ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής



Πτυχιακή εργασία

Σύγκριση μεθόδων μέτρησης του χρόνου αντήχησης κλειστών χώρων

Τσιλικιτίδης Νικόλαος

ΤΑ: 2142

Επιβλέποντες: ***Δρ. Μπακαρέζος Ευθύμιος***
Καθηγητής

Δρ. Μπρέζας Σπύρος
Μεταδιδακτορικός Ερευνητής

Ρέθυμνο, Ιούνιος 2025

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΟΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΟΠΤΟΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής

Τομέας .....

Πτυχιακή Εργασία

Σύγκριση μεθόδων μέτρησης του χρόνου αντήχησης κλειστών χώρων.

του

Τσιλικιτίδη Νικόλαου

Επιβλέποντες: ***Δρ. Μπακαρέζος Ευθύμιος***
Καθηγητής

Δρ. Μπρέζας Σπύρος
Μεταδιδακτορικός Ερευνητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την [Ημερομηνία …η …. ….].

.....	.....	.....
XXX XXX	XXX XXX	XXX XXX
Βαθμίδα	Βαθμίδα	Βαθμίδα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Μπρέζα Σπύρο που ανέλαβε την επίβλεψη αυτής της πτυχιακής, τη βοήθεια για την επιλογή του θέματος αυτής, αλλά και για την παραχώρηση του προσωπικού του εξοπλισμού για τις ανάγκες της εργασίας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την φίλη και συμφοιτήτρια Δέσποινα Γρηγορίου για την πολύτιμη βοήθειά της στη διεξαγωγή των ακουστικών μετρήσεων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή πραγματεύεται τη σύγκριση μεθόδων μέτρησης του χρόνου αντήχησης σε τρεις κλειστούς χώρους διαφορετικού όγκου και απορρόφησης. Η χρήση ηχόμετρου κλάσης Ι με δωδεκαεδρική ηχητική πηγή χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό τιμών αναφοράς. Εναλλακτικά με τις μετρήσεις αναφοράς, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις με ενεργό ηχείο δύο δρόμων, το οποίο εξέπεμπε ηχητικά σήματα προερχόμενα από εξωτερική γεννήτρια σημάτων και ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης πραγματοποιήθηκε από το ηχόμετρο. Επιπρόσθετα, η διέγερση και ο υπολογισμός της πτώσης του πεδίου πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση λογισμικού. Αρχικά διερευνήθηκε η ανάγκη μετρήσεων με στρέψη του ηχείου ώστε να προσομοιαστεί η ηχοβόληση του δωδεκάεδρου. Παράλληλα, εξετάστηκε ο υπολογισμός μίας κρουστικής απόκρισης μετά από κατάλληλη χρονική μετατόπιση των επιμέρους σημάτων. Στη συνέχεια, συγκρίθηκαν οι χρόνοι αντήχησης Τ20 και Τ30 μεταξύ των μεθόδων. Από τη σύγκριση προκύπτει ότι οι μετρήσεις με τη χρήση εξωτερικής γεννήτριας σήματος δύνανται να δώσουν παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της δωδεκαεδρικής πηγής. Στην περίπτωση του λογισμικού, η μέτρηση του χρόνου Τ20 δίνει αποτελέσματα με μικρή απόκλιση από τιμές αναφοράς, αφήνοντας τις μεγαλύτερες αποκλίσεις του χρόνου Τ30 ως πεδίο μελλοντικής εργασίας.

ABSTRACT

This thesis deals with the comparison of methods for measuring reverberation time in three enclosed spaces of different volumes and absorption. The use of a class I sound level meter with a dodecahedron was used to calculate reference values. As an alternative to the reference measurements, additional measurements were performed with a two-way active loudspeaker, which emitted sound signals fed by an external signal generator, while the calculation of the reverberation time was performed by the sound level meter. In more, excitation and calculation of the sound field decay were performed using acoustics software. Initially, the need for measurements with rotation of the loudspeaker was investigated to simulate the excitation of the dodecahedron. At the same time, the calculation of an impulse response after an appropriate time shift of the individual signals was considered. Subsequently, the reverberation times T20 and T30 among the methods were compared. The comparison shows that measurements using an external signal generator give similar results to those of the dodecahedral source. In the case of the software, the T20 time measurement gives results less deviated from reference values, leaving the larger deviations of the T30 time as a field for future work.

Ρέθυμνο, [ημέρα] [μήνας] [έτος]

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Τσιλικιτίδης Νικόλαος, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας & Ακουστικής του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου δεν υποδηλώνει απαραιτήτως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ i

ΠΕΡΙΛΗΨΗ i

ABSTRACT ii

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ iv

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ 1

1.1 Αντήχηση 1

1.2 Χρόνος αντήχησης 1

1.3 Θεωρητικοί υπολογισμοί του χρόνου αντήχησης 3

1.3.1 Ορισμός κατά SABINE 3

1.3.2 Υπολογισμός του χρόνου αντήχησης κατά NORRIS-EYRING 4

1.4 Χρησιμότητα του χρόνου αντήχησης 5

1.5 Μέθοδοι μέτρησης του χρόνου αντήχησης 6

1.5.1 Μέθοδος του παλμού 6

1.5.2 Μέθοδος του μηδενισμού της πηγής (θορύβου) 6

1.5.3 Μέθοδος ακολουθίας μέγιστου μήκους (MLS – Maximum Length Sequence) 7

1.6 Σήματα ακουστικής διέγερσης 7

1.6.1 Λευκός θόρυβος 7

1.6.2 Ροζ θόρυβος 7

1.6.3 Σάρωση συχνοτήτων 8

1.7 Κρουστική απόκριση χώρου 8

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ 9

2.1 Εξοπλισμός 9

2.2 Σκοπός των μετρήσεων 9

2.3 Διαδικασία των μετρήσεων 10

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 15

4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 28

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 30

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 54

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι θεωρητικές αρχές, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στην εξαγωγή και στην ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

1.1 Αντήχηση

Από την εμπειρία μας, έχουμε παρατηρήσει ότι ο ήχος γίνεται αντιληπτός διαφορετικά σε έναν κλειστό χώρο σε σχέση με έναν ανοικτό. Αν υποθέσουμε ότι σε ένα σημείο του δωματίου παράγουμε έναν ήχο με μικρή διάρκεια, για παράδειγμα χτυπώντας τα χέρια μας, ο ήχος θα διαδοθεί προς όλες τις κατευθύνσεις. Σύντομα θα φτάσει σε επαφή με την πλησιέστερη επιφάνεια, όπου ένα μέρος της ενέργειάς του θα απορροφηθεί και το υπόλοιπο θα ανακλαστεί.

Δημιουργείται έτσι η πρώτη ανάκλαση, που φτάνει στον ακροατή με καθυστέρηση έναντι του απευθείας ήχου. Στη συνέχεια, ο αρχικός ήχος συναντά και τις υπόλοιπες επιφάνειες του χώρου, από όπου επίσης ανακλάται. Στον ακροατή φτάνει μια σειρά ισχυρών και σχετικά απομονωμένων ανακλάσεων, που ονομάζουμε πρώτες ανακλάσεις. Στη συνέχεια, ο αριθμός των ανακλάσεων πολλαπλασιάζεται λόγω της πρόσπτωσης σε πολλές επιφάνειες, δηλαδή λόγω των ανακλάσεων που έχουν ανακλαστεί σε δύο ή περισσότερες επιφάνειες.

Η αντήχηση εξαρτάται από τις διαστάσεις του χώρου και την απορροφητικότητα των υλικών των επιφανειών του. Το αποτέλεσμα είναι μια "ουρά" η οποία προστίθεται στον αρχικό ήχο, προσδίδοντάς του μεγαλύτερη διάρκεια και ένταση. Ταυτόχρονα, όμως, παραμορφώνεται κάπως η χροιά του λόγω του φάσματος συχνοτήτων των ανακλάσεων, το οποίο εξαρτάται από τα υλικά του χώρου.

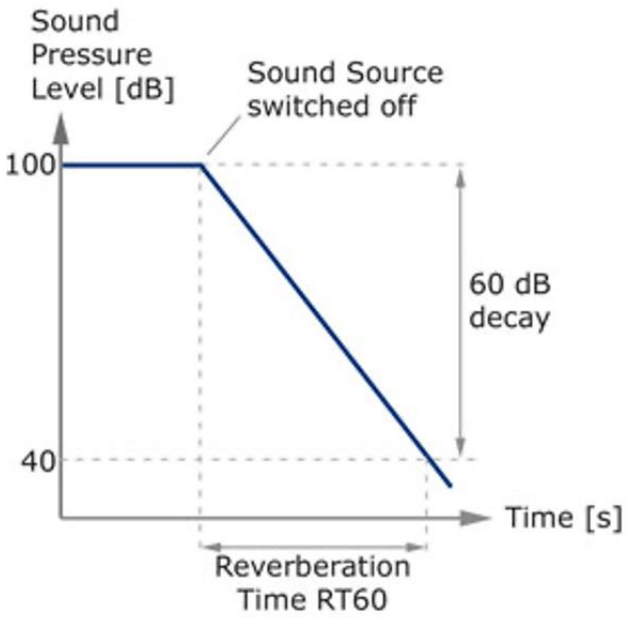
Η αντήχηση μπορεί να έχει είτε θετική είτε αρνητική επίδραση, και ο ρόλος του μηχανικού ακουστικής είναι να σχεδιάσει ή να προσαρμόσει τον χώρο, έτσι ώστε να συνεργάζεται βέλτιστα με το ακουστικό γεγονός που πρόκειται να λάβει χώρα σε αυτόν [1].

1.2 Χρόνος αντήχησης

Ως χρόνος αντήχησης ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται ώστε η στάθμη θορύβου (Lp) να ελαττωθεί κατά 60 dB, μετά το μηδενισμό της πηγής.

Ο χρόνος αντήχησης είναι ένας ζωτικός παράγοντας στην ακουστική κλειστών χώρων, καθώς σχετίζεται με την ποιότητα του ήχου σε αυτούς. Ο χρόνος αυτός εξαρτάται από τη συχνότητα του ήχου και καθορίζεται για κάθε οκτάβα ή τριτοκτάβα. Παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο αντήχησης περιλαμβάνουν την απορρόφηση του χώρου και τον όγκο του.

Στο σενάριο μιας ισοτροπικής πηγής ήχου στο κέντρο μιας αίθουσας, η ενέργεια από την πηγή διαχέεται προς όλες τις κατευθύνσεις. Η ενέργεια αυξάνεται εκθετικά στην αρχή, αλλά μετά από ένα χρονικό διάστημα τα διαδιδόμενα ηχητικά κύματα ανακλώνται και απορροφούνται από τις ανακλαστικές επιφάνειες της αίθουσας. Ο χρόνος αντήχησης είναι αυτός που απαιτείται ώστε η ενέργεια να μειωθεί κατά 60 dB ή η ηχητική πίεση να ελαττωθεί κατά 1.000.000 φορές [2].



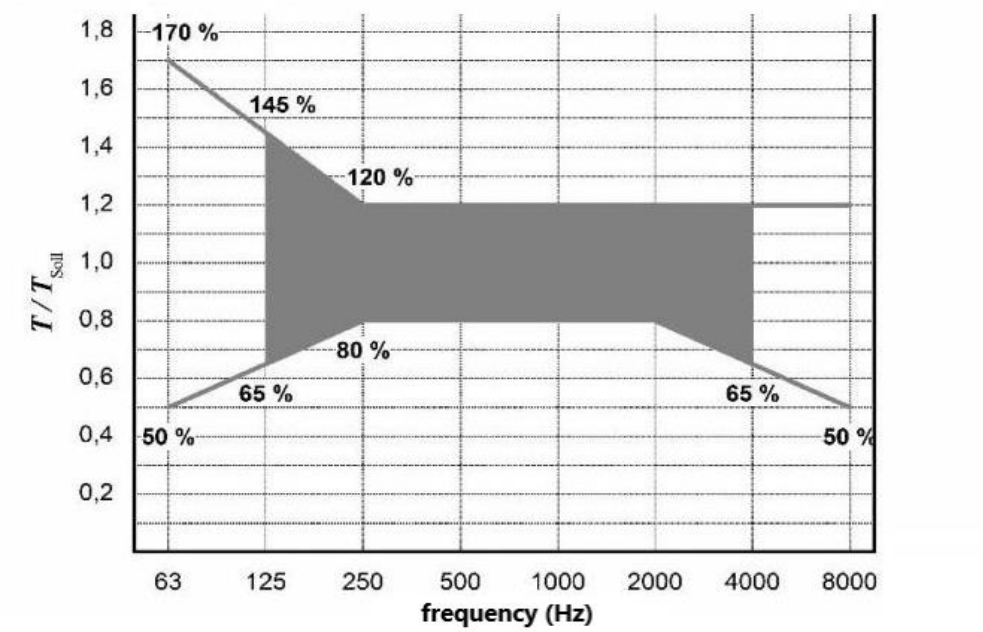
ΕΙΚΟΝΑ 1: Διάγραμμα της μείωσης της στάθμης ηχητικής πίεσης του ηχητικού πεδίου.

