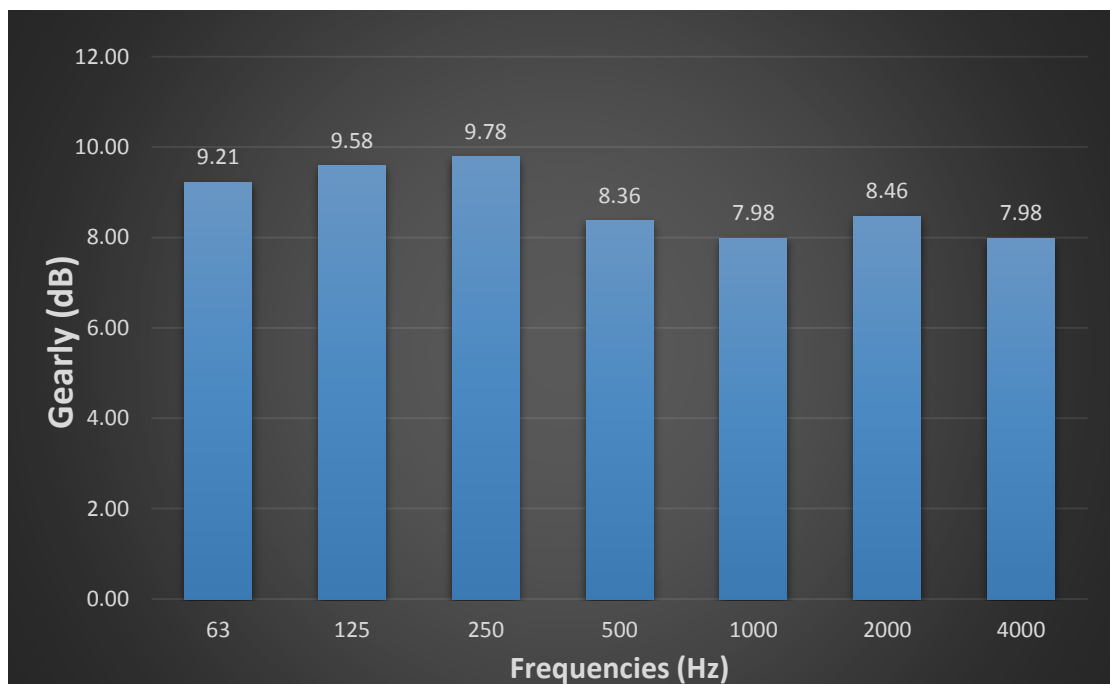
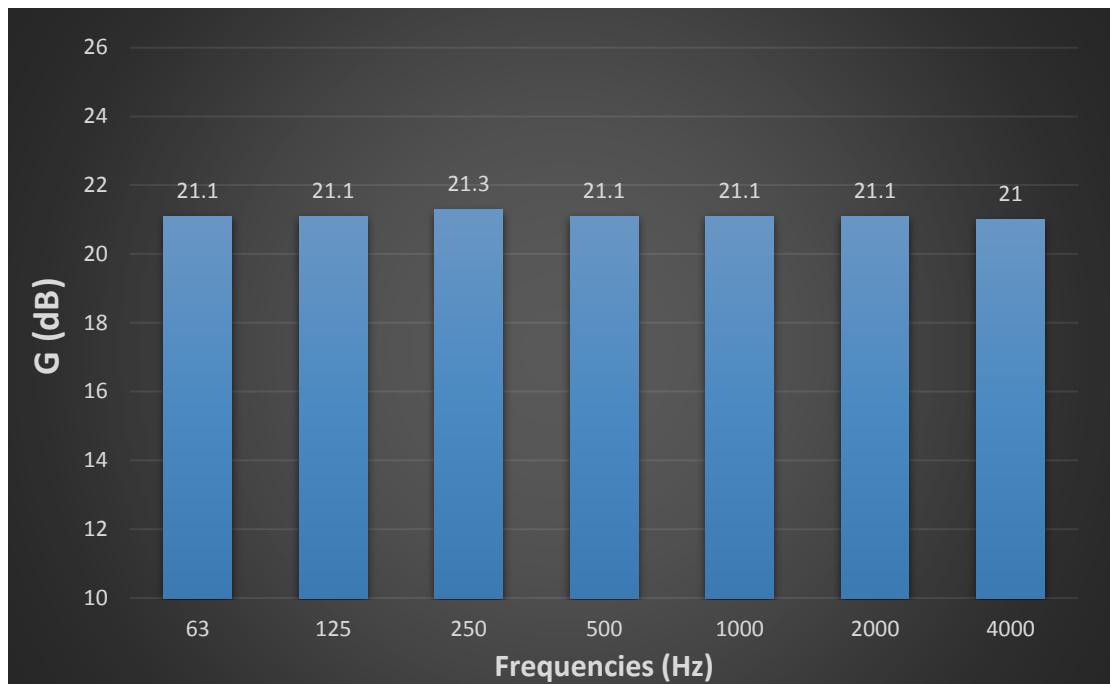
F.2.1. Ύψος οροφής σκηνής 6m

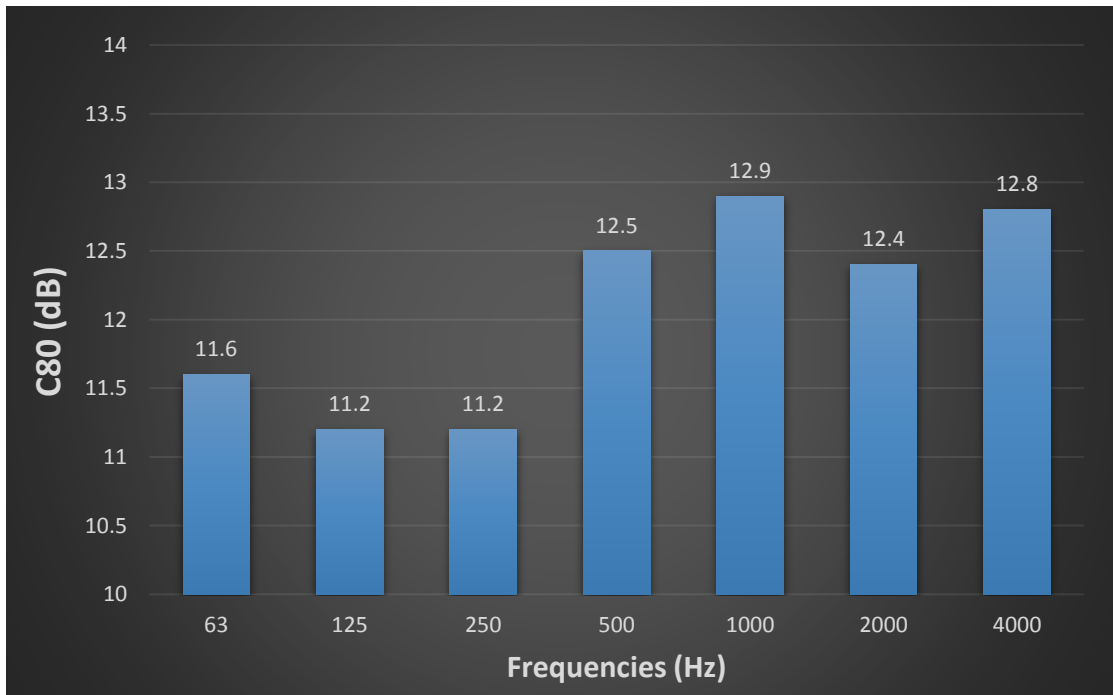
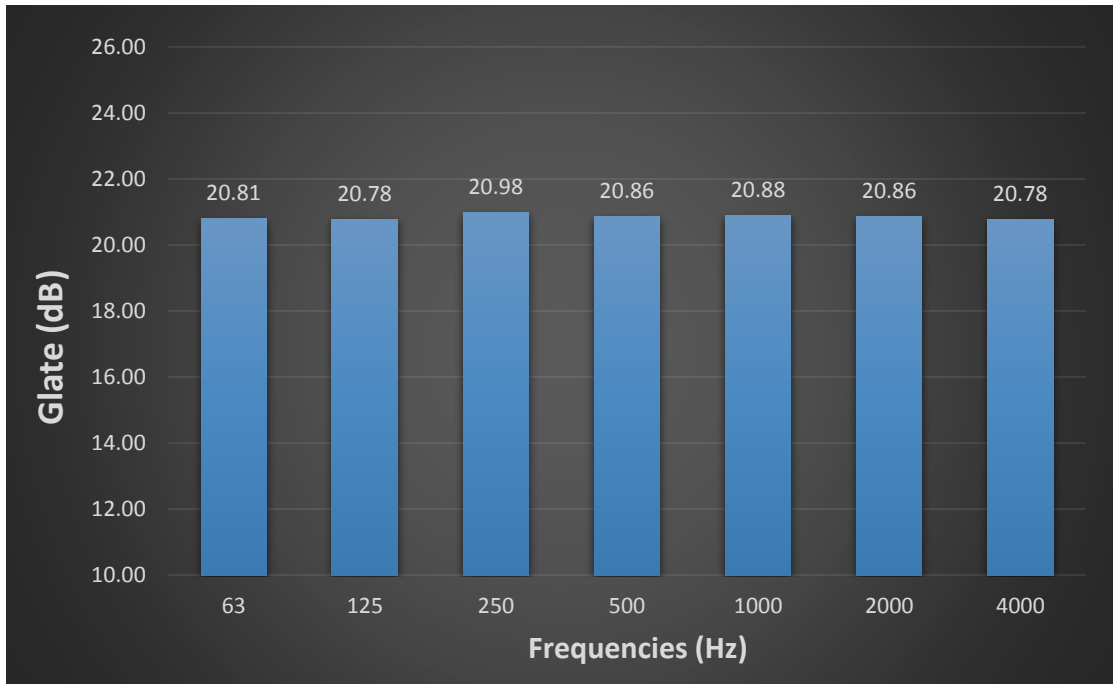


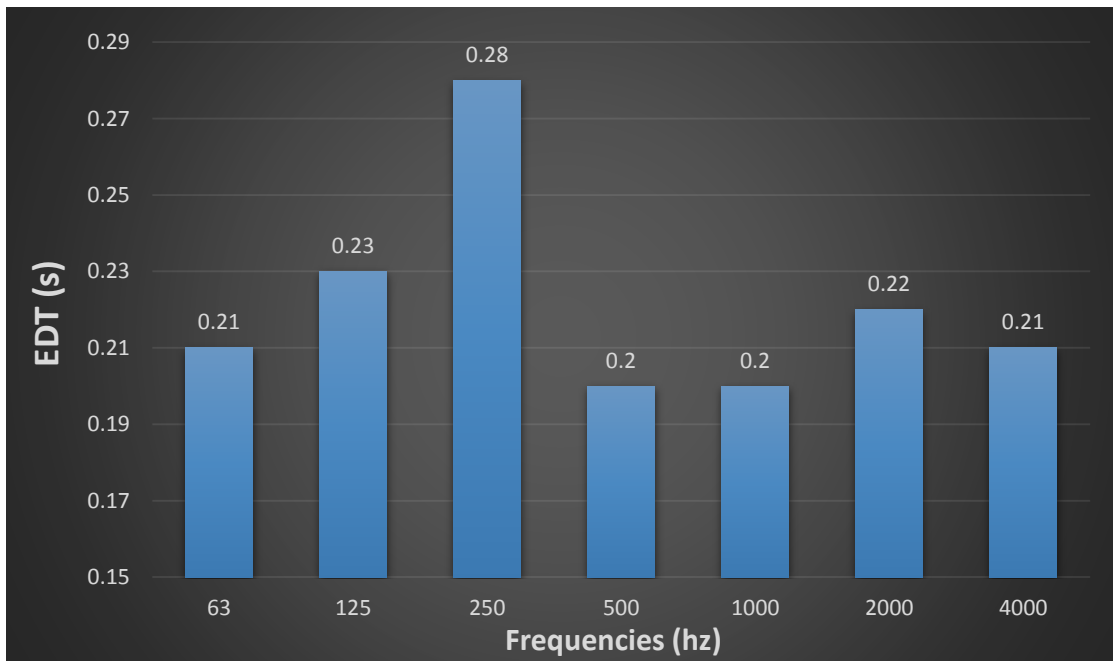
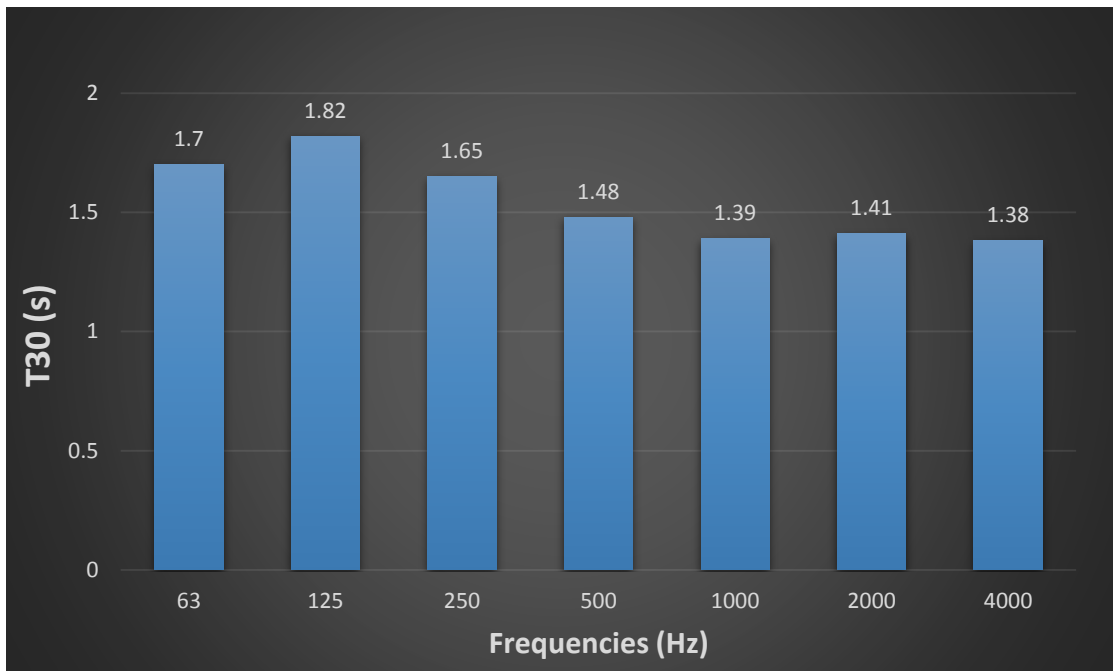




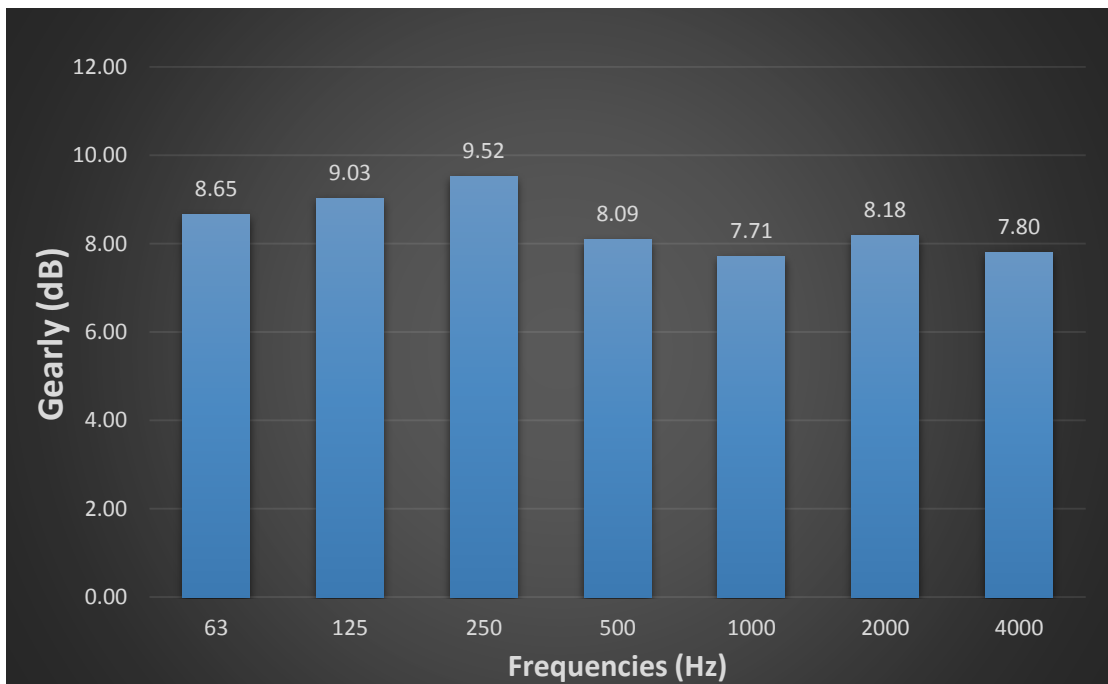
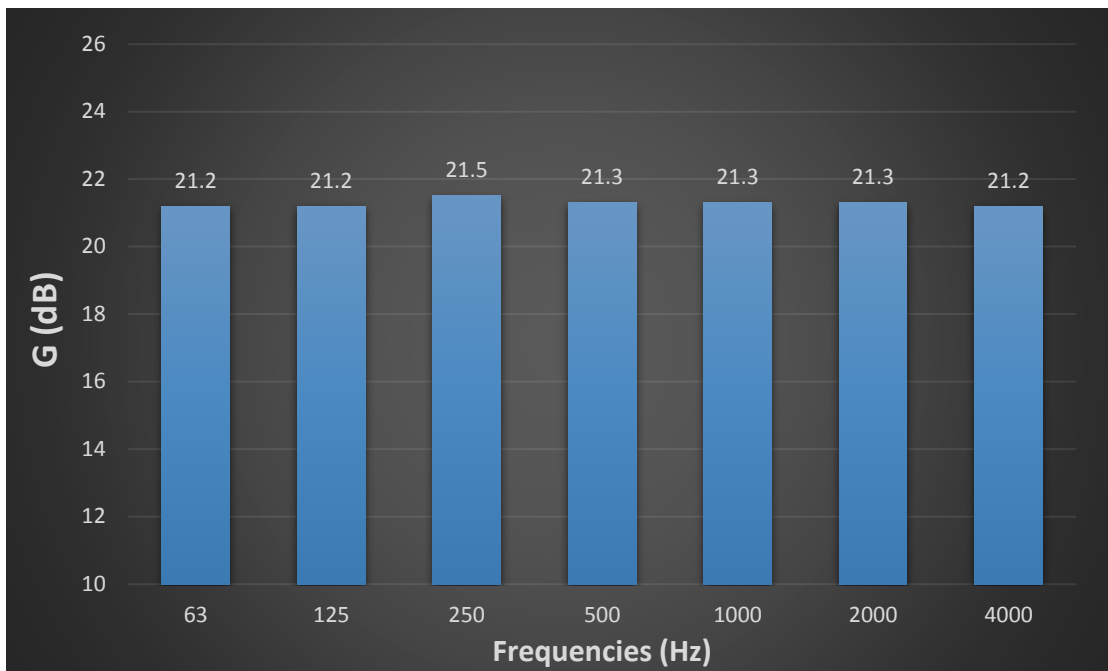
F.2.2. Ύψος οροφής σκηνής 5m

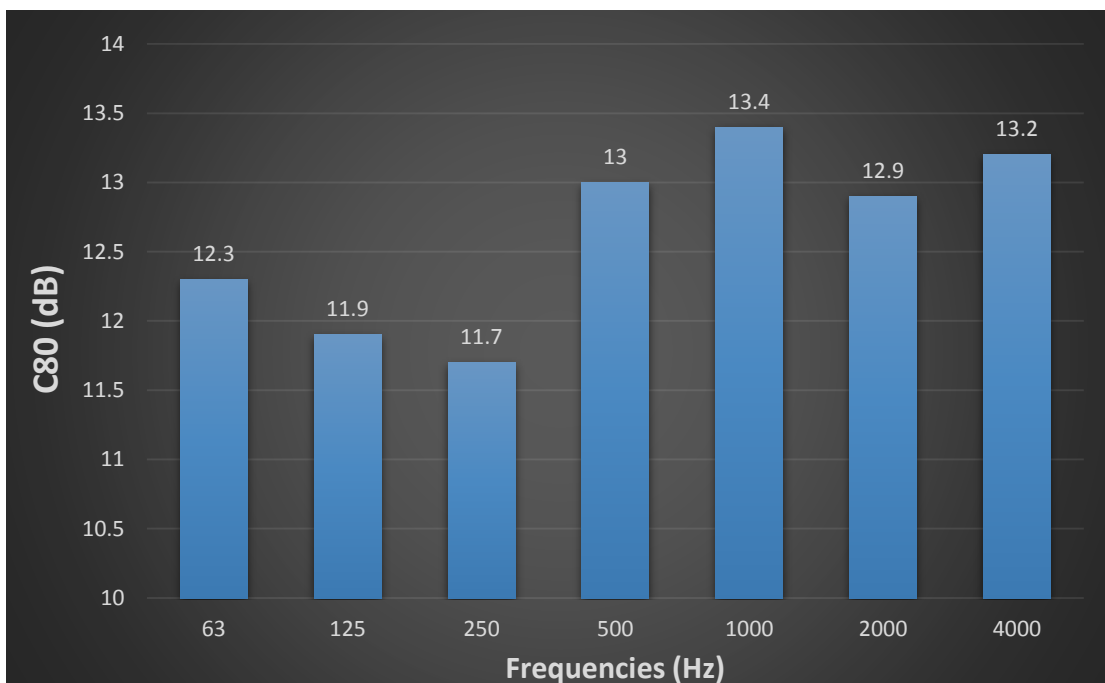
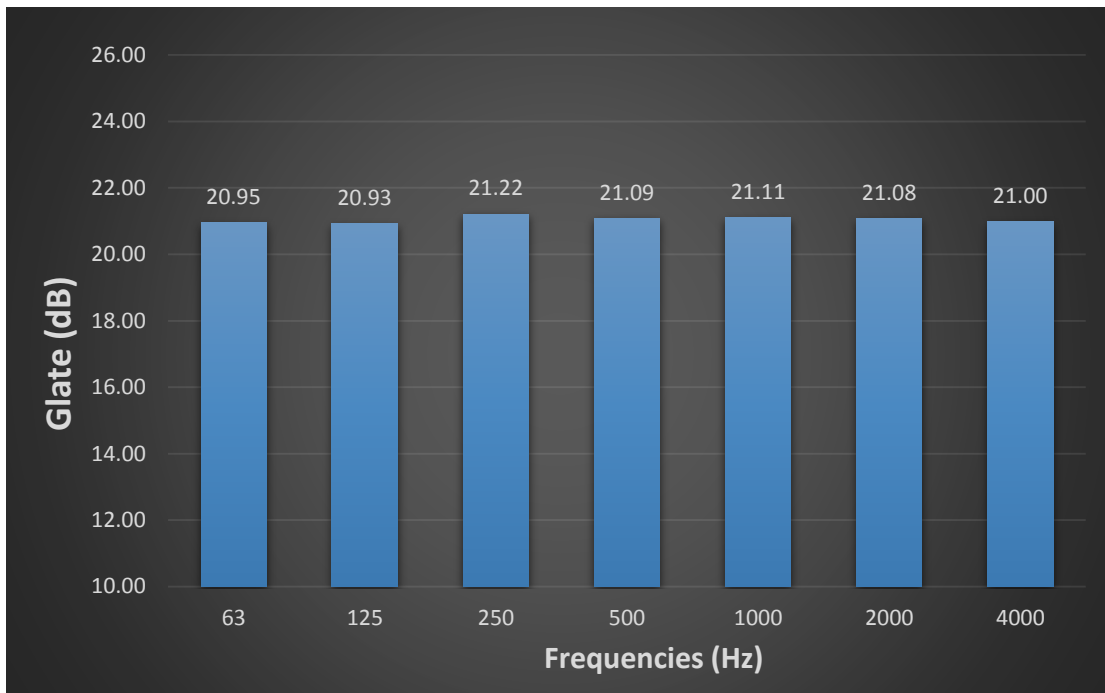


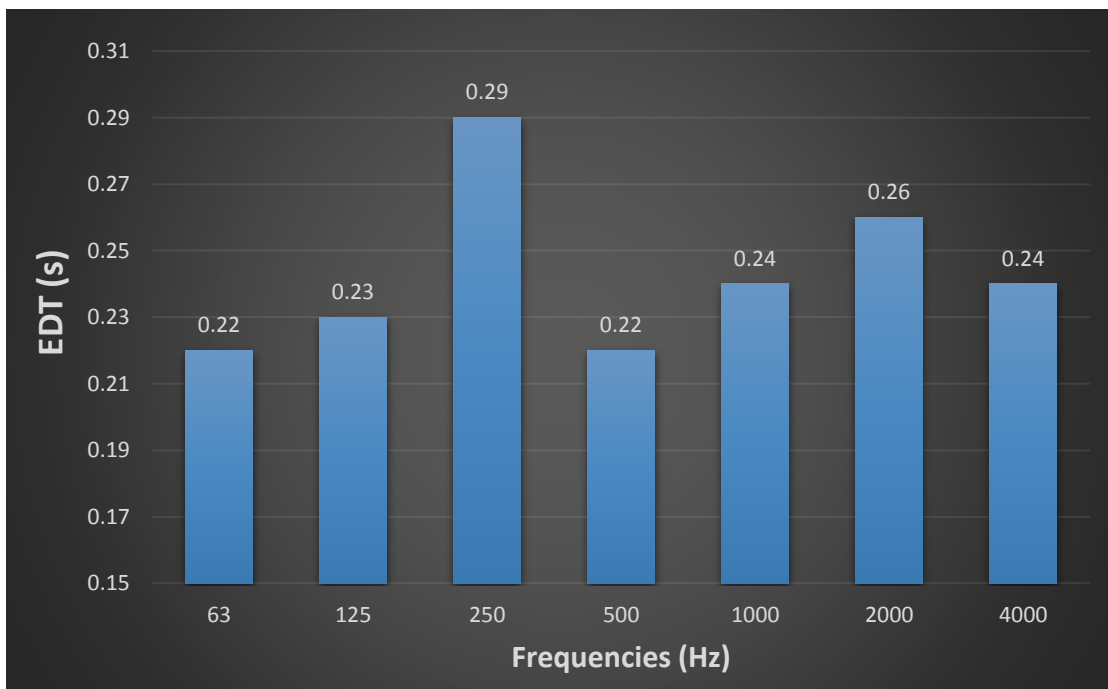
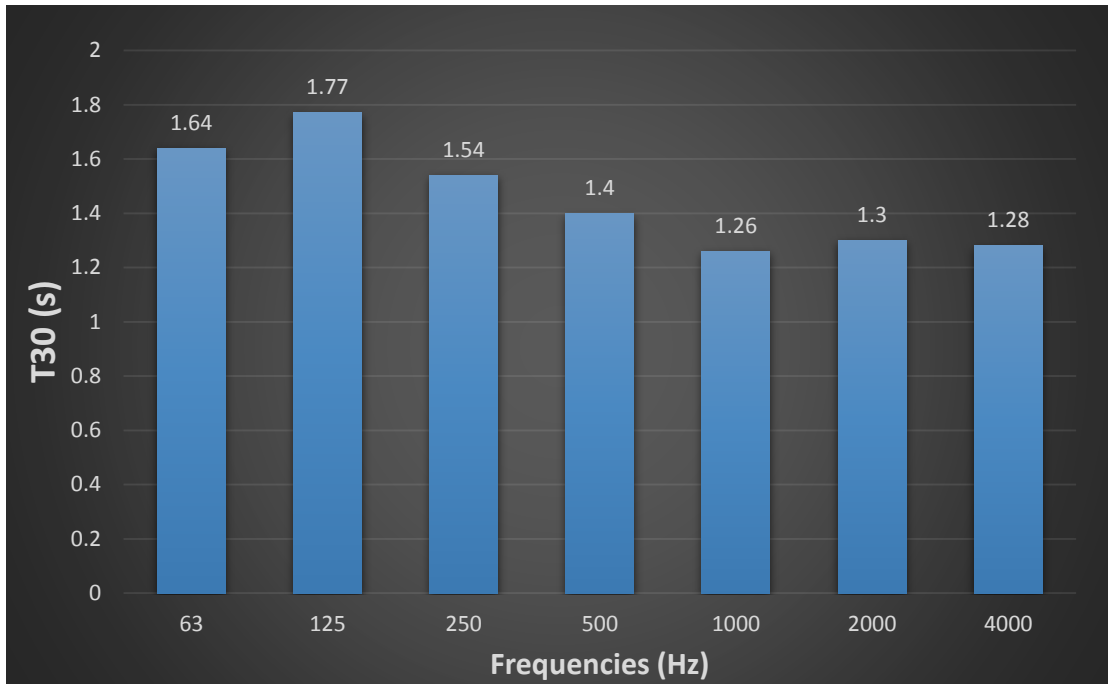




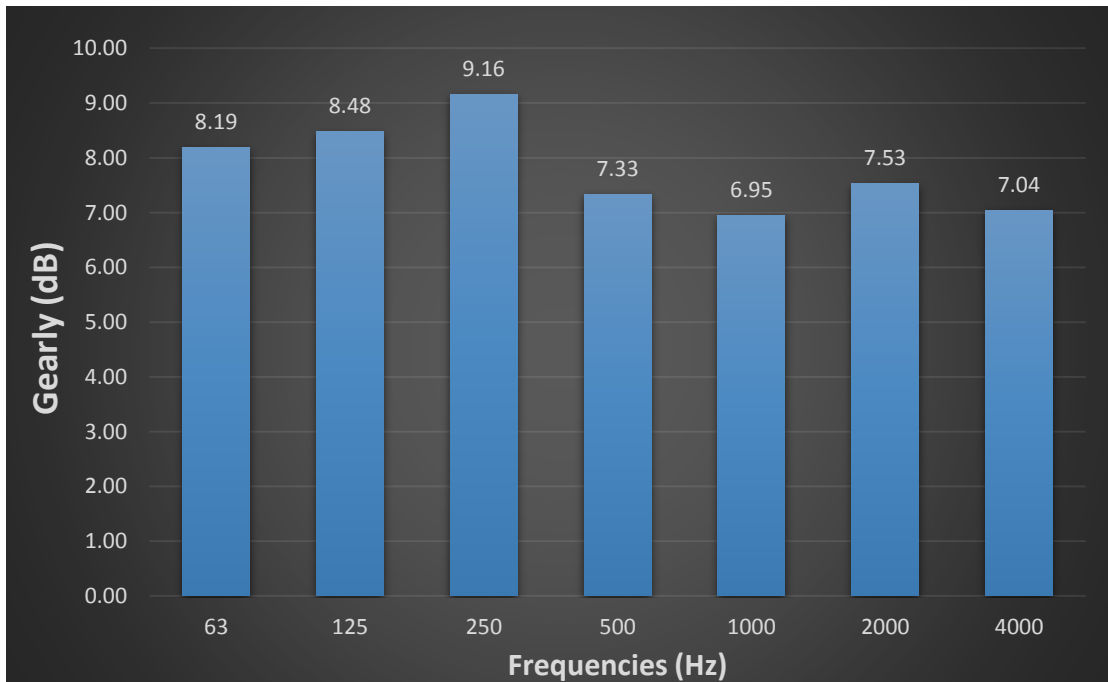
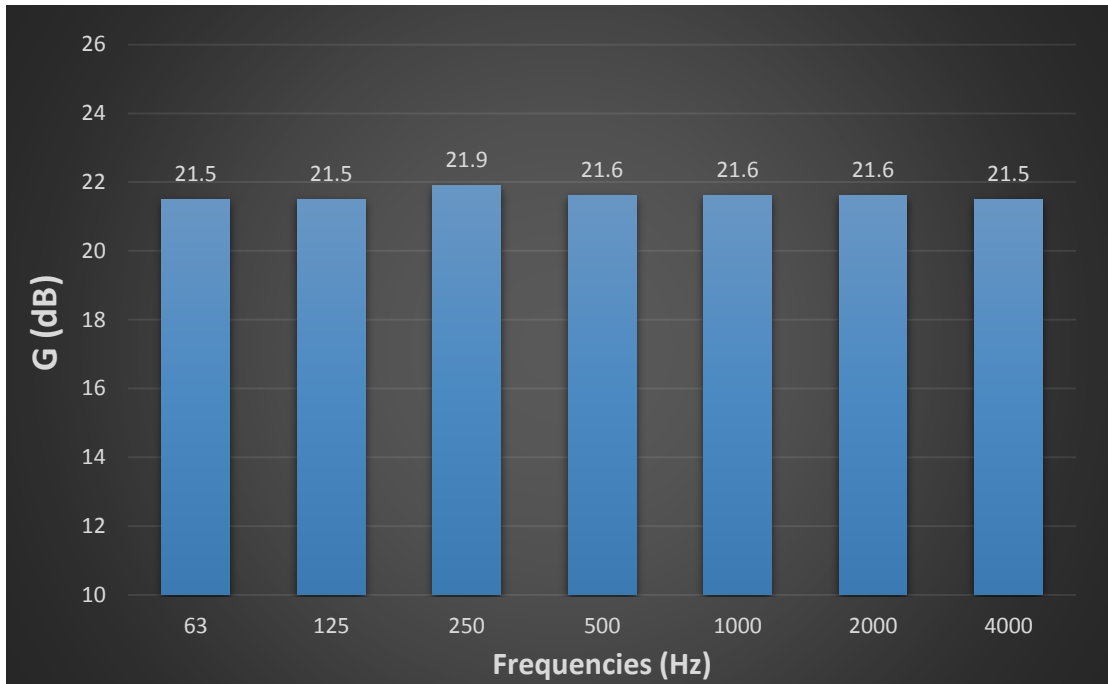
F.2.3. Ύψος οροφής σκηνής 4m

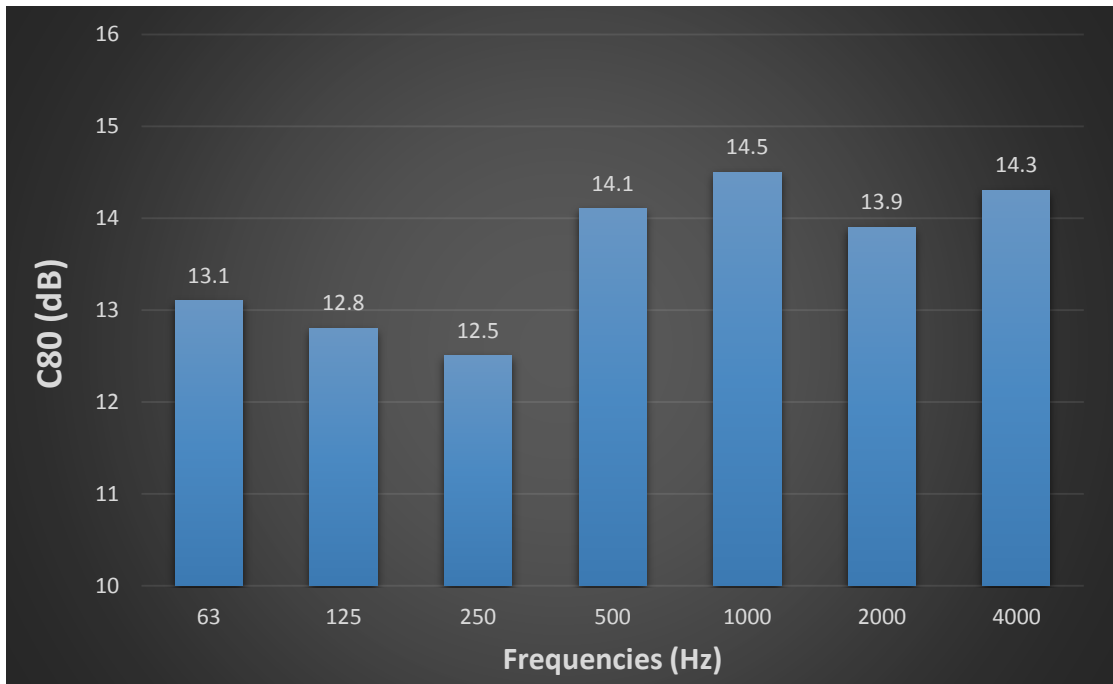
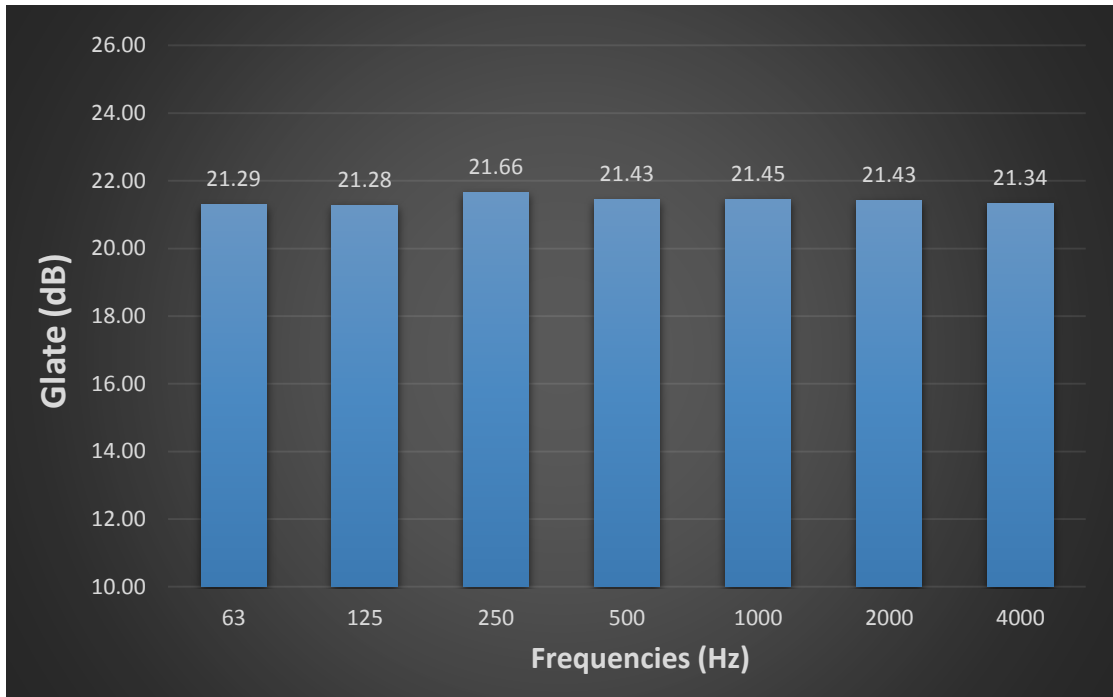