[Πηγή: www.nti-audio.com]

Για κλειστούς χώρους όπου απαιτείται υψηλή κατανόηση του λόγου, επιθυμούμε μικρό χρόνο αντήχησης. Αυτό περιλαμβάνει αίθουσες διδασκαλίας και διαλέξεων. Σε αντίθεση, για μουσικούς χώρους, ο χαρακτήρας της μουσικής σύνθεσης επηρεάζει τον επιθυμητό χρόνο αντήχησης. Γρήγορες μουσικές φράσεις απαιτούν μικρό χρόνο αντήχησης , ενώ αργές ροές μουσικής επωφελούνται από μεγαλύτερο, όπως συμβαίνει σε εκκλησίες ή μουσική της Αναγέννησης.

Επίσης, ο χρόνος αντήχησης πρέπει να είναι σχετικά σταθερός στο φάσμα των συχνοτήτων από 250 Hz ως 4 kHz, με κάποια ανοχή στις πολύ χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Ο ιδανικός χρόνος αντήχησης εξαρτάται από τον όγκο του χώρου, το συχνοτικό περιεχόμενο των ήχων και τον σκοπό χρήσης του χώρου.

Συνοπτικά, ο χρόνος αντήχησης προσαρμόζεται στις απαιτήσεις κάθε χώρου, είτε πρόκειται για ομιλία είτε για μουσική, βελτιώνοντας την ακουστική εμπειρία των ανθρώπων.



ΕΙΚΟΝΑ 2: Άνω και κάτω όριο της αναλογίας του χρόνου αντήχησης ενός χώρου προς τον προτεινόμενο χρόνο αντήχησης, ο οποίος καθορίζεται από τη χρήση του.

1.3 Θεωρητικοί υπολογισμοί του χρόνου αντήχησης

1.3.1 Ορισμός κατά SABINE

Μια απλή και διαδεδομένη μέθοδος για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης είναι αυτή που προτάθηκε από τον Sabine. Αυτή η σχέση ισχύει αρκετά καλά για χώρους με μικρή απορρόφηση ήχου. Η σχέση του Sabine δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$RT_{60} = \frac{0.161 * V}{A_S} \quad (1)$$

όπου

RT_{60}: ο χρόνος αντήχησης σε s

V: ο όγκος του δωματίου σε m^3

A_S: η απορρόφηση του δωματίου σε Sabines

Η απορρόφηση του χώρου δίνεται από τη σχέση:

$$A_S = a_1 s_1 + a_2 s_2 \ldots + a_n s_n \quad (2)$$

όπου: a_1, a_2 οι συντελεστές απορρόφησης των επιφανειών του χώρου

s_1, s_2: το αντίστοιχο εμβαδό της κάθε επιφάνειας

Ο Sabine εισήγαγε την πρώτη προσεγγιστική μέθοδο για τον υπολογισμό του χρόνου αντήχησης, η οποία εξακολουθεί να χρησιμοποιείται σήμερα. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι ο ήχος διαχέεται ομοιόμορφα σε όλο τον χώρο και απορροφάται ομοιόμορφα από τις επιφάνειές του, πράγμα που σπάνια συμβαίνει στην πραγματικότητα. Το μοντέλο του Sabine παρέχει ακριβή αποτελέσματα όταν οι επιφάνειες έχουν μικρή απορρόφηση, δηλαδή έναν μέσο συντελεστή απορρόφησης κάτω από 0.3. Ωστόσο, όταν η απορρόφηση είναι υψηλότερη, το μοντέλο αποκλίνει σημαντικά από τα πραγματικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, εάν υποθέσουμε ότι όλες οι επιφάνειες ενός χώρου είναι πλήρως απορροφητικές και επομένως ο συντελεστής απορρόφησης είναι α=1, τότε η σχέση δίνει μια τιμή για τον χρόνο αντήχησης, η οποία είναι πεπερασμένη, ενώ στην πράξη αυτό δεν είναι δυνατόν. Ως εκ τούτου, στη βιβλιογραφία συναντώνται διαφορετικές τιμές για τον συντελεστή της σχέσης, όπως 0.16, 0.161, 0.162, 0.163 και 0.164, λόγω της εμπειρικής φύσης της σχέσης. [3]

1.3.2 Υπολογισμός του χρόνου αντήχησης κατά NORRIS-EYRING

Ο C.F. Eyring παρατήρησε την αδυναμία του μοντέλου του Sabine να προβλέψει σωστά τον χρόνο αντήχησης ενός χώρου με πλήρη απορρόφηση του ήχου. Αντί να τείνει στο μηδέν, όπως θα αναμενόταν, ο χρόνος αντήχησης παραμένει σημαντικός. Ο Eyring υπέθεσε ότι ο ήχος που προκαλείται από μια πηγή στο χώρο ανακλάται συνεχώς στις επιφάνειές του, οι οποίες θεωρείται ότι έχουν όλες συντελεστή απορρόφησης ίσο με τον μέσο συντελεστή απορρόφησης $\bar{a}$. Κάθε φορά που ένα ηχητικό κύμα ανακλάται σε μια από τις επιφάνειες, ένα ποσοστό $\bar{a}$ της ενέργειας απορροφάται, ενώ το υπόλοιπο$(1 - \bar{a})$ ανακλάται [3].

Η μέση ελεύθερη διαδρομή αναφέρεται στον μέσο όρο της απόστασης που διανύει το ηχητικό κύμα μεταξύ των ανακλάσεων στις επιφάνειες που περικλείουν ένα χώρο. Αυτή η μέση ελεύθερη διαδρομή υπολογίζεται πειραματικά σε πολύ μεγάλους χώρους, όπου τα ηχητικά πεδία είναι ομογενή, με τον ακόλουθο τύπο:

$$\overline{lm} = \frac{4V}{S} \tag{3}$$

όπου

V: ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα m^3

S: το εμβαδό των επιφανειών του χώρου σε m^2

Επομένως ο αριθμός των ανακλάσεων ανά δευτερόλεπτο θα είναι:

$$N = \frac{c\,S}{4\,V} \tag{4}$$

όπου:

c: η ταχύτητα του ήχου στον αέρα σε m/s

S: το εμβαδό των επιφανειών του χώρου σε m^2

Ο χρόνος αντήχησης σύμφωνα με τον Eyring δίνεται από τη σχέση:

$$RT_{60} = \frac{0.161 * V}{-S \ln(1-\bar{a})} \tag{5}$$

V: Ο όγκος του δωματίου σε κυβικά μέτρα m^3

S: το εμβαδό των επιφανειών του χώρου σε m^2

$\bar{a}$: Ο μέσος συντελεστής απορρόφησης που δίνεται από τη σχέση:

$$\bar{a} = \frac{a_1 s_1 + a_2 s_2 \ldots + a_n s_n}{S_1 + S_2 + \cdots + S_n} \tag{6}$$

Όσο πιο ομοιόμορφη είναι η απορρόφηση όλων των επιφανειών του χώρου τόσο πιο ακριβής είναι η σχέση [3].

1.4 Χρησιμότητα του χρόνου αντήχησης

Ο χρόνος αντήχησης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για την ακουστική των χώρων, καθώς επηρεάζει τον βαθμό διάχυσης του ήχου. Σύμφωνα με τον Shroeder, η συχνότητα αποκοπής (f_c), που ορίζεται από τη σχέση:

$$f_c = 2000\left(\frac{T}{V}\right)^{1/2} \tag{7}$$

αντιστοιχεί στη χαμηλότερη συχνότητα όπου το αντηχητικό πεδίο θεωρείται διάχυτο, επιτρέποντας τη χρήση των αρχών της στατιστικής ακουστικής. Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, το διάχυτο πεδίο επικρατεί, μειώνοντας τα σφάλματα μέτρησης. Σημαντικός είναι επίσης ο ρόλος του χρόνου αντήχησης στην ακουστική του χώρου. Ένα δωμάτιο με μεγάλο χρόνο αντήχησης μπορεί να προκαλέσει επικάλυψη των συλλαβών και να δυσκολεύει την επικοινωνία. Η επιλογή του κατάλληλου χρόνου αντήχησης βελτιώνει την ακουστική συμπεριφορά του χώρου. Συνήθως υπολογίζεται για τις συχνότητες των 500 Hz ή 1000 Hz, εκεί όπου η ανθρώπινη ομιλία περιλαμβάνει τη μέγιστη ενέργεια [2].

1.5 Μέθοδοι μέτρησης του χρόνου αντήχησης

Για να μετρήσουμε τον χρόνο αντήχησης χρειαζόμαστε μια πηγή ήχου για τη διέγερση του χώρου και τη δημιουργία του αντηχητικού πεδίου και ένα όργανο λήψης ήχου π.χ. ηχόμετρο. Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι μέτρησης του χρόνου αντήχησης.

1.5.1 Μέθοδος του παλμού

Σε αυτή τη μέθοδο, δημιουργούμε έναν παλμό σε έναν χώρο, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα ένα πιστόλι ή ένα μπαλόνι που σκάει. Καταγράφουμε αμέσως τη μείωση της έντασης του ηχητικού πεδίου με την πάροδο του χρόνου έως ότου φτάσει στο μηδέν. Για την καταγραφή χρησιμοποιούμε ένα ηχόμετρο με φασματικό αναλυτή, έτσι ώστε να μπορούμε να μετρήσουμε ξεχωριστά σε διαφορετικές οκτάβες (με διαφορετικό ρυθμό πτώσης με τη συχνότητα). Βασιζόμαστε στις κλίσεις των καμπύλων για να υπολογίσουμε και να παρουσιάσουμε τον χρόνο αντήχησης.

Η προαναφερθείσα μέθοδος παρουσιάζει δύο κύρια μειονεκτήματα:

1) Δεν παρέχει επαρκή ηχητική ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες του ηχητικού φάσματος, εκτός αν χρησιμοποιηθούν εκρηκτικές ύλες για τη δημιουργία παλμών.
2) Χαμηλή επαναληψιμότητα. Αυτό σημαίνει ότι η μέθοδος δεν μπορεί να επαναληφθεί με ακρίβεια σε διάφορες πειραματικές συνθήκες, προκαλώντας δυσκολίες στη σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα σε διαφορετικές μετρήσεις ή δοκιμές [3].

1.5.2 Μέθοδος του μηδενισμού της πηγής (θορύβου)

Μια εναλλακτική μέθοδος είναι να διεγείρουμε έναν χώρο με θόρυβο, είτε λευκό είτε ροζ, μέχρι να φτάσουμε σε μια κατάσταση ισορροπίας. Ο χρόνος που απαιτείται για αυτό το φαινόμενο μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τον χώρο. Αφού φτάσουμε σε αυτήν την κατάσταση, διακόπτουμε την πηγή θορύβου ακαριαία. Έπειτα, ακολουθούμε την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε στη μέθοδο του παλμού από τη στιγμή που διακόψαμε την πηγή.