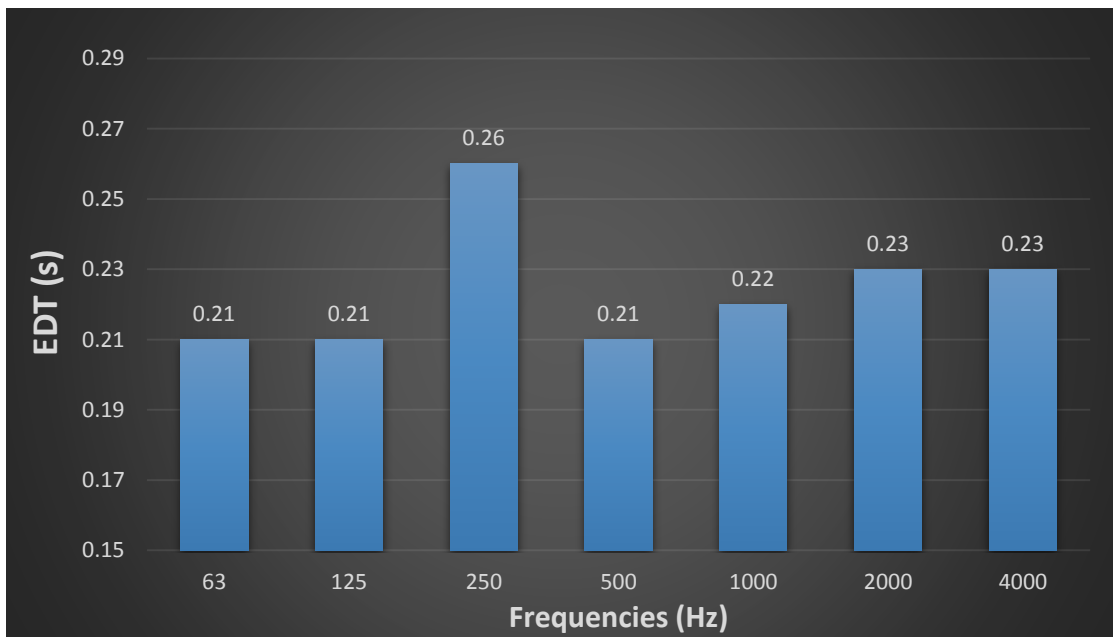
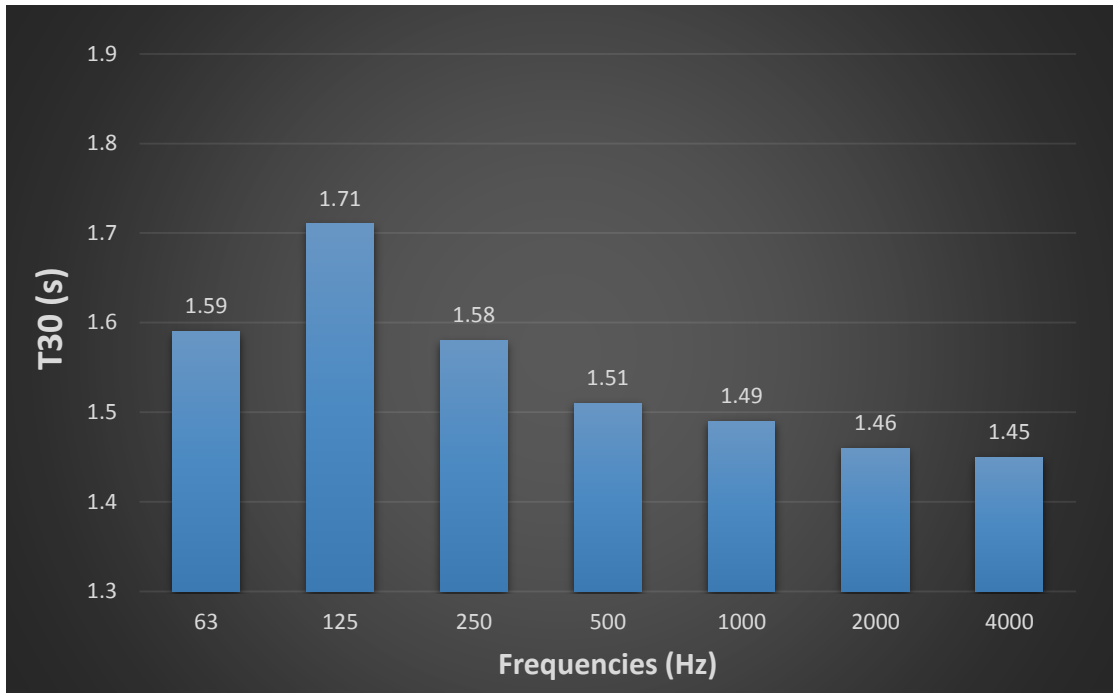




F.2.4. Ύψος οροφής σκηνής 3m

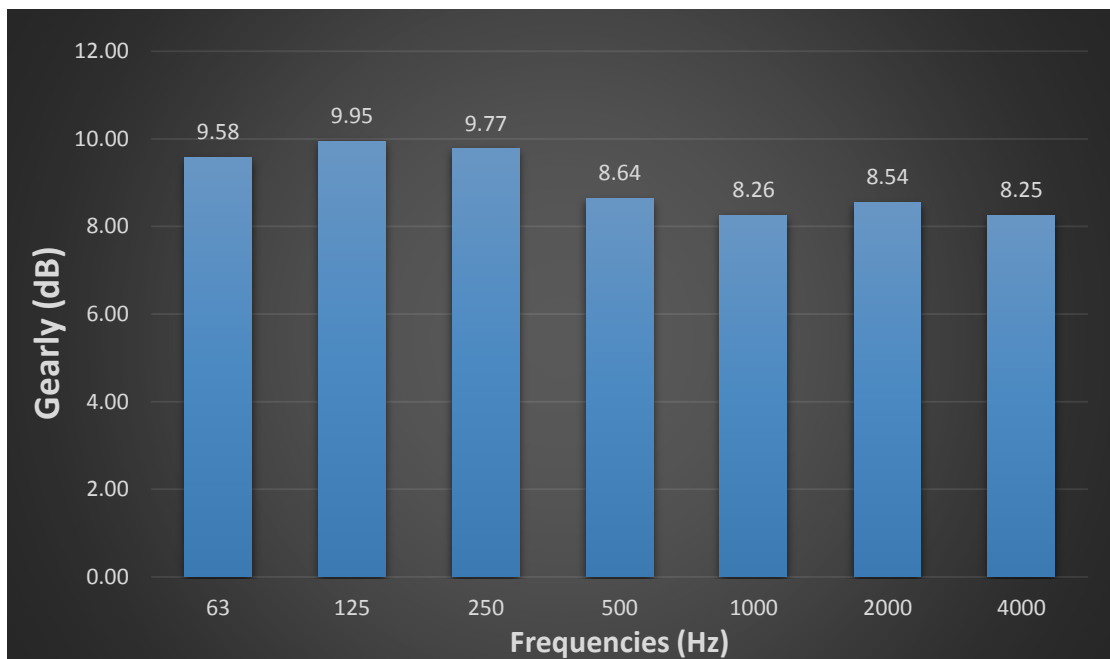
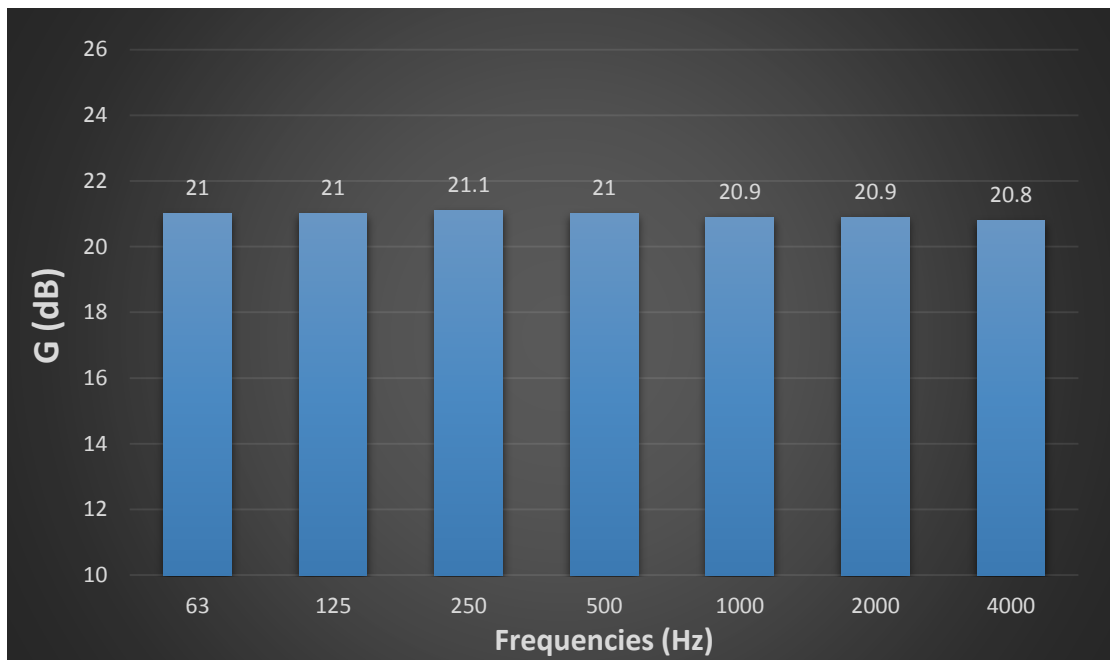


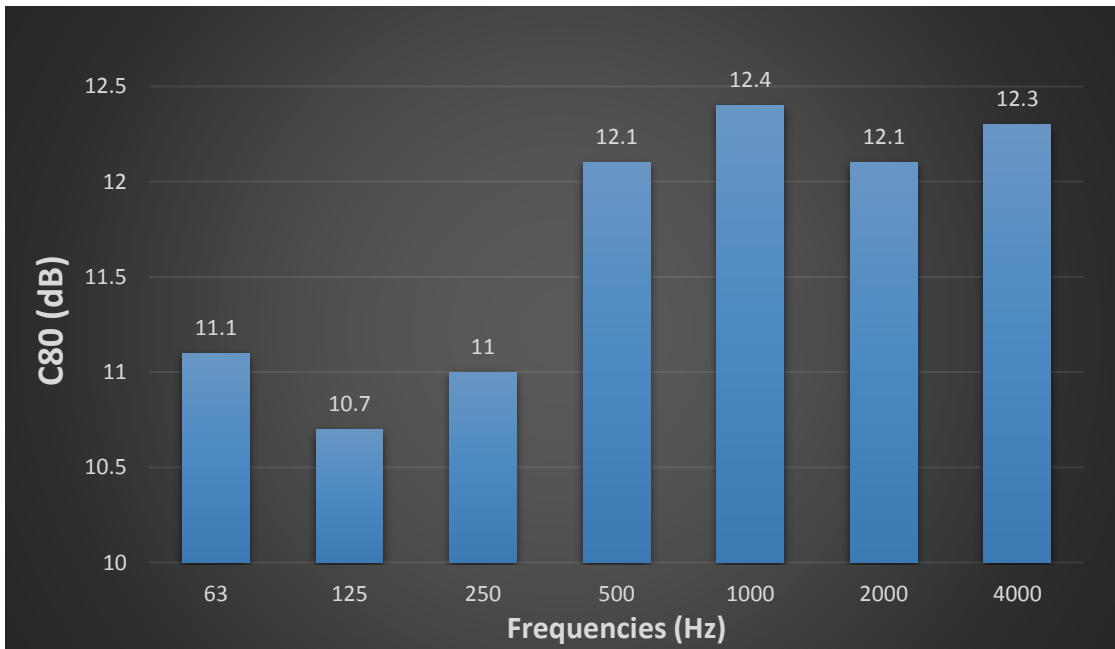
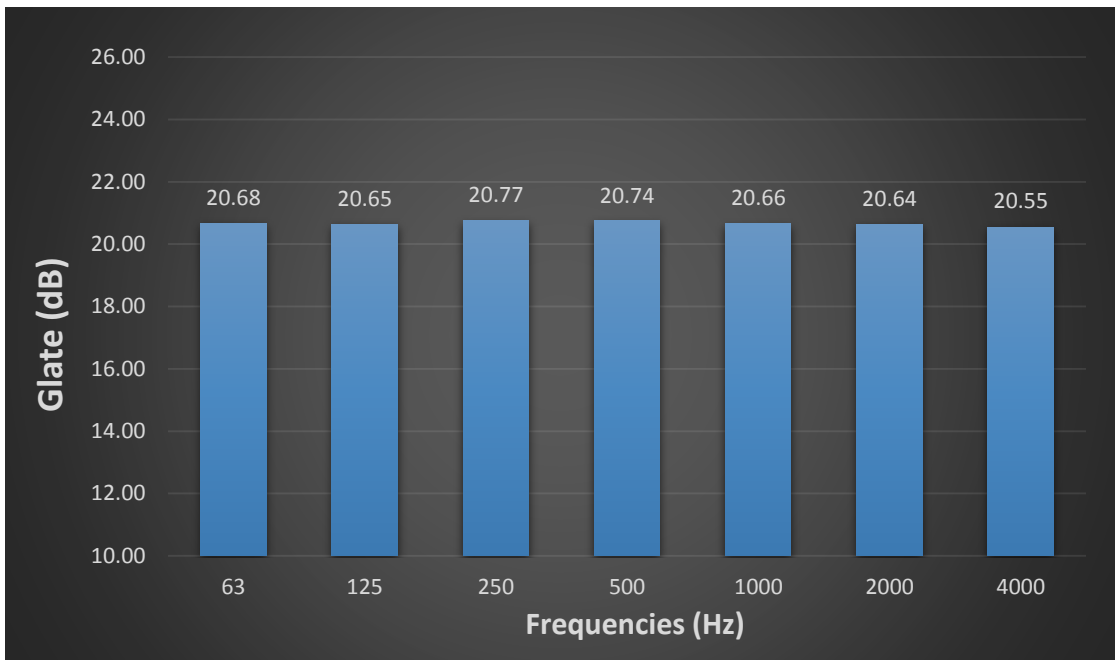


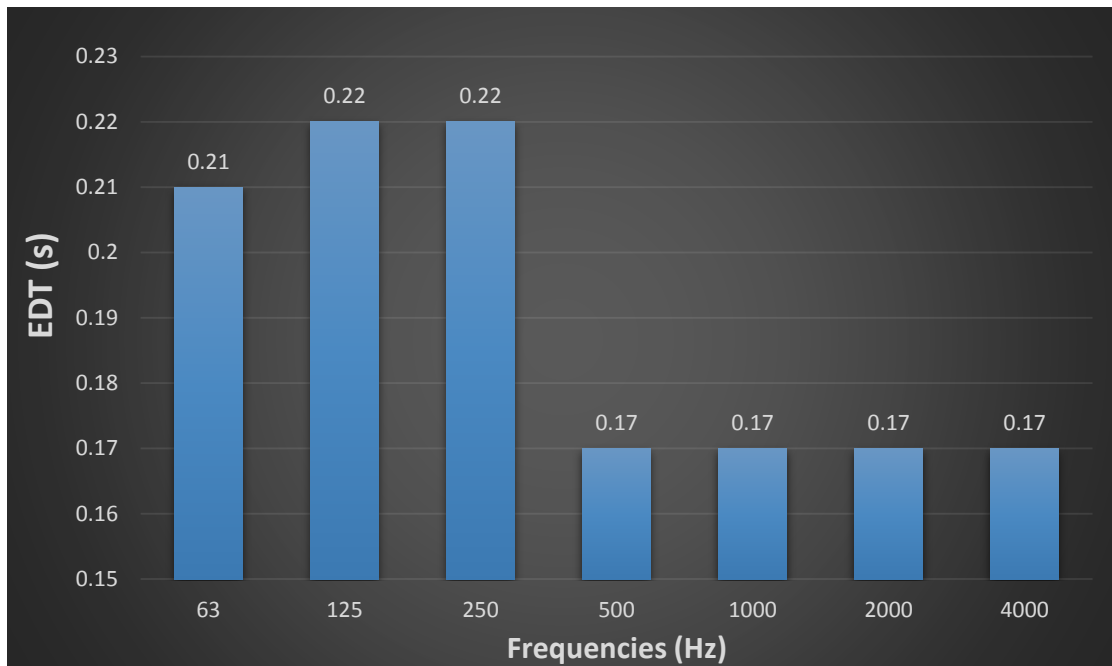
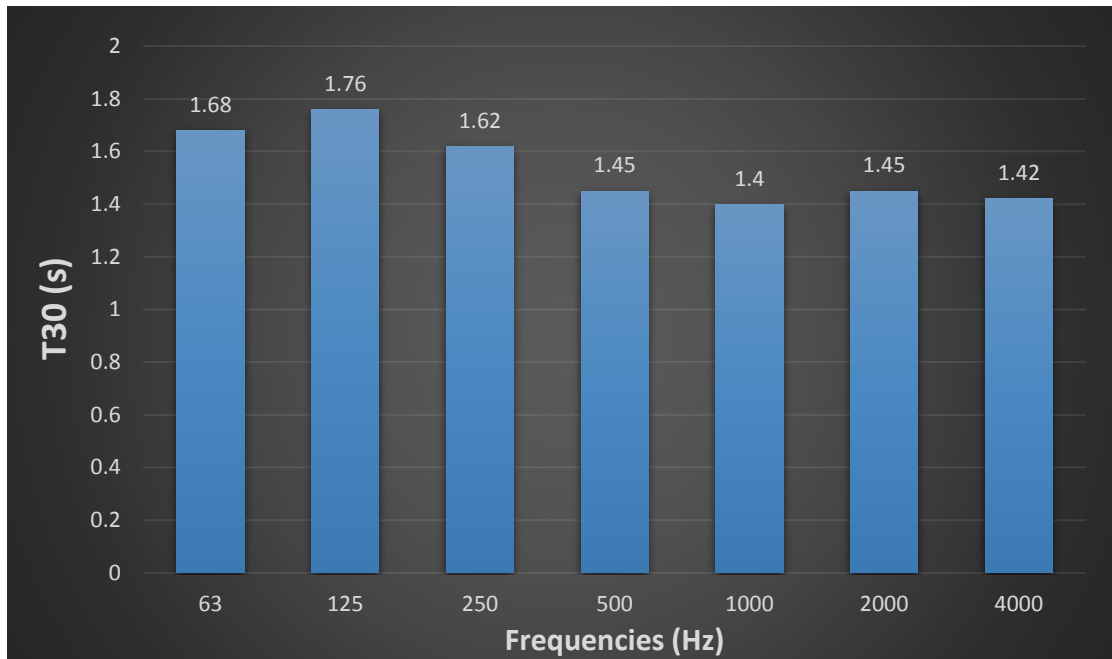


ΣΤ.3. Κλίση πλαϊνών τοίχων σκηνής

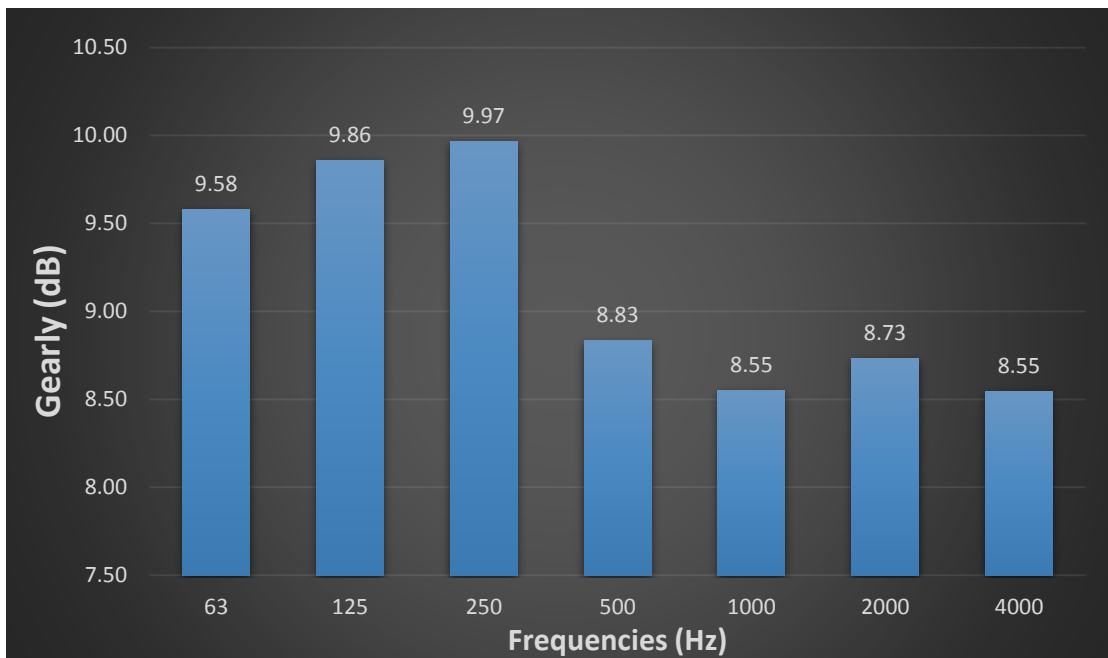
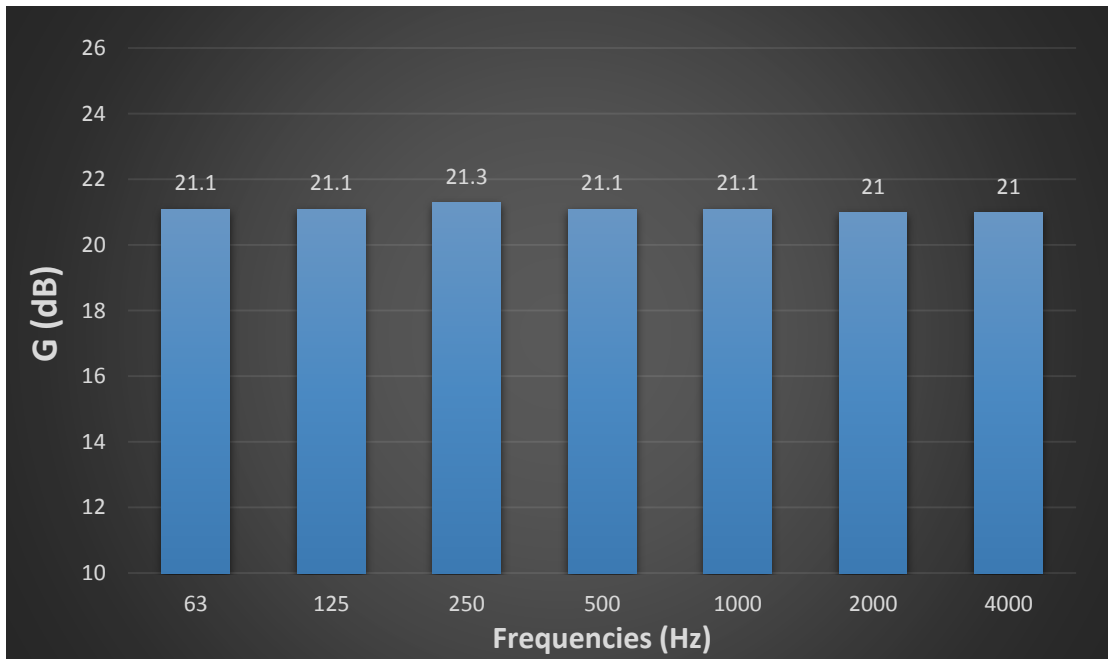
F.3.1. Κλίση 35°

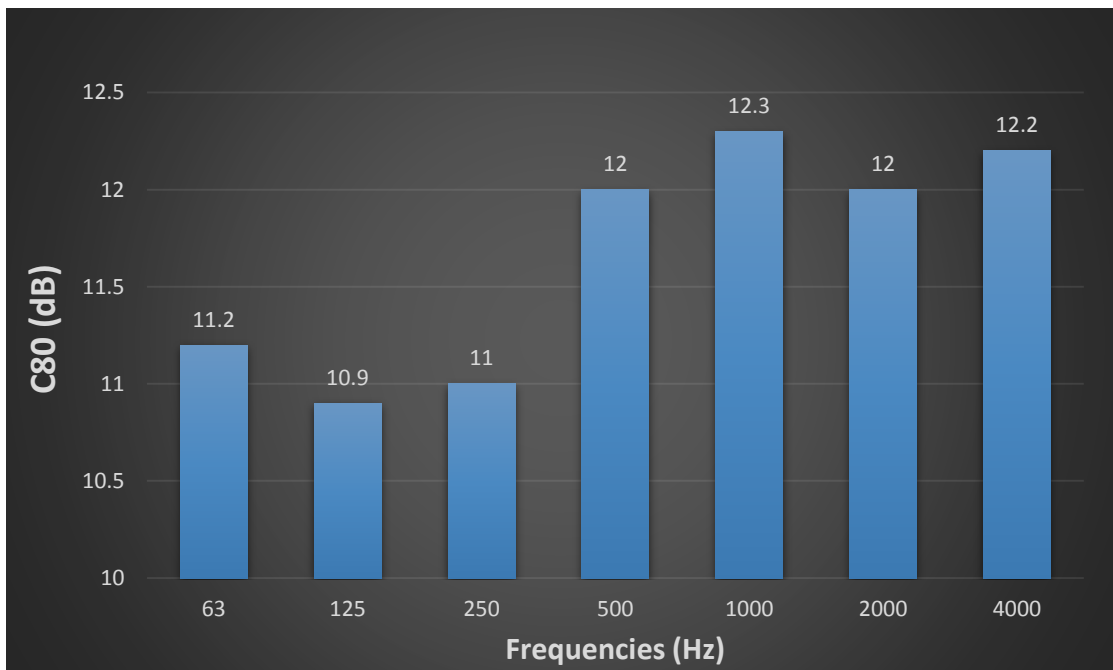
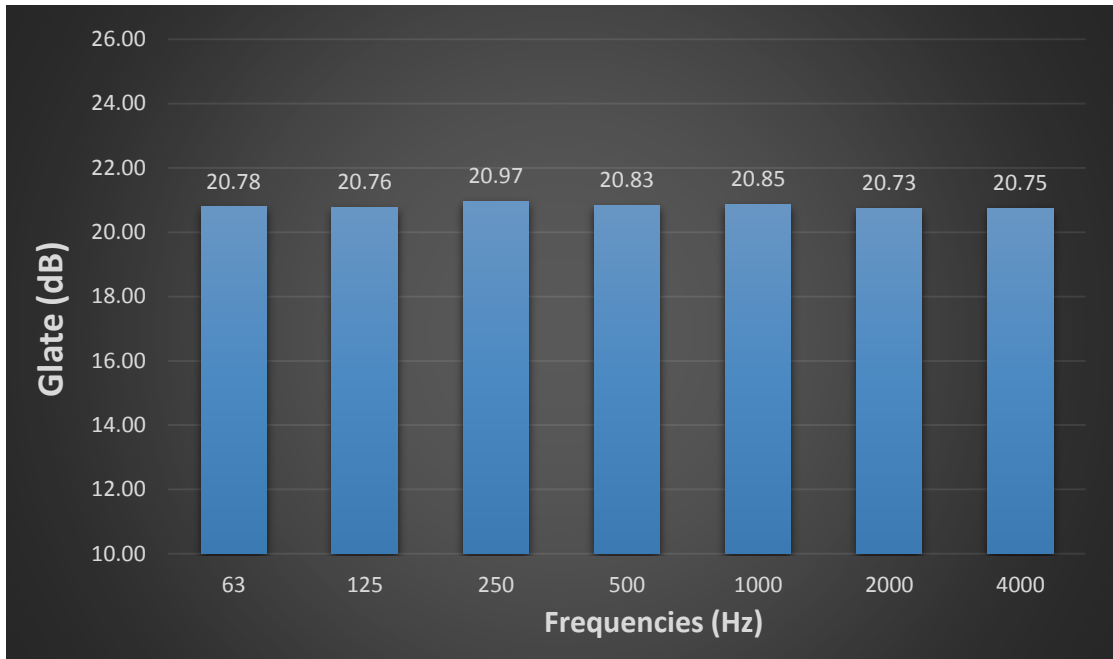


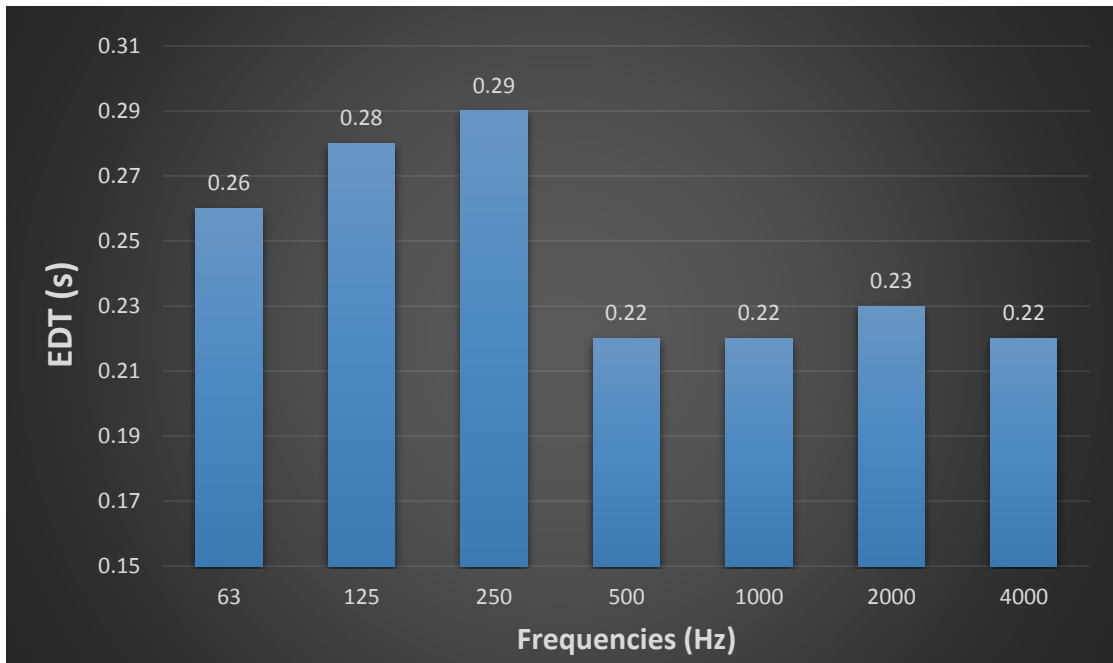
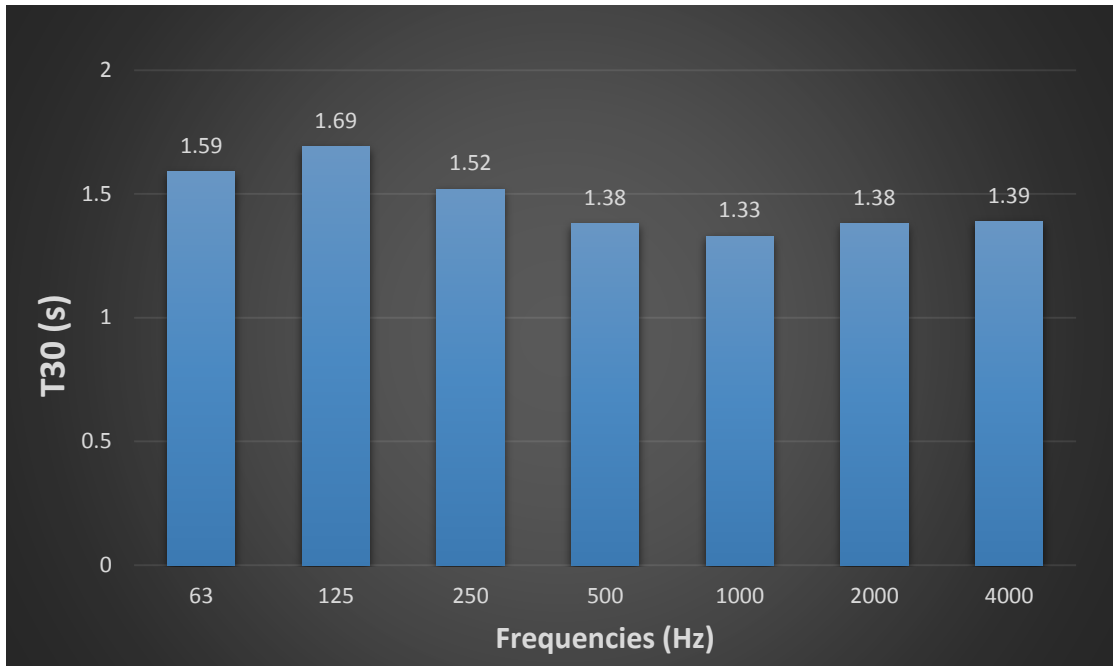




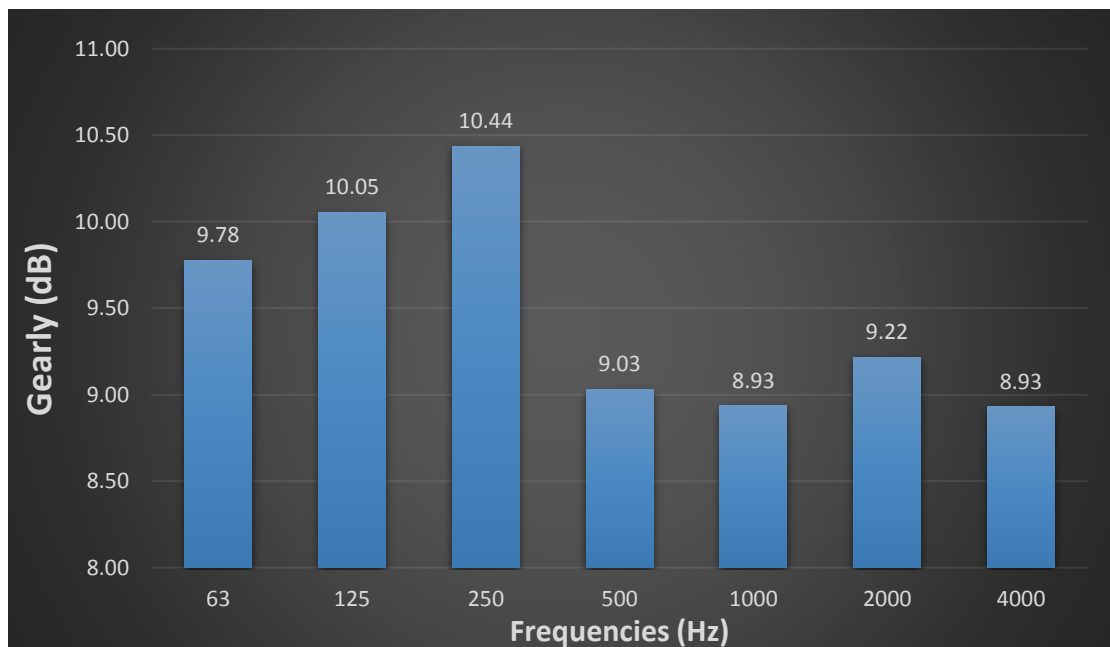
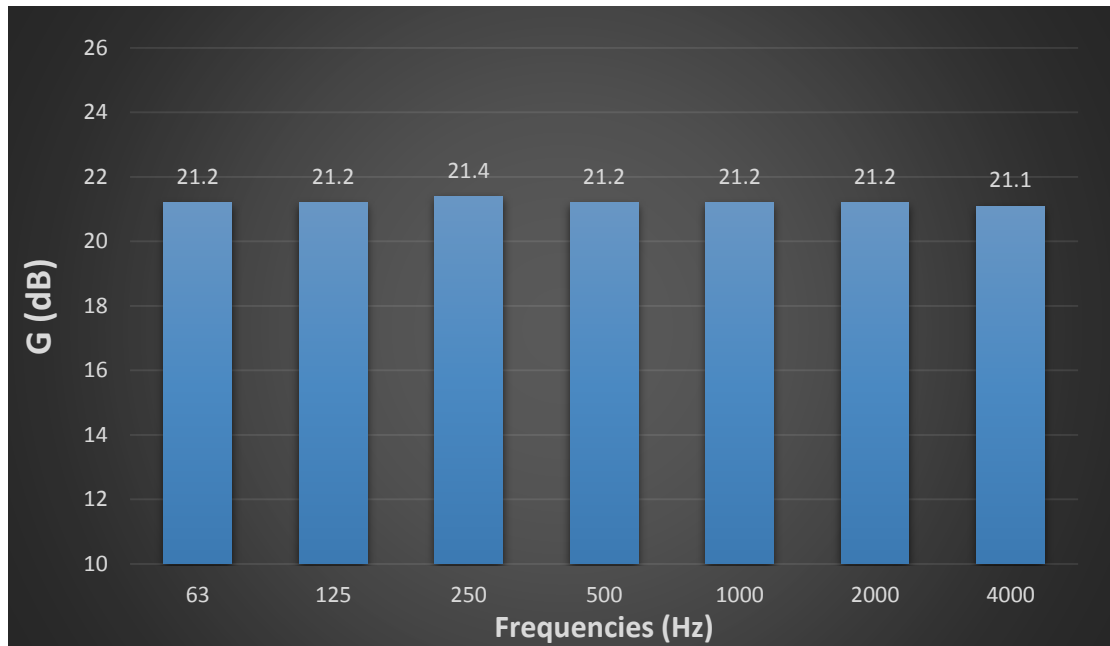
F.3.2. Κλίση 24°

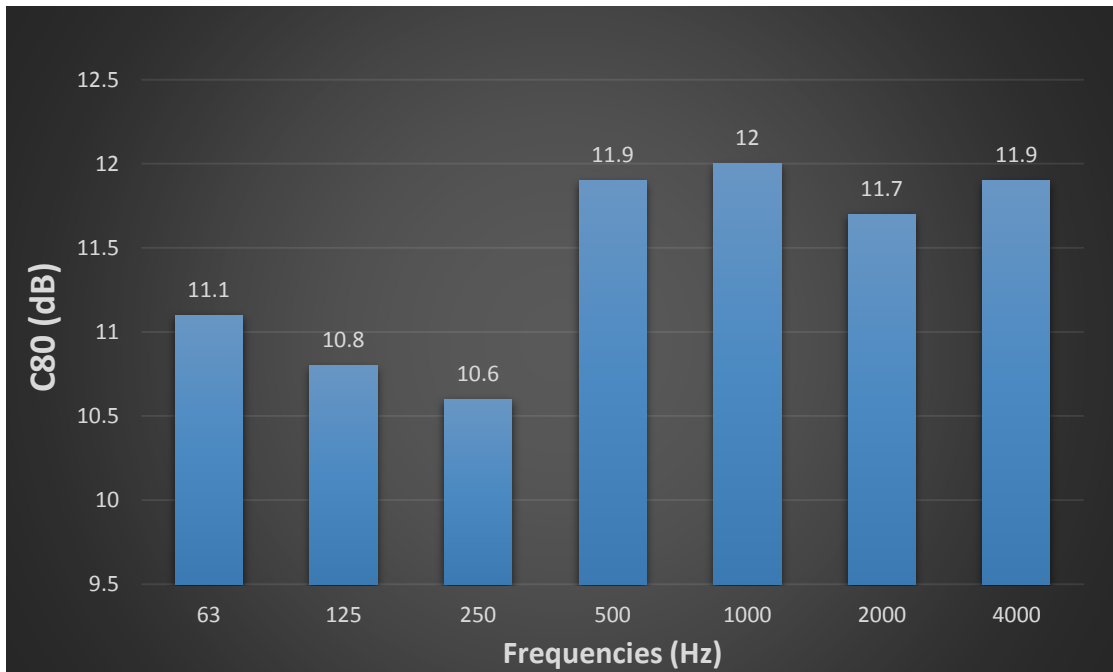
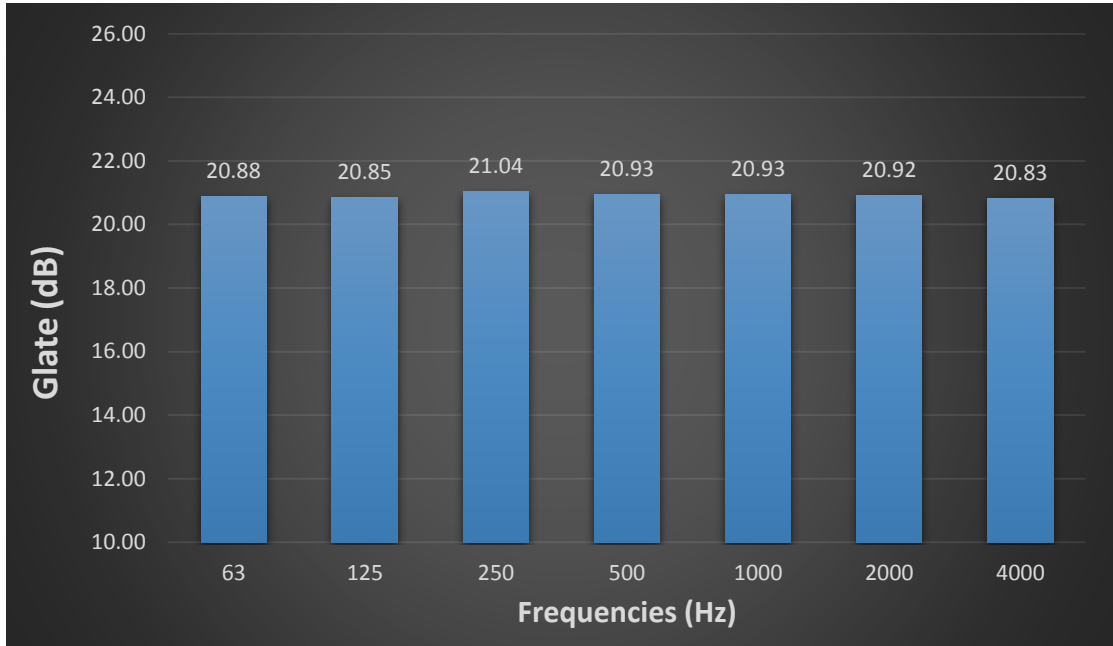


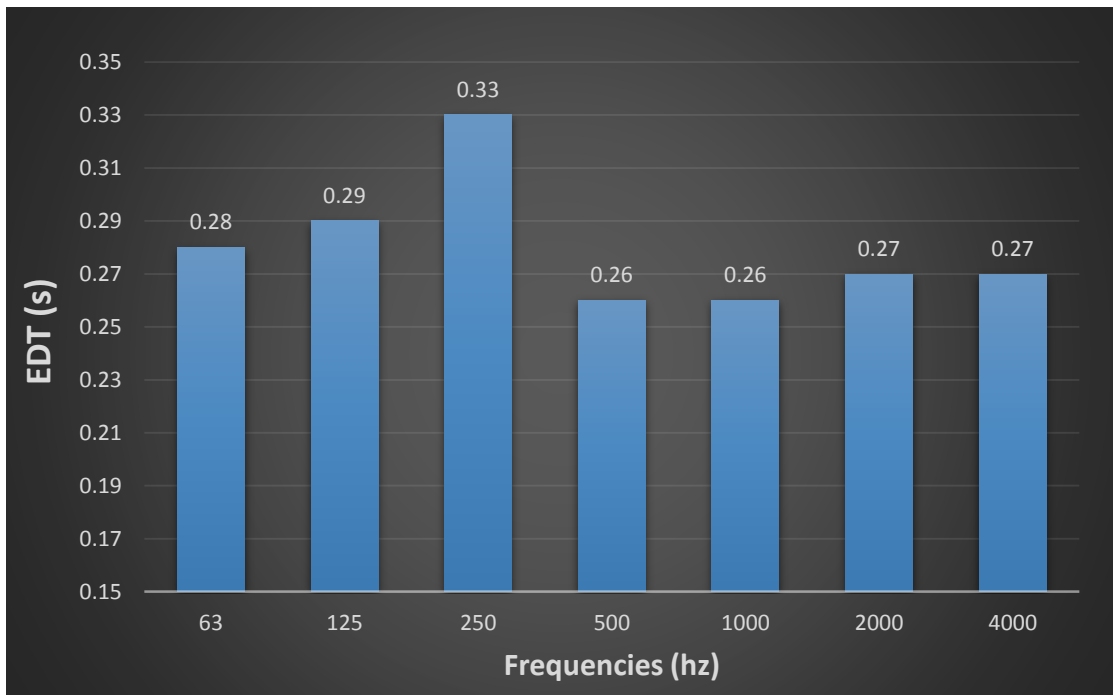
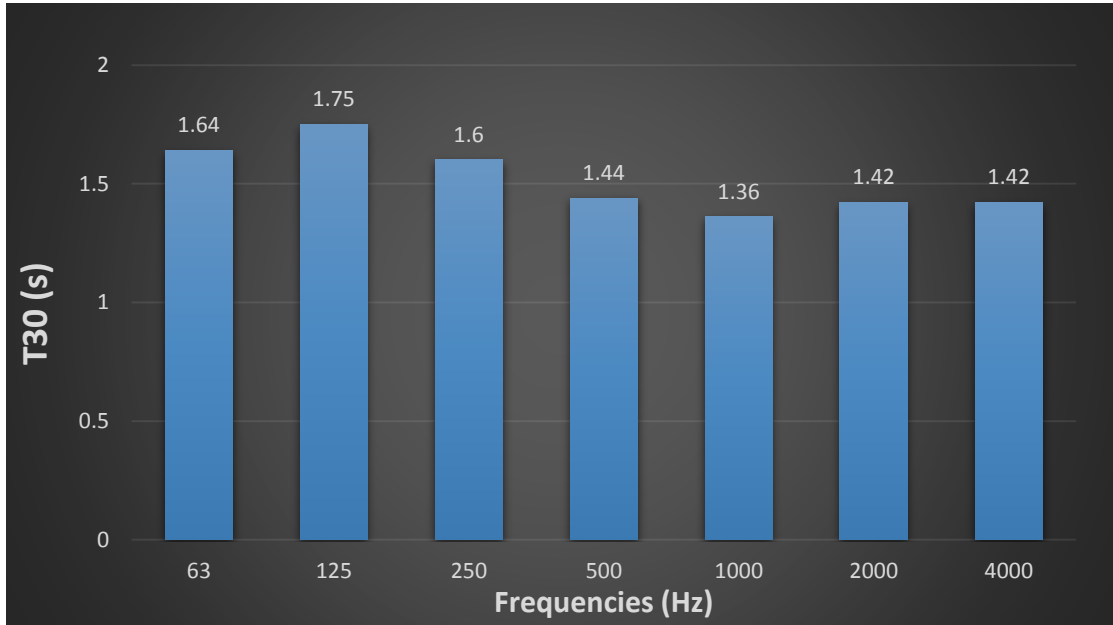




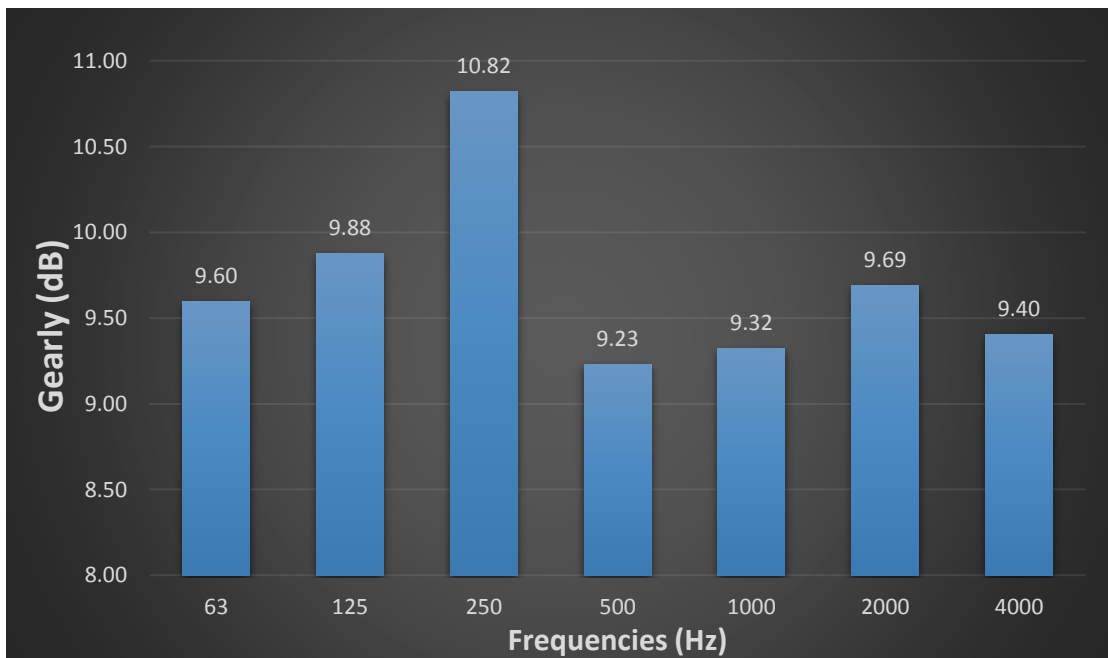
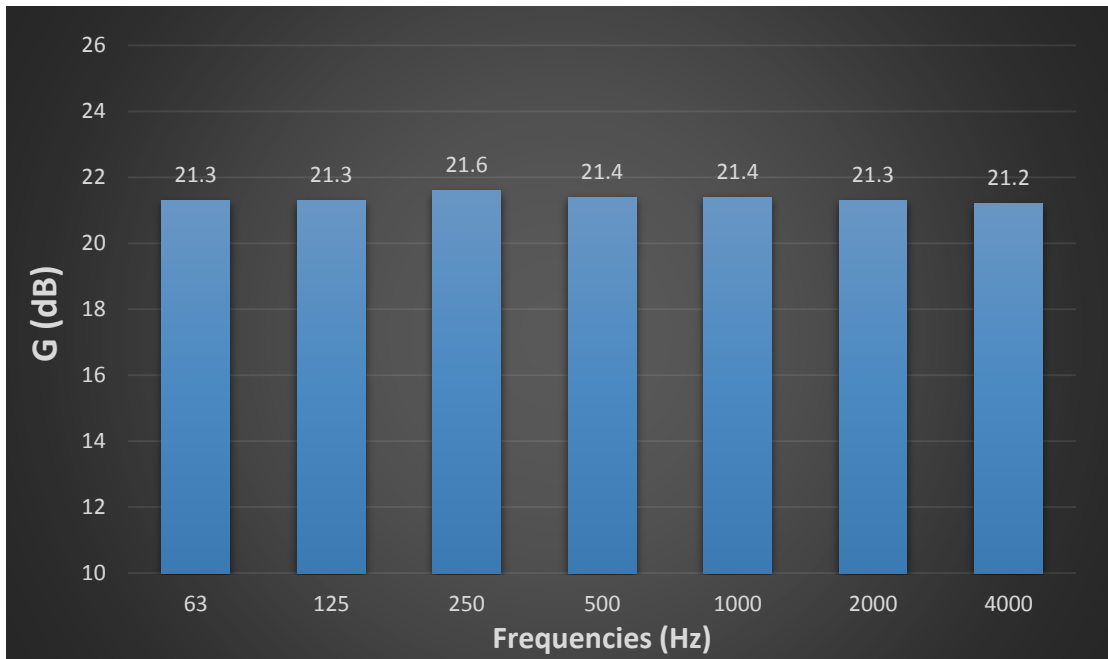
F.3.3. Κλίση 15°

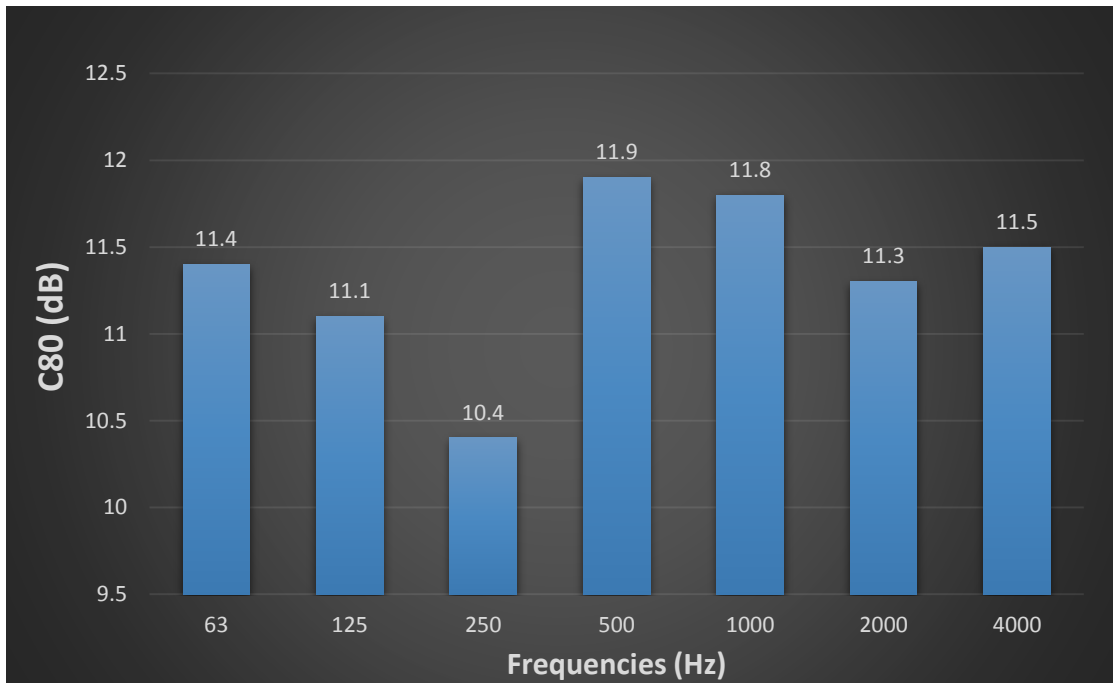
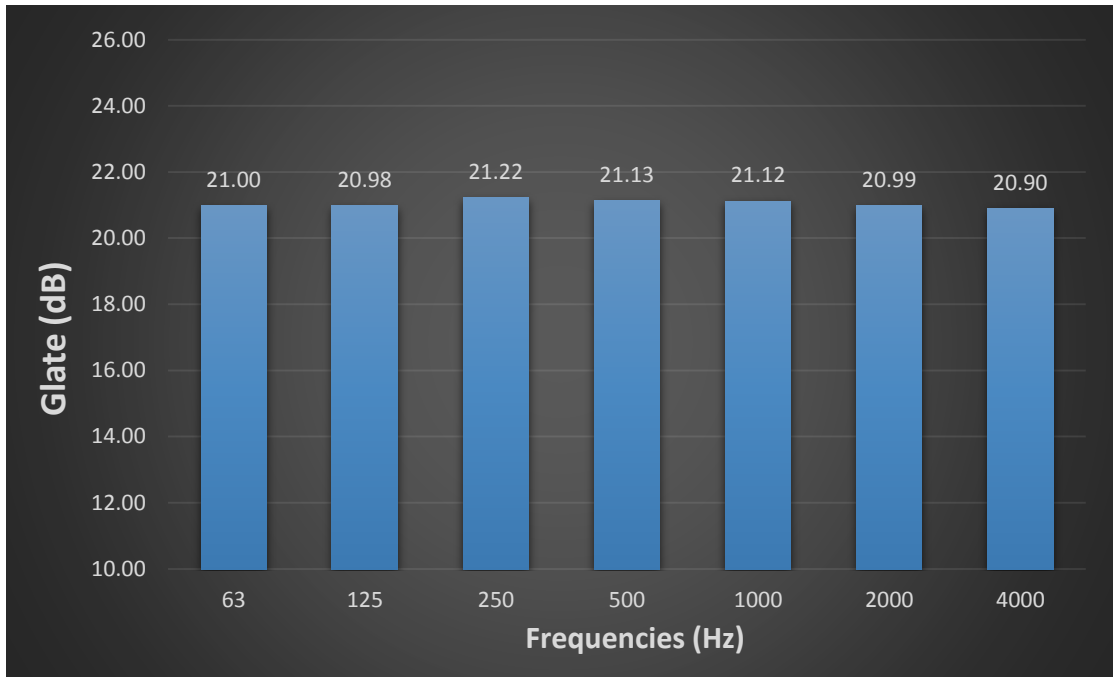


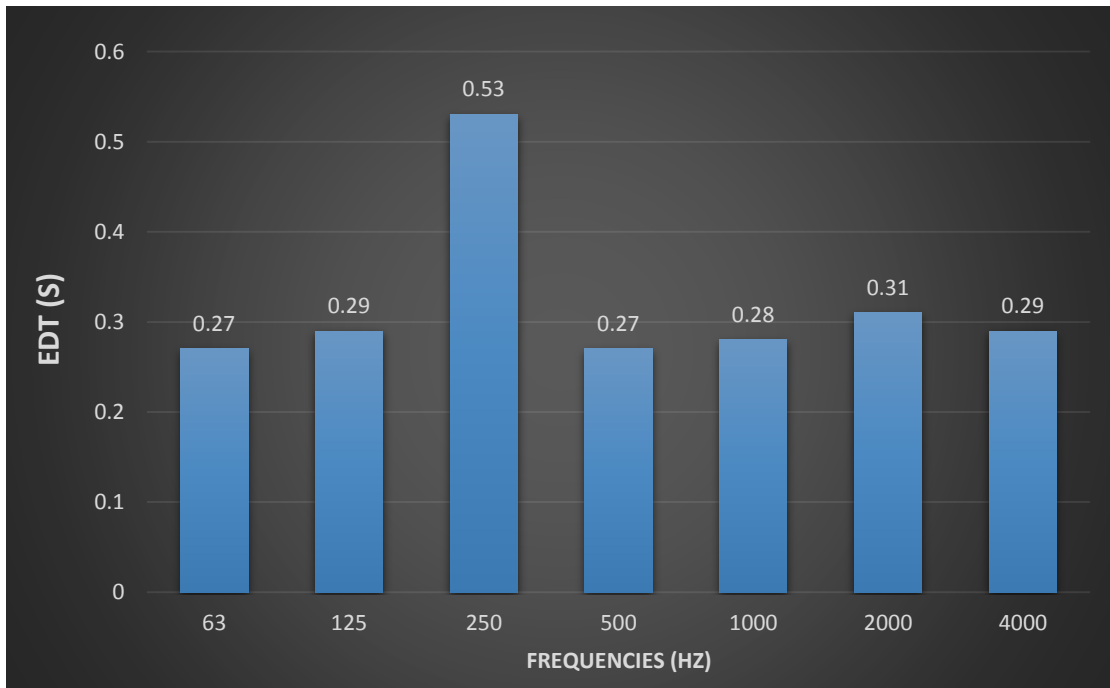
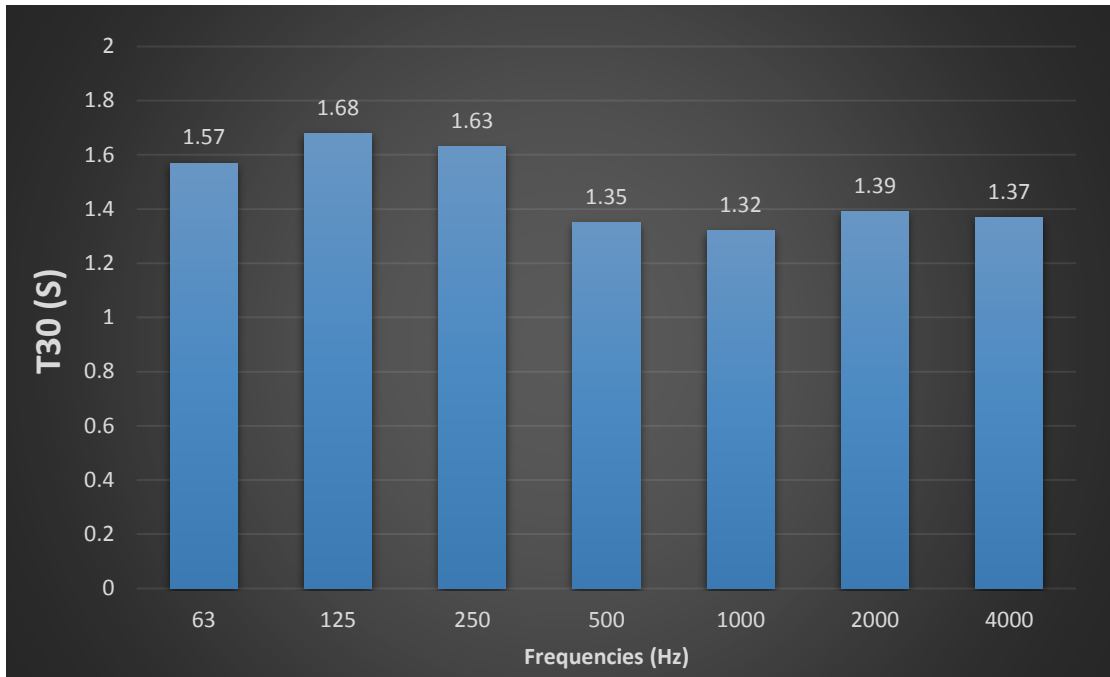




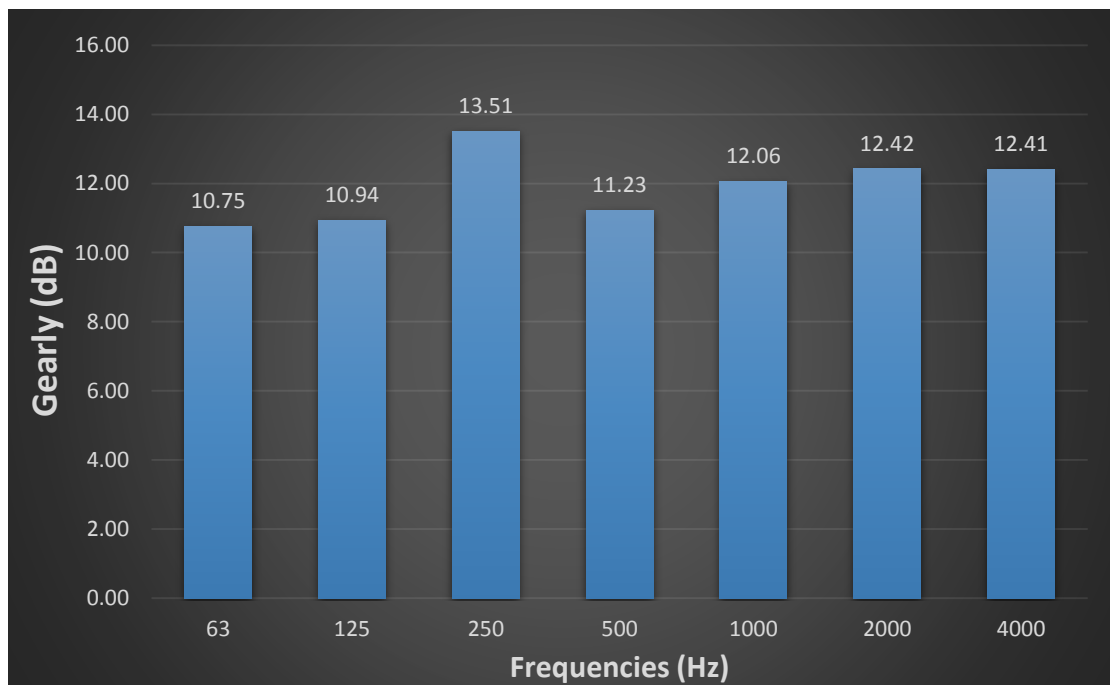
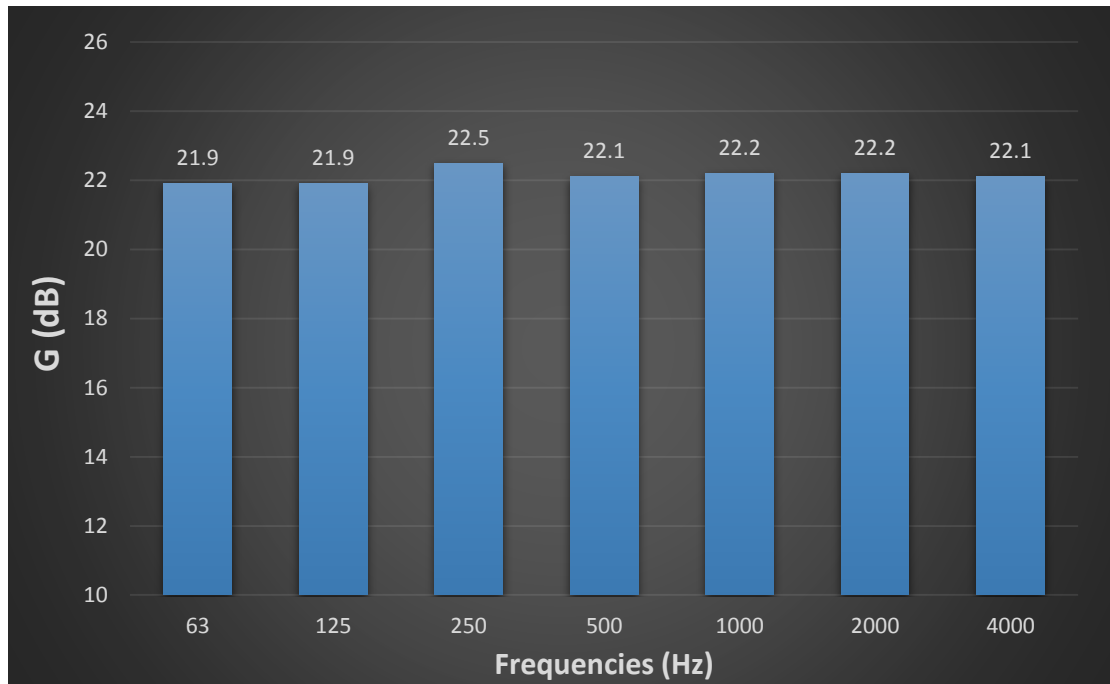
F.3.4. Κλίση 0°

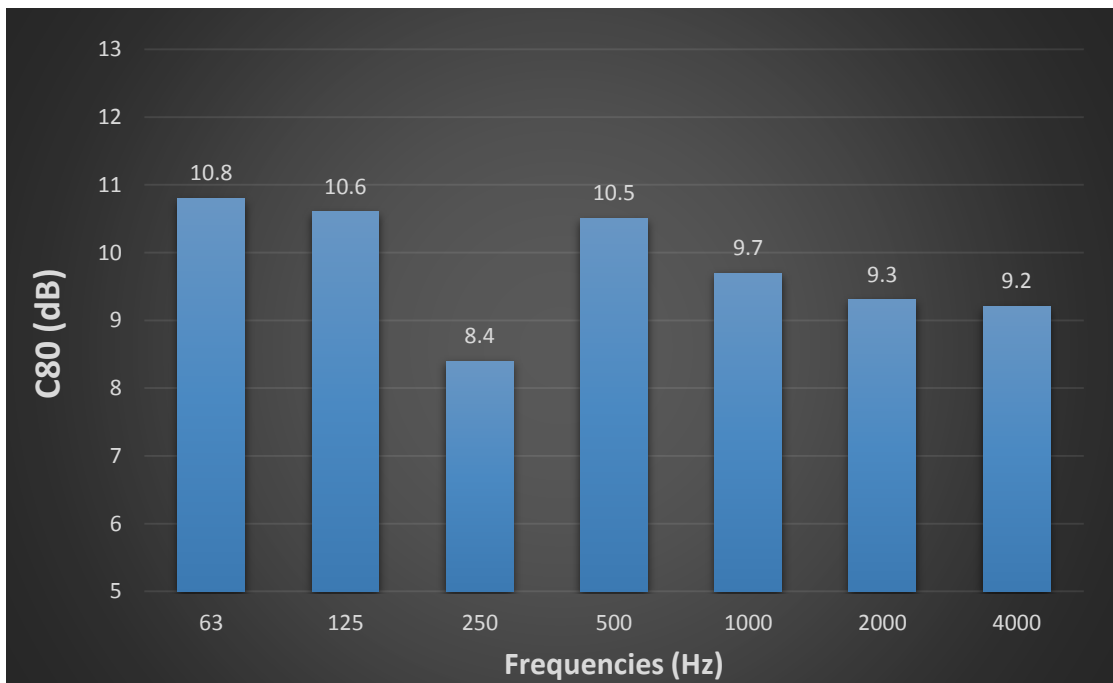
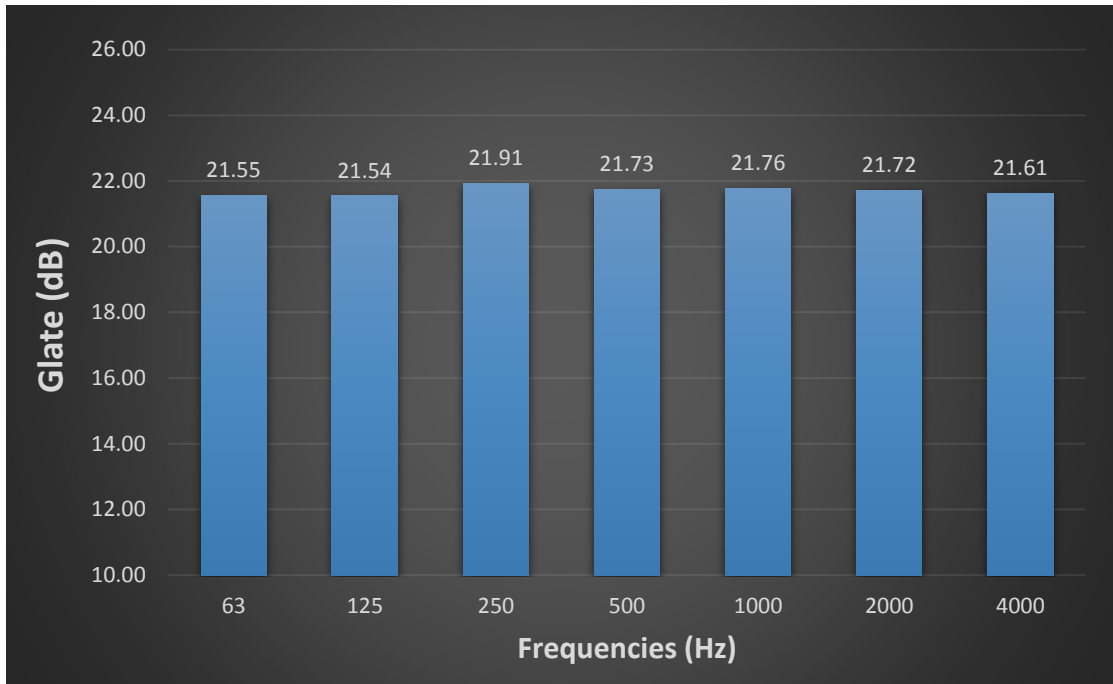


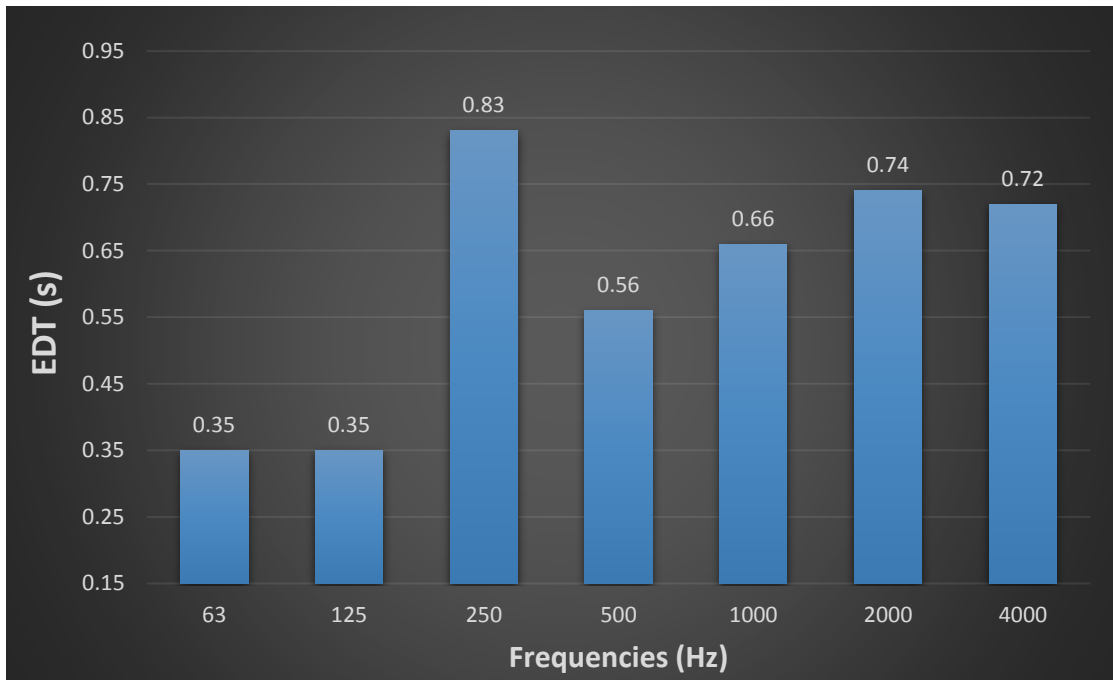
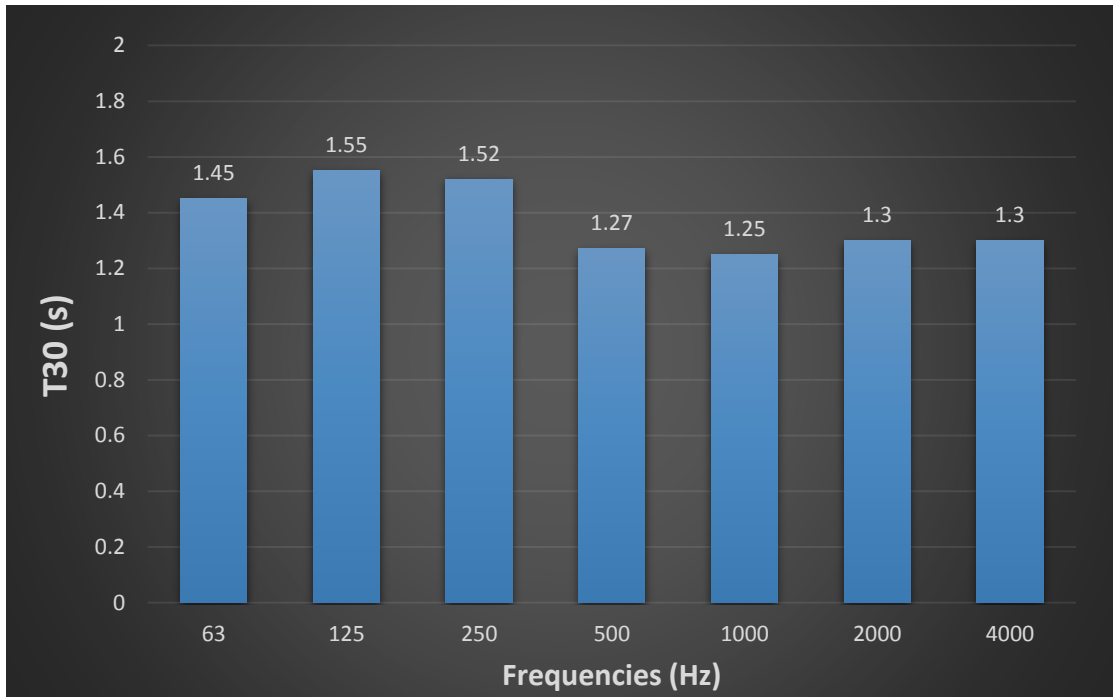




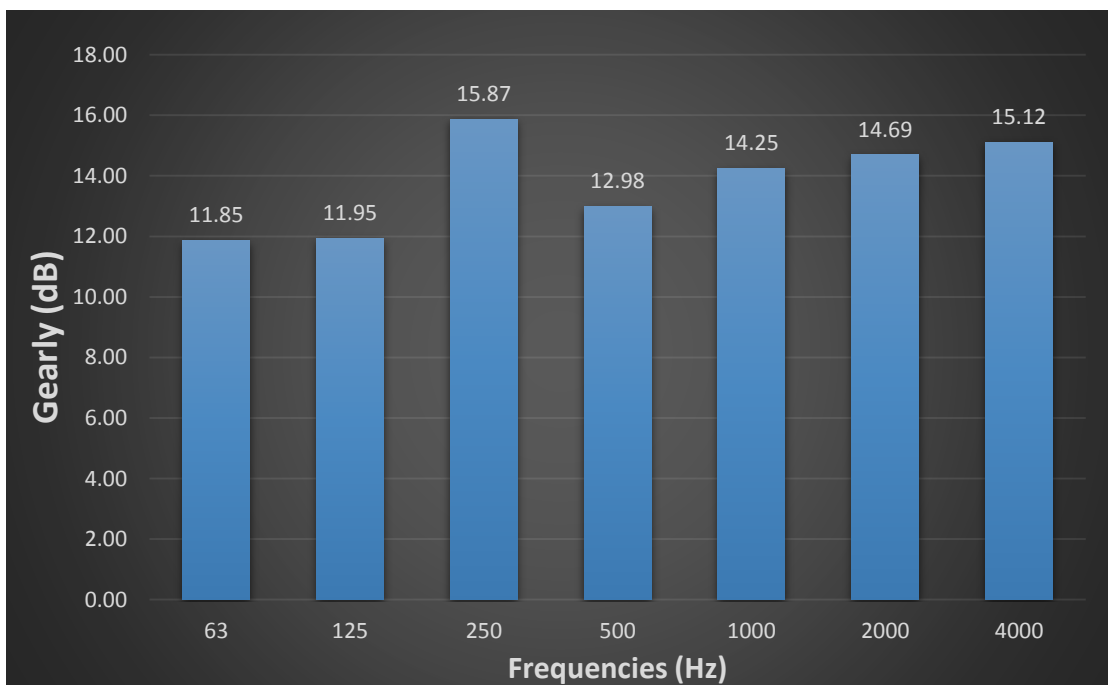
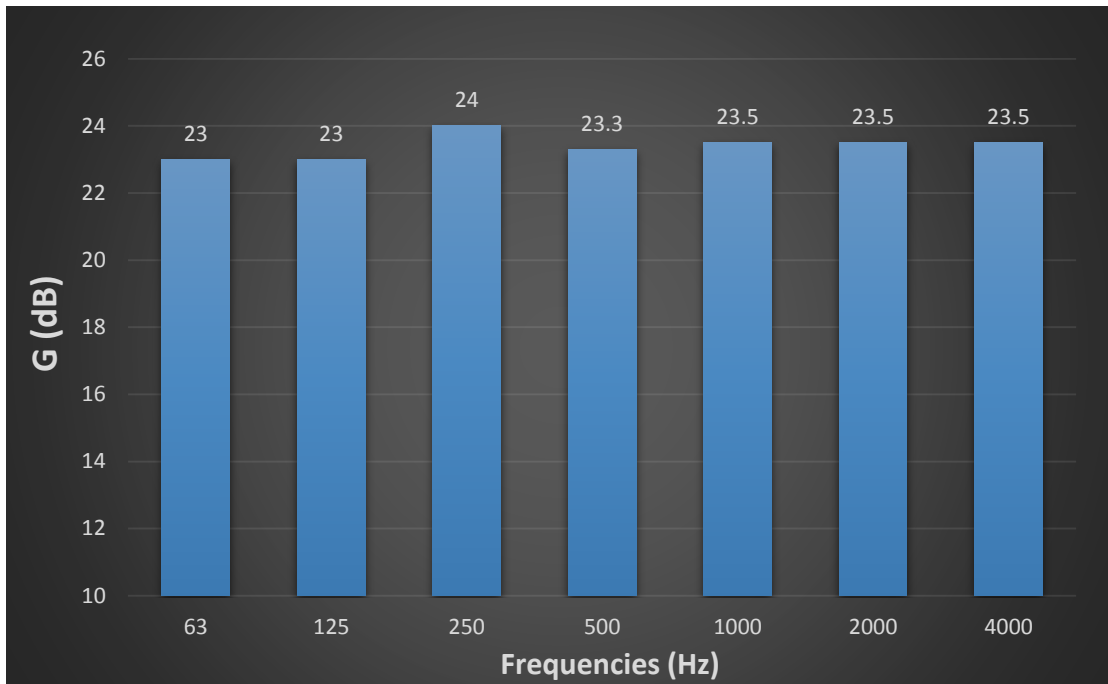
F.3.5. Κλίση -15°