Κάποια πλεονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1) Η πηγή θορύβου παράγει μεγαλύτερες ποσότητες ηχητικής ενέργειας, ιδιαίτερα σημαντικό σε χώρους με υψηλά επίπεδα θορύβου.
2) Εκπέμπει ηχητική ενέργεια σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων.

1.5.3 Μέθοδος ακολουθίας μέγιστου μήκους (MLS – Maximum Length Sequence)

Για την αξιολόγηση της απόκρισης σε κλειστούς χώρους, οι Schröder και Alrutz ανέπτυξαν τη μέθοδο της εκπομπής ενός ψευδοτυχαίου σήματος που έχει παρόμοιες ιδιότητες με τον τυχαίο θόρυβο. Αυτή η ακολουθία ονομάζεται μέγιστου μήκους MLS (Maximum Length Sequence).

Η μέτρηση του χρόνου αντήχησης με τη μέθοδο MLS έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

1) Είναι πολύ λίγο ευαίσθητη σε εξωτερικούς θορύβους, δηλαδή επιτυγχάνουμε μεγάλο λόγο σήματος προς θόρυβο (S/N).
2) Η ακολουθία είναι στάσιμη και έχει περίοδο $l=2^n-1$ (όπου n θετικός αριθμός). Κάθε δείγμα της ακολουθίας έχει τιμή +1 ή -1, αποτελείται δηλαδή από συναρτήσεις δέλτα του Dirac [3].

1.6 Σήματα ακουστικής διέγερσης

1.6.1 Λευκός θόρυβος

Ο λευκός θόρυβος μοιάζει με το λευκό φως, καθώς η ενέργειά του κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων. Αυτό σημαίνει ότι η μέση ισχύς του λευκού θορύβου είναι η ίδια σε κάθε ζώνη συχνοτήτων του 1 Hz. Με άλλα λόγια, η ενέργειά του κατανέμεται ομοιόμορφα σε κάθε διαφορετική συχνότητα. Συχνά αναφέρεται ότι ο λευκός θόρυβος έχει την ίδια ενέργεια ανά Hz. Κατά συνέπεια, σε λογαριθμική κλίμακα συχνοτήτων, ο λευκός θόρυβος φαίνεται να έχει επίπεδη κατανομή ενέργειας με τη συχνότητα. Καθώς η κάθε επόμενη οκτάβα περιλαμβάνει διπλάσιες ζώνες του 1 Hz σε σχέση με την προηγούμενη, η ενέργεια του λευκού θορύβου διπλασιάζεται σε κάθε επόμενη οκτάβα. Ακουστικά, ο λευκός θόρυβος ακούγεται σαν ένα συνεχές σφύριγμα υψηλής συχνότητας [4].

1.6.2 Ροζ θόρυβος

Ο ροζ θόρυβος είναι ένας τύπος θορύβου που έχει ίση μέση ισχύ σε κάθε ζώνη οκτάβας (ή 1/3 οκτάβας). Καθώς κάθε επόμενη οκτάβα ενσωματώνει διαδοχικά μεγαλύτερες περιοχές συχνοτήτων, ο ροζ θόρυβος έχει μεγαλύτερη ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες. Συγκεκριμένα, ορίζεται ως θόρυβος μεγάλης ενέργειας στις χαμηλές συχνότητες, με συγκεκριμένη κλίση 3 dB ανά οκτάβα.

Γενικά, ο ροζ θόρυβος είναι πιο κοντά στον τρόπο που τα αυτιά μας αντιλαμβάνονται υποκειμενικά τους ήχους, ενώ ο λευκός θόρυβος συνήθως χρησιμοποιείται για ηλεκτρικές μετρήσεις. Η κατανομή ενέργειας του ροζ θορύβου προσεγγίζει

περισσότερο τον τρόπο με τον οποίο το ανθρώπινο αυτί αντιλαμβάνεται τους ήχους [4].

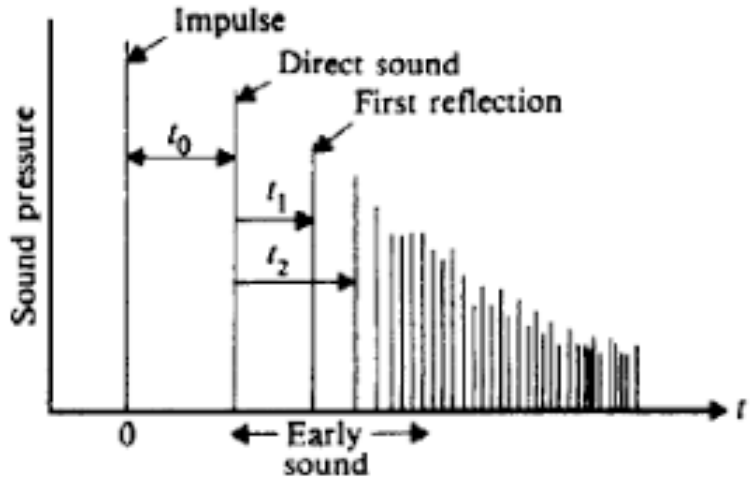
1.6.3 Σάρωση συχνοτήτων

Η ημιτονοειδής σάρωση χρησιμοποιεί μια ημιτονοειδή συνάρτηση που αλλάζει σταδιακά τη συχνότητα με την πάροδο του χρόνου. Τυπικά μια ημιτονοειδής συνάρτηση εκτείνεται σε όλο το φάσμα συχνοτήτων (20 Hz – 20 kHz) για το πλήρες φάσμα της ανθρώπινης ακοής. Η διάρκεια μιας ημιτονοειδούς σάρωσης εξαρτάται από παράγοντες, όπως ο χρόνος αντήχησης και η στάθμη θορύβου βάθους, αλλά συνήθως διαρκεί από 3 έως 20 δευτερόλεπτα.

Μια γραμμική ημιτονοειδής σάρωση αυξάνει ή μειώνει τη συχνότητα με σταθερό γραμμικό ρυθμό με την πάροδο του χρόνου, ενώ μια λογαριθμική σάρωση το κάνει με εκθετικό ρυθμό, διεγείροντας περισσότερο χρόνο τις χαμηλές συχνότητες από ότι τις υψηλές. Η γραμμική σάρωση διεγείρει για ίσο χρόνο κάθε συχνότητα [4].

1.7 Κρουστική απόκριση χώρου

Η κρουστική απόκριση ενός χώρου (Impulse Response - IR) είναι ένα από τα πιο βασικά εργαλεία στην ακουστική ανάλυση. Περιγράφει πως ένας χώρος αντιδρά σε έναν στιγμιαίο ηχητικό παλμό και περιέχει όλες τις πληροφορίες για τον χρόνο αντήχησης, τις πρώτες ανακλάσεις και τη διάχυση του ήχου. Από την κρουστική απόκριση μπορούμε να εξάγουμε τον χρόνο αντήχησης [5].



ΕΙΚΟΝΑ 3: Διάγραμμα κρουστικής απόκρισης δωματίου (RIR)
[Πηγή: Σημειώσεις εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Ακουστικής ΕΛΜΕΠΑ.]

Αποτελείται από τρία βασικά μέρη:
1) Τον απευθείας ήχο (Direct Sound) που φτάνει στην πηγή χωρίς ανακλάσεις.
2) Τις πρώτες ανακλάσεις (Early Reflections) που φτάνουν στον δέκτη μέσα στα

πρώτα ~50ms και επηρεάζουν την αίσθηση του χώρου.
3) Την αντήχηση (Reverberation), δηλαδή πολλαπλές διαδοχικές ανακλάσεις.

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η διαδικασία των μετρήσεων καθώς και τα αποτελέσματα αυτών.

2.1 Εξοπλισμός

Για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε χωρίστηκε σε δύο κατηγορίες, με την πρώτη να περιλαμβάνει εξοπλισμό που καλύπτει τις απαιτήσεις προτυποποιημένων μετρήσεων και τη δεύτερη εξοπλισμό που δεν καλύπτει τέτοιες απαιτήσεις.

Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει:

- Ηχόμετρο κλάσης 1, τύπου Cesva, μοντέλο SC310
- Πανκατευθυντική πηγή ήχου, τύπου NTI, μοντέλο DS3
- Γεννήτρια και ενισχυτή σήματος, τύπου NTI, μοντέλο PA3
- Γεννήτρια σήματος, τύπου NTI, μοντέλο Minirator MR2
- Βαθμονομητή ηχομέτρου, τύπου Cirrus, μοντέλο CR 511E

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει:

- Αυτοενισχυόμενο ηχείο δυο δρόμων, τύπου RCF, μοντέλο ART 325A
- Μικρόφωνο μετρήσεων, τύπου, BeyerDynamic, μοντέλο MM1
- Κάρτα ήχου τύπου Roland, μοντέλο Quad Capture
- Φορητό υπολογιστή που διαθέτει το λογισμικό ARTA

2.2 Σκοπός των μετρήσεων

Στόχος των μετρήσεων που θα αναλυθούν παρακάτω ήταν η μέτρηση του χρόνου αντήχησης σε τρεις χώρους διαφορετικού όγκου, απορρόφησης και χρήσης σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 3382-1 και ISO 3382-2, με απώτερο σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του διαφορετικού μετρητικού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της πτυχιακής. Μετρήθηκαν τρεις χώροι που περιλάμβαναν μια αίθουσα διδασκαλίας στο Τμήμα Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, το αμφιθέατρο του τμήματος και μία αίθουσα εργαστηρίου του ερευνητικού κέντρου I.P.P.L.

Οι μετρήσεις αυτές κατηγοριοποιήθηκαν βάσει του χρησιμοποιηθέντος εξοπλισμού σε μετρήσεις αναφοράς και σε μετρήσεις προς σύγκριση.

Οι μετρήσεις αναφοράς πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση της πανκατευθυντικής δωδεκαεδρικής πηγής ήχου του ηχόμετρου. Ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης πραγματοποιήθηκε από το ηχόμετρο και η ηχητική διέγερση των χώρων πραγματοποιήθηκε με σήμα ροζ θορύβου.

Οι επιπρόσθετες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του υπόλοιπου εξοπλισμού και είναι οι εξής:

Ως ηχητική πηγή χρησιμοποιήθηκε το ενεργό ηχείο δύο δρόμων, για το οποίο επιπροσθέτως διερευνήθηκε εάν είναι δυνατή η χρήση του αντί του δωδεκαεδρικού ηχείου. Για την προαναφερθείσα χρήση έλαβαν χώρα μετρήσεις με περιστροφή του ηχείου των δύο δρόμων και διερεύνηση της δυνατότητας συνδυασμού των επιμέρους μετρήσεων για τον υπολογισμό της πτώσης του ηχητικού πεδίου.

Η τροφοδοσία της ηχητικής πηγής πραγματοποιήθηκε από την εξωτερική γεννήτρια σήματος τροφοδοτώντας απευθείας το ενεργό ηχείο, αλλά και από το λογισμικό ARTA τροφοδοτώντας το ενεργό ηχείο μέσω της εξωτερικής κάρτας ήχου, ενώ η λήψη των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε εξ ολοκλήρου με το μετρητικό μικρόφωνο. Η διέγερση του χώρου πραγματοποιήθηκε με τα εξής ηχητικά σήματα: λευκού και ροζ θορύβου, γραμμικής και λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων, καθώς και με ακολουθία μέγιστου μήκους (MLS). Για την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Matlab.

2.3 Διαδικασία των μετρήσεων

Ξεκινώντας τις μετρήσεις βάσει του ISO 3382-1 και ISO 3382-2 τηρήθηκαν οι εξής απαιτήσεις:

- Οι θέσεις της ηχητικής πηγής κατά τη διάρκεια των μετρήσεων βρισκόταν σε σημεία όπου υπό κανονικές συνθήκες υπήρχαν φυσικές πηγές ήχου στον εκάστοτε χώρο.
- Το ύψος του ακουστικού κέντρου της ηχητικής πηγής δεν ξεπέρασε το κατώτατο όριο της απόστασης του 1,5 m από το δάπεδο.
- Στις αίθουσες ομιλίας και μουσικής το ύψος του ηχομέτρου/μικροφώνου πάνω από το δάπεδο βρισκόταν σε ύψος 1,2 m όπου αντιστοιχεί στο ύψος του αυτιού του μέσου ακροατή σε τυπικές καρέκλες.
- Οι θέσεις του ηχομέτρου/μικροφώνου είχαν απόσταση μεταξύ τους τουλάχιστον 2 m.
- Οι θέσεις του ηχομέτρου/μικροφώνου απείχαν τουλάχιστον 1 m, το ¼ του μήκους κύματος για το συνηθισμένο εύρος συχνοτήτων από την πλησιέστερη ανακλαστική επιφάνεια και το δάπεδο.
- Καμία θέση μικροφώνου δεν ήταν κοντά σε οποιαδήποτε θέση ηχητικής πηγής, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερβολικά ισχυρή επιρροή από τον απευθείας ήχο.
- Το ηχόμετρο/μικρόφωνο τοποθετήθηκε σε σημεία που αντιστοιχούν σε ρεαλιστικές θέσεις ακροατών.

- Για μετρήσεις ακριβείας υπήρξαν 12 συνδυασμοί θέσεων ηχητικής πηγής-ηχομέτρου/μικροφώνου.

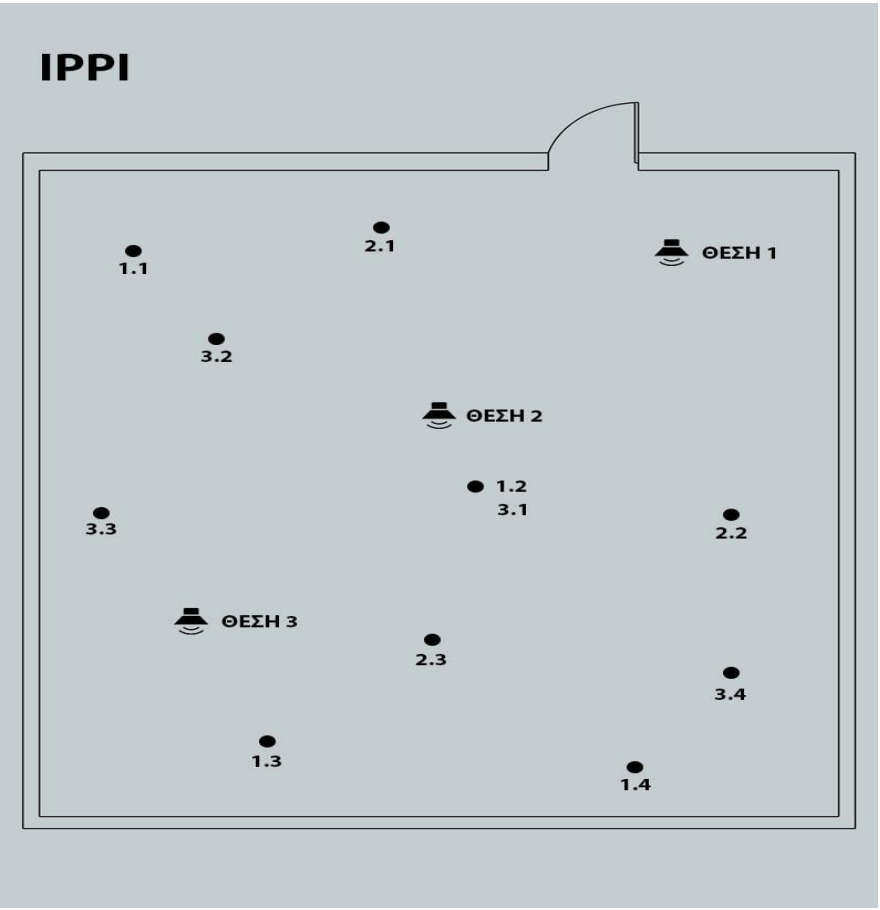
Στη συνέχεια της διαδικασίας των μετρήσεων και λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω απαιτήσεις μετρήθηκαν οι διαστάσεις των αιθουσών για τον υπολογισμό του όγκου αυτών, όπως επίσης έγιναν μετρήσεις της θερμοκρασίας και υγρασίας. Έπειτα σημειώθηκαν οι θέσεις πηγής και ηχομέτρου/μικροφώνου στο δάπεδο, σε συνδυασμό $3^{ων}$ θέσεων ηχητικής πηγής και $4^{ων}$ θέσεων ηχομέτρου/μικροφώνου για κάθε θέση ηχητικής πηγής, για την αίθουσα διδασκαλίας και την αίθουσα εργαστηρίου του ερευνητικού κέντρου. Στην αίθουσα του αμφιθεάτρου ο συνδυασμός ήταν 2 θέσεις ηχητικής πηγής και 6 θέσεις ηχομέτρου/μικροφώνου ικανοποιώντας έτσι τις απαιτήσεις για μετρήσεις ακριβείας.

Συνδεσμολογία μέτρησης	Πηγή ήχου	Υπολογισμός πτώσης ηχητικού πεδίου	Γεννήτρια σήματος	Σήμα διέγερσης	Γωνία μεταξύ του άξονα του ηχείου και του ηχόμετρου
1	Δωδεκάεδρο	Ηχόμετρο	Γεννήτρια σήματος με ενισχυτή	Ροζ θόρυβος	
2	Ενεργό ηχείο	Ηχόμετρο	Εξωτερική γεννήτρια σήματος	Ροζ και λευκός θόρυβος	0°, 90°, 180°, 270°
3	Ενεργό ηχείο	Μικρόφωνο μετρήσεων	Γεννήτρια σήματος του λογισμικού ARTA	Ροζ και λευκός θόρυβος, γραμμική και λογαριθμική σάρωση, MLS	0°, 90°, 180°, 270°

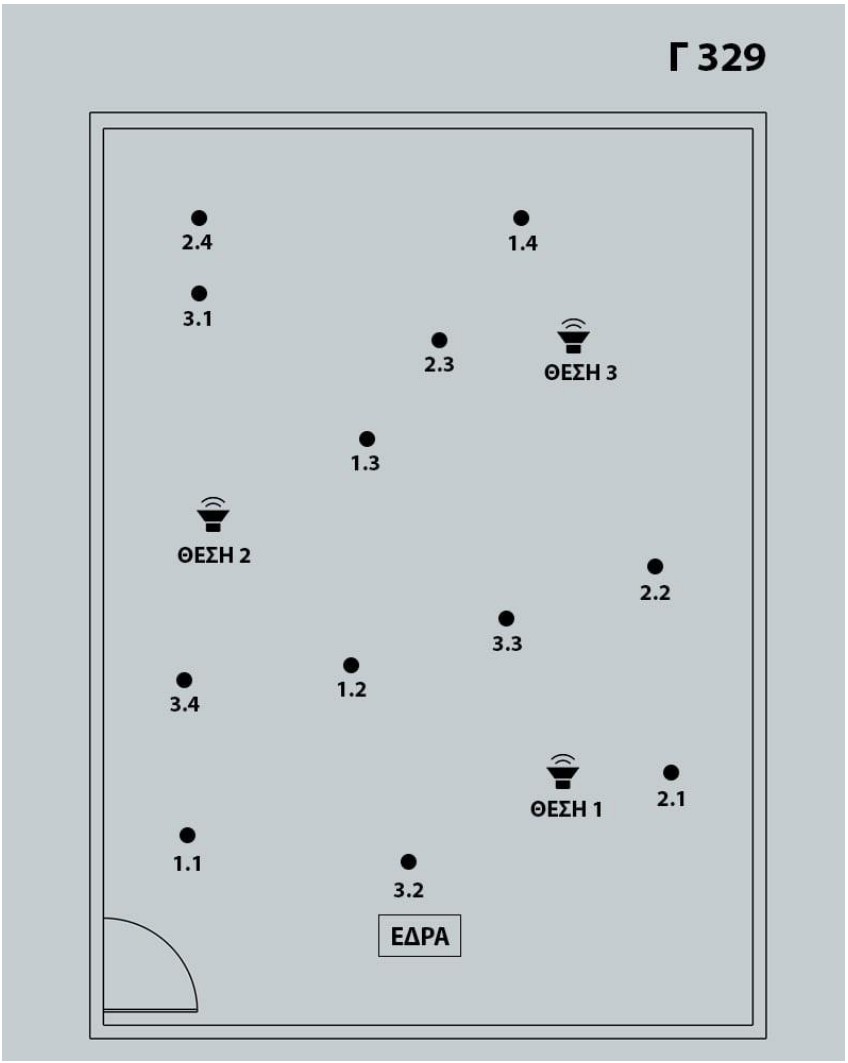
Εν συνεχεία της παραπάνω διαδικασίας μετρήθηκε ο θόρυβος βάθους, και έπειτα πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις αναφοράς με τη δωδεκαεδρική ηχητική πηγή και ηχόμετρο κλάσης 1 με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου. Η διαδικασία συνεχίστηκε αντικαθιστώντας τη δωδεκαεδρική πηγή με το ενεργό ηχείο δύο δρόμων, λαμβάνοντας τέσσερις μετρήσεις σε κάθε θέση ηχητικής πηγής αλλά και ηχομέτρου. Οι τέσσερις αυτές μετρήσεις αντιστοιχούν στις 4 περιστροφές του ενεργού ηχείου στον οριζόντιο άξονα $(0^{\circ},90^{\circ},180^{\circ},270)^{\circ}$ με σκοπό την προσομοίωση της πανκατευθυντικής πηγής ήχου, και με δύο σήματα διέγερσης λευκό και ροζ θόρυβο για κάθε σετ μετρήσεων. Η τροφοδοσία του ενεργού ηχείου με σήματα ακουστικής διέγερσης έγινε με εξωτερική γεννήτρια σημάτων. Το τρίτο και τελευταίο σετ μετρήσεων περιελάμβανε ως ηχητική πηγή το ενεργό ηχείο δυο δρόμων και αντί του ηχομέτρου οι λήψεις της ακουστικής πίεσης αλλά και η τροφοδότηση σημάτων ακουστικής διέγερσης του ηχείου έγιναν μέσω του λογισμικού ARTA. Η διέγερση του ηχείου πραγματοποιήθηκε με σήματα ροζ και λευκού θορύβου, γραμμικό και λογαριθμικό sweep και με ακολουθία μέγιστου

μήκους MLS. Ο υπολογισμός του χρόνου αντήχησης πραγματοποιήθηκε με ανάλυση τριτοκτάβας.

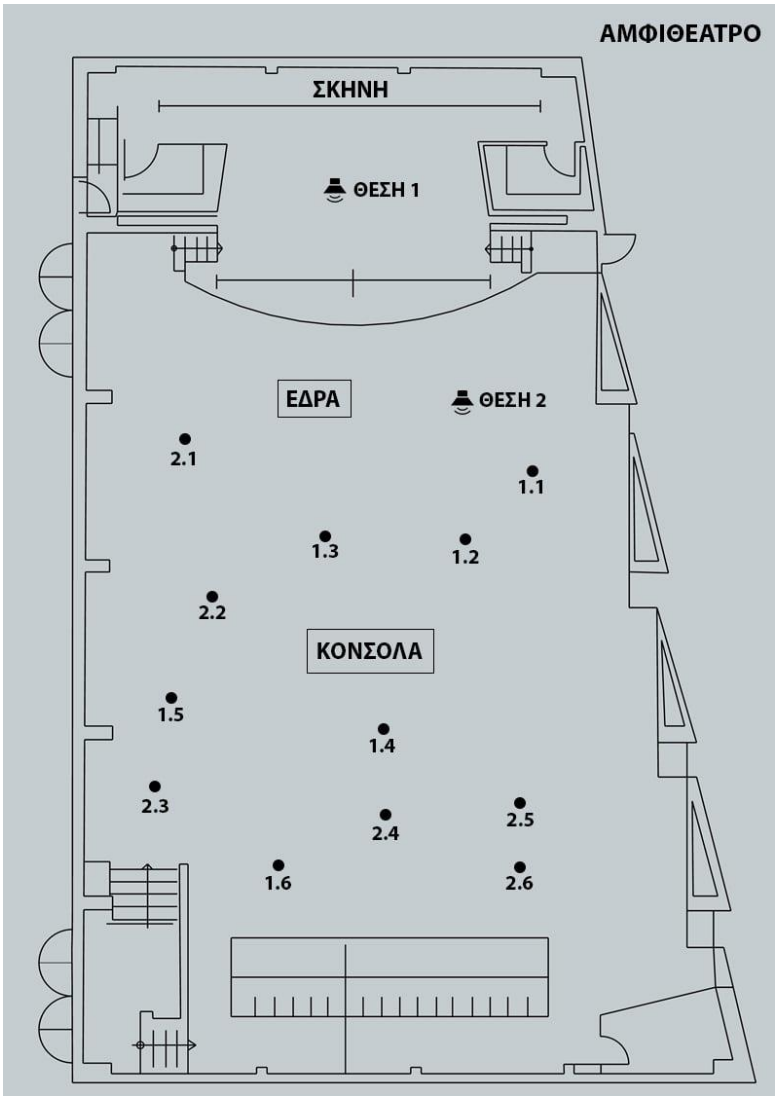
Παρακάτω παρατίθενται σχεδιαγράμματα σχετικά με τους συνδυασμούς τοποθέτησης ηχητικής πηγής και μικροφώνου στις τρεις αίθουσες που πραγματοποιήθηκαν οι ακουστικές μετρήσεις, καθώς και διαγράμματα ροής σχετικά με τη συνδεσμολογία του εξοπλισμού.