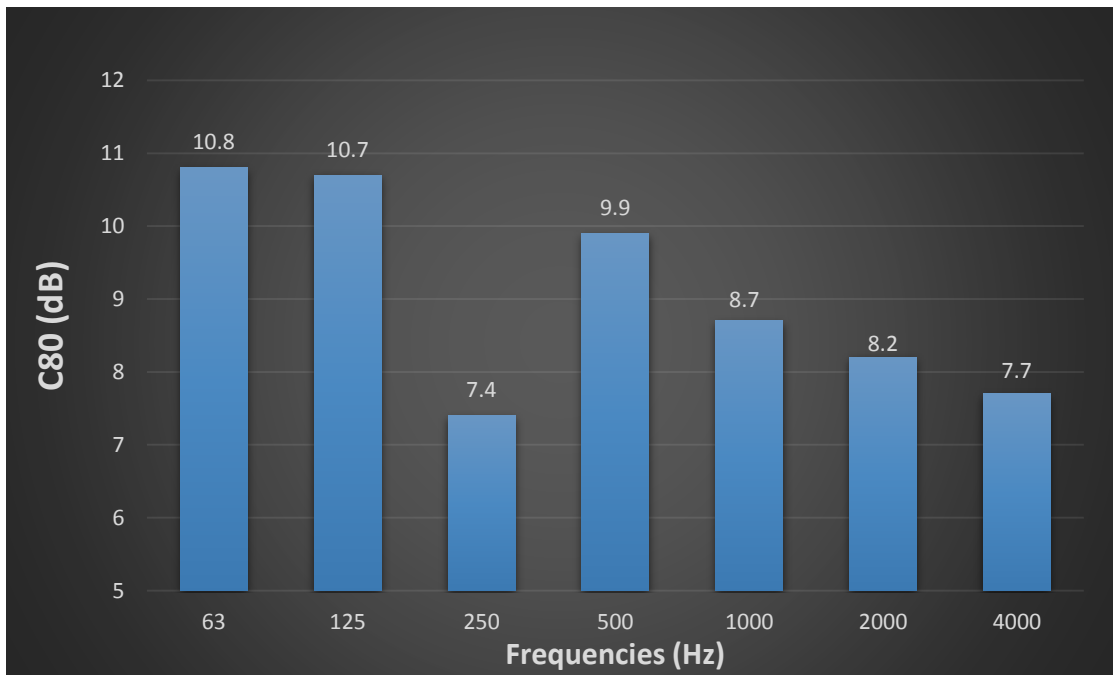
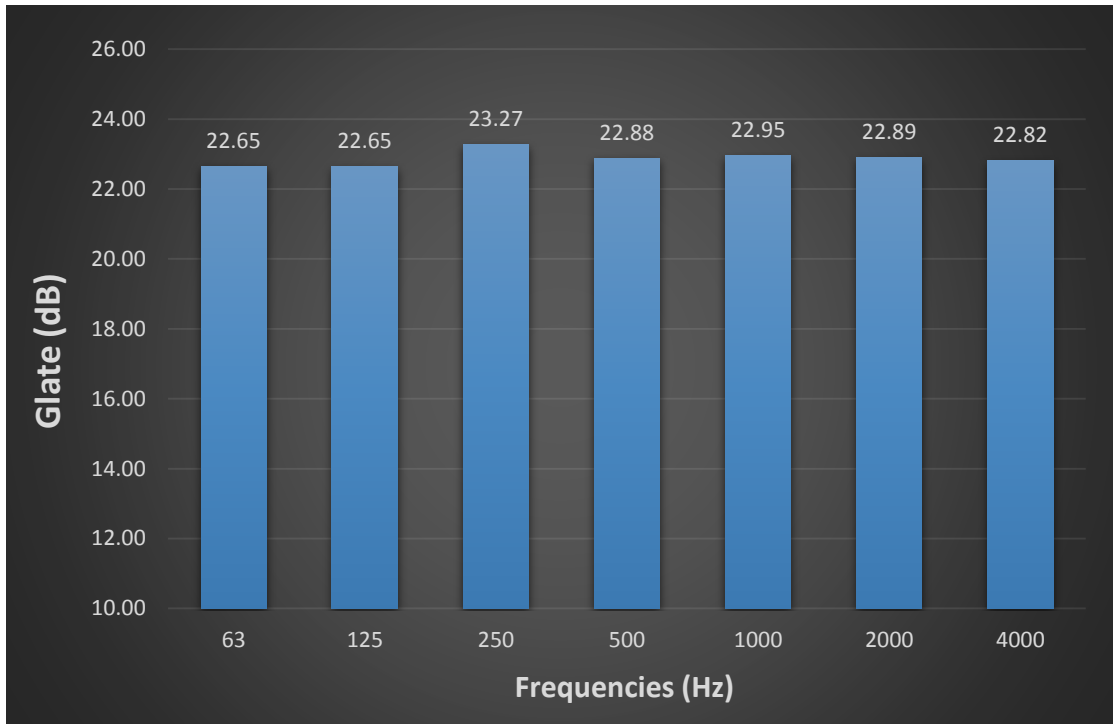


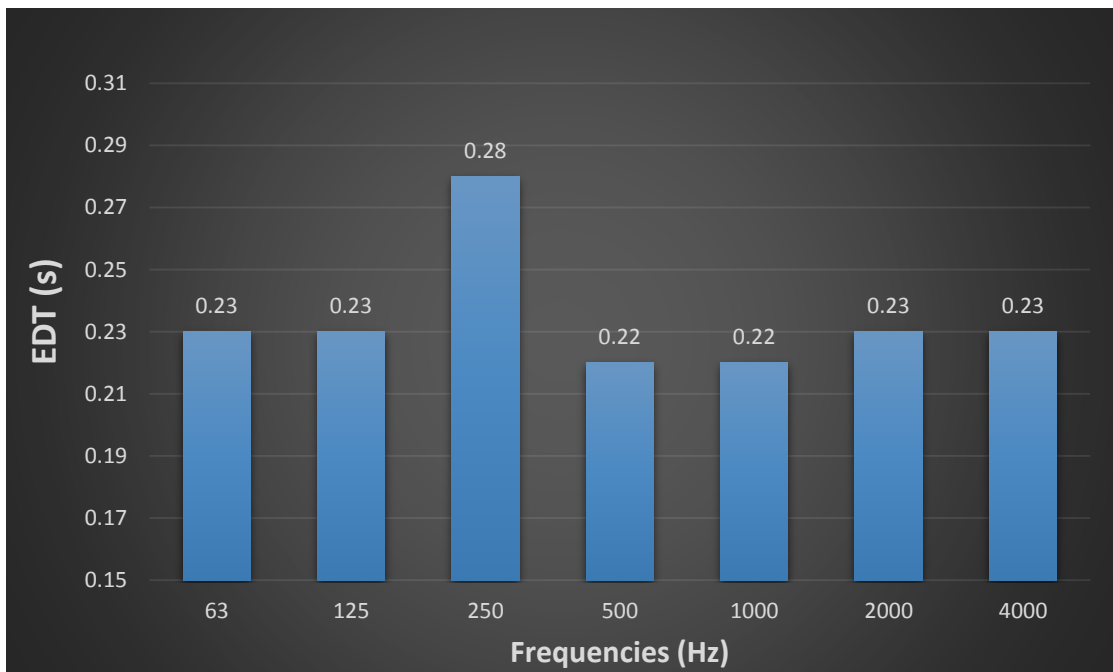
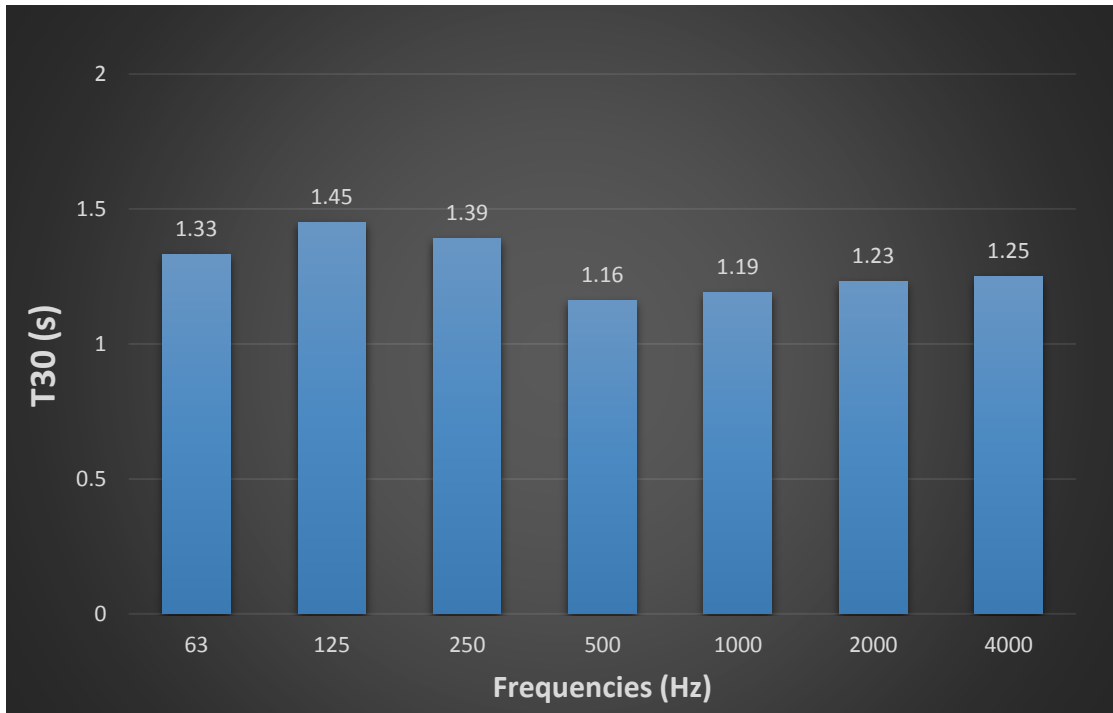




F.3.6. Κλίση -25°

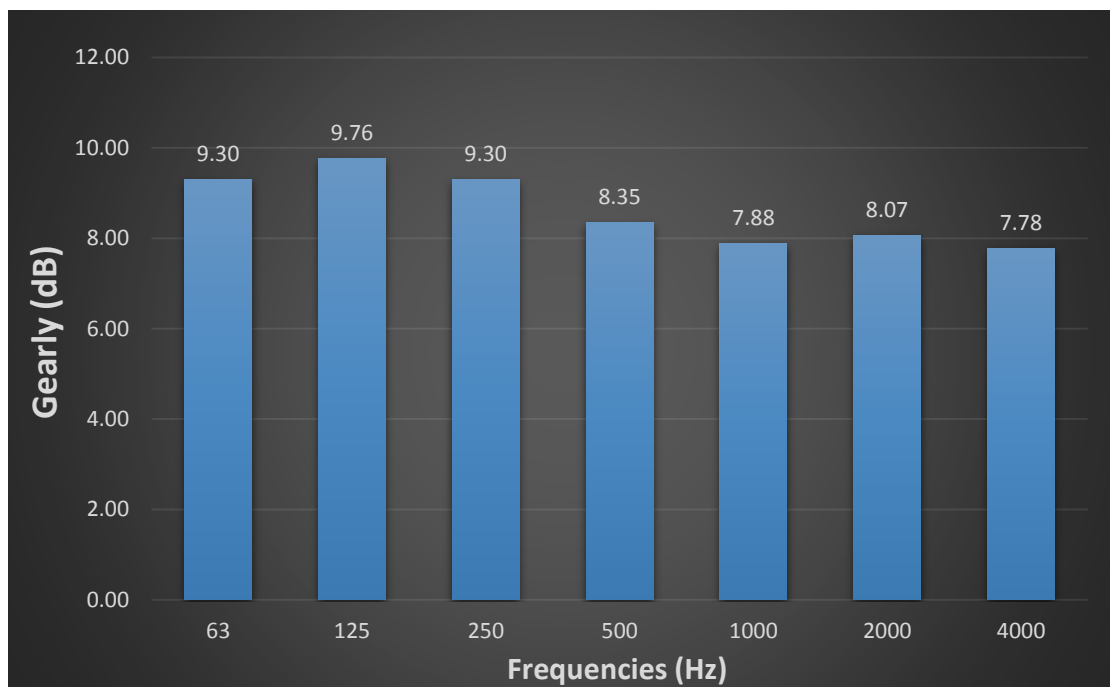
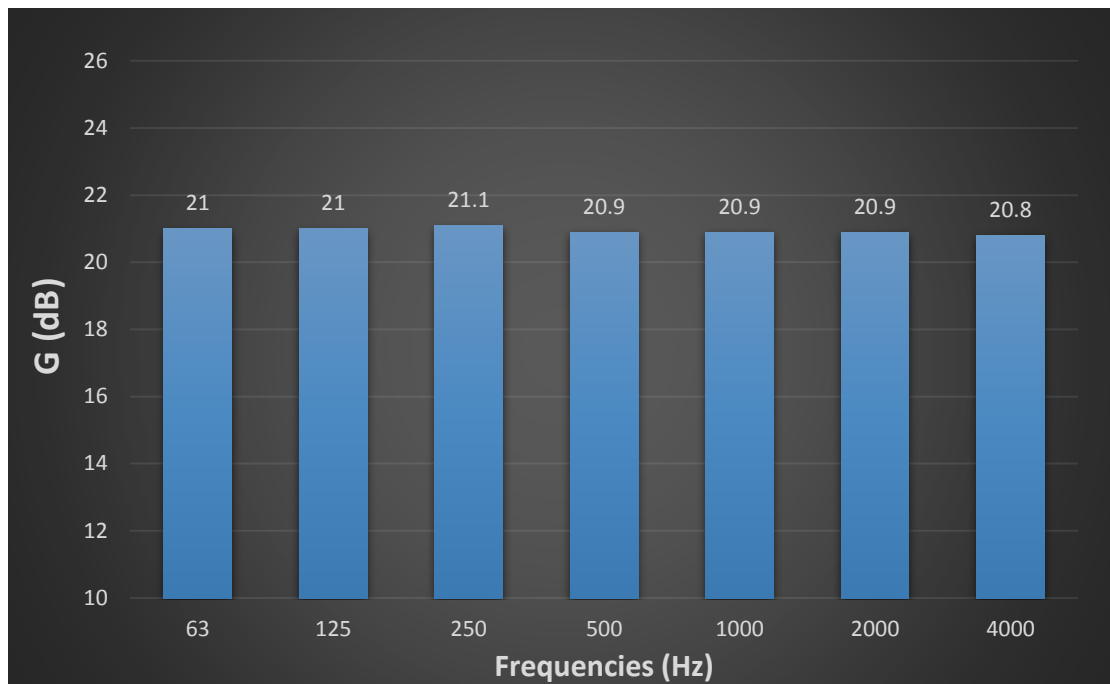


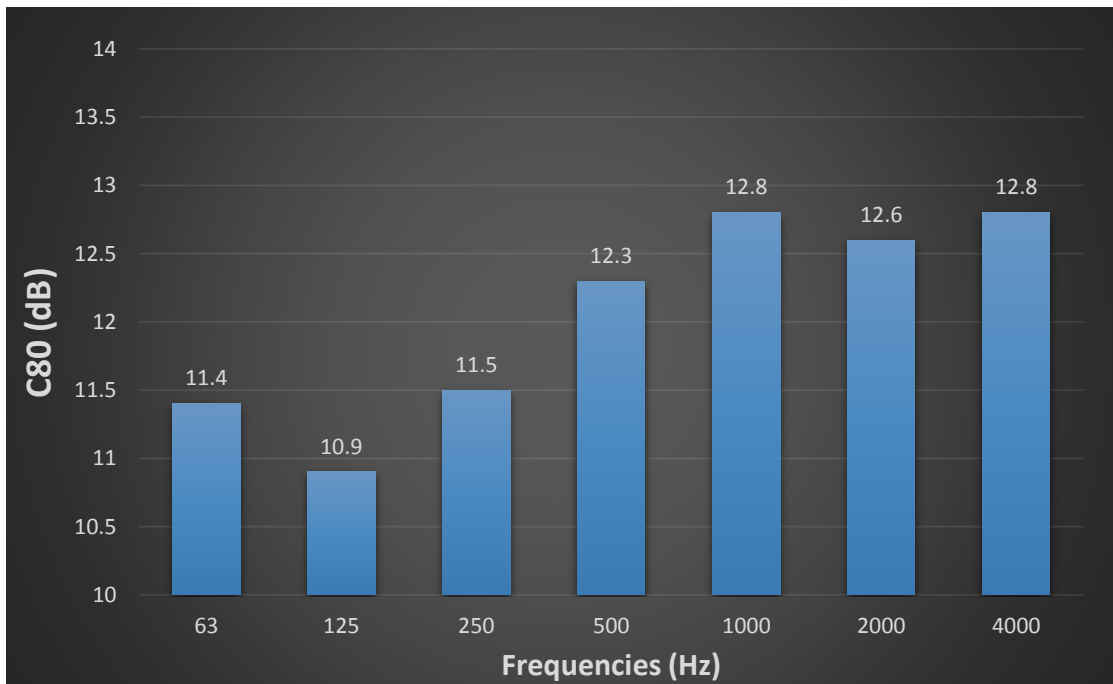
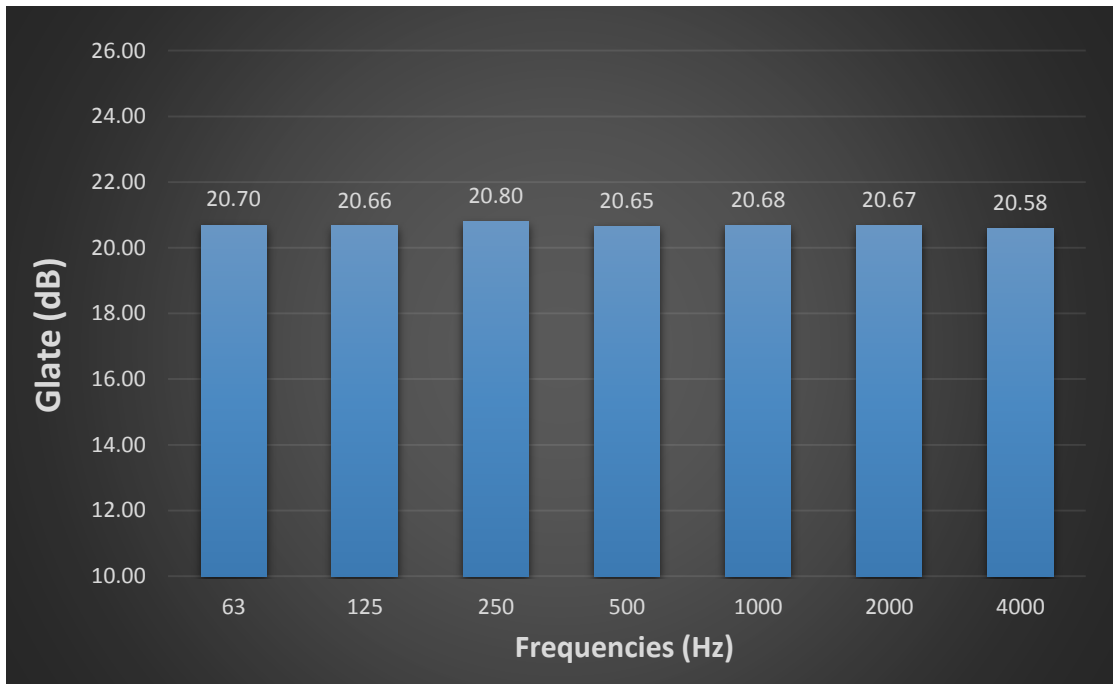


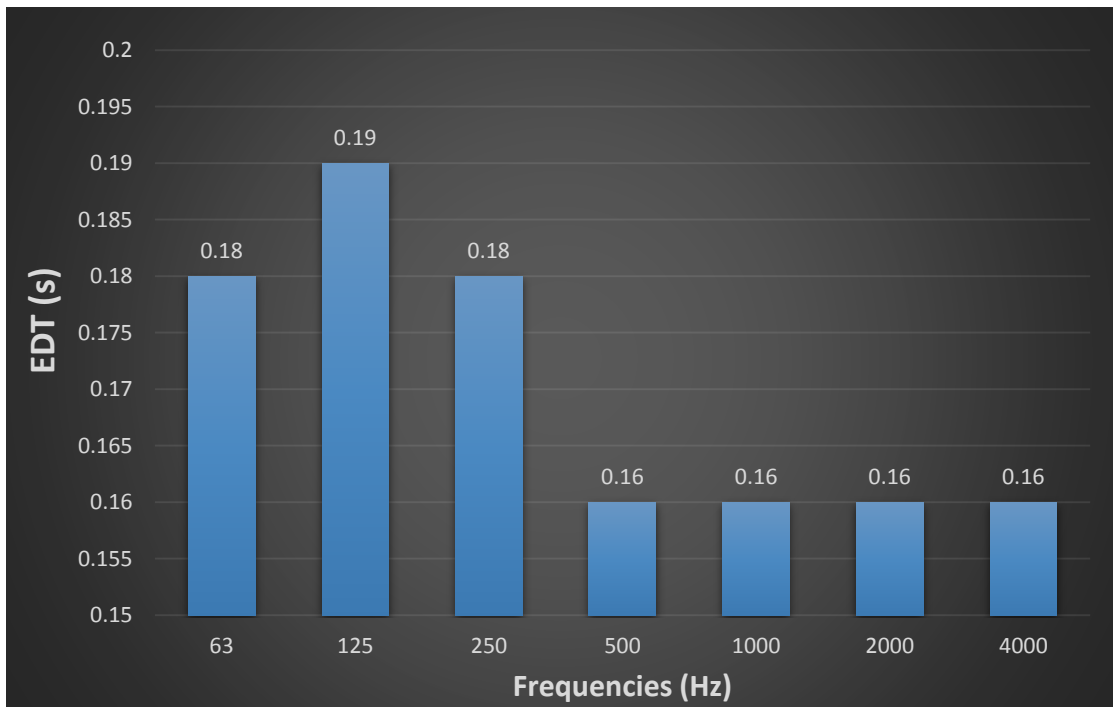
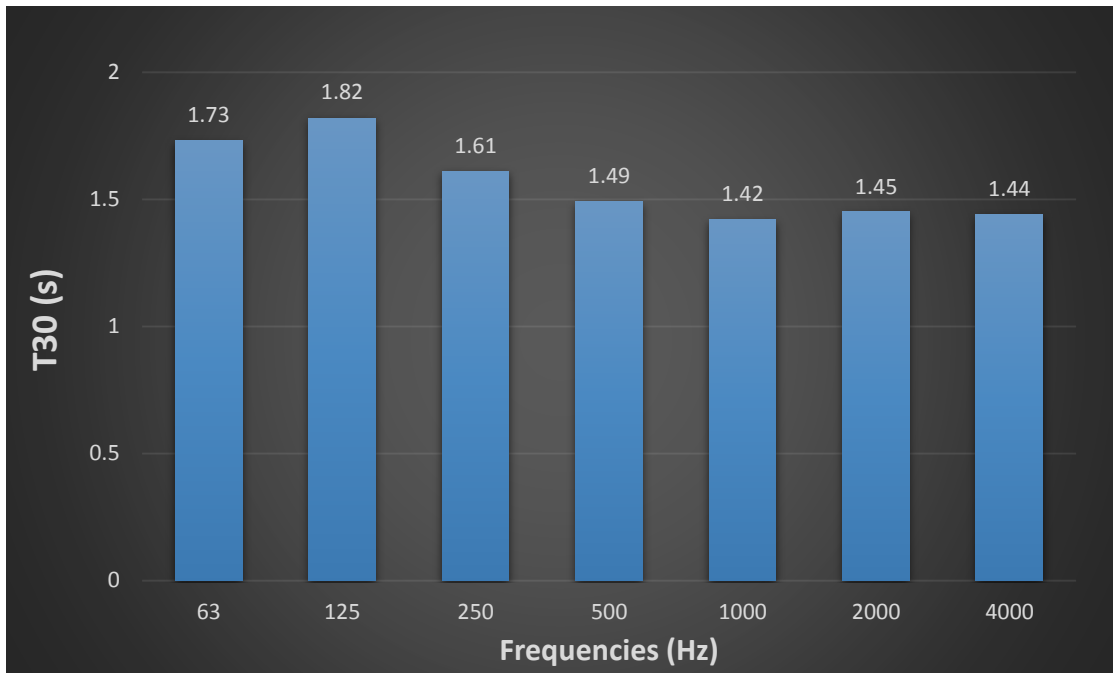


ΣΤ.4. Κλίση ανακλαστήρα οροφής σκηνής

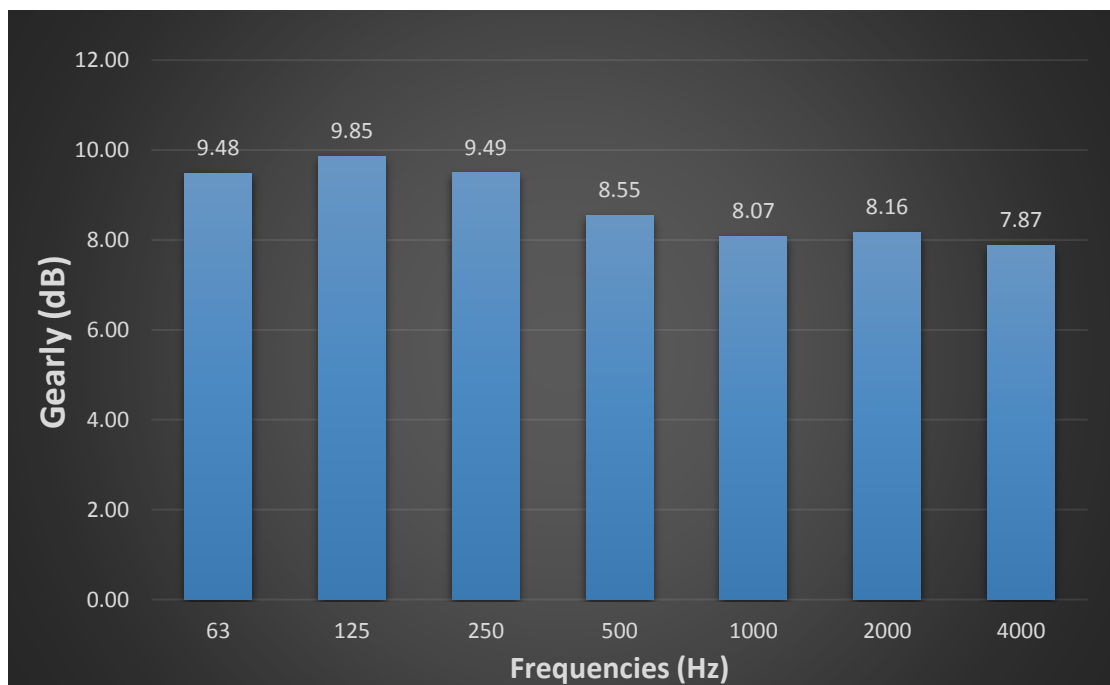
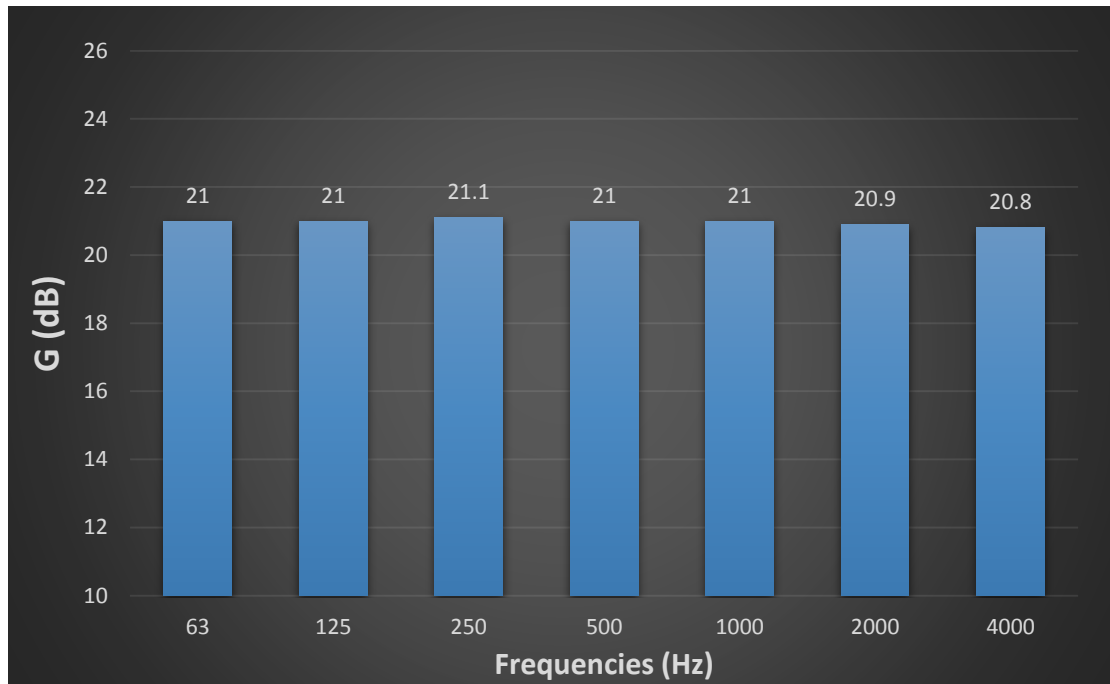
F.4.1. Κλίση 20°

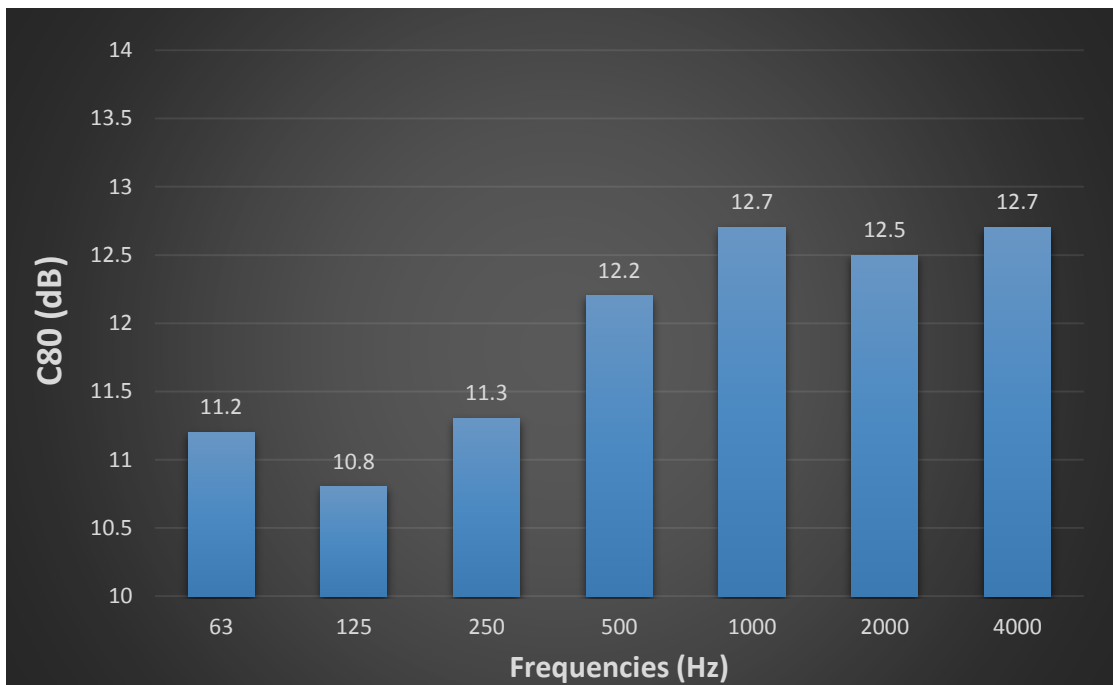
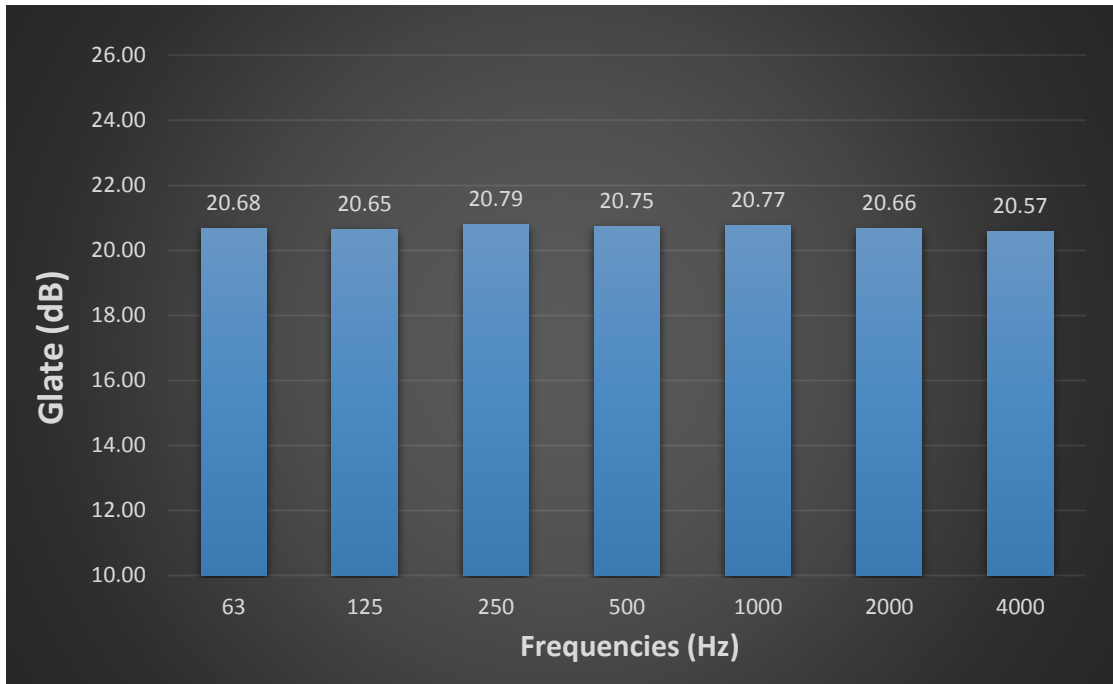


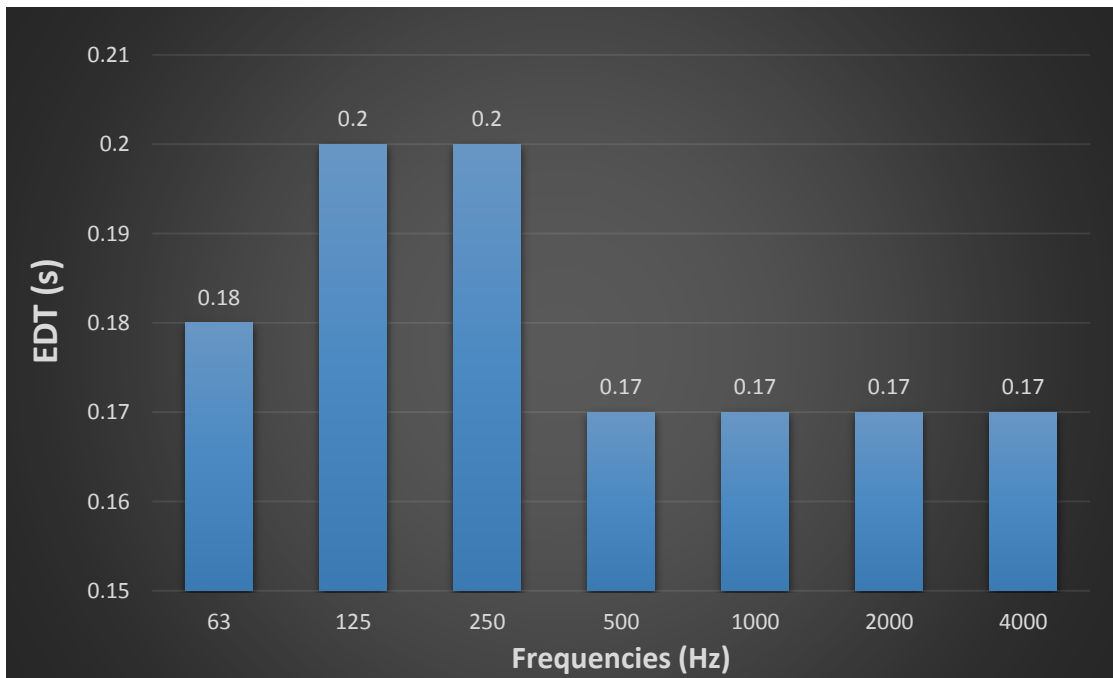
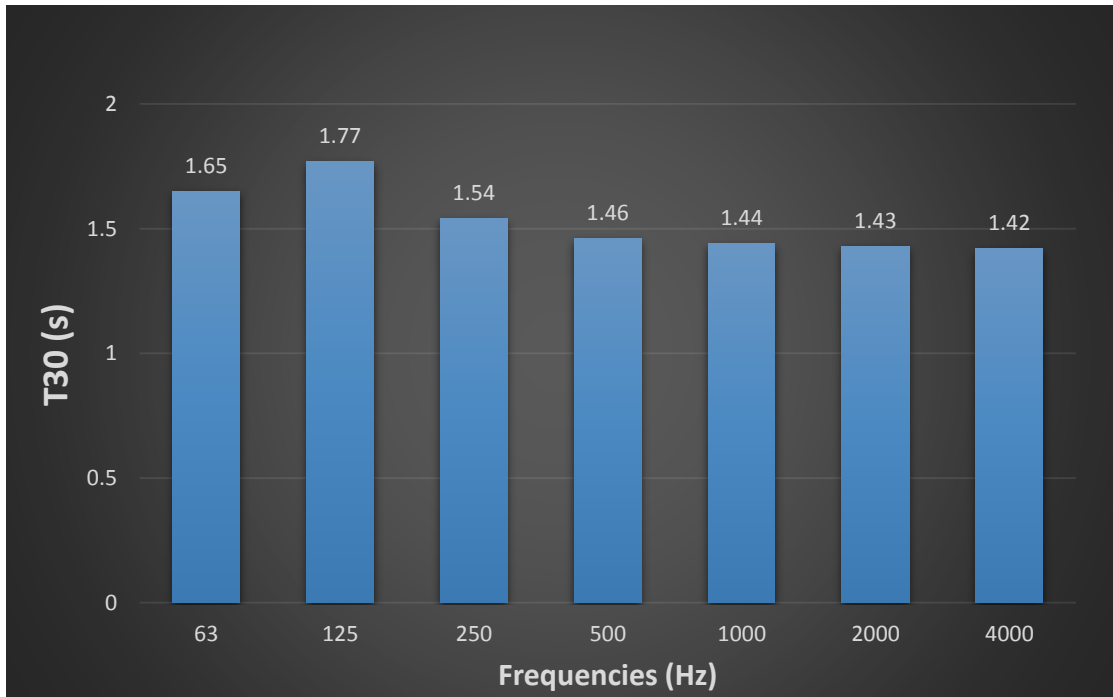