ΕΙΚΟΝΑ 4: Κάτοψη της αίθουσας εργαστηρίου του ερευνητικού κέντρου I.P.P.L., στην οποία φαίνονται οι θέσεις της ηχητικής πηγής και οι θέσεις του μικροφώνου για κάθε θέση της ηχητικής πηγής.



ΕΙΚΟΝΑ 5: Κάτοψη της αίθουσας διδασκαλίας Γ329 του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, στην οποία φαίνονται οι θέσεις της ηχητικής πηγής και οι θέσεις του μικροφώνου για κάθε θέση της ηχητικής πηγής.



ΕΙΚΟΝΑ 6: Κάτοψη του αμφιθεάτρου του Τμήματος Μουσικής Τεχνολογίας και Ακουστικής, στην οποία φαίνονται οι θέσεις της ηχητικής πηγής και οι θέσεις του μικροφώνου για κάθε θέση της ηχητικής πηγής.

Παρακάτω εμφανίζονται τα σχεδιαγράμματα ροής που αφορούν τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των ακουστικών μετρήσεων, όπως και τη συνδεσμολογία αυτού.



ΣΧΗΜΑ 1: Σχεδιάγραμμα ροής των μετρήσεων αναφοράς που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της μελέτης. Στην εικόνα επίσης διακρίνονται το ηχόμετρο κλάσης 1 και το δωδεκάεδρο ηχείο με τον ενισχυτή ο οποίος διαθέτει και ενσωματωμένη γεννήτρια σημάτων ακουστικής διέγερσης.

Στο επόμενο σχεδιάγραμμα φαίνεται η συνδεσμολογία για το δεύτερο σετ μετρήσεων.



ΣΧΗΜΑ 2: Σχεδιάγραμμα ροής του δεύτερου σετ μετρήσεων όπου διακρίνονται το ηχόμετρο κλάσης 1, το αυτοενισχυόμενο ηχείο και η εξωτερική γεννήτρια ακουστικών σημάτων.

Και τέλος στο επόμενο σχεδιάγραμμα ροής αποτυπώνεται η συνδεσμολογία για το τρίτο σετ μετρήσεων του οποίου η καταγραφή και η αναπαραγωγή των ακουστικών σημάτων πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό ακουστικών μετρήσεων ARTA.



ΣΧΗΜΑ 3: Σχεδιάγραμμα ροής του τρίτου σετ μετρήσεων όπου διακρίνονται το πανκατευθυντικό μικρόφωνο, το αυτοενισχυόμενο ηχείο, η εξωτερική κάρτα ήχου και ο Η/Υ που διαθέτει το λογισμικό ARTA.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

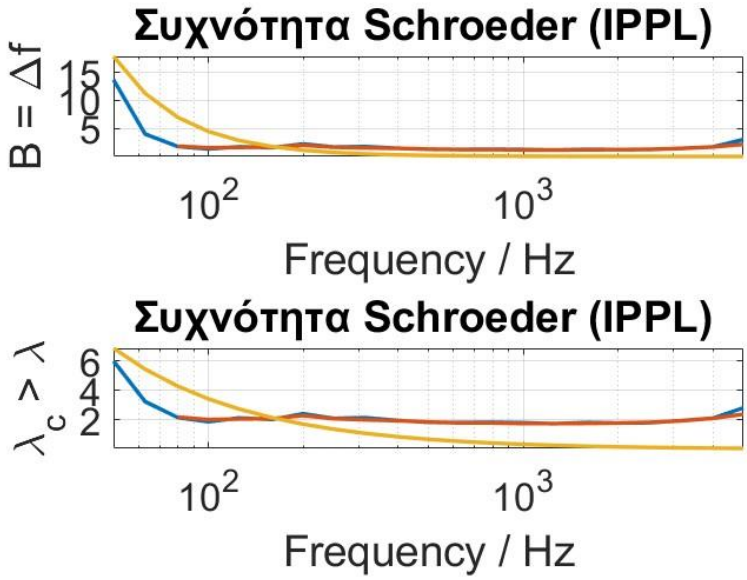
Έπειτα από την ολοκλήρωση των μετρήσεων, πραγματοποιήθηκε ανάλυση των αποτελεσμάτων με το λογισμικό MATLAB. Για τη χρήση των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν με την περιστροφή του ηχείου, εξετάστηκε εάν είναι απαραίτητη η χρονική ευθυγράμμιση των σημάτων, λόγω της χρονικής διαφοράς μεταξύ της άφιξης κάθε σήματος στο μικρόφωνο. Για τη χρονική ευθυγράμμιση των σημάτων χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση alignsignals και οι πέντε διαφορετικές μέθοδοι, τις οποίες περιλαμβάνει:

- Maxpeak: Ευθυγραμμίζει τα σήματα βάσει της μέγιστης κορυφής του κάθε σήματος.
- Npeak: Λειτουργεί όπως η maxpeak, αλλά επιτρέπει τον ορισμό από τον χρήστη της εκάστοτε κορυφής αντί για τη μέγιστη.
- Risetime: Εντοπίζει τη στιγμή ανόδου του σήματος δηλαδή τη στιγμή που το πλάτος ξεπερνά ένα κατώφλι. Ευθυγραμμίζει τα σήματα έτσι ώστε η στιγμή αυτή να συμβεί ταυτόχρονα.
- Xcorr: Χρησιμοποιεί την ετεροσυσχέτιση για να βρει τη βέλτιστη χρονική μετατόπιση, υπολογίζει δηλαδή το πόσο πρέπει να μετακινηθεί ένα σήμα ώστε να έχει την μέγιστη συσχέτιση με τα υπόλοιπα σήματα.
- Sum: Υπολογίζει τη διαφορά μεταξύ των σημάτων σε διαφορετικές μετατοπίσεις και ευθυγραμμίζει με βάση το ελάχιστο άθροισμα διαφορών.

Εν συνεχεία των παραπάνω προέκυψαν τα διαγράμματα και συγκρίσεις που θα δούμε παρακάτω.

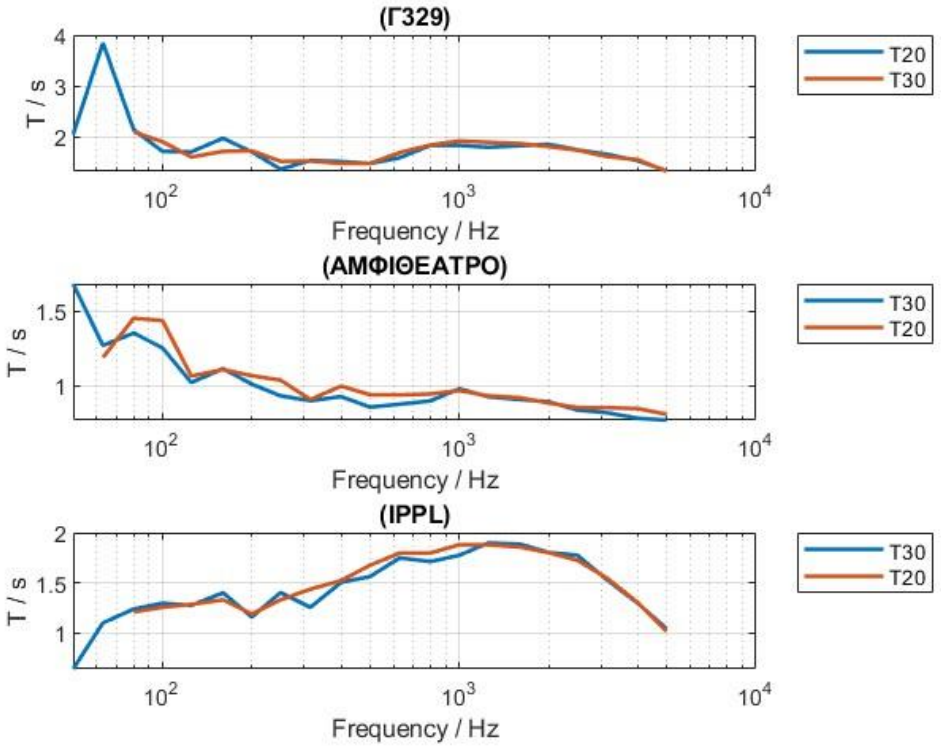
Ο παρακάτω πίνακας έχει σκοπό την επεξήγηση των ποσοτήτων που εμφανίζονται στα διαγράμματα καθώς και τα είδη των σημάτων

Σύμβολα	Επεξήγηση
Δ	Μεταβολή ή διαφορά
σ	Τυπική απόκλιση
PN	Σήμα ροζ θορύβου
WN	Σήμα λευκού θορύβου
LINSW	Σήμα γραμμής σάρωσης συχνοτήτων
LOGSW	Σήμα λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων
MLS	Σήμα ακολουθίας μέγιστου μήκους
REFERENCE	Μέτρηση αναφοράς
ARTA	Μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ARTA



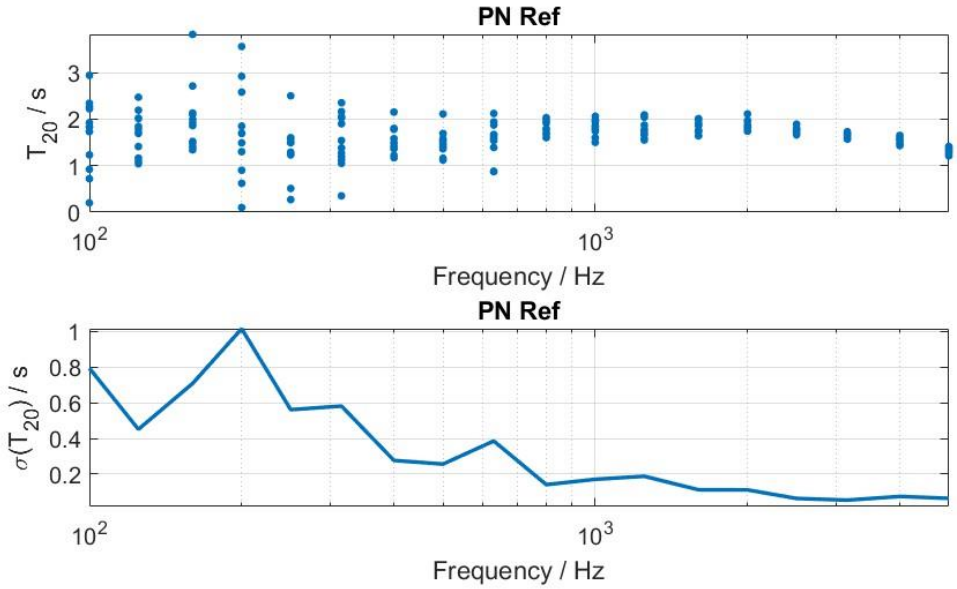
ΓΡΑΦΗΜΑ 1: Υπολογισμός της συχνότητας αποκοπής για την αίθουσα εργαστηρίου IPPL.

Ο υπολογισμός της συχνότητας αποκοπής πραγματοποιήθηκε για να βρεθεί το όριο μεταξύ των χαμηλών συχνοτήτων, όπου κυριαρχούν τα στάσιμα κύματα και των πιο υψηλών συχνοτήτων, που ο ήχος στην περιοχή αυτή γίνεται πιο διάχυτος, με αποτέλεσμα η κατανομή του στον μετρούμενο χώρο να κατανέμεται πιο ομοιόμορφα και να μπορεί η συμπεριφορά του να περιγραφεί στατιστικά.

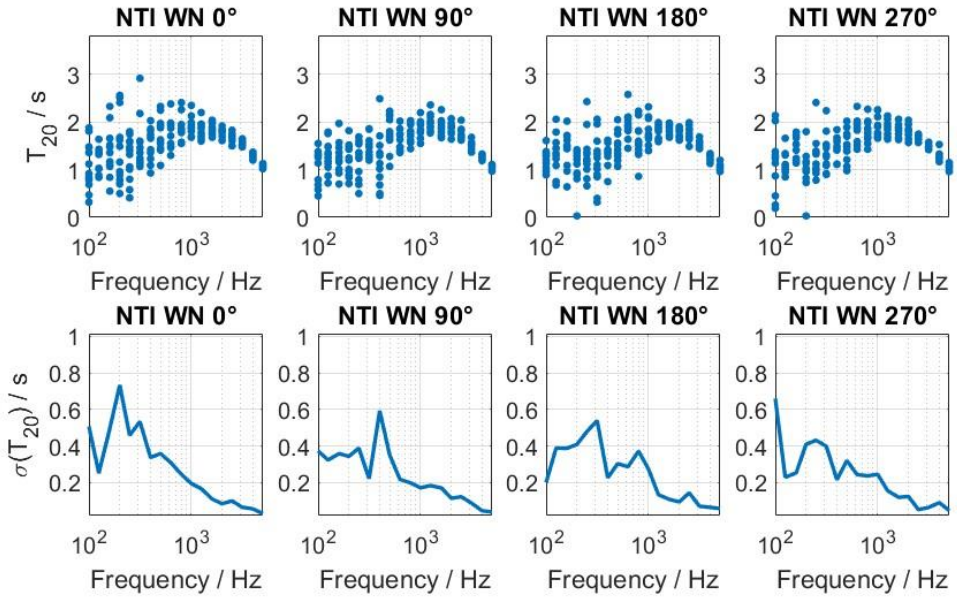


ΓΡΑΦΗΜΑ 2: Διαγράμματα των χρόνων Τ20 και Τ30 για τις τρεις αίθουσες όπου οι μετρήσεις λήφθηκαν με το ηχόμετρο και την δωδεκαεδρική πηγή ήχου.

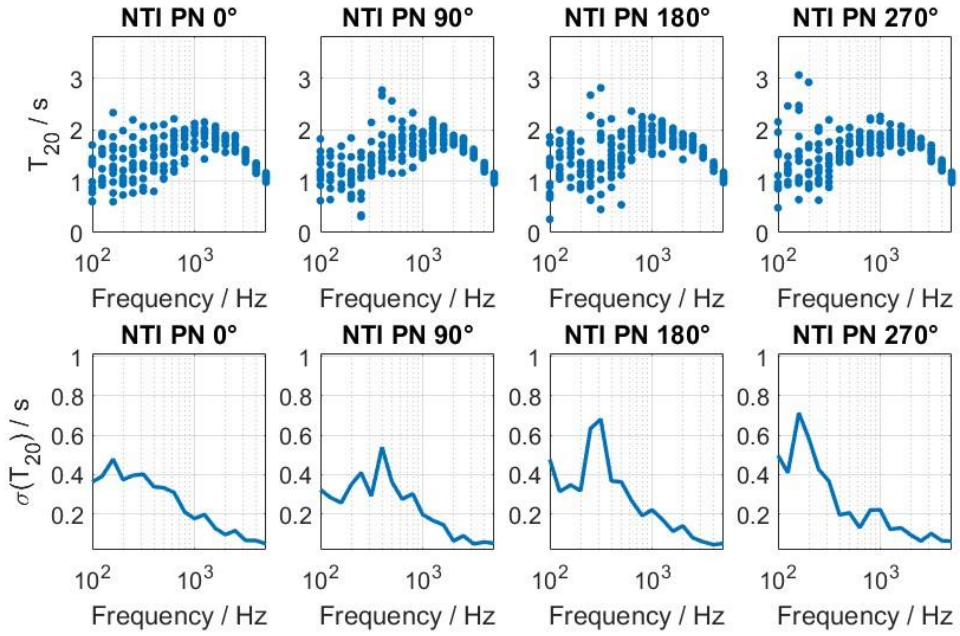
Αυτό που εξετάζεται στο γράφημα 2 είναι το κατά πόσο διαφέρουν οι δύο χρόνοι (Τ20-Τ30) μεταξύ τους. Παρατηρώντας τα τρία διαγράμματα δεν εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές ανάμεσα στους χρόνους και για τις τρεις αίθουσες, πράγμα που σημαίνει πως και οι δύο χρόνοι είναι χρήσιμοι για τις συγκρίσεις που θα πραγματοποιηθούν. Οι εξής χρόνοι προκύπτουν από τον μέσο όρο των δώδεκα μετρήσεων που παραπέμπουν στην πρώτη συνδεσμολογία δηλαδή στης μετρήσεις αναφοράς.



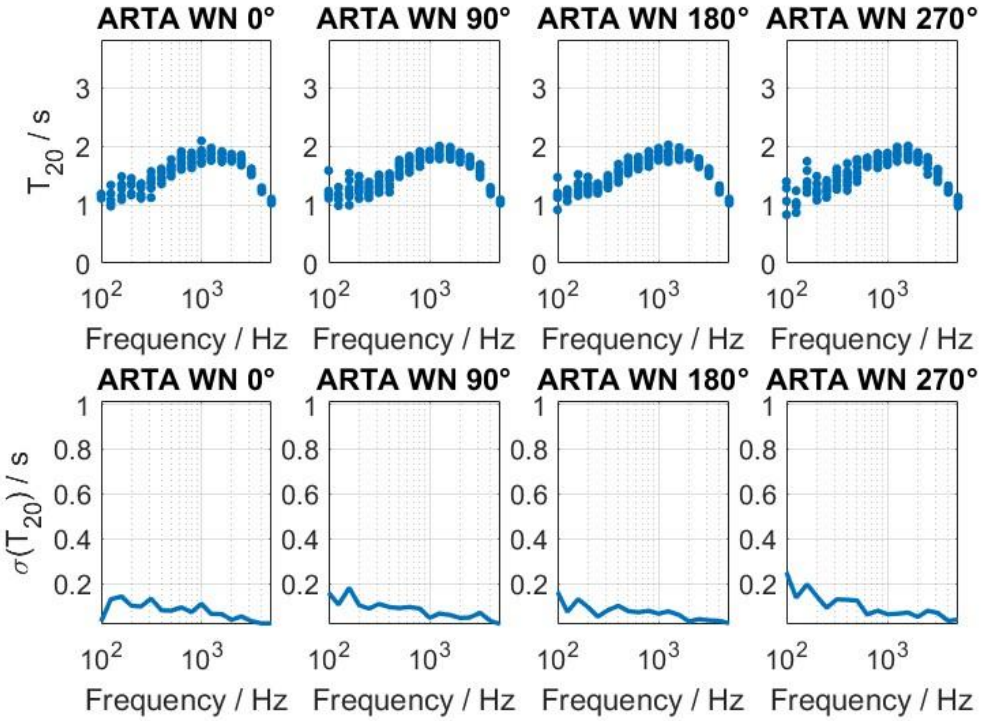
ΓΡΑΦΗΜΑ 3: Διαγράμματα μετρήσεων αναφοράς του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού, με ροζ θόρυβο.



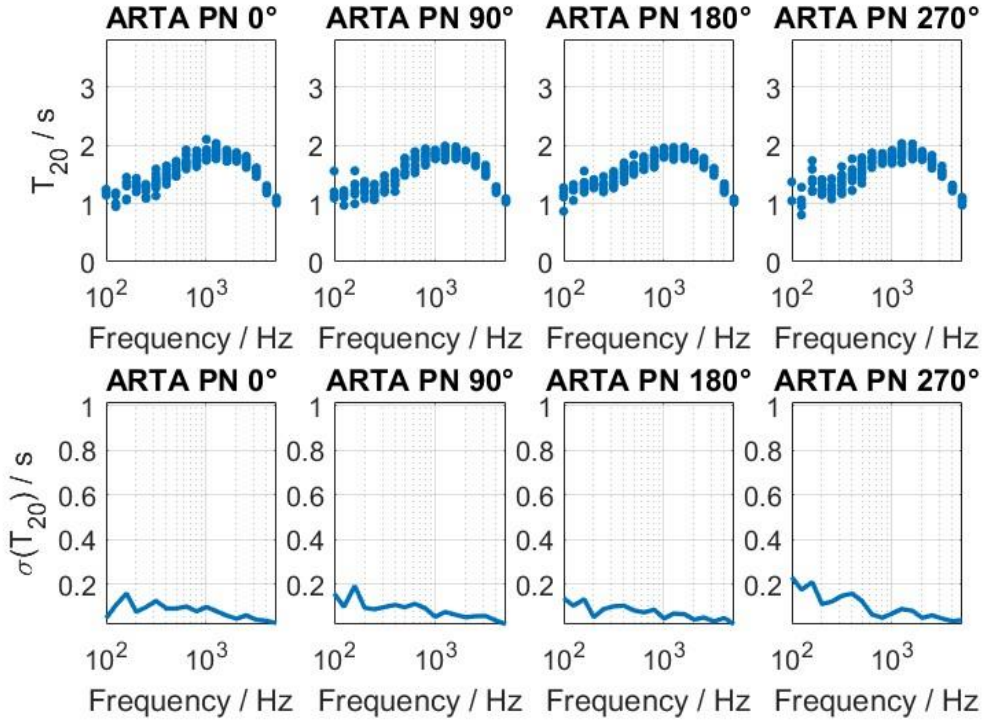
ΓΡΑΦΗΜΑ 4: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και γεννήτρια συχνοτήτων με σήμα διέγερσης λευκού θορύβου.



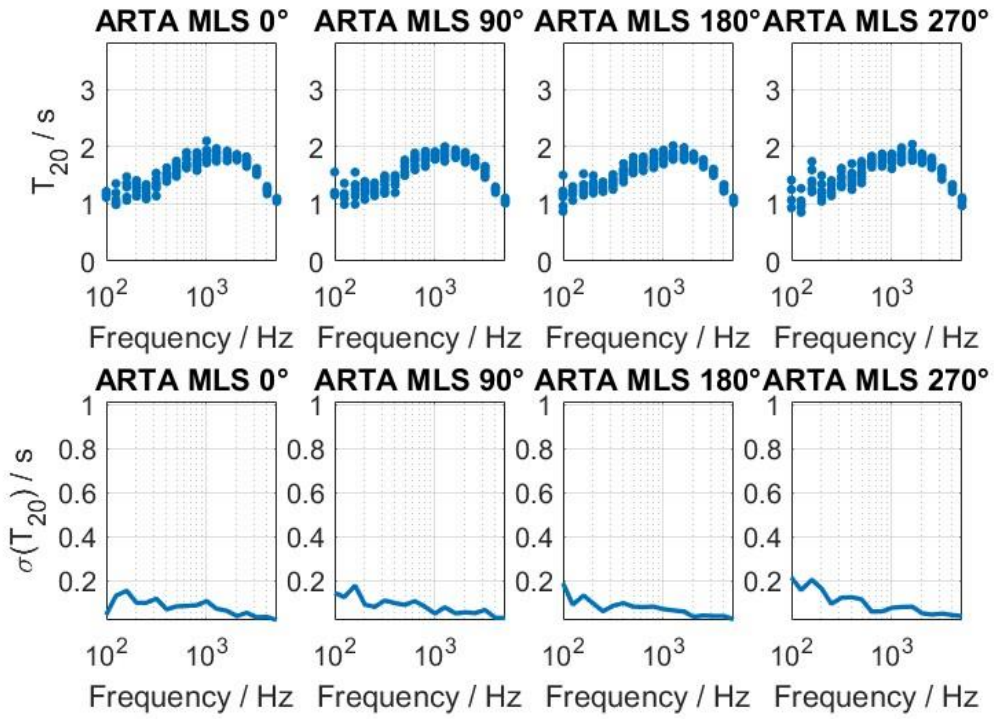
ΓΡΑΦΗΜΑ 5: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και γεννήτρια συχνοτήτων με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου.