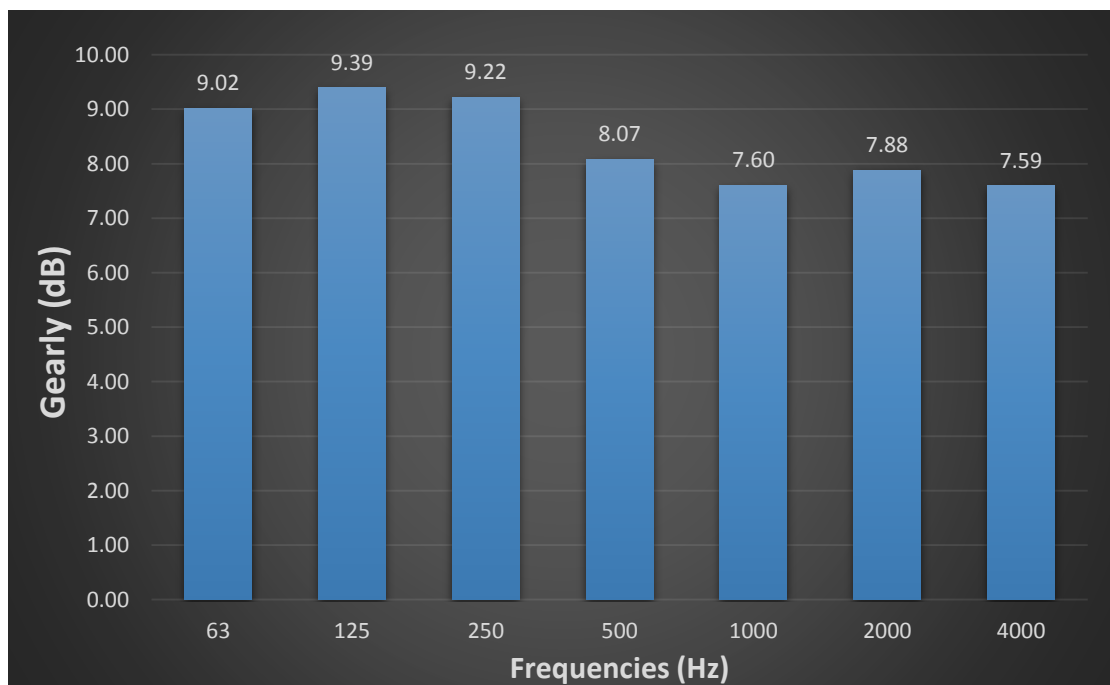
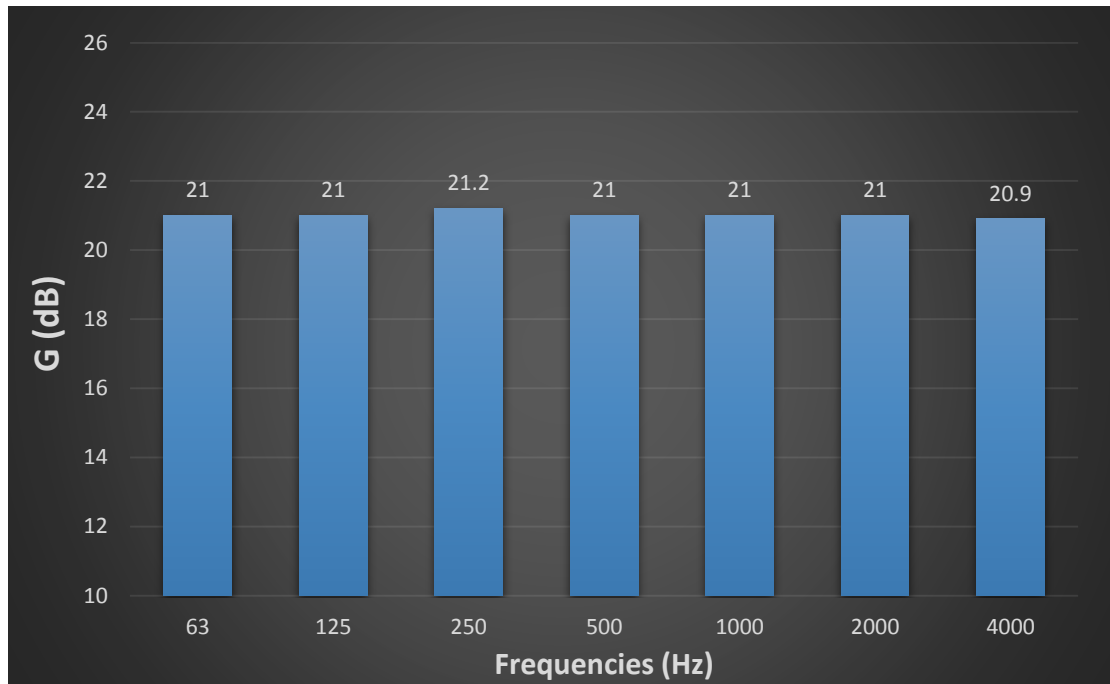
F.4.2. Κλίση 15°

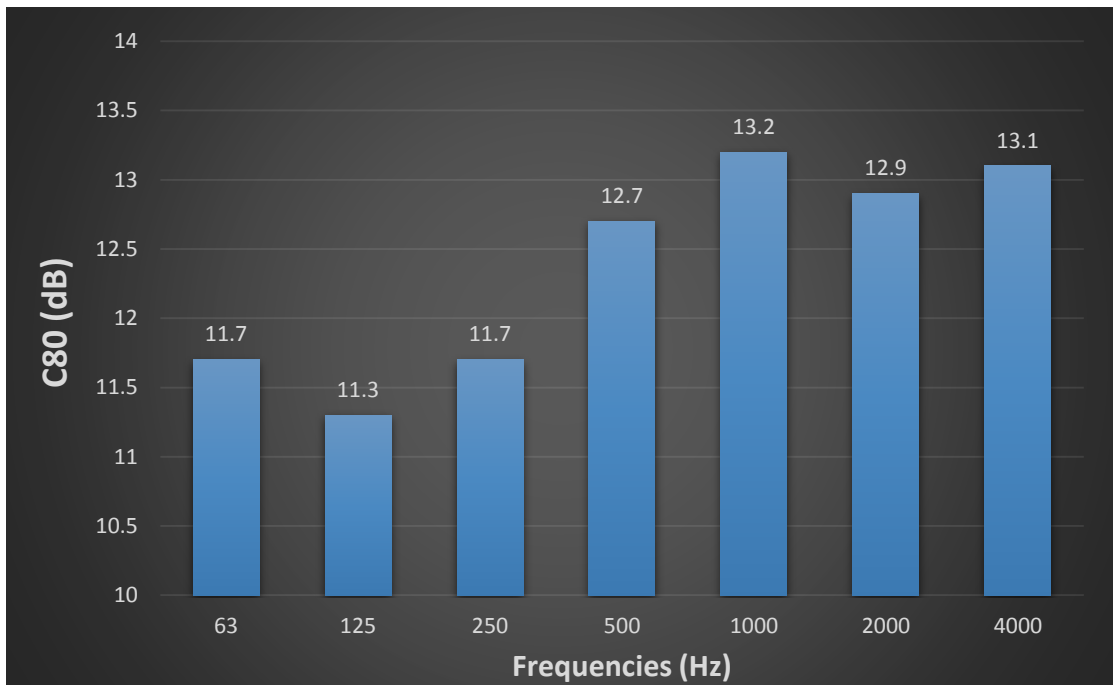
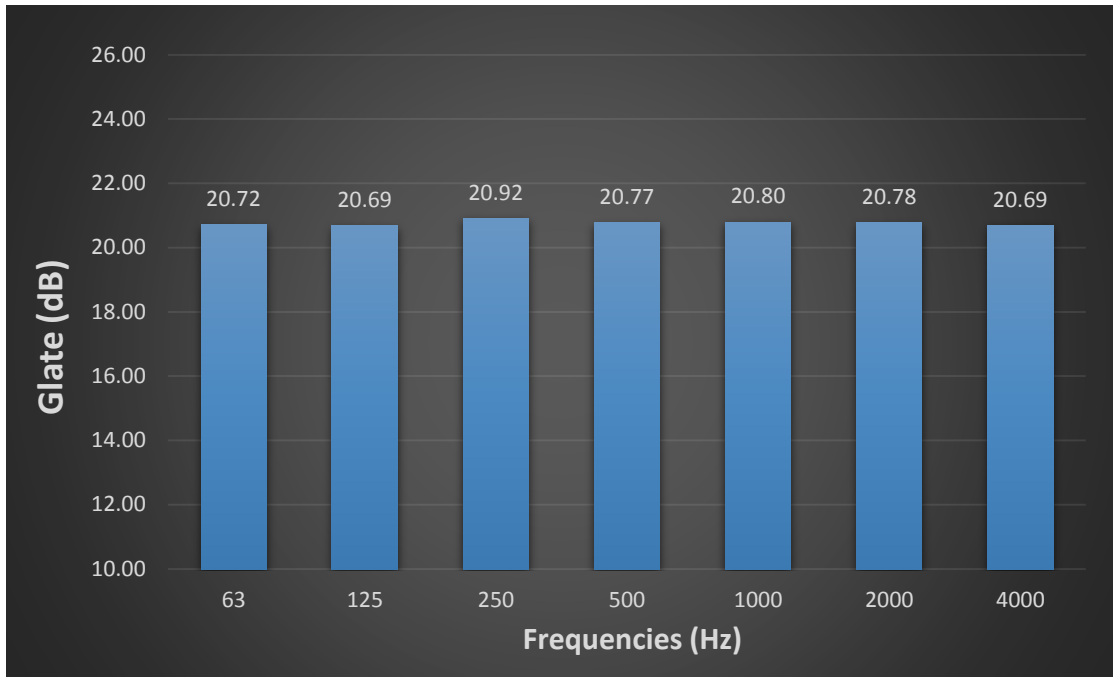


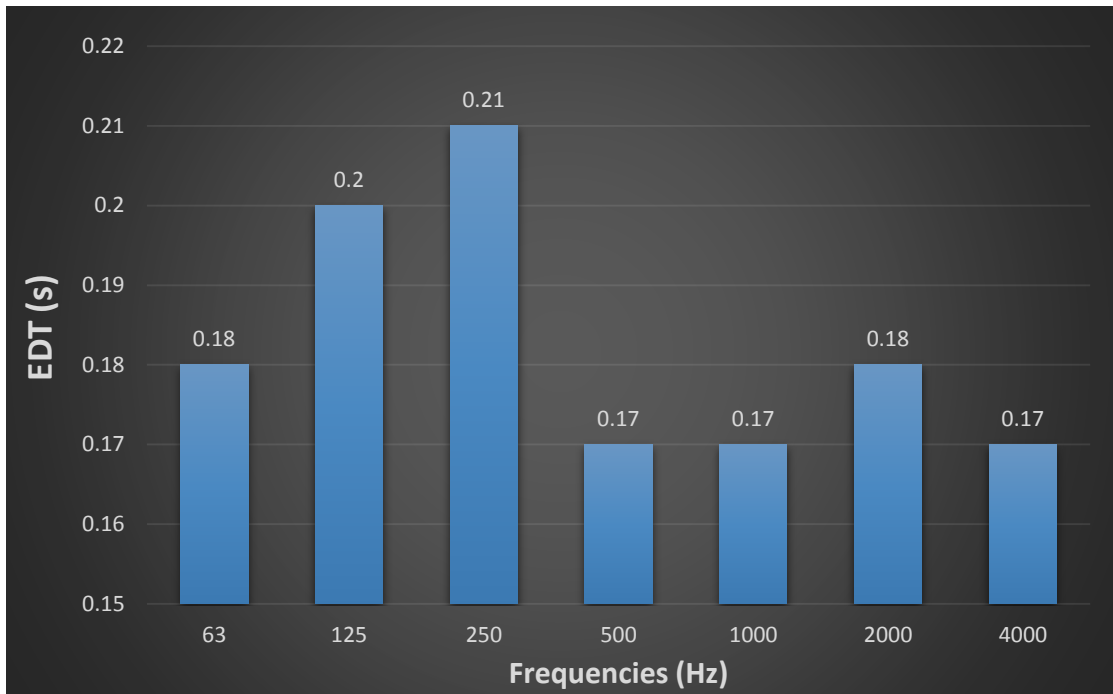
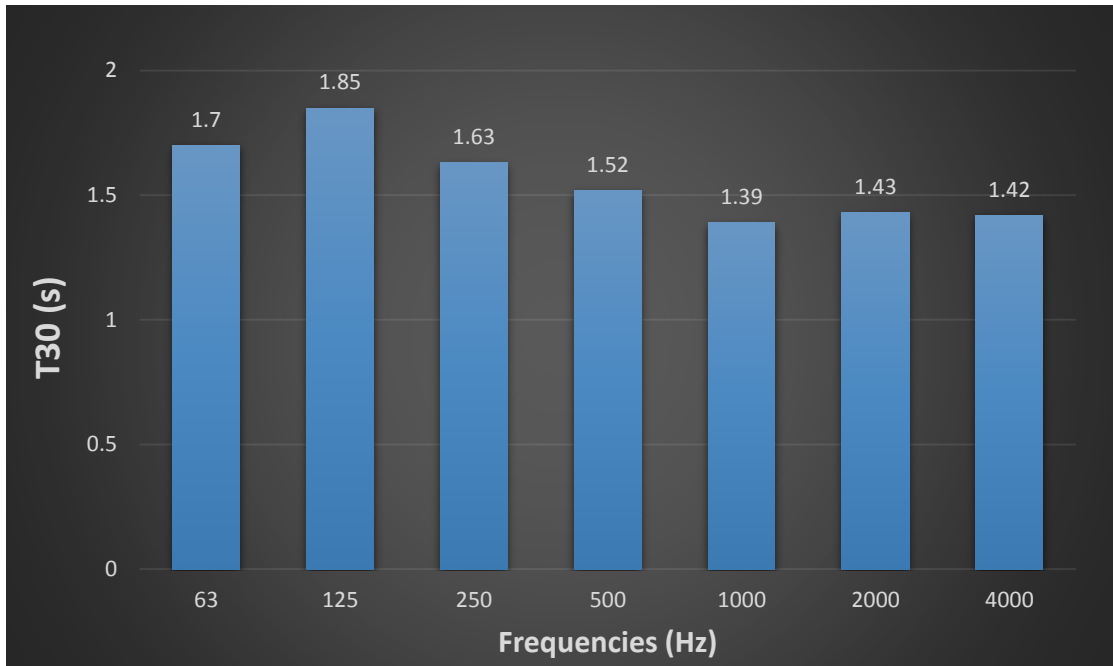




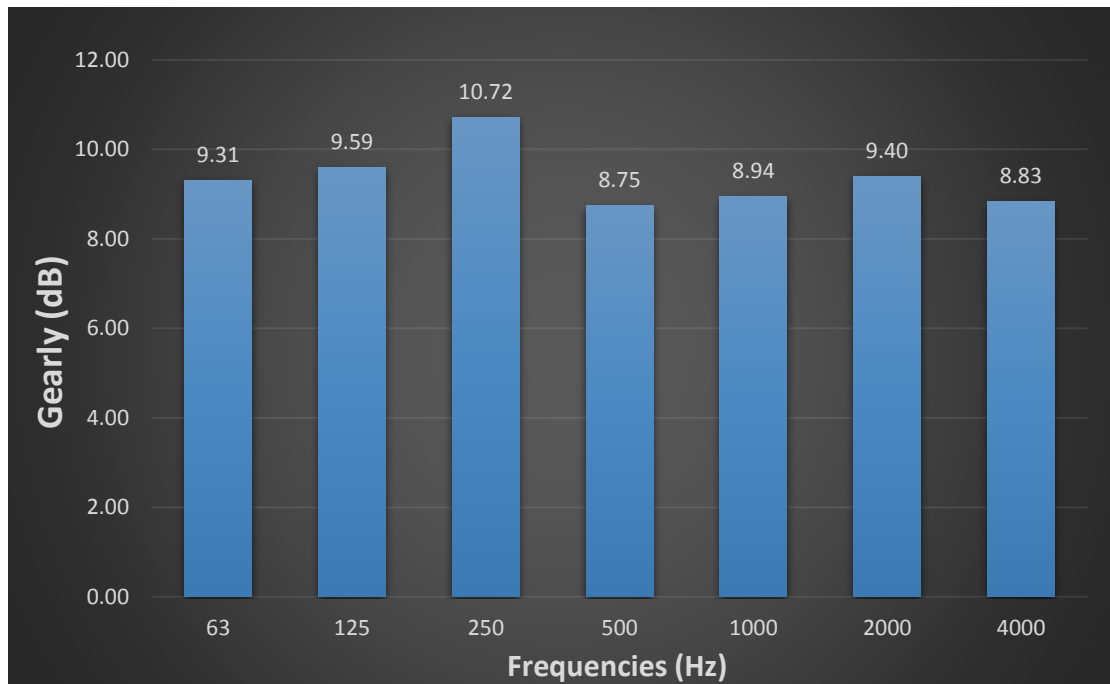
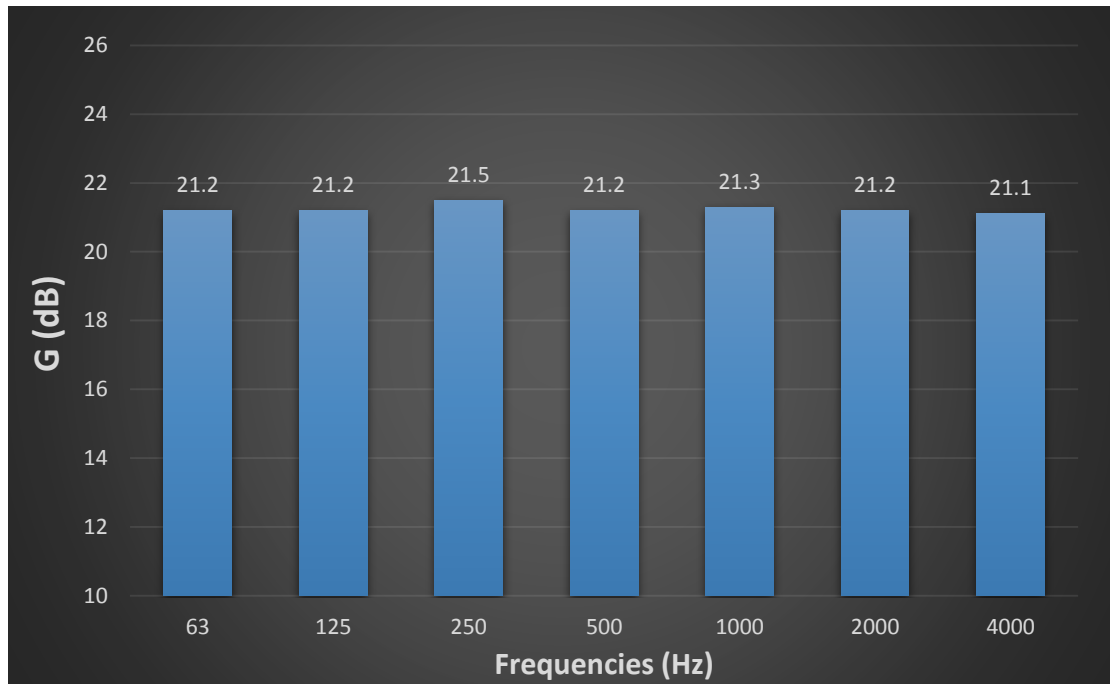
F.4.3. Κλίση 10°

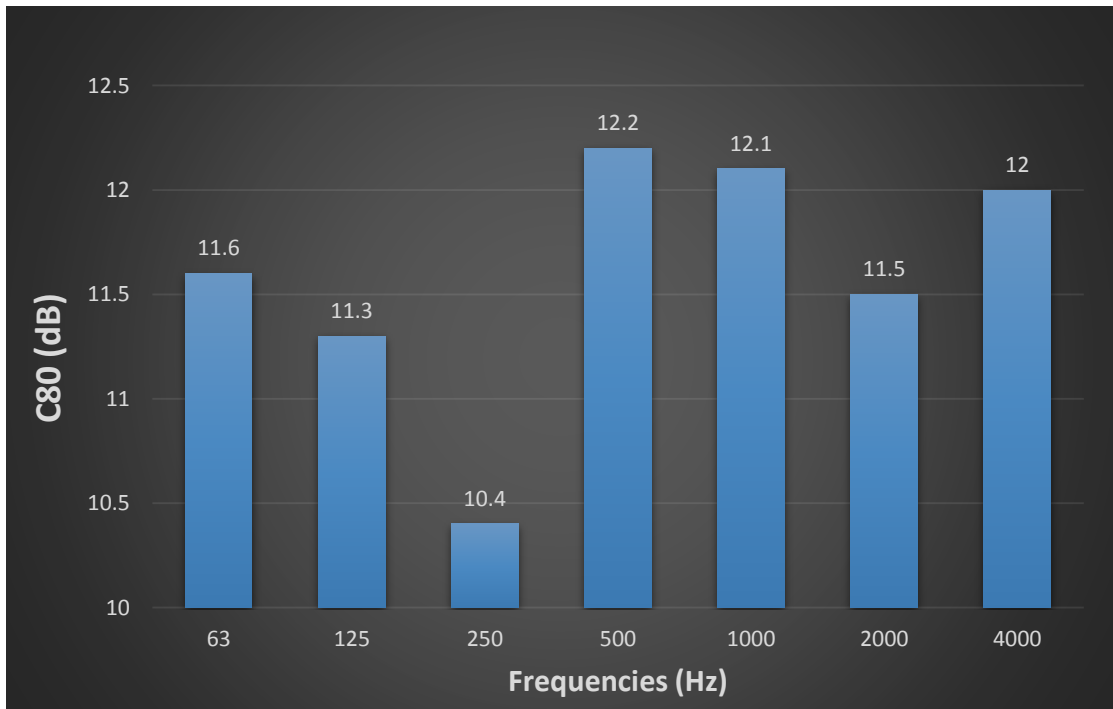
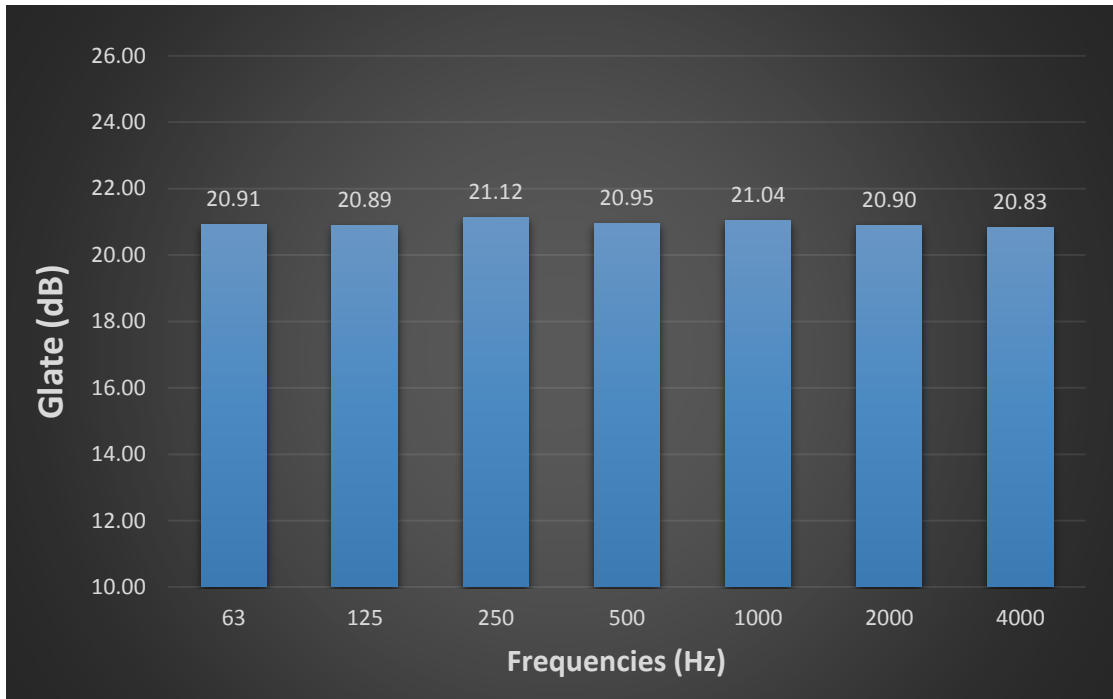


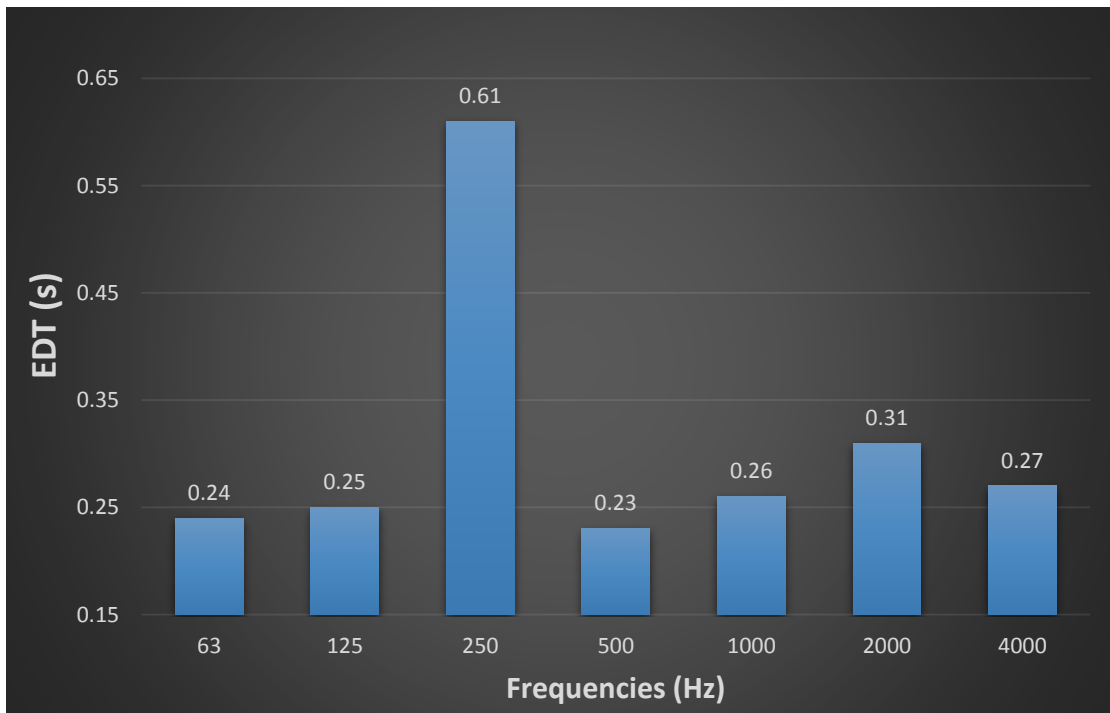
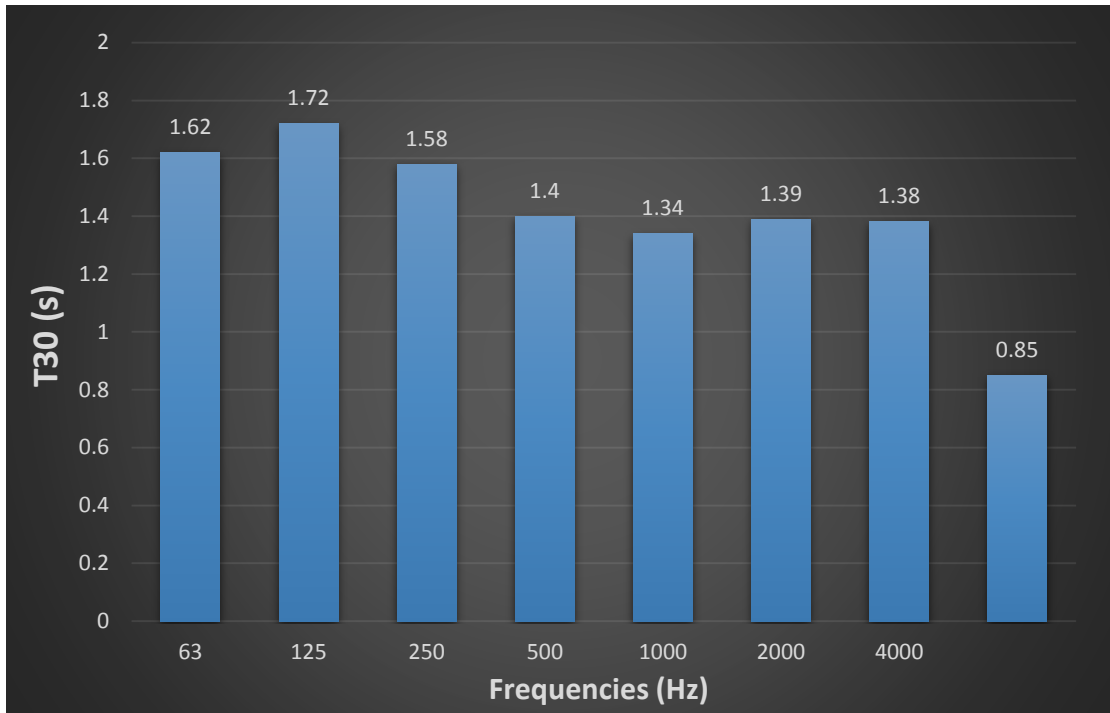




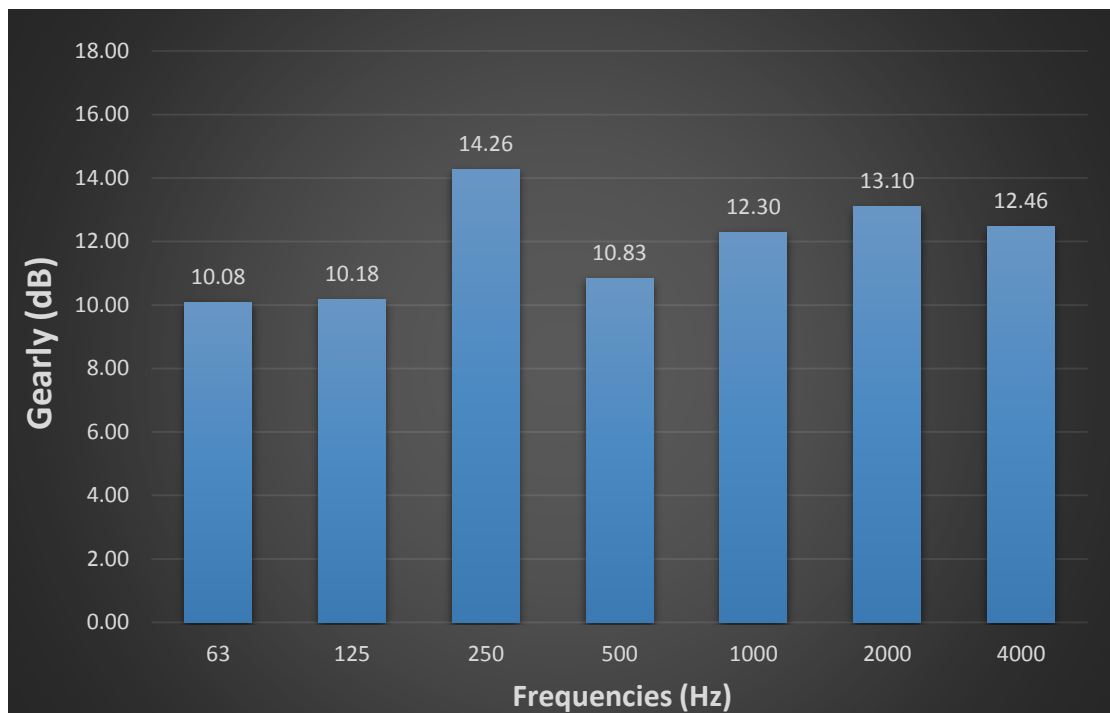
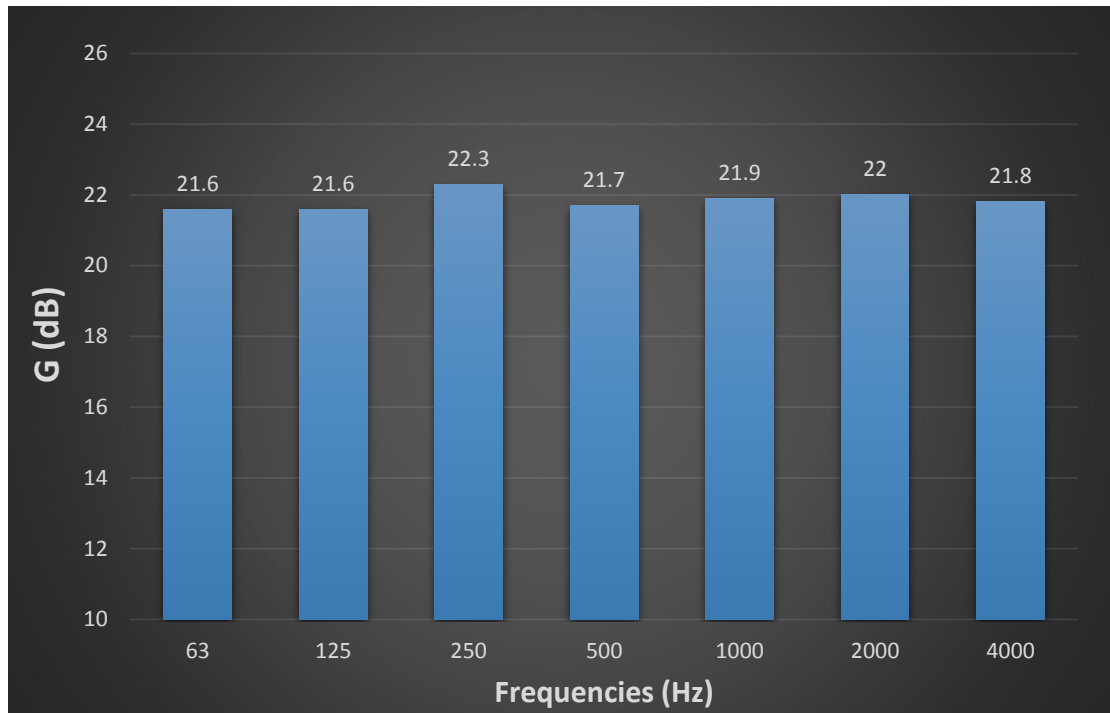
F.4.4. Κλίση 0°

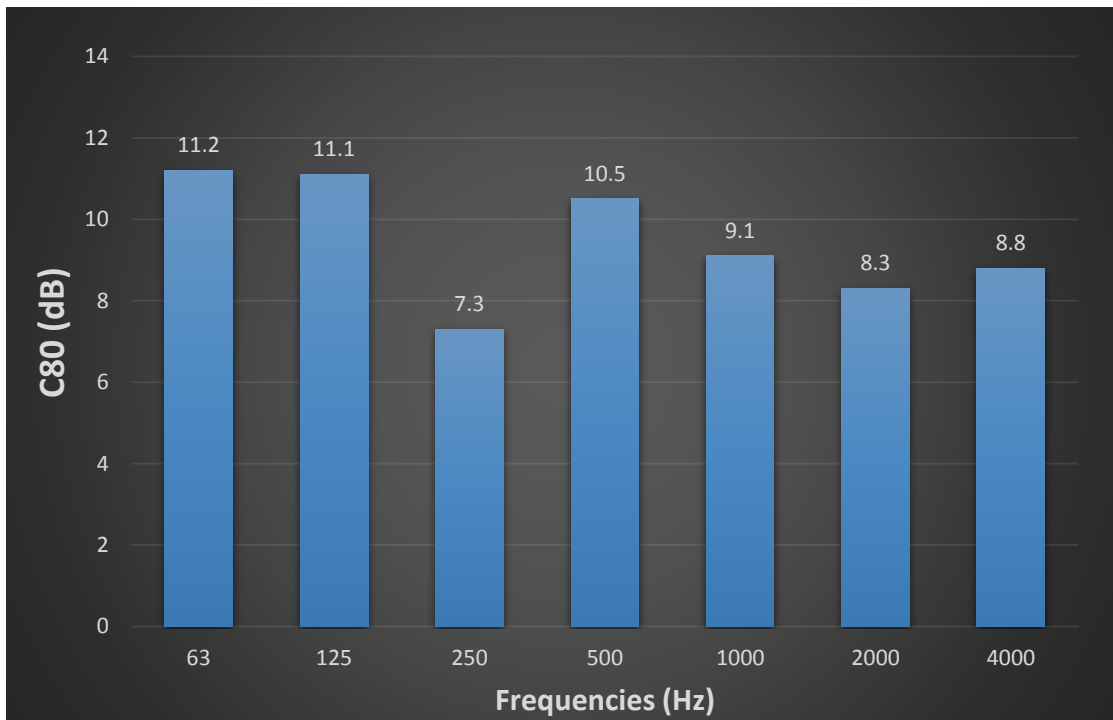
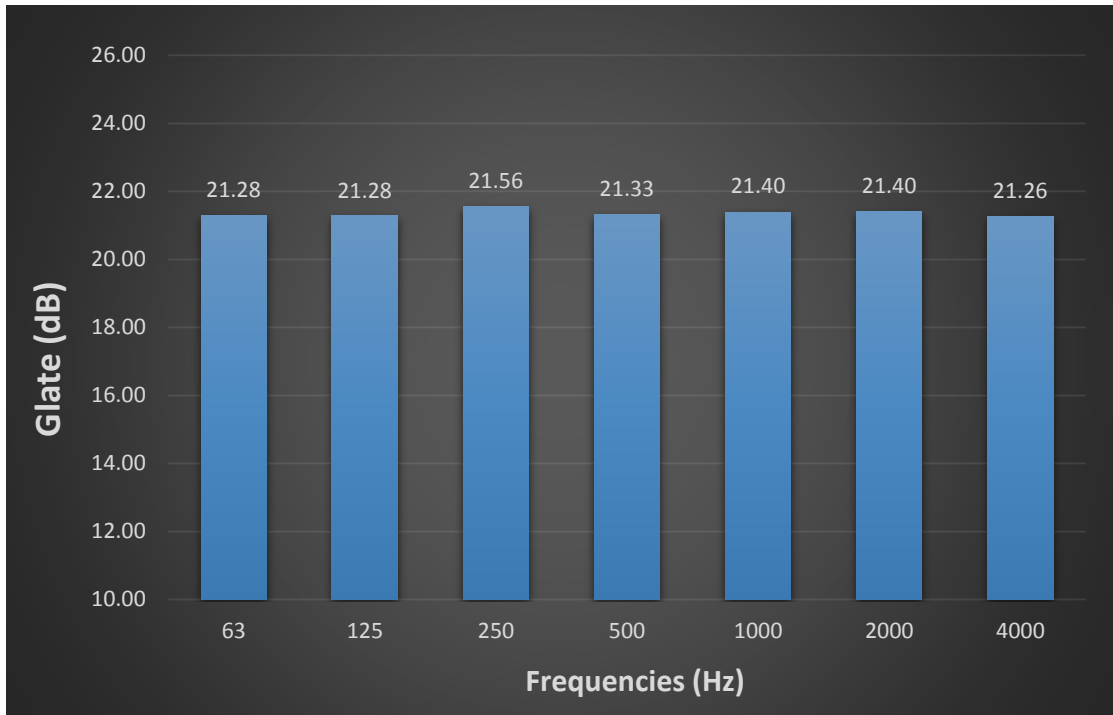