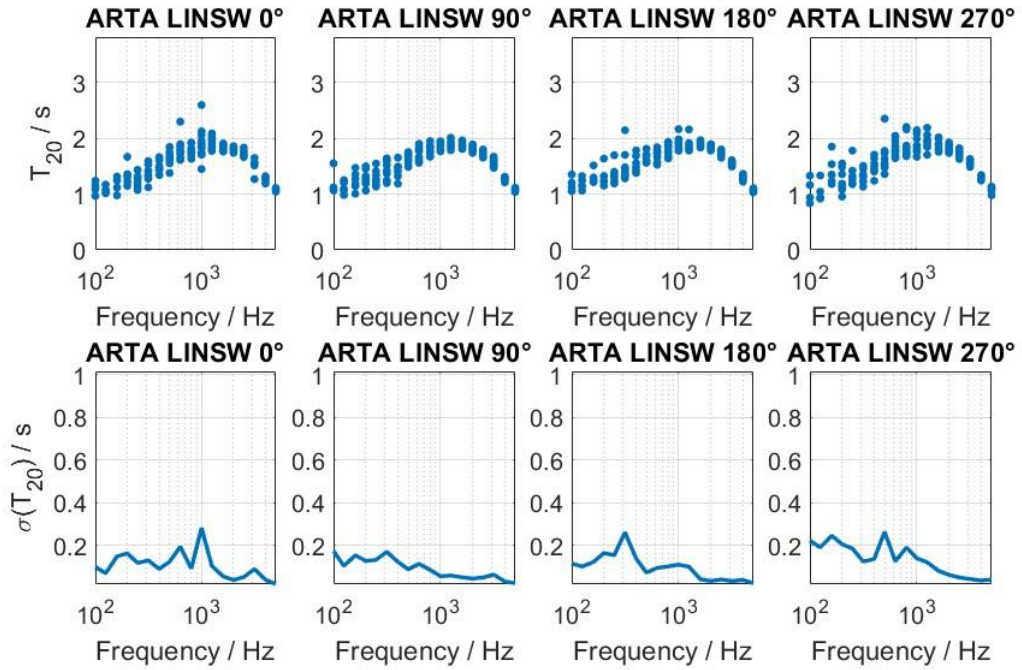
ΓΡΑΦΗΜΑ 6: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης λευκού θορύβου.



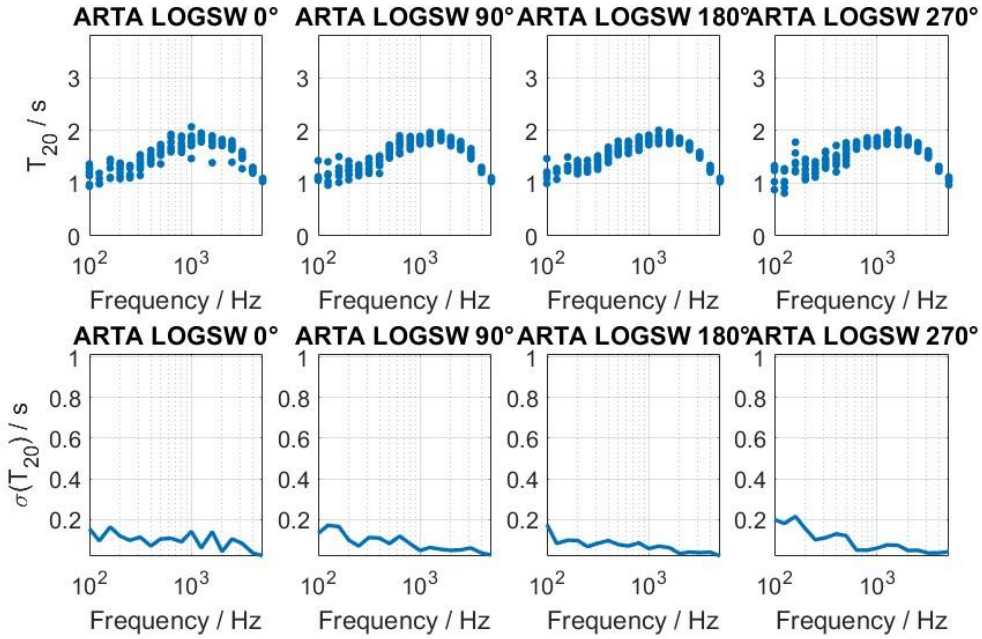
ΓΡΑΦΗΜΑ 7: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου.



ΓΡΑΦΗΜΑ 8: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης MLS.



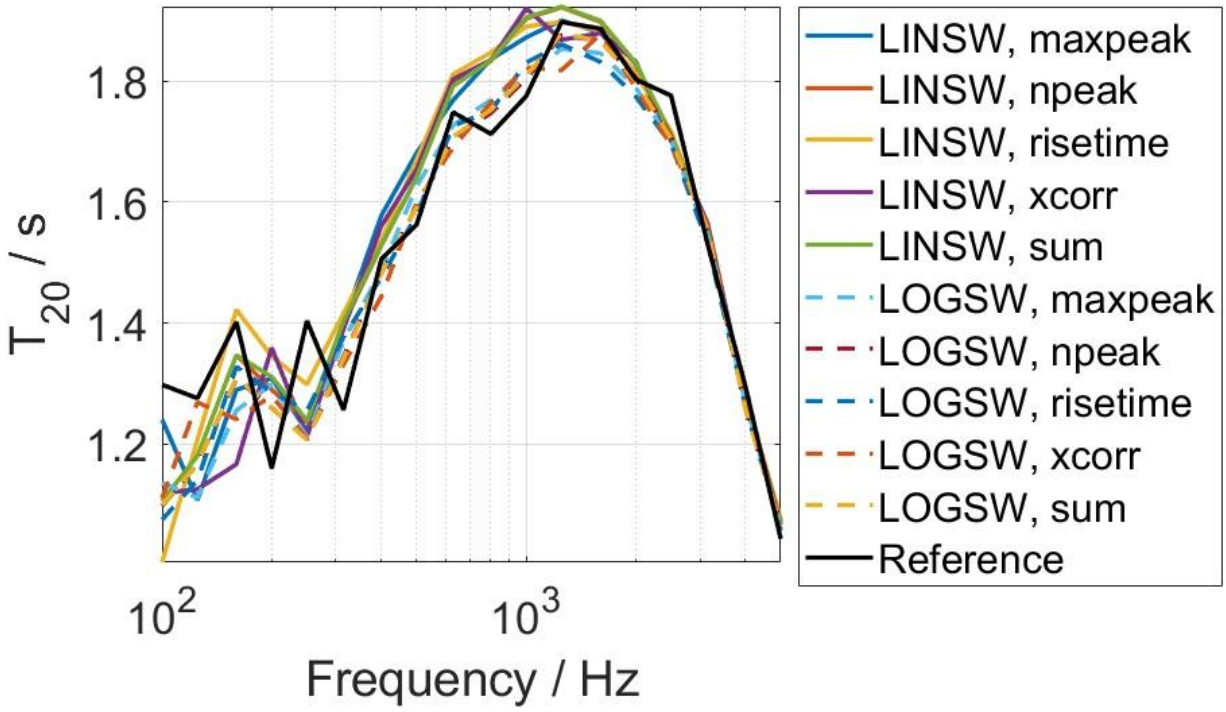
ΓΡΑΦΗΜΑ 9: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης γραμμικής σάρωσης συχνοτήτων.



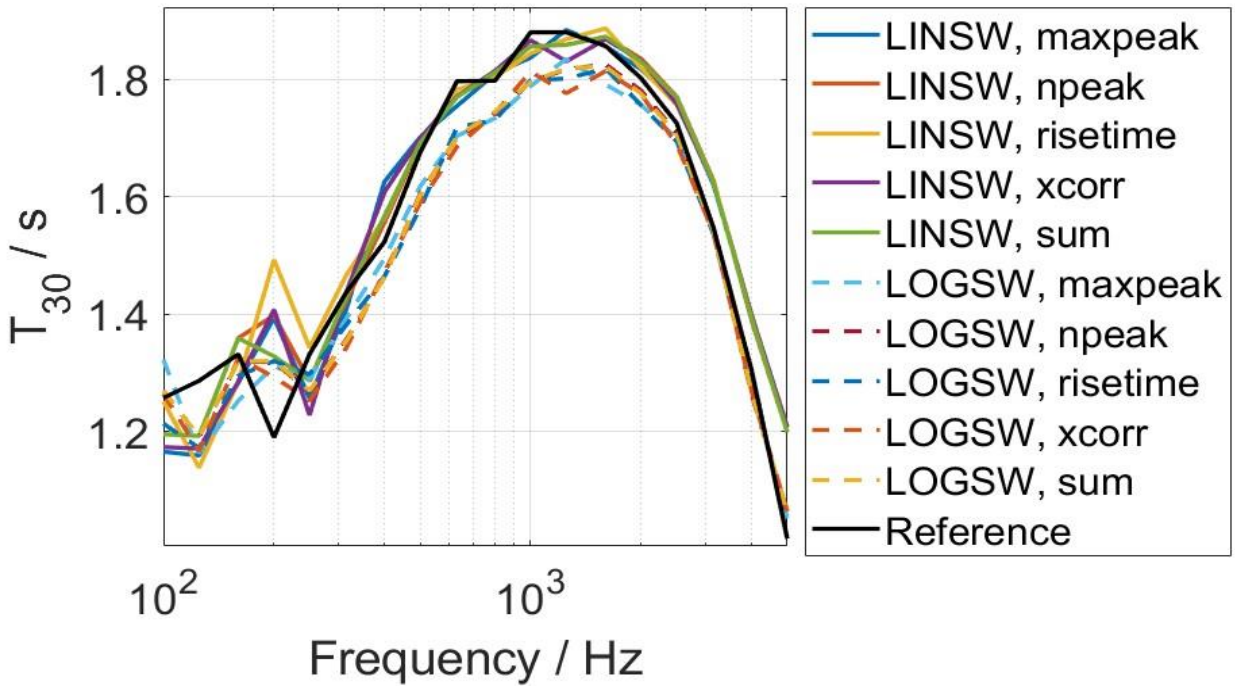
ΓΡΑΦΗΜΑ 10: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων.