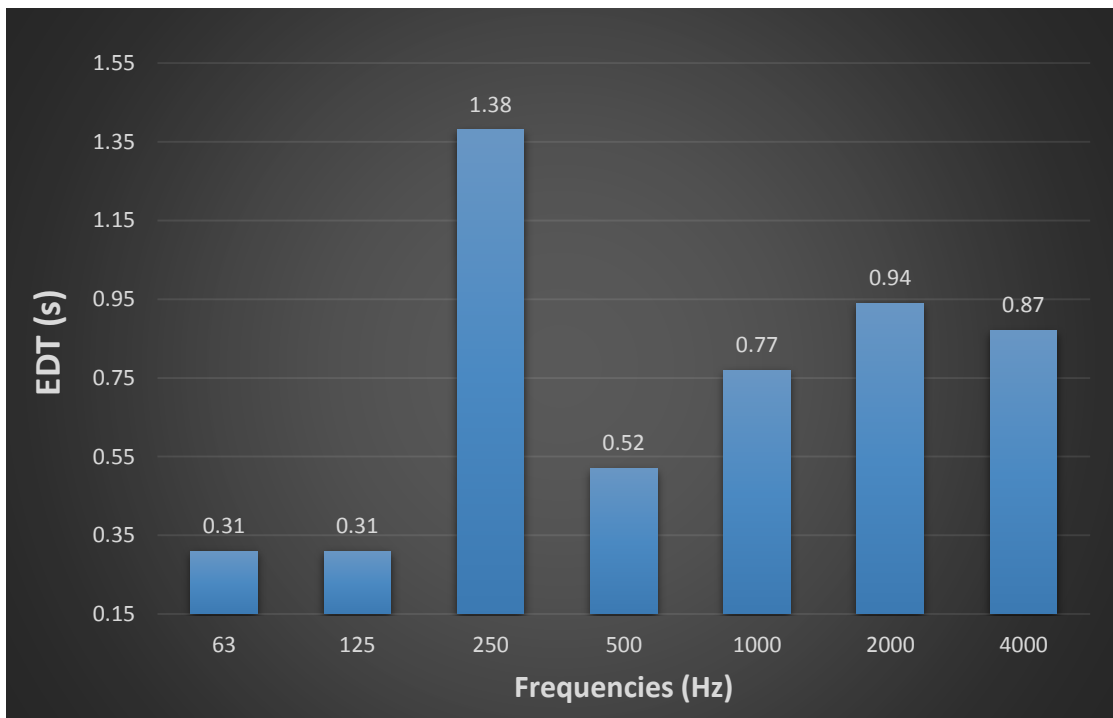
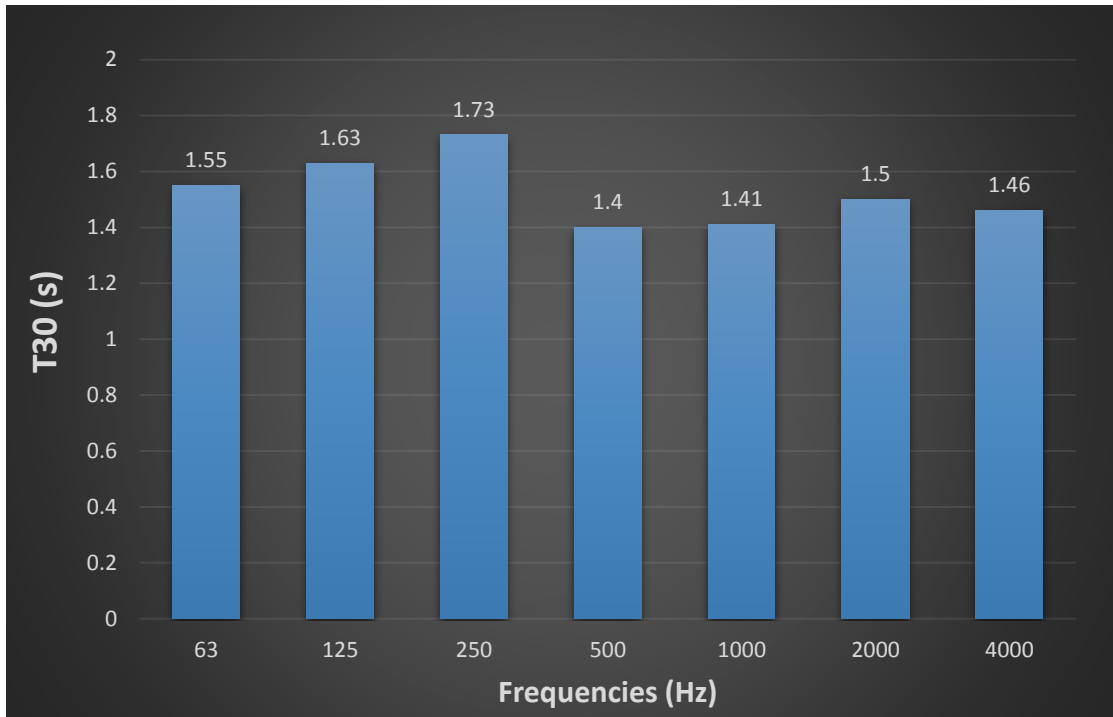




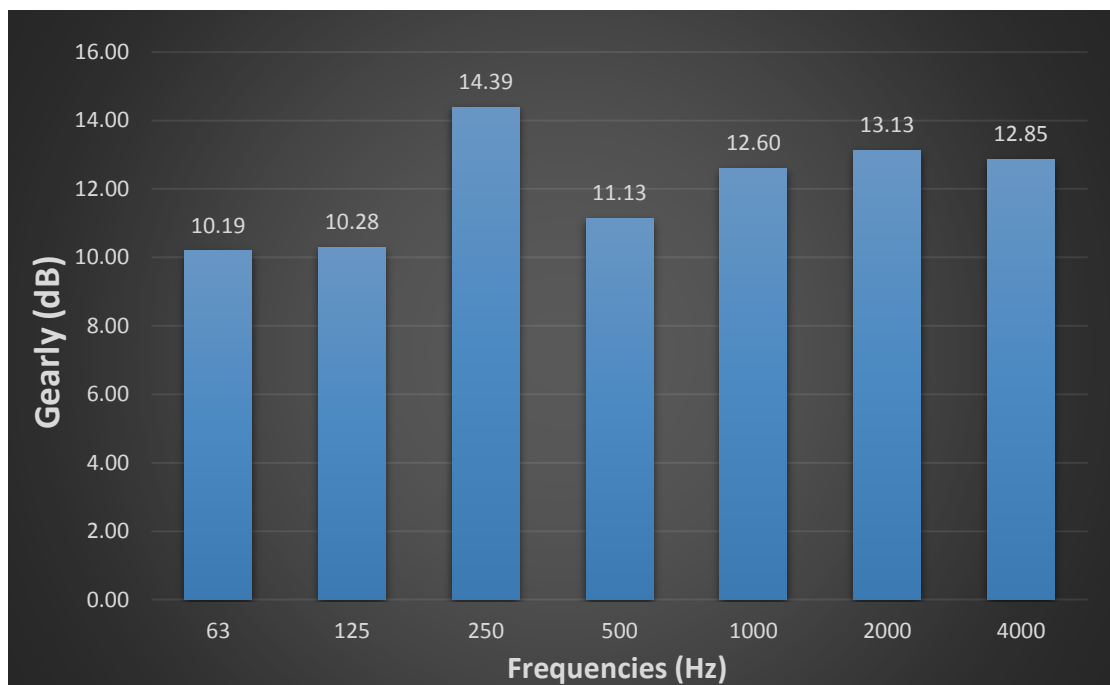
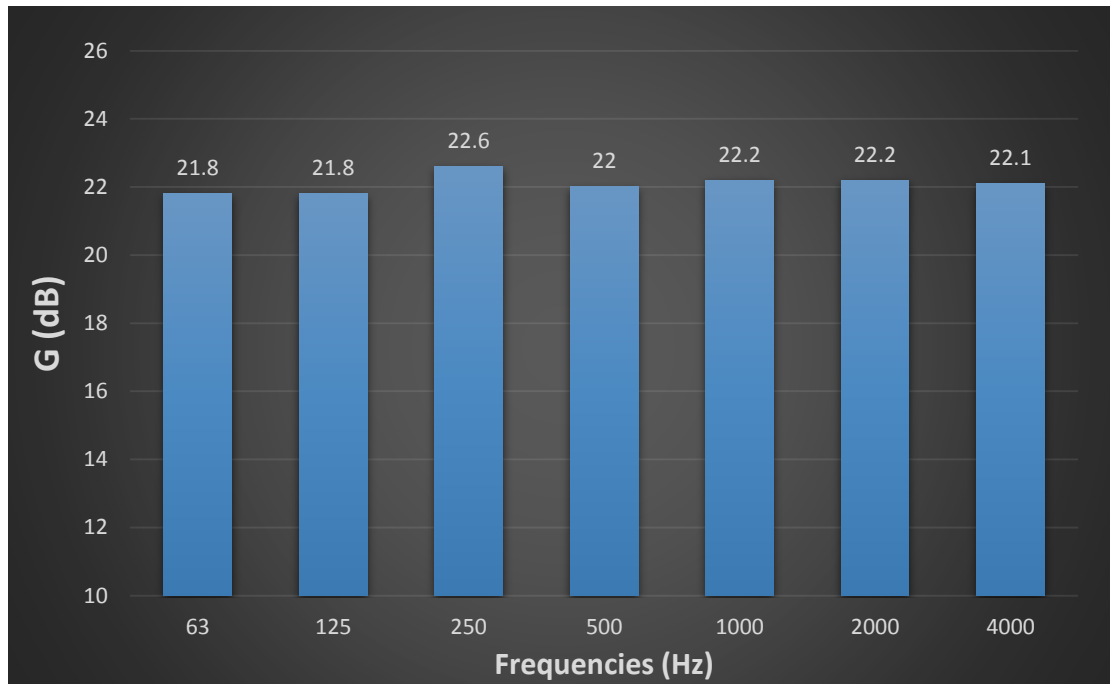
F.4.5. Κλίση -10°

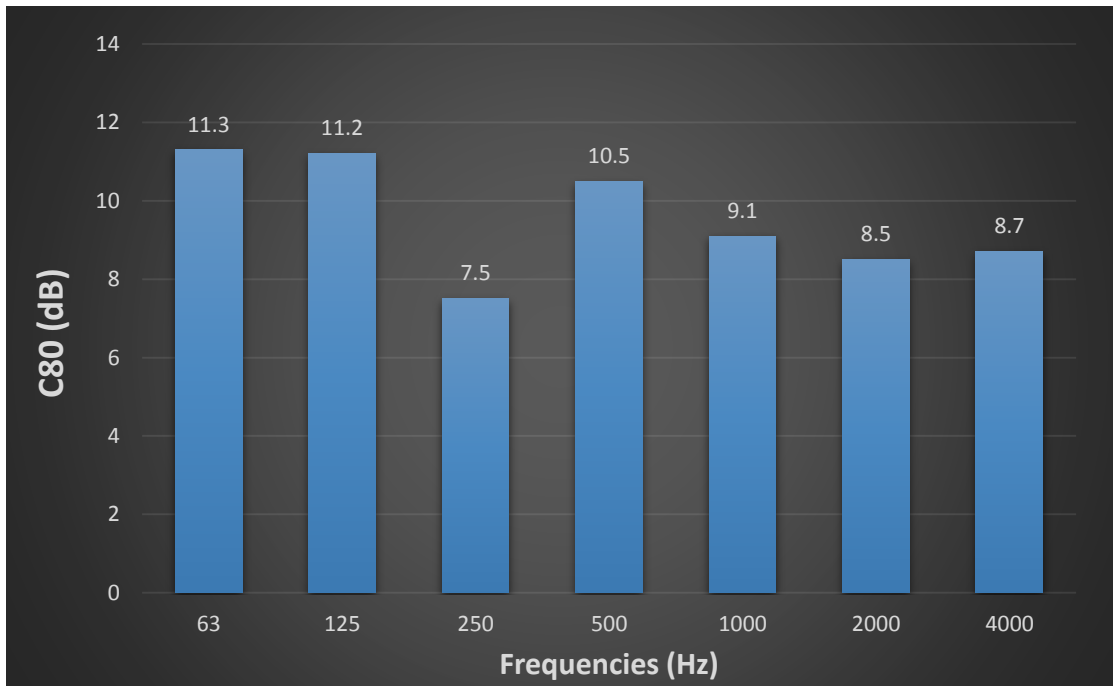
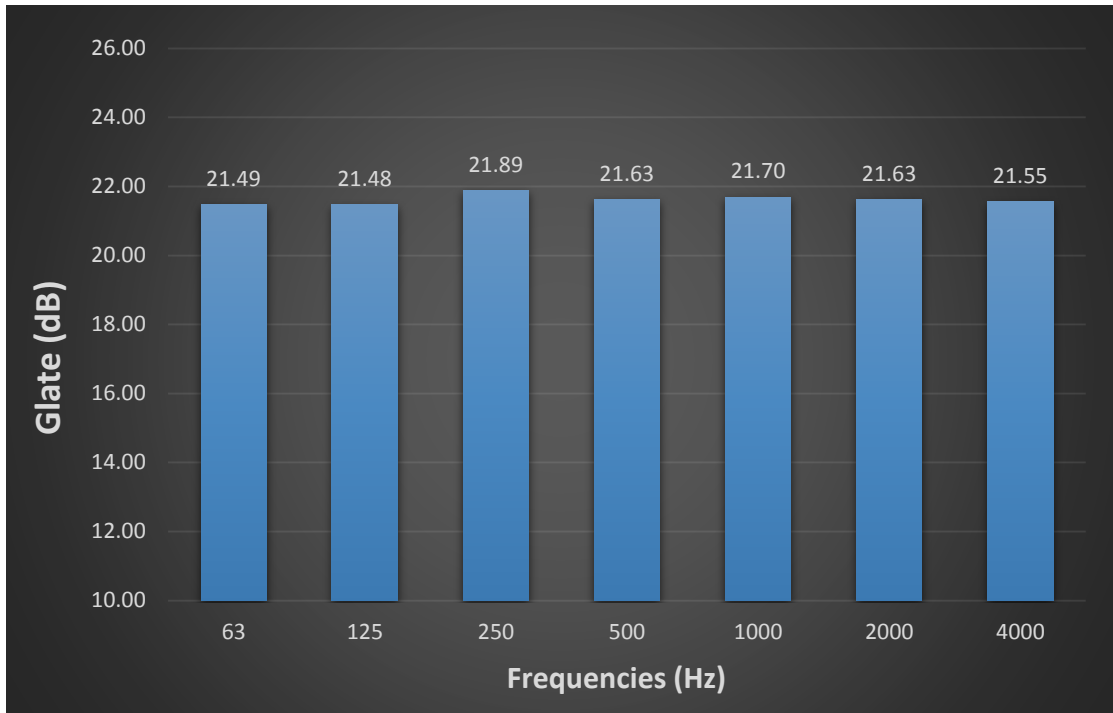


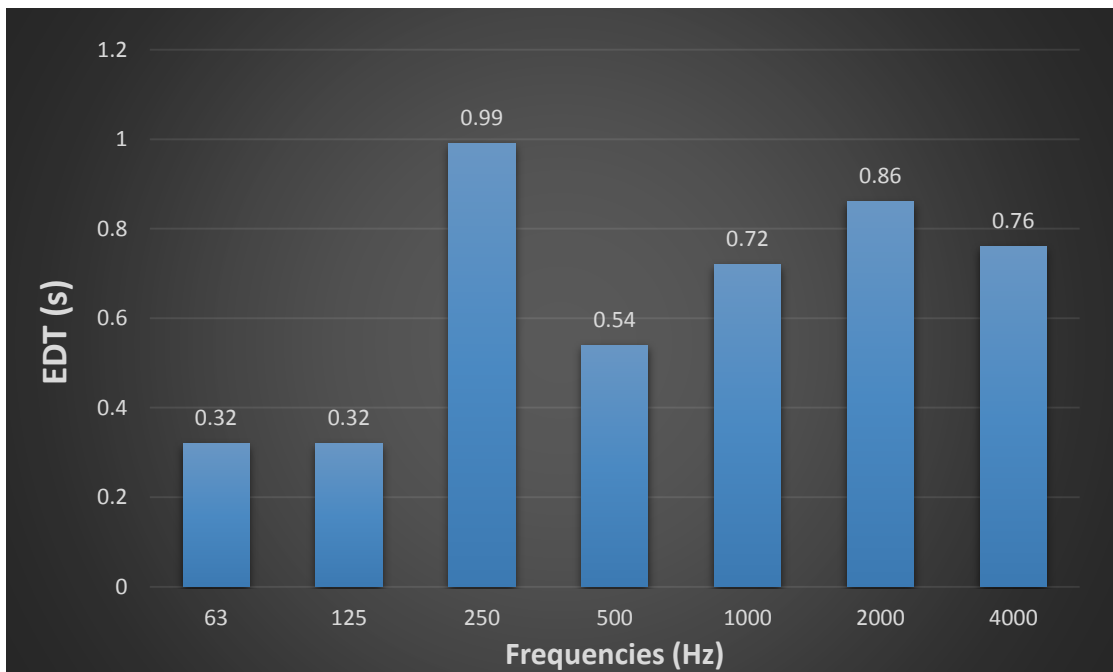
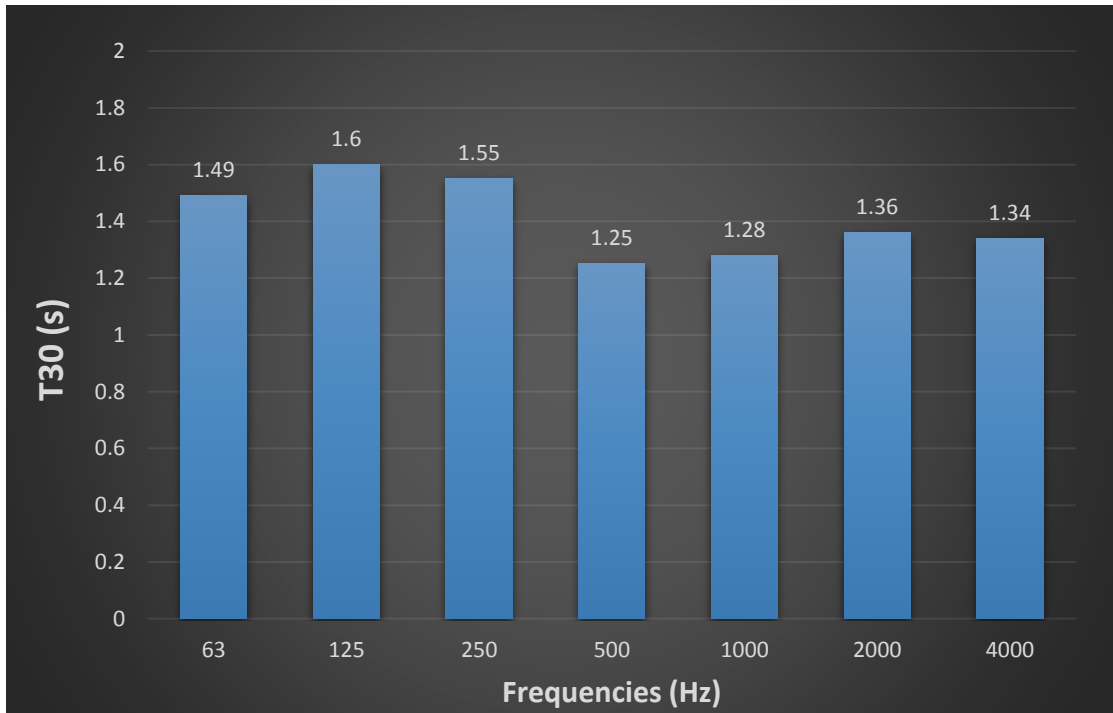




F.4.6. Κλίση -15°

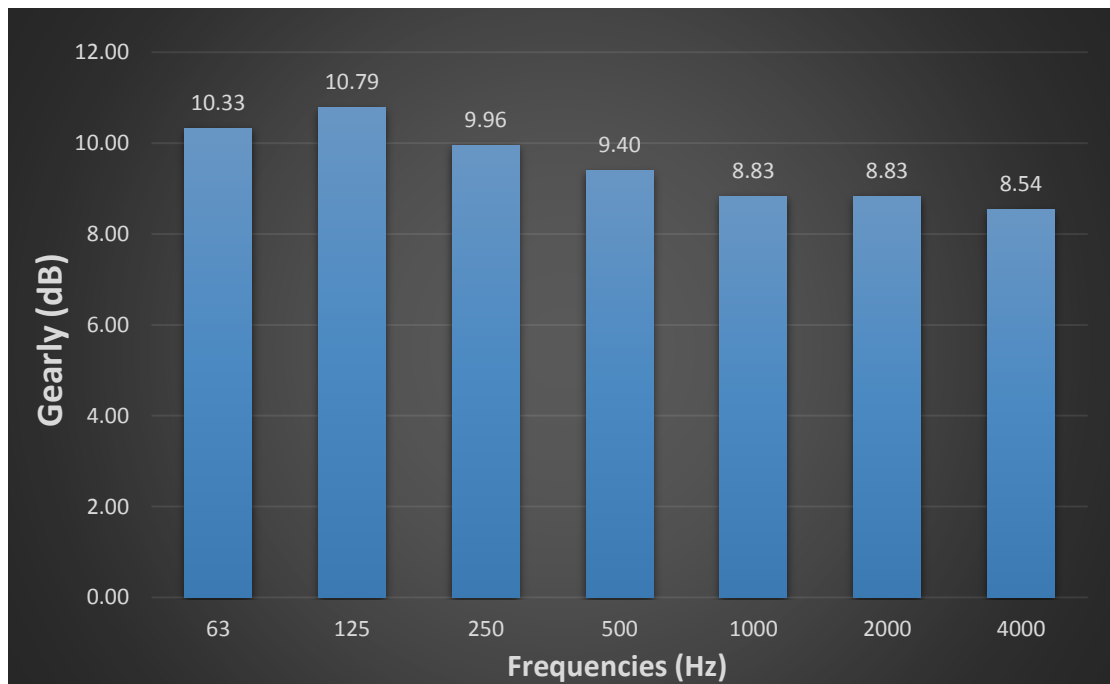
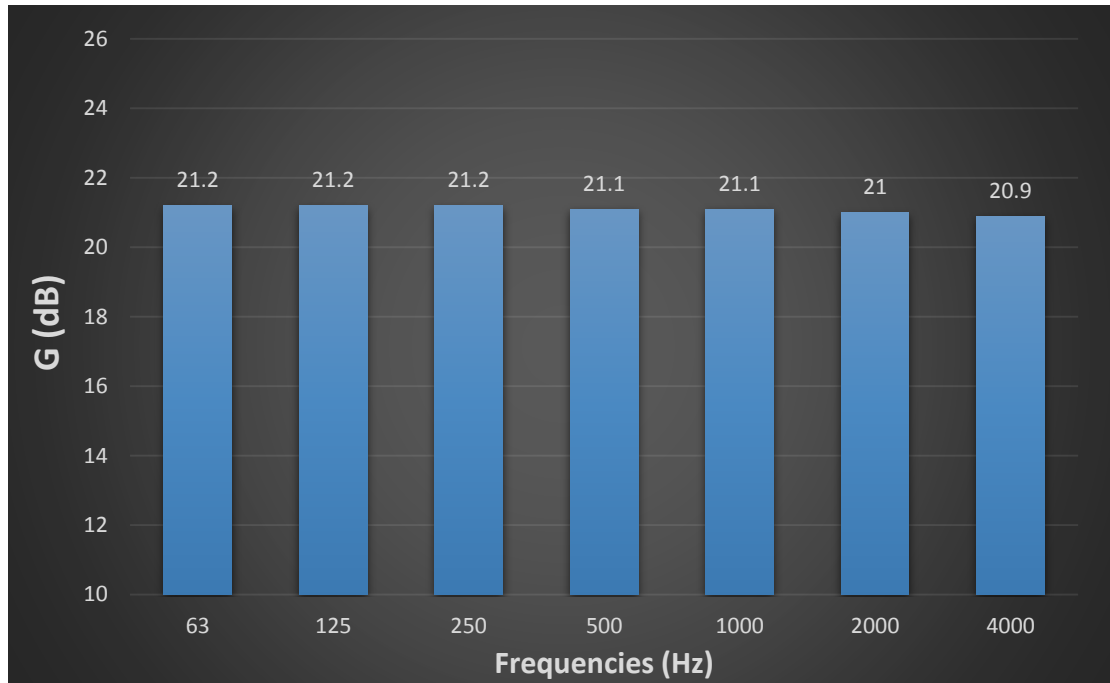


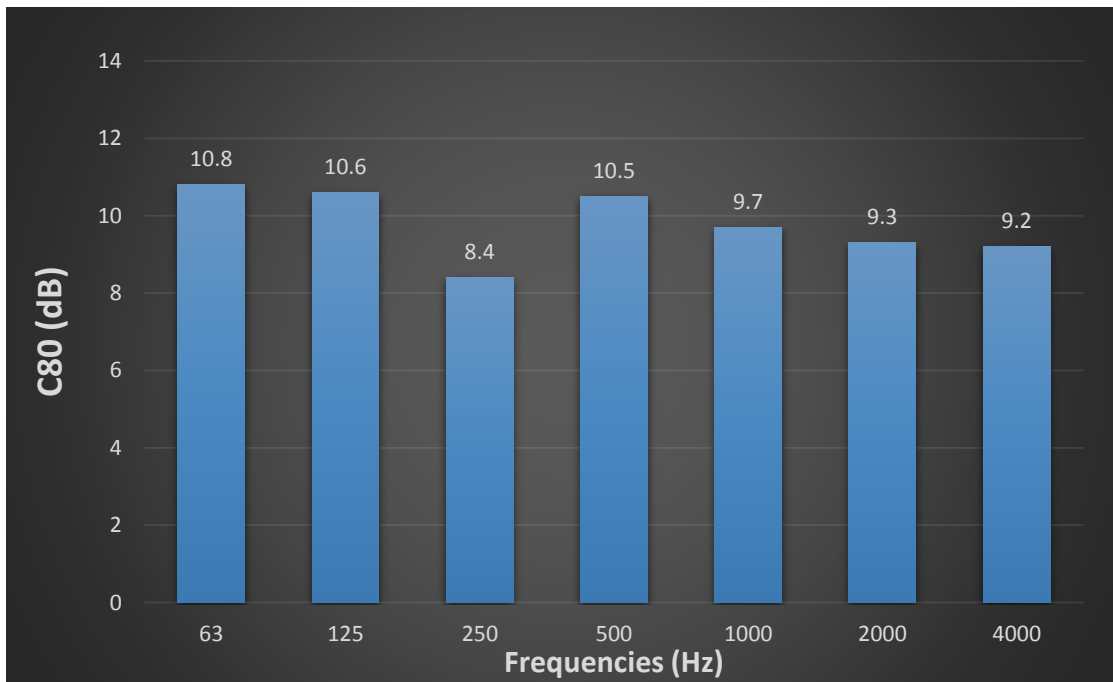
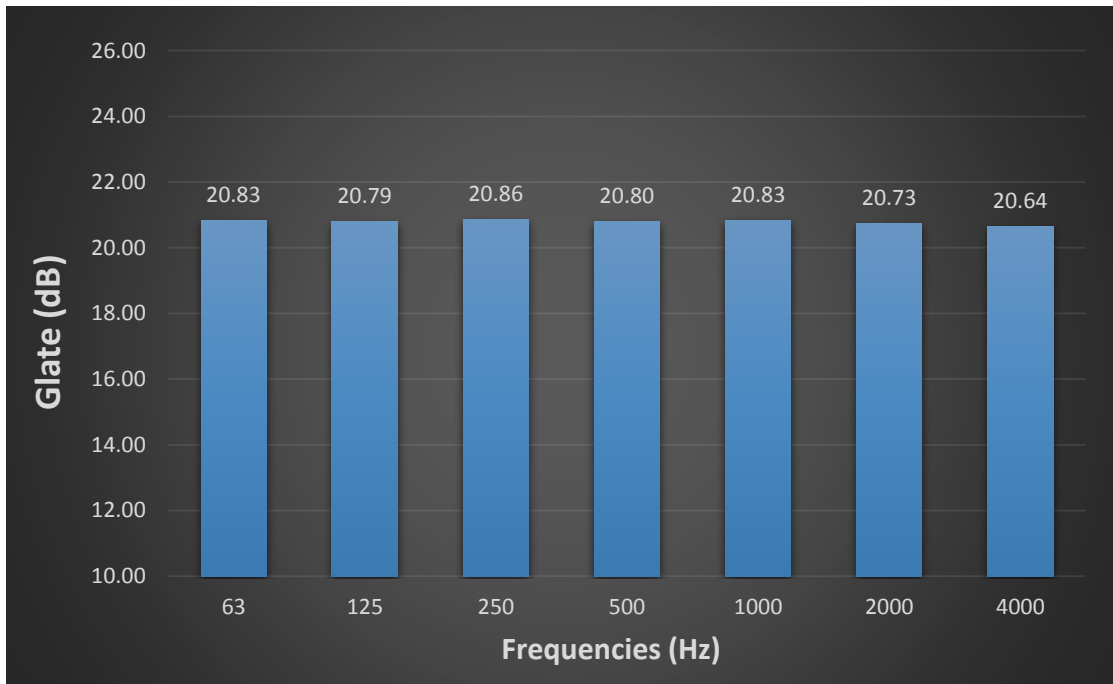


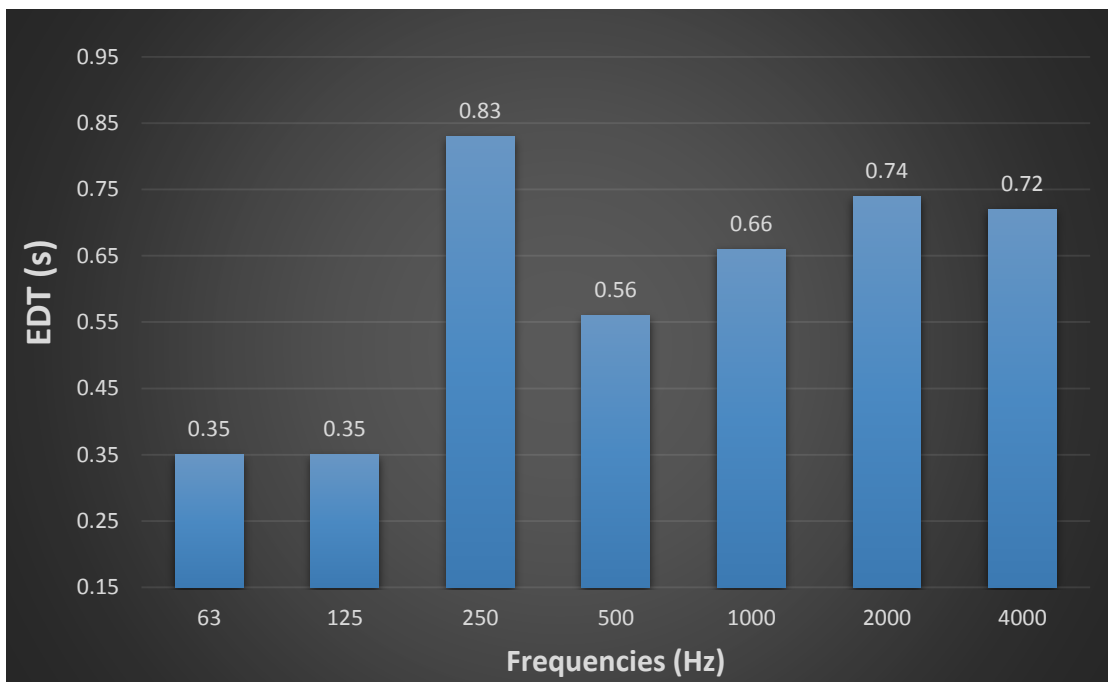
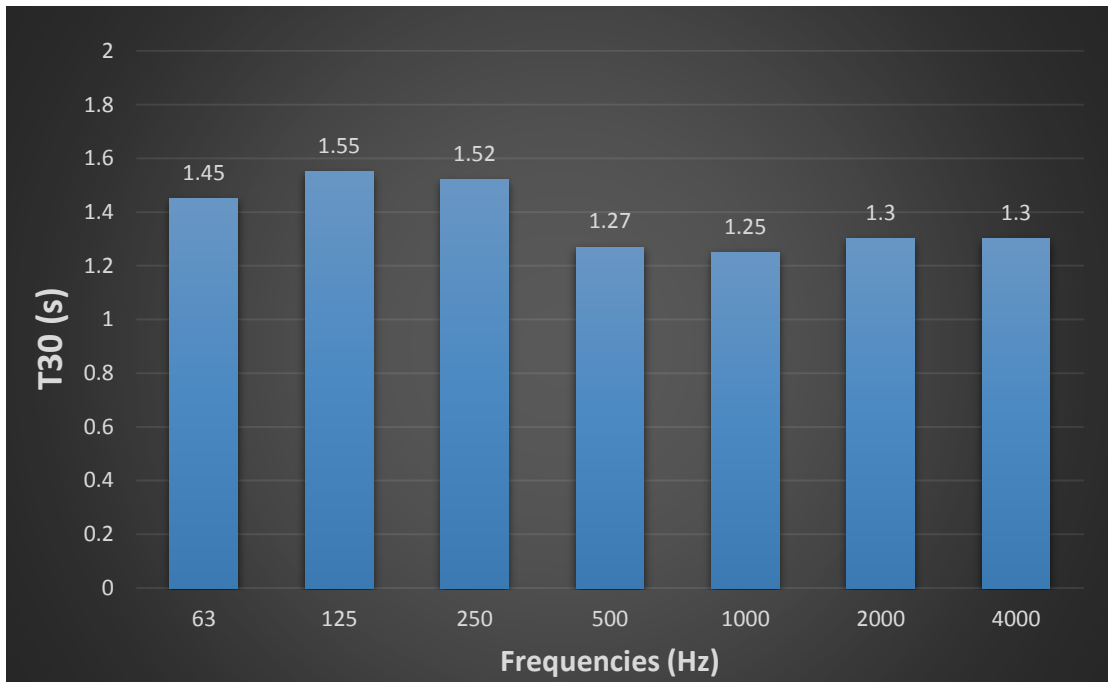


ΣΤ.5. Κλίση τοίχου πίσω από τη σκηνή

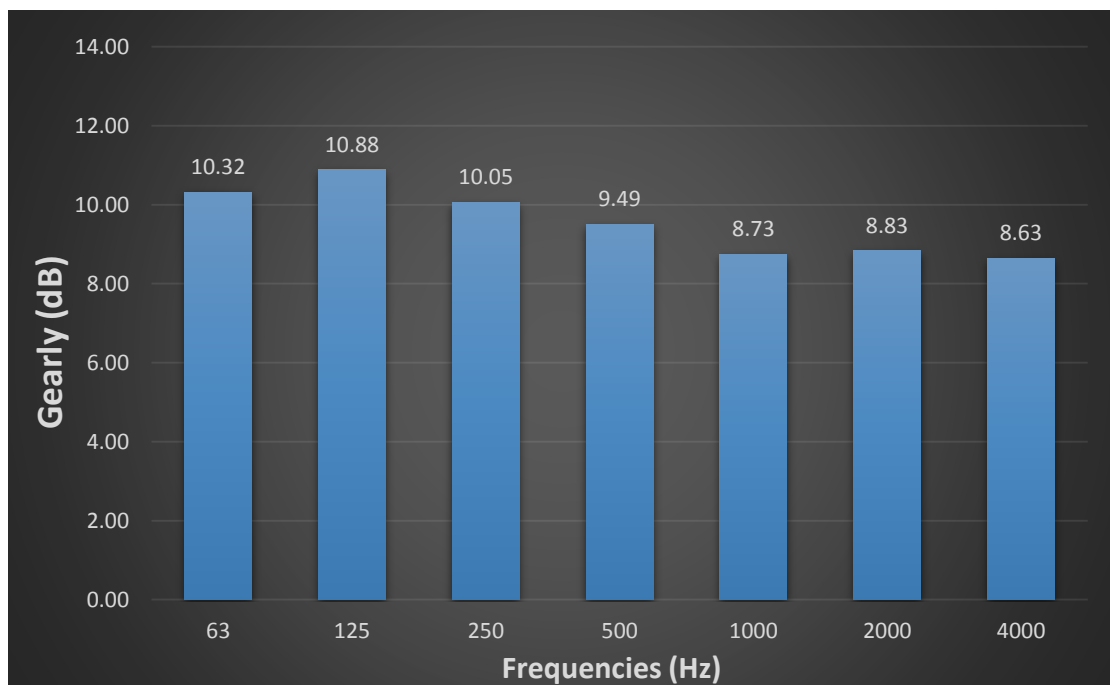
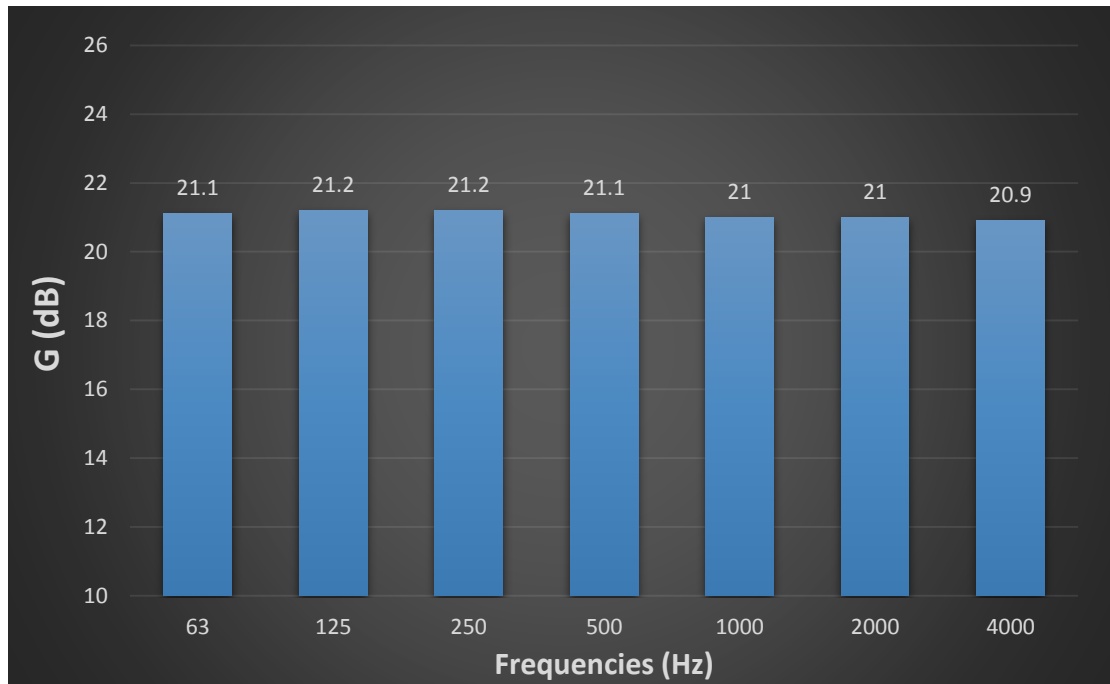
F.5.1. Κλίση 30°

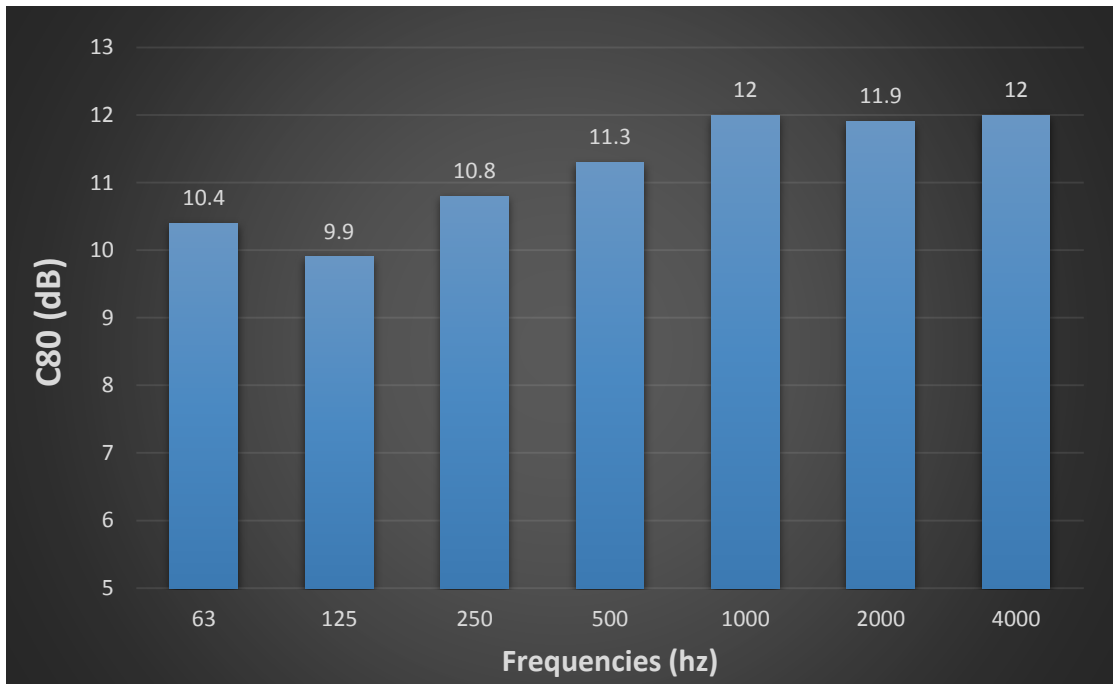
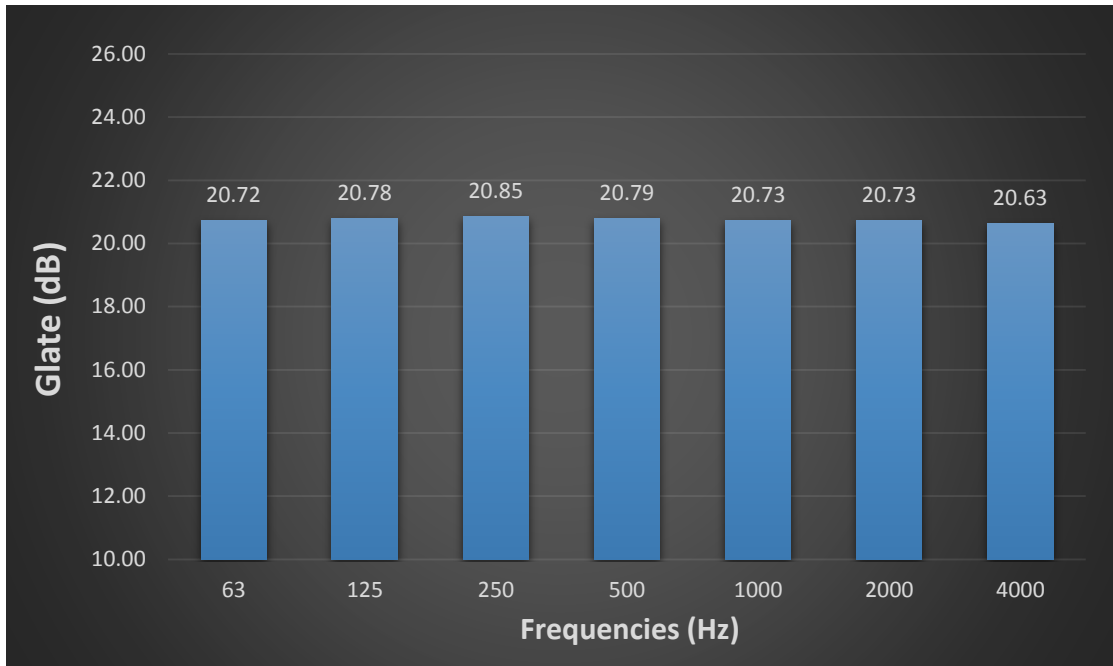


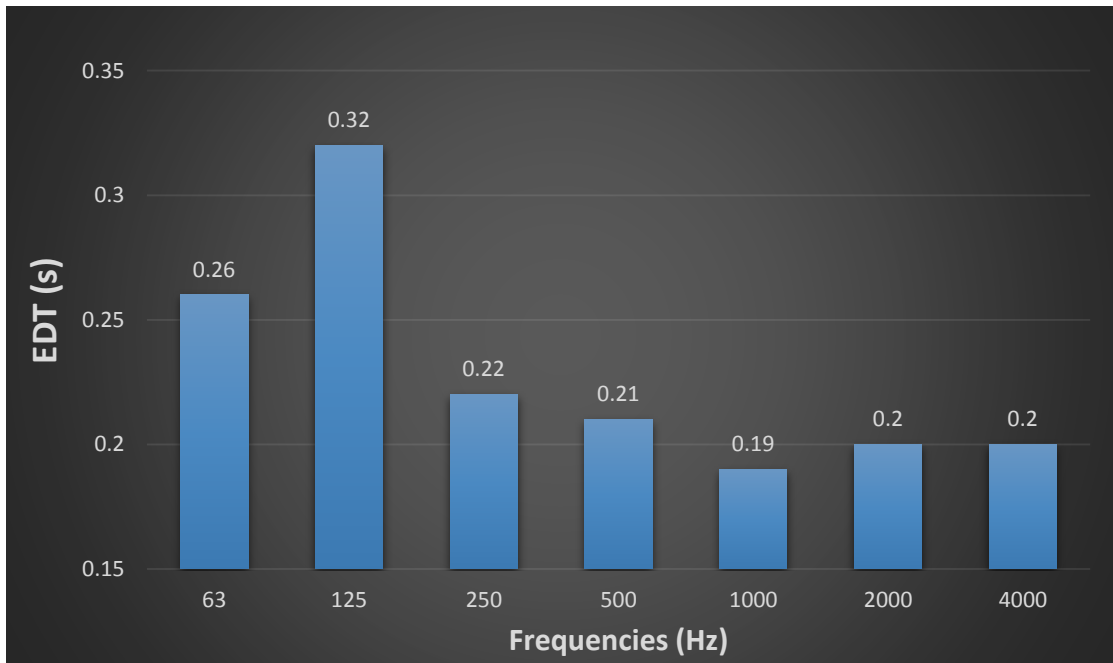
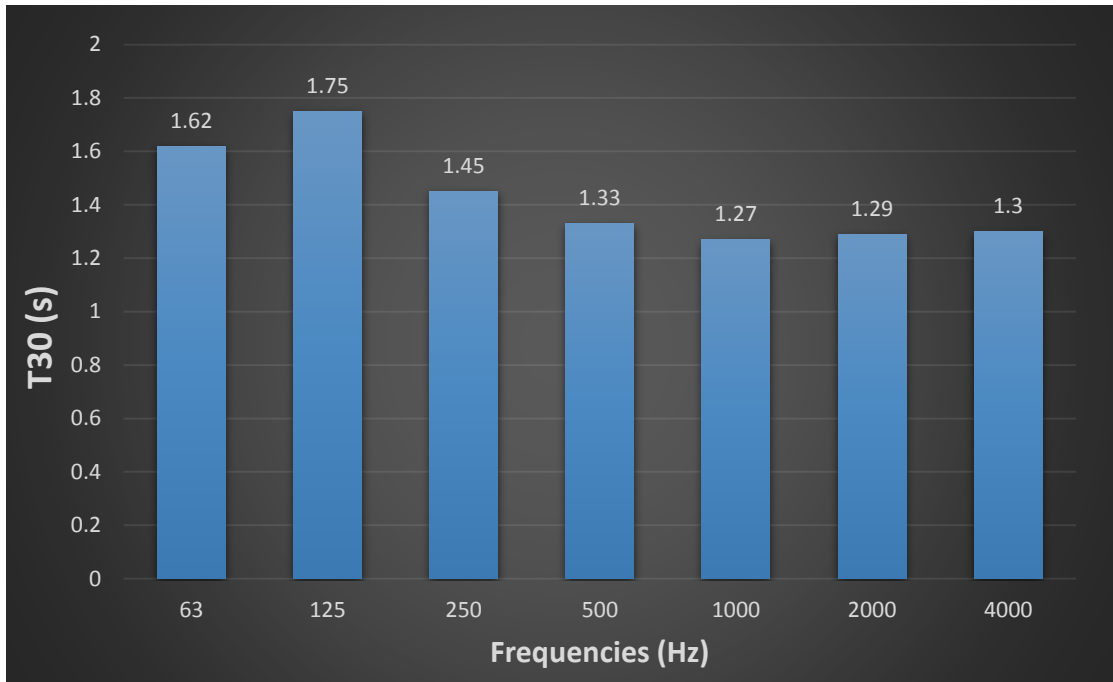




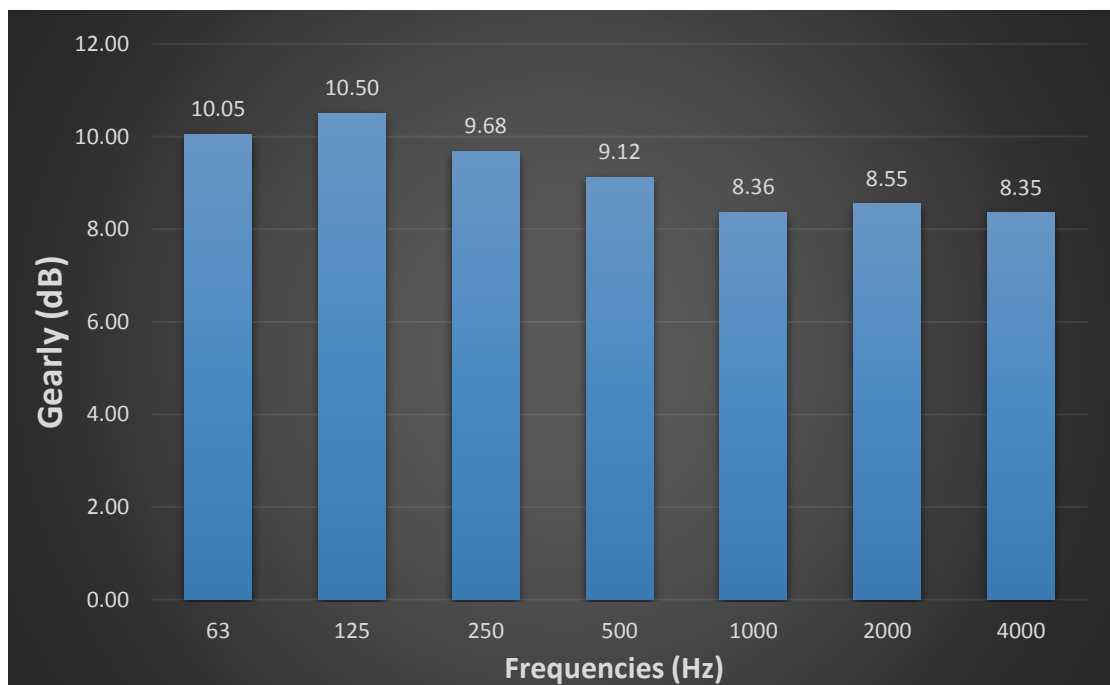
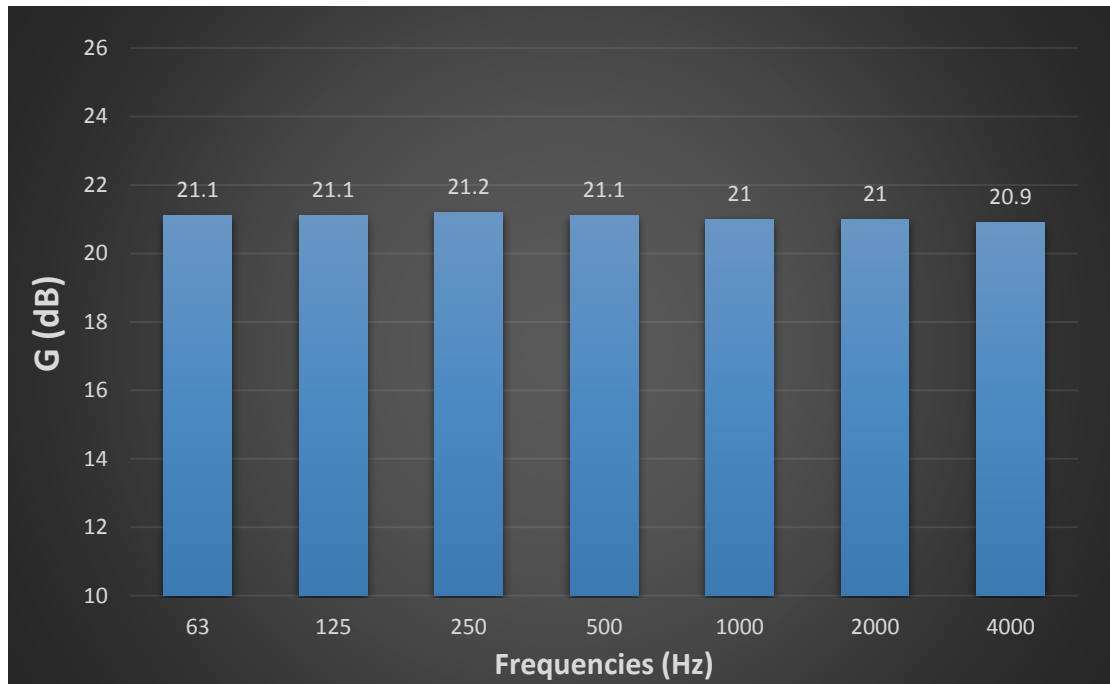
F.5.2. Κλίση 20°

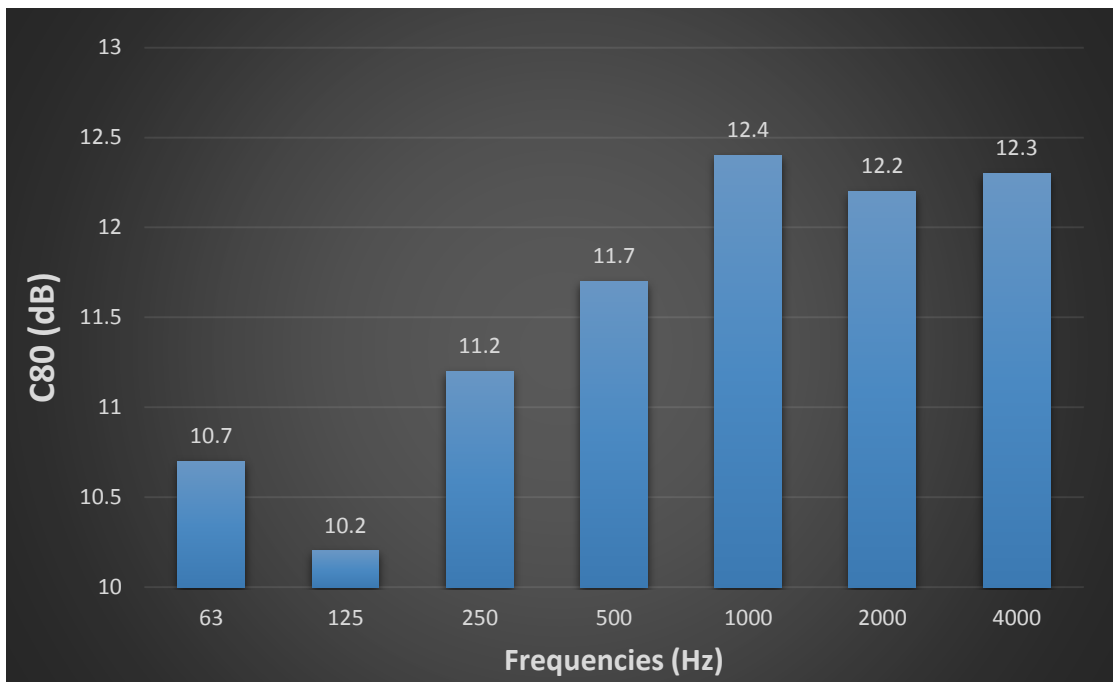
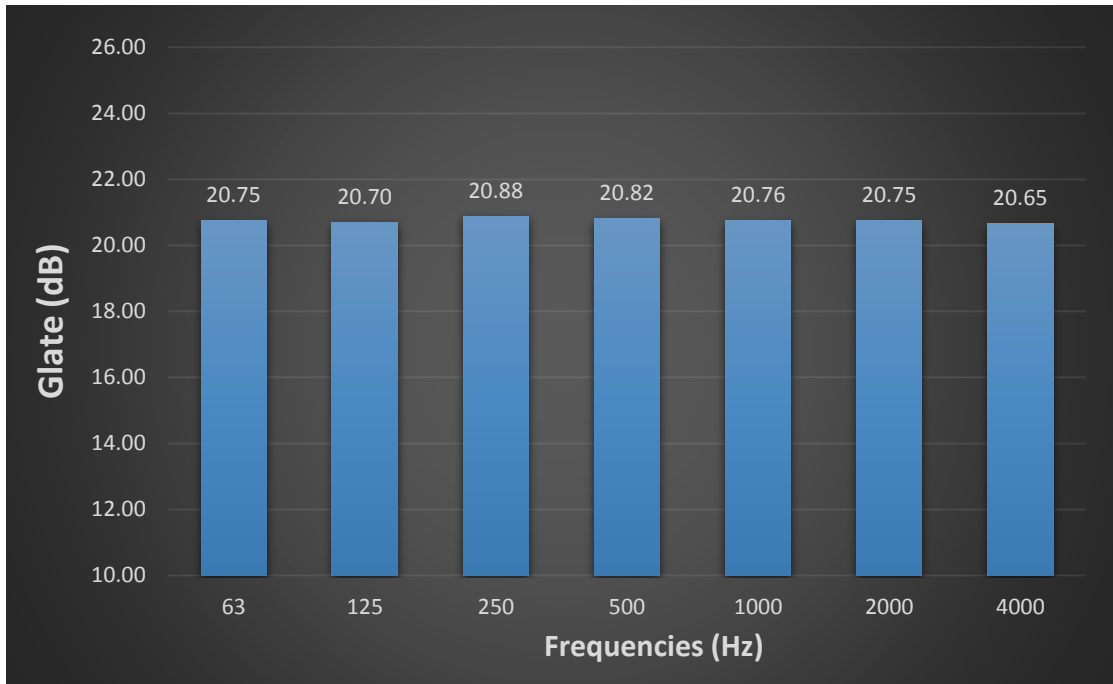


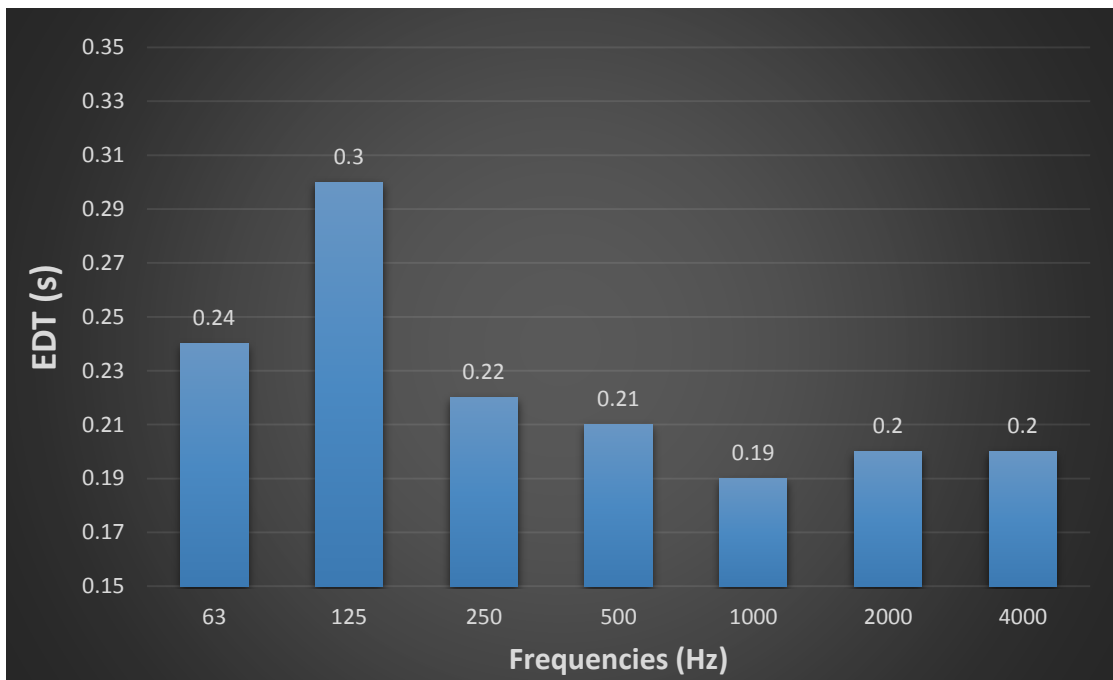
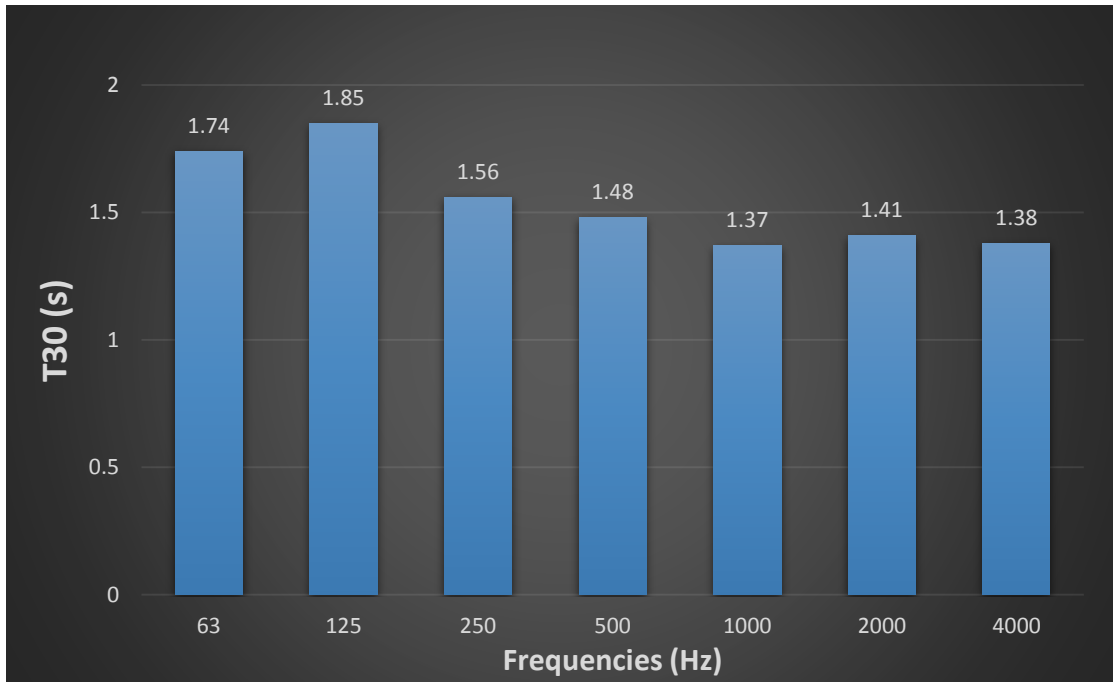




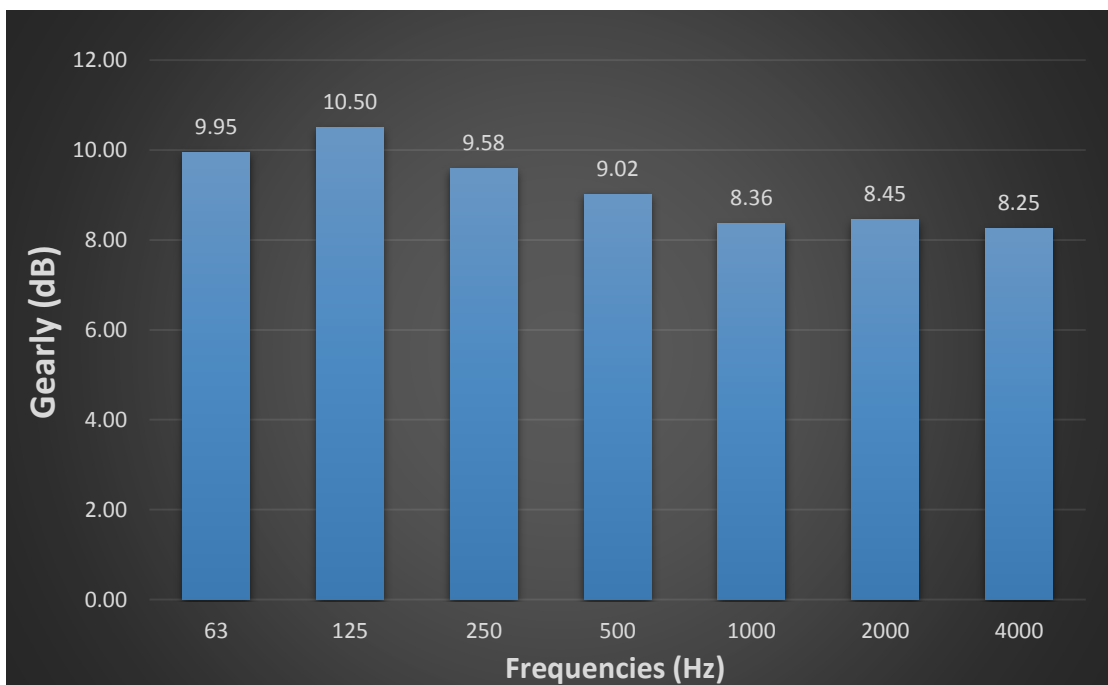
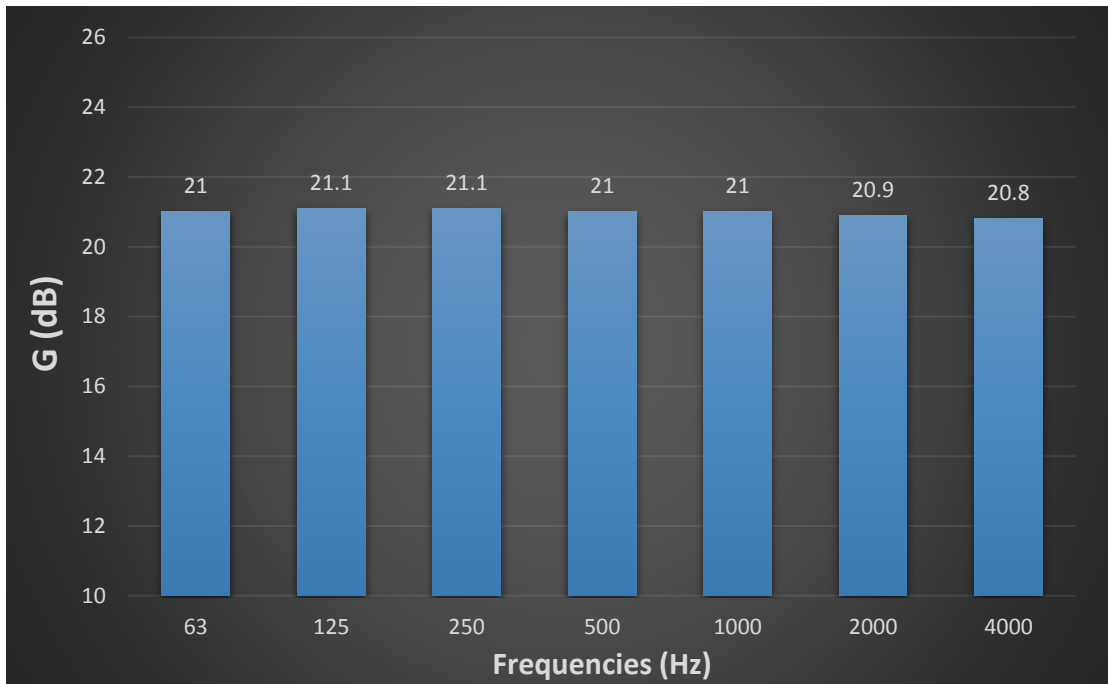
F.5.3. Κλίση 10°

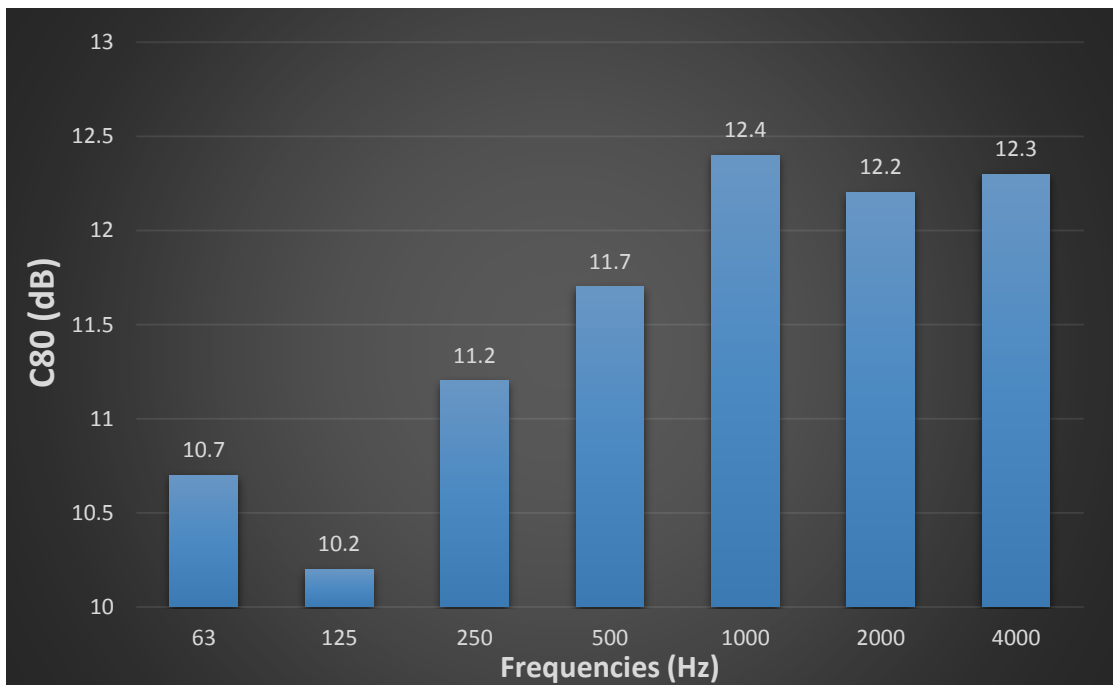
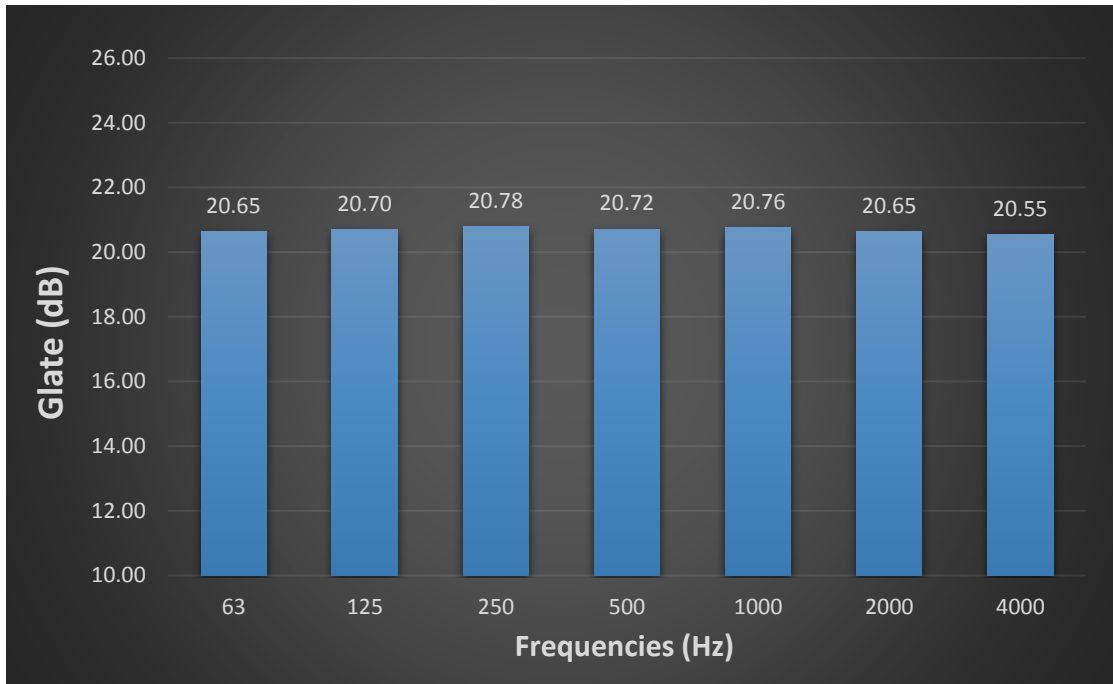


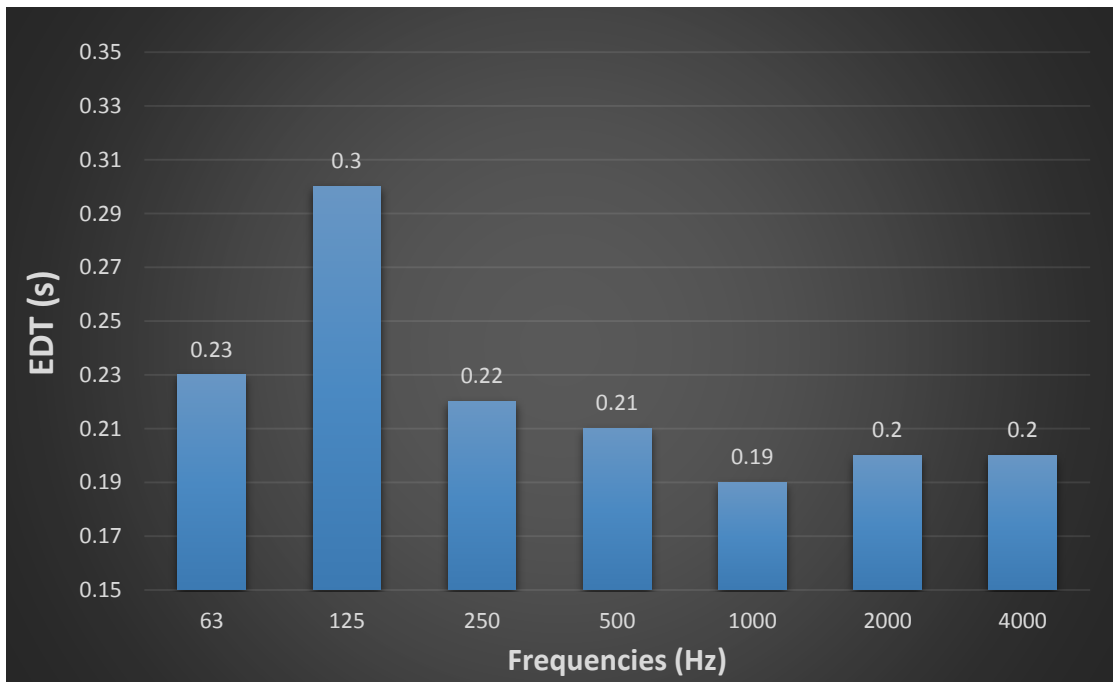
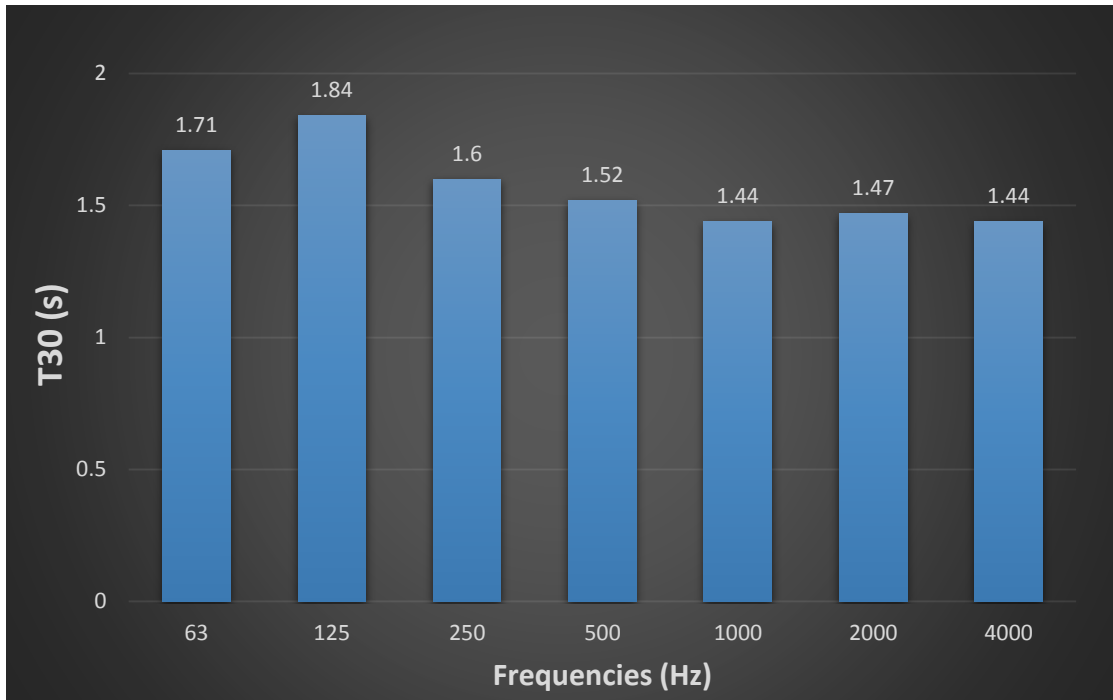




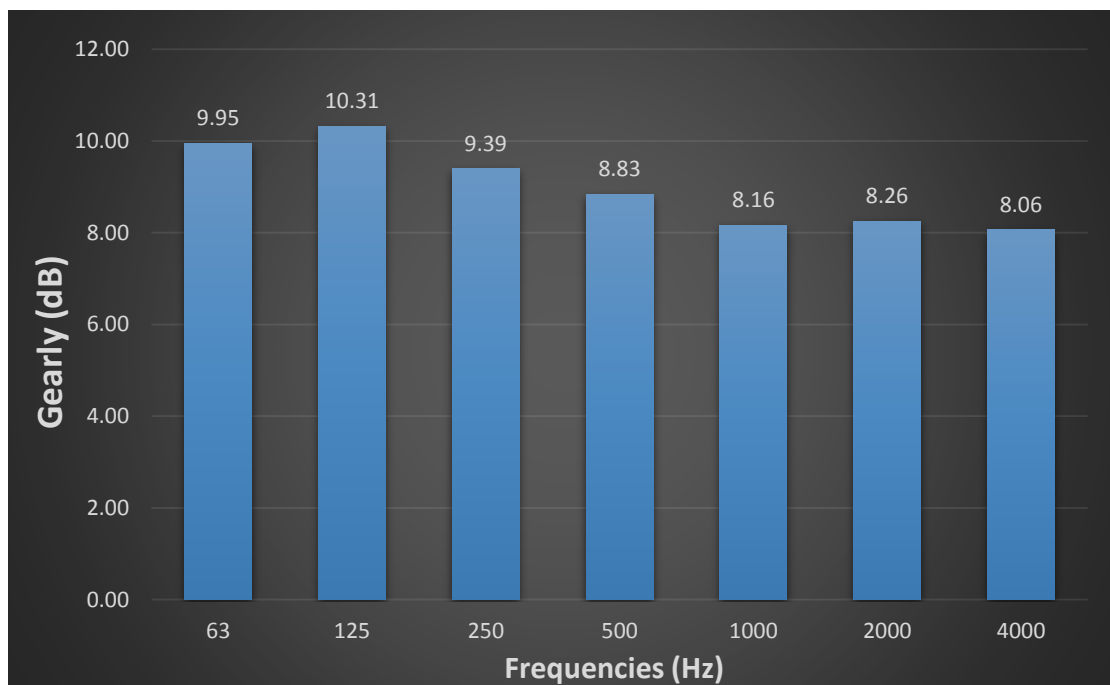
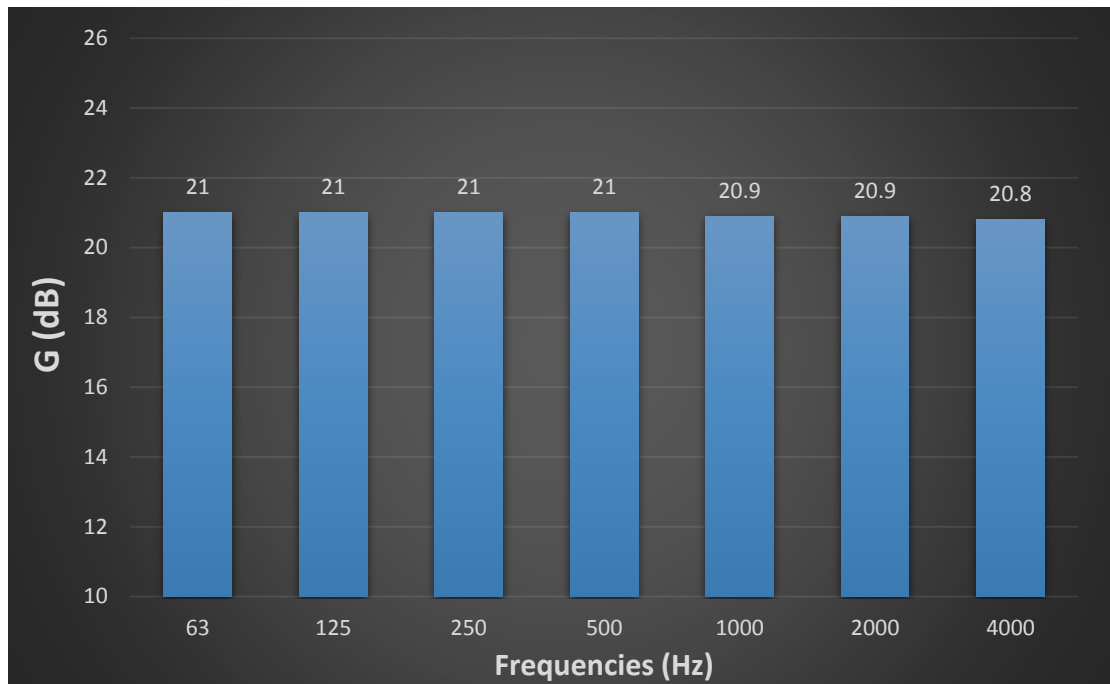
F.5.4. Κλίση 5°

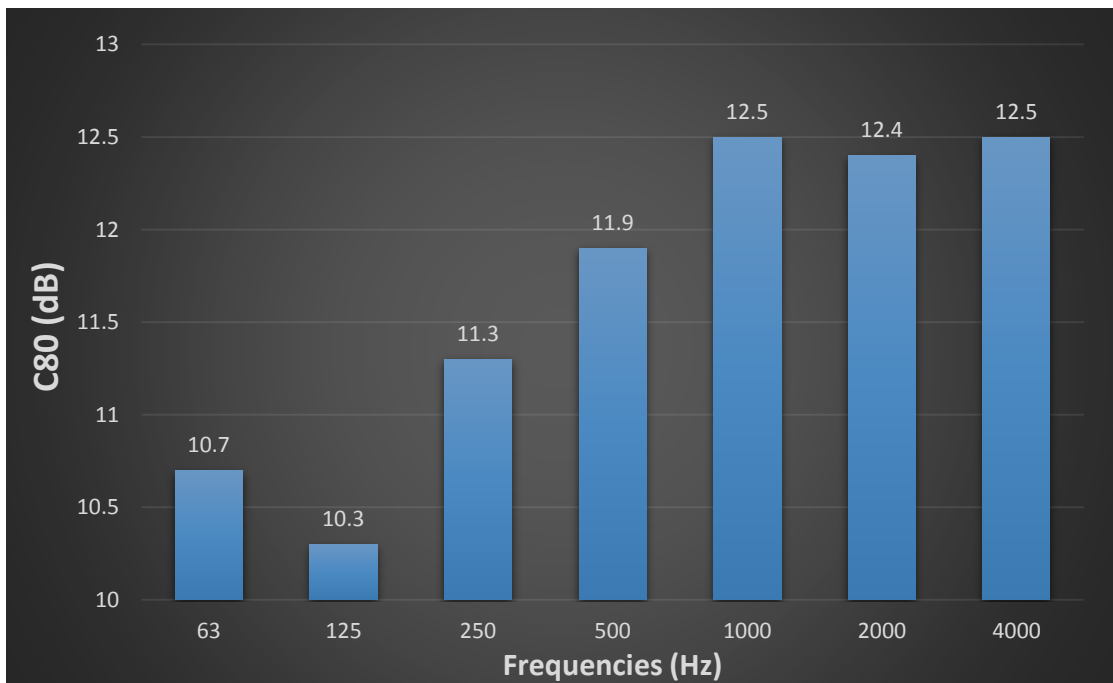
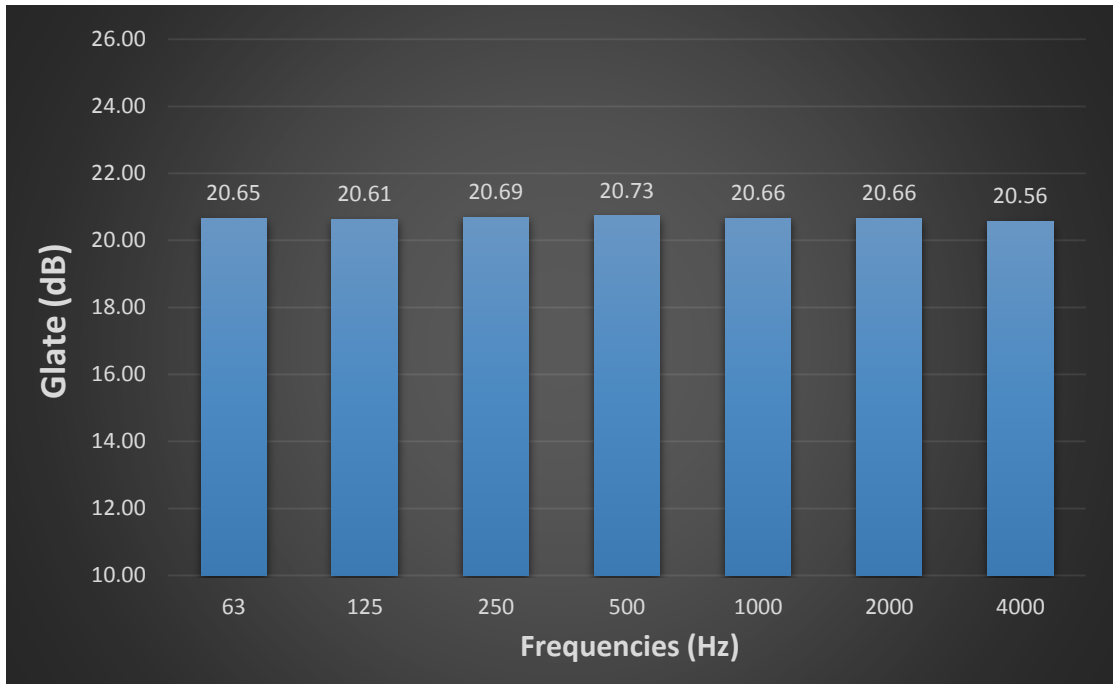


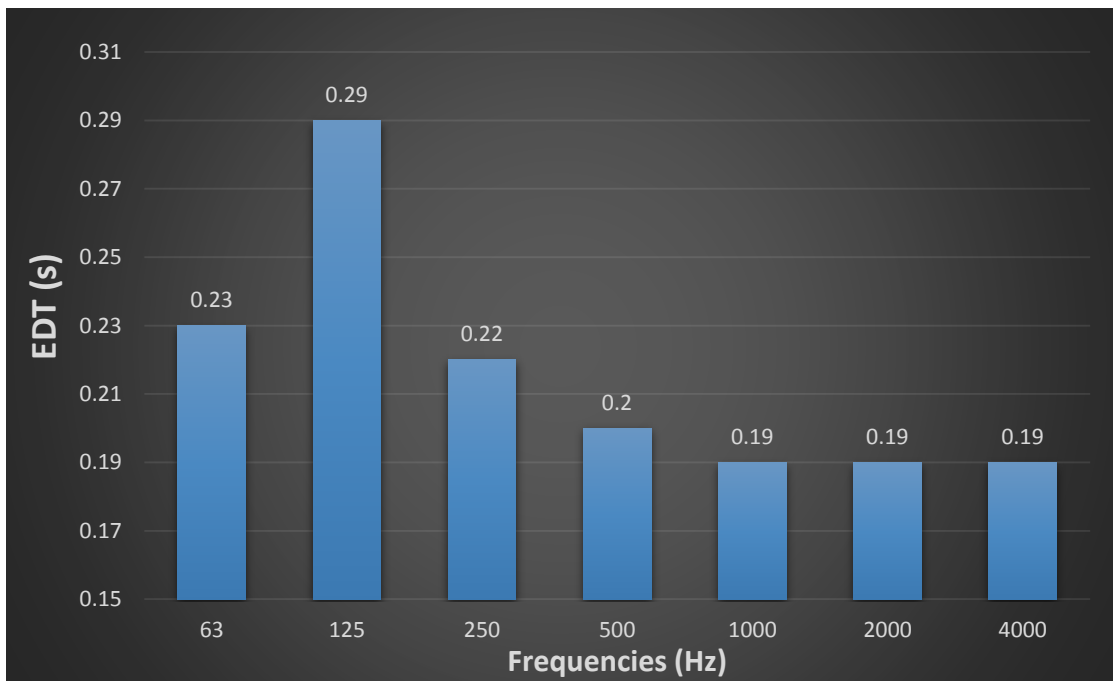
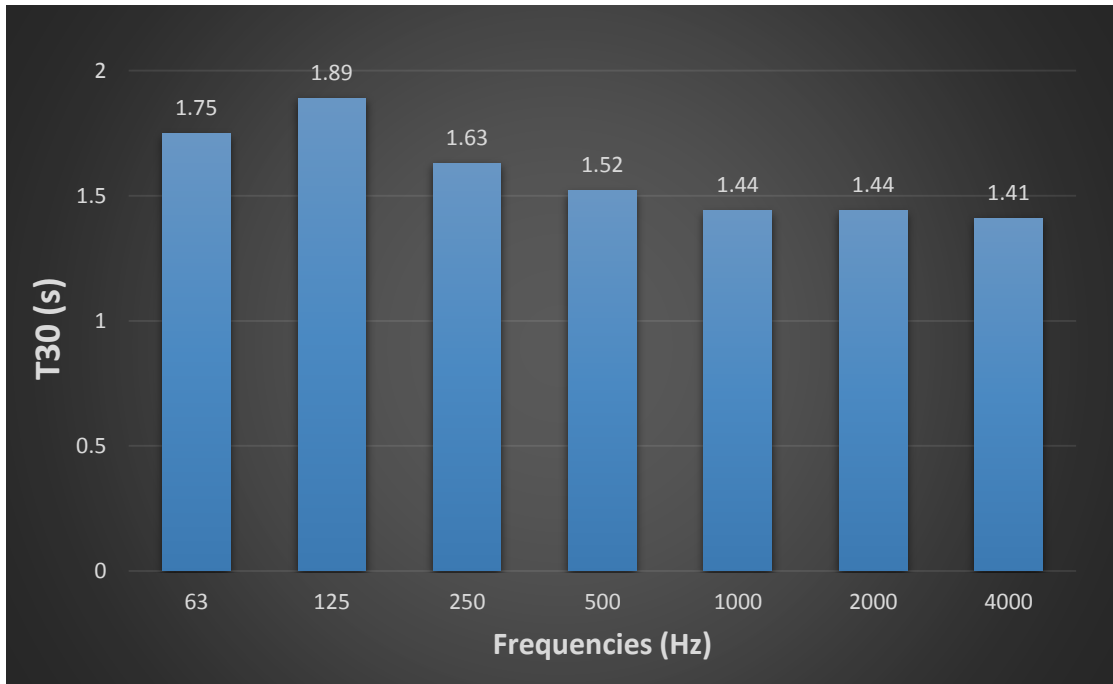




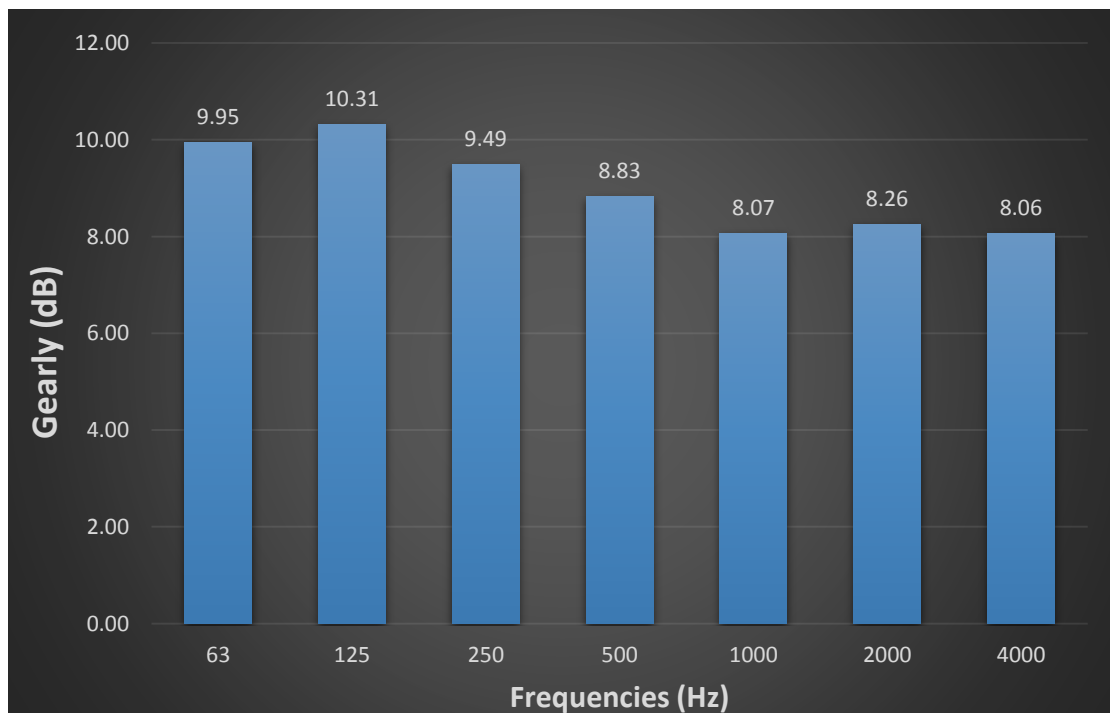
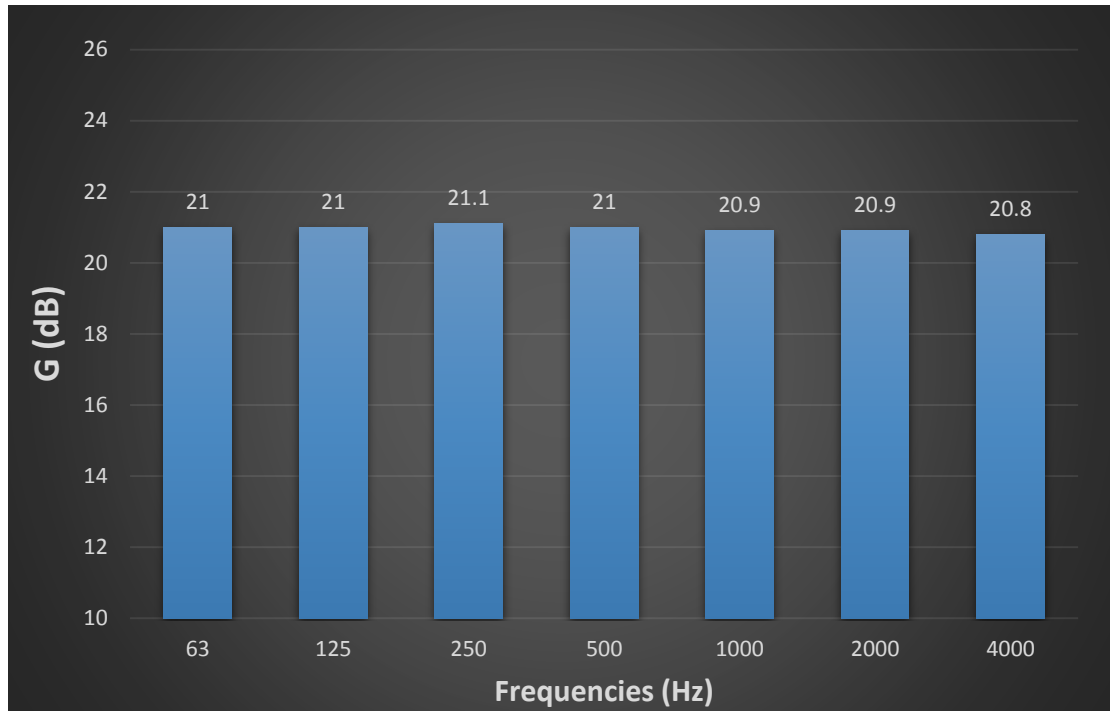
F.5.5. Κλίση 0°

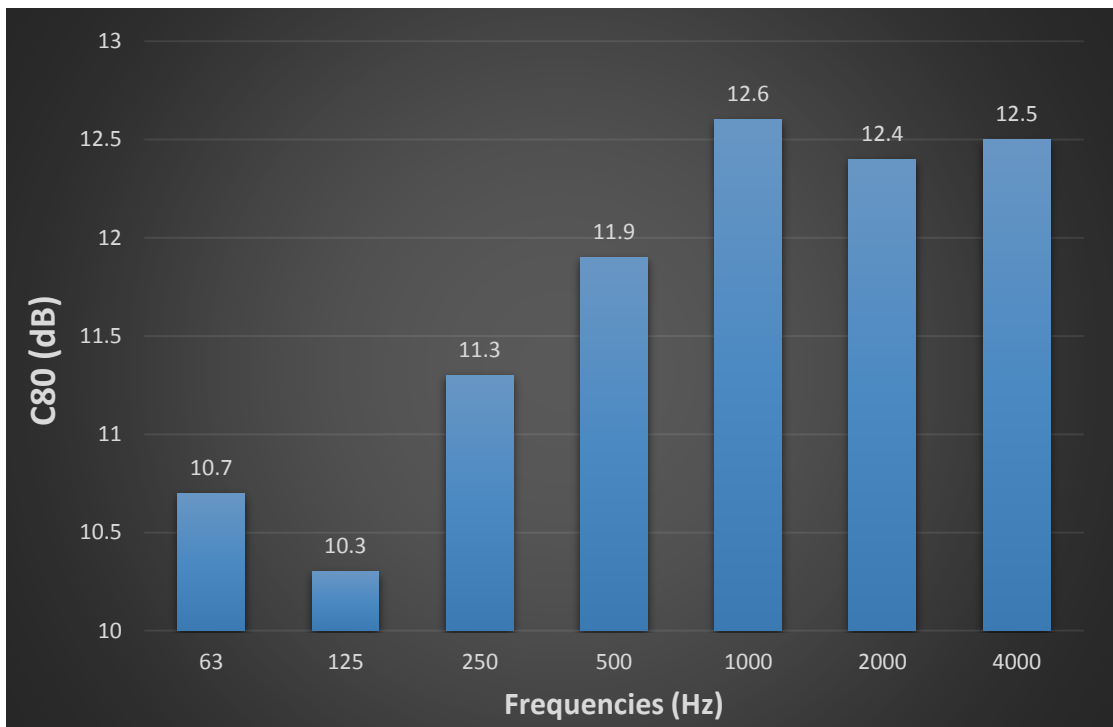
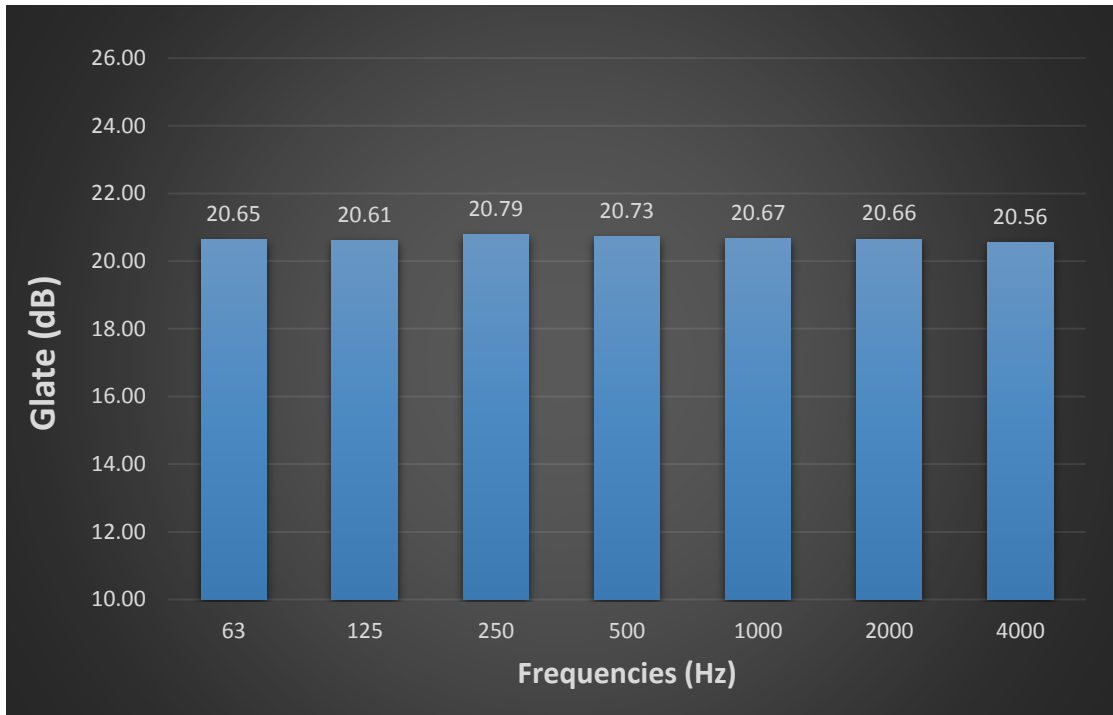


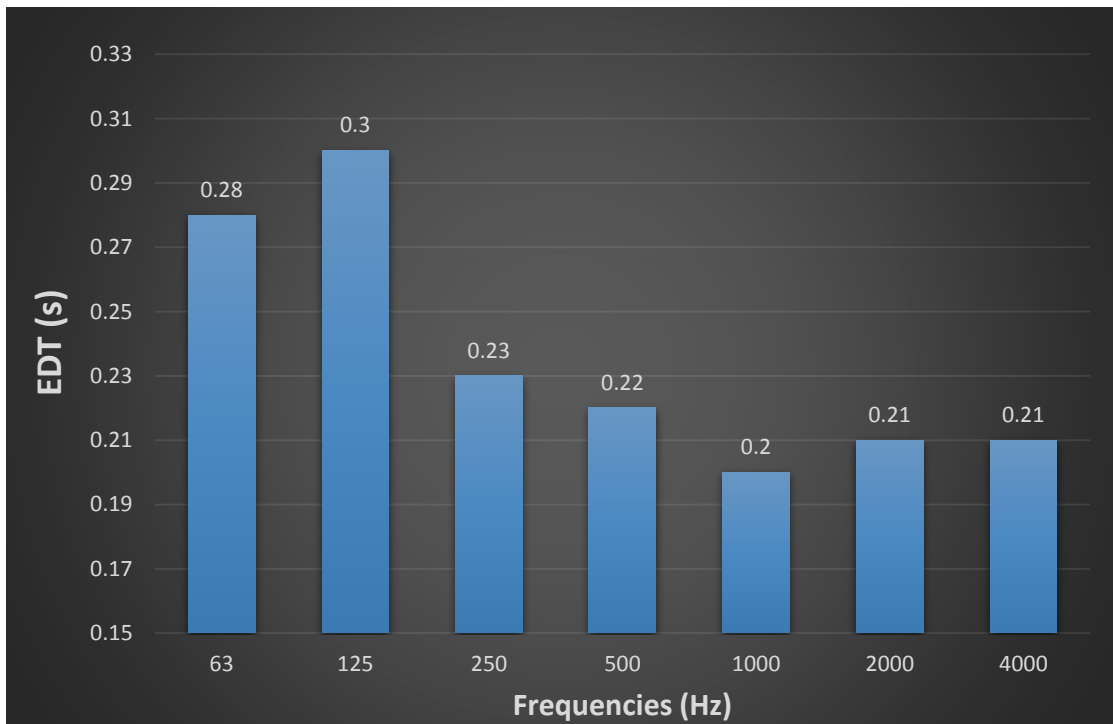
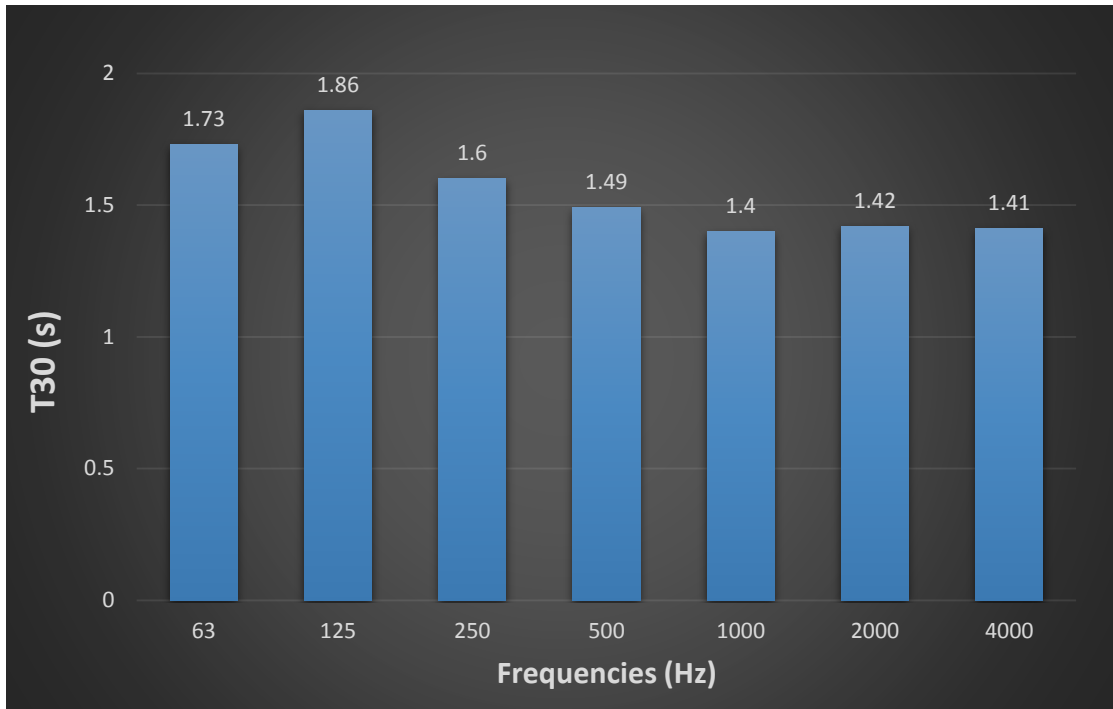




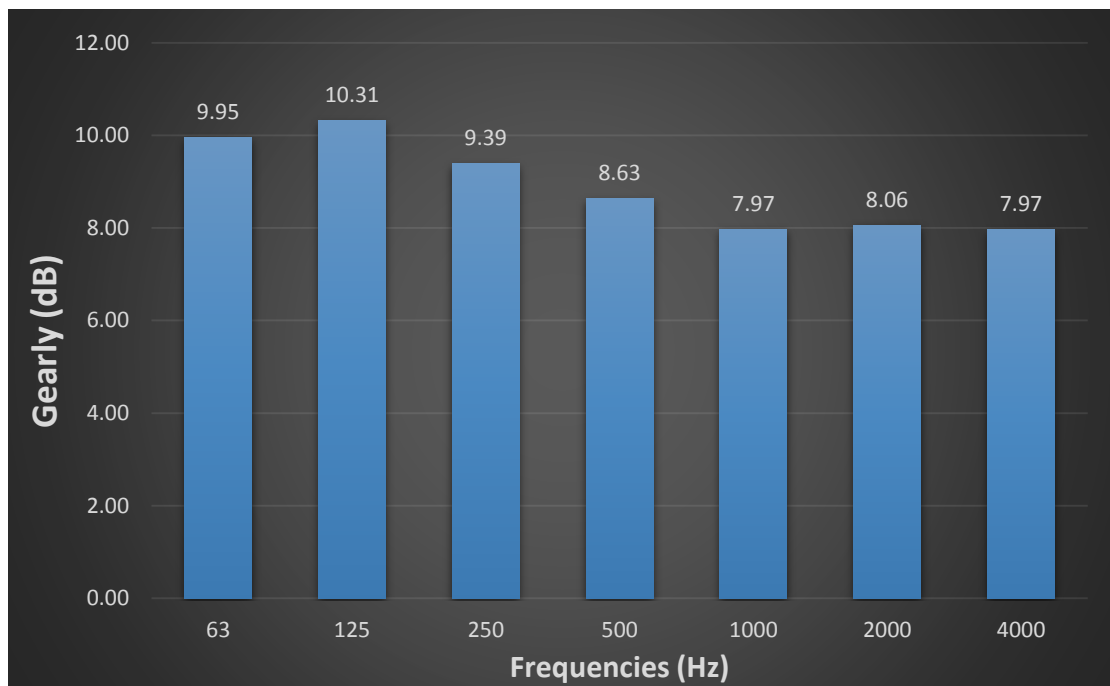
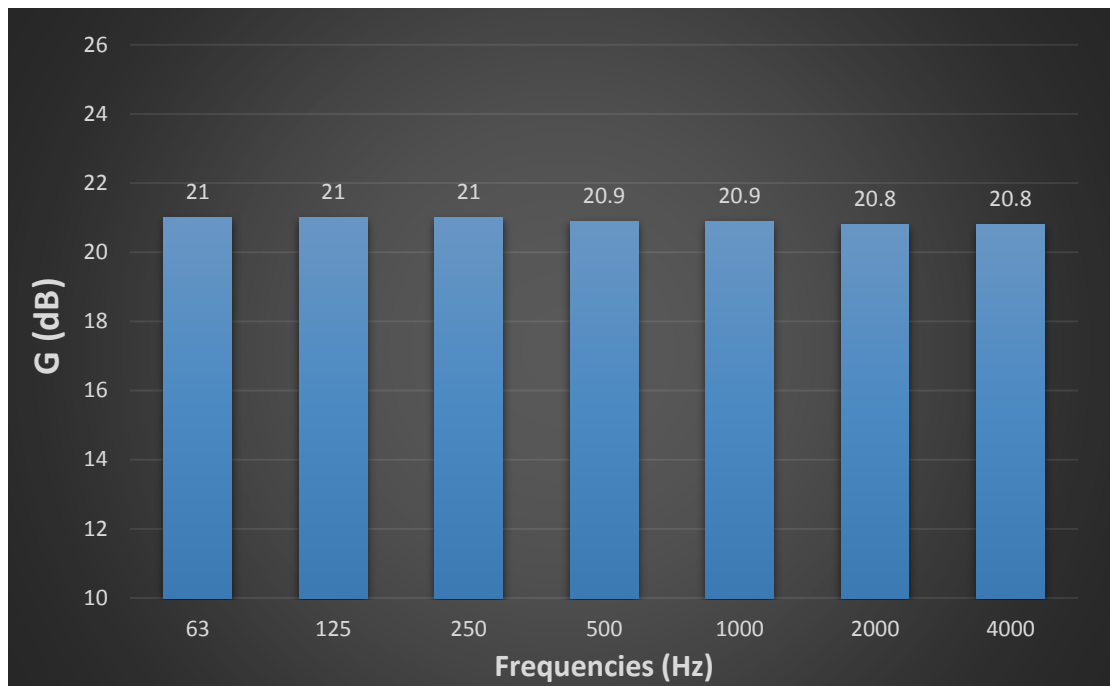
F.5.6. Κλίση -10°

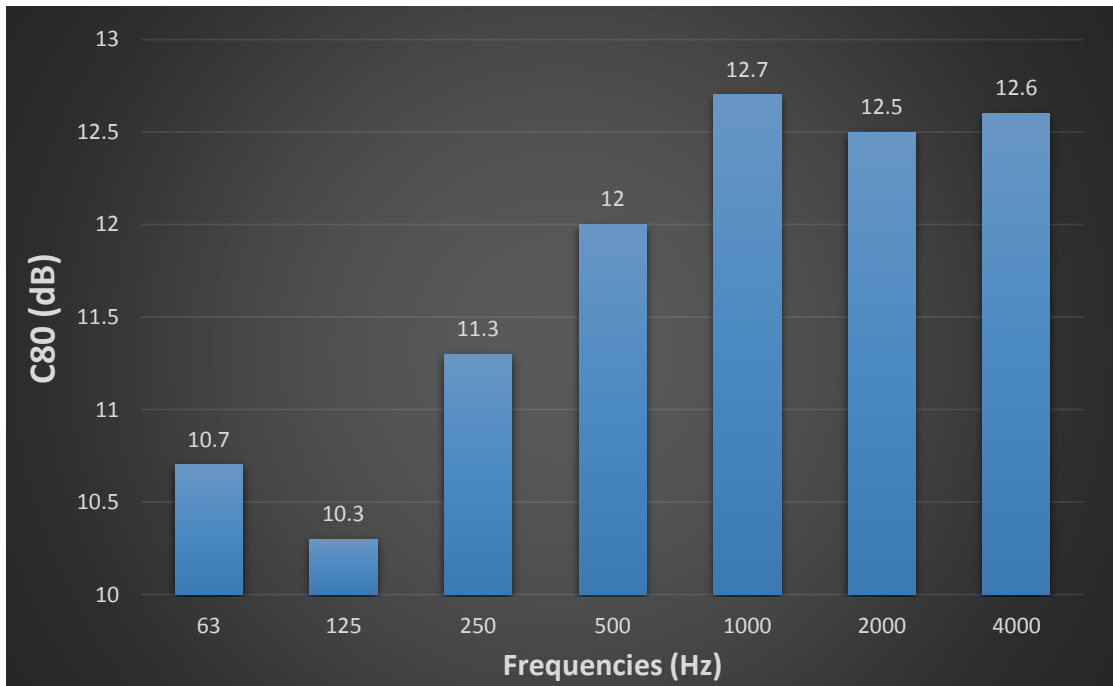
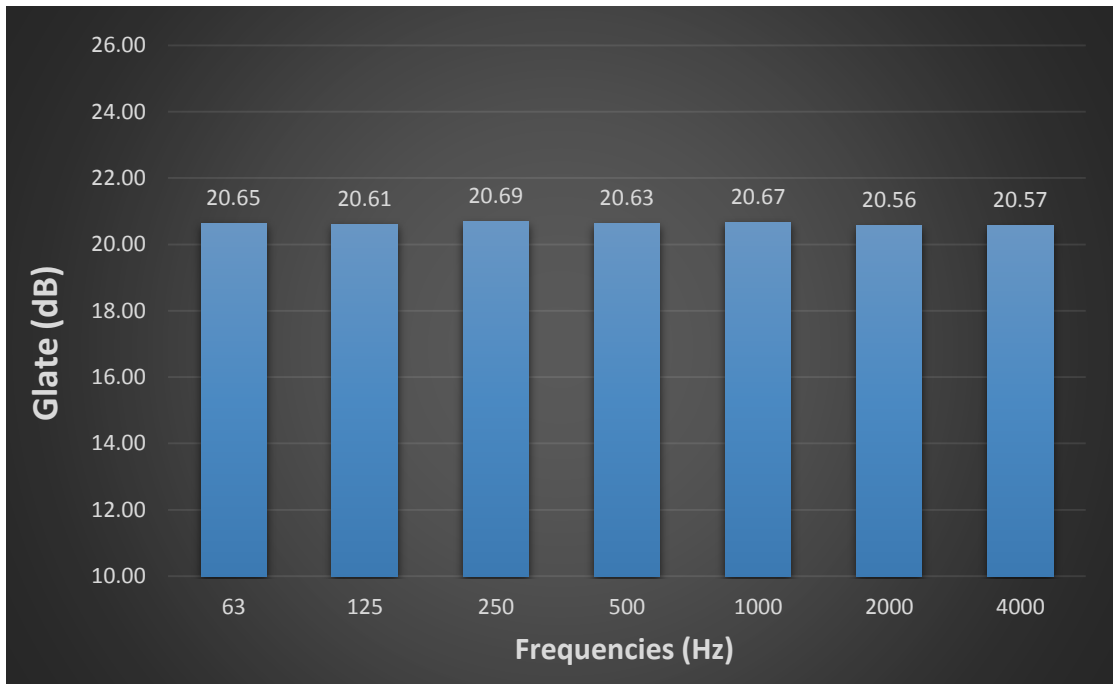


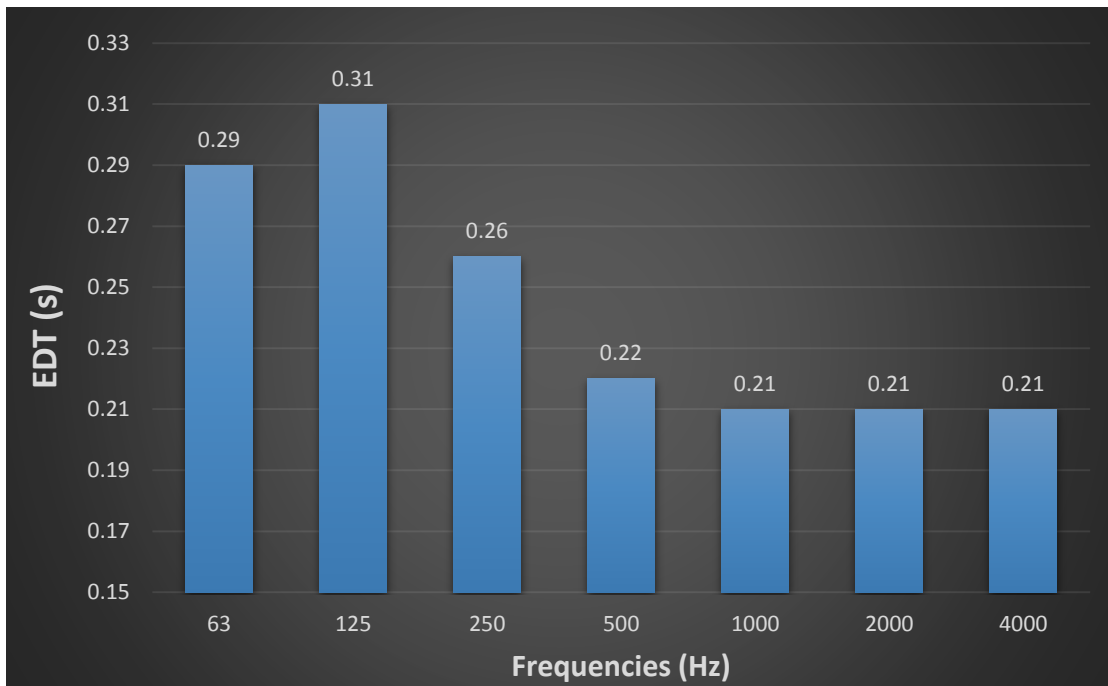
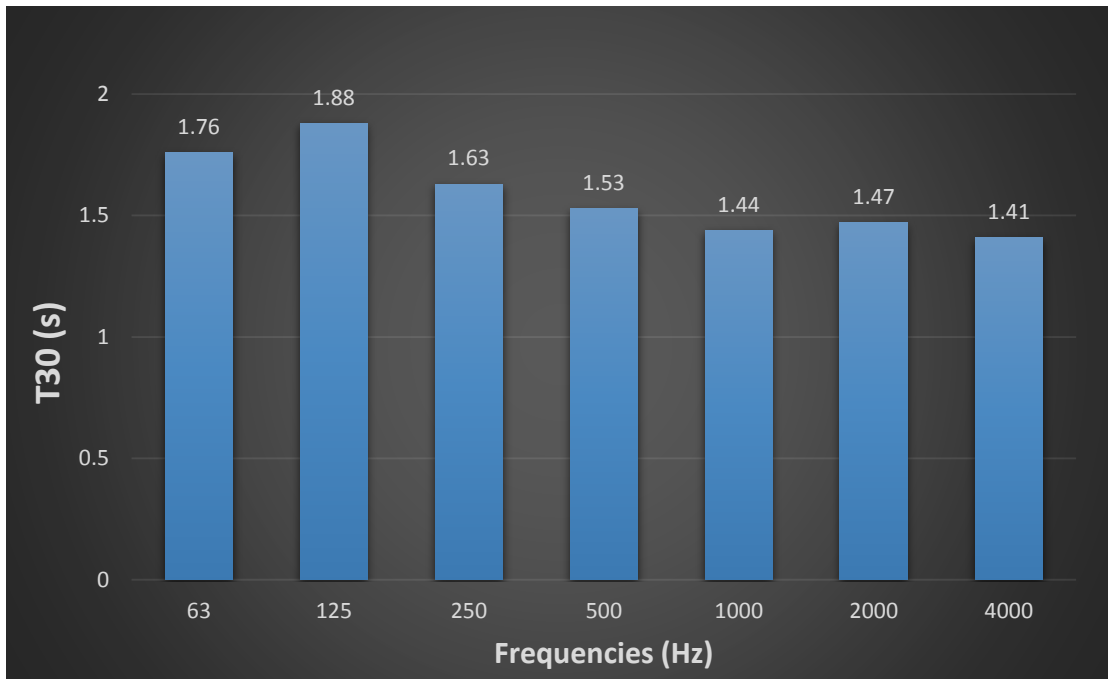




F.5.7. Κλίση -20°







F.5.8. Κλίση -30°