Το γράφημα 3 περιέχει όλες τις μετρήσεις αναφοράς που πραγματοποιήθηκαν με το ηχόμετρο και τη δωδεκαεδρική πηγή ήχου. Στο πρώτο διάγραμμα εμπεριέχονται οι τιμές για κάθε συχνότητα και στο δεύτερο διάγραμμα γίνεται ο υπολογισμός της

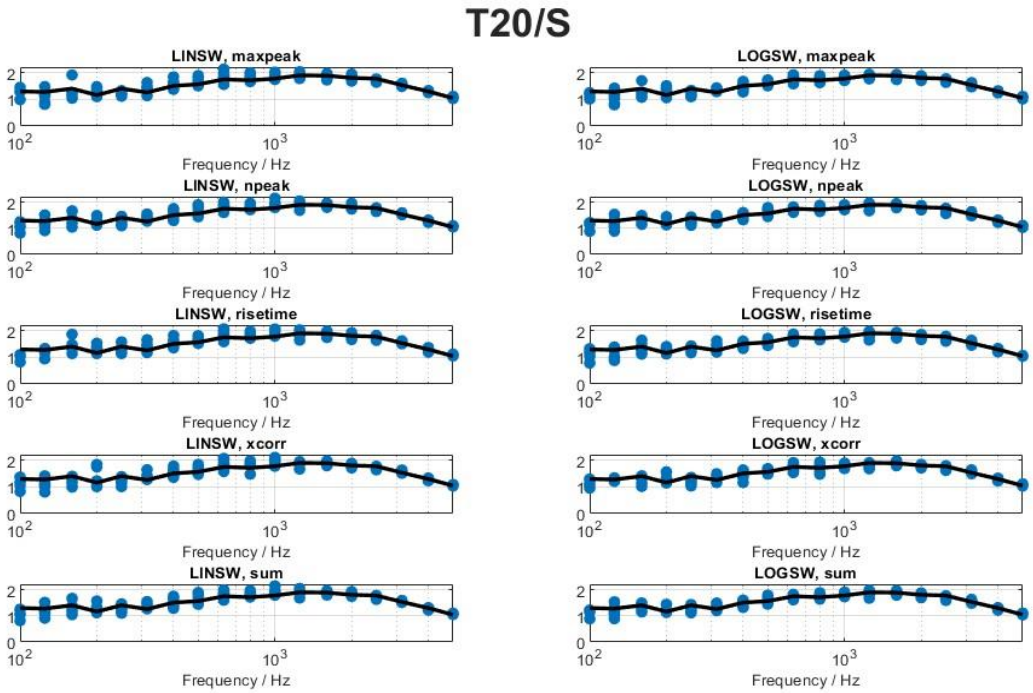
τυπικής απόκλισης, για να βρεθεί πόσο κοντά βρίσκονται οι τιμές των μετρήσεων στη μέση τιμή. Όσο μικρότερη είναι η τυπική απόκλιση τόσο πιο κοντά βρίσκονται η τιμές μεταξύ των μετρήσεων. Ακριβώς η ίδια διαδικασία συνεχίζεται έως και το γράφημα 10. Παρατηρώντας τα διαγράμματα εντοπίζουμε ότι η τυπική απόκλιση είναι μικρότερη, για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ARTA και στα σήματα που έχουν περιοδικότητα, το οποίο οφείλεται στο ότι το σύστημα παρακολουθεί την είσοδο αλλά και την έξοδο του σήματος για κάθε μέτρηση, αυξάνοντας το λόγο σήματος προς θόρυβο.



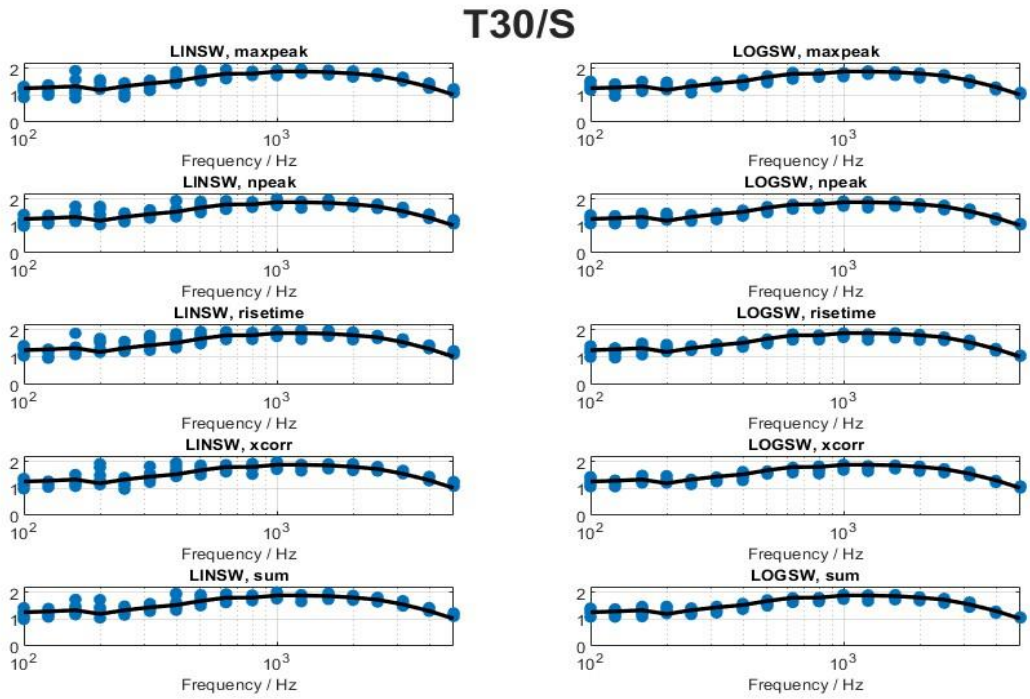
ΓΡΑΦΗΜΑ 11: Γράφημα του χρόνου T20 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς σύγκριση των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.



ΓΡΑΦΗΜΑ 12: Γράφημα του χρόνου T30 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς σύγκριση των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.

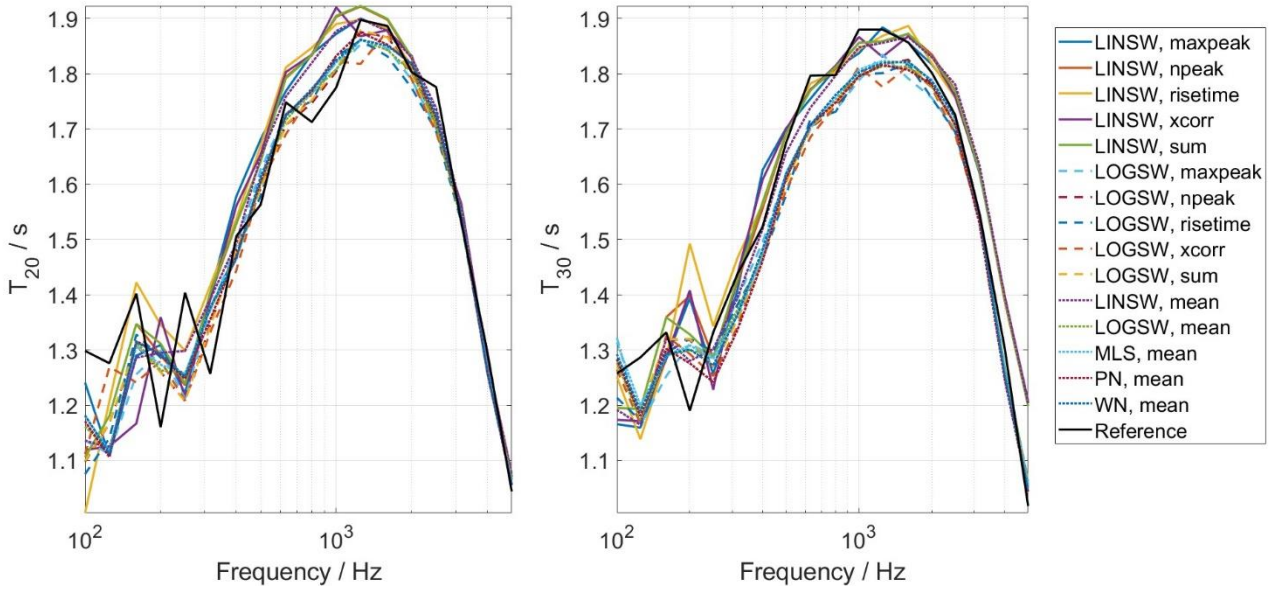


ΓΡΑΦΗΜΑ 13: Γραφήματα του χρόνου T20 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς έλεγχο της διασποράς των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.



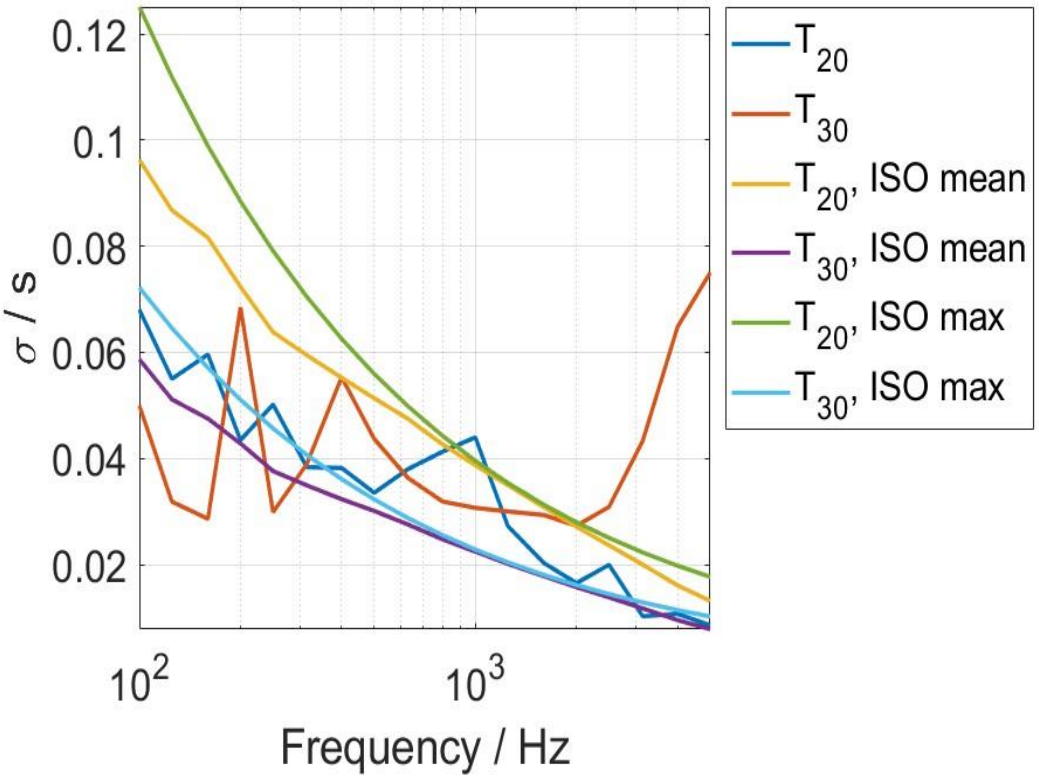
ΓΡΑΦΗΜΑ 14: Γραφήματα του χρόνου T30 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς έλεγχο της διασποράς των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.

Στα διαγράμματα 11 έως 14 πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των μετρήσεων αναφοράς των χρόνων T20 και T30 με τις μετρήσεις που διεξάχθηκαν με την περιστροφή του ενεργού ηχείου, με σήματα ακουστικής διέγερσης γραμμικής και λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων, έχοντας πραγματοποιήσει ευθυγράμμιση των σημάτων. Ως επί τω πλείστον, λήφθηκαν μετρήσεις ακριβώς στις ίδιες θέσεις ηχητικής πηγής της αίθουσας, με αυτές της δωδεκαεδρικής πηγής ήχου, με την διαφορά ότι για κάθε θέση ηχητικής πηγής πραγματοποιήθηκαν τέσσερις περιστροφές του ενεργού ηχείου, άρα προέκυψαν και τέσσερις μετρήσεις. Στη συνέχεια, από τα τέσσερα αυτά σήματα της κάθε μέτρησης προέκυψε ένα σήμα, το οποίο συγκρίθηκε με το σήμα αναφοράς. Η χρονική ευθυγράμμιση των τεσσάρων σημάτων αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω συγκρίσεις είναι ότι δεν παρατηρήθηκαν διαφορές ανάμεσα στις πέντε μεθόδους ευθυγράμμισης. Όσον αφορά τις μετρήσεις με τα διαφορετικά σήματα ακουστικής διέγερσης συγκριτικά με τις μετρήσεις αναφοράς, παρατηρήθηκε, ότι για τις μετρήσεις με γραμμική σάρωση συχνοτήτων υπάρχει μια απόκλιση στις υψηλές συχνότητες, ενώ για αυτές με τη λογαριθμική σάρωση συχνοτήτων υπάρχει απόκλιση στις χαμηλές.



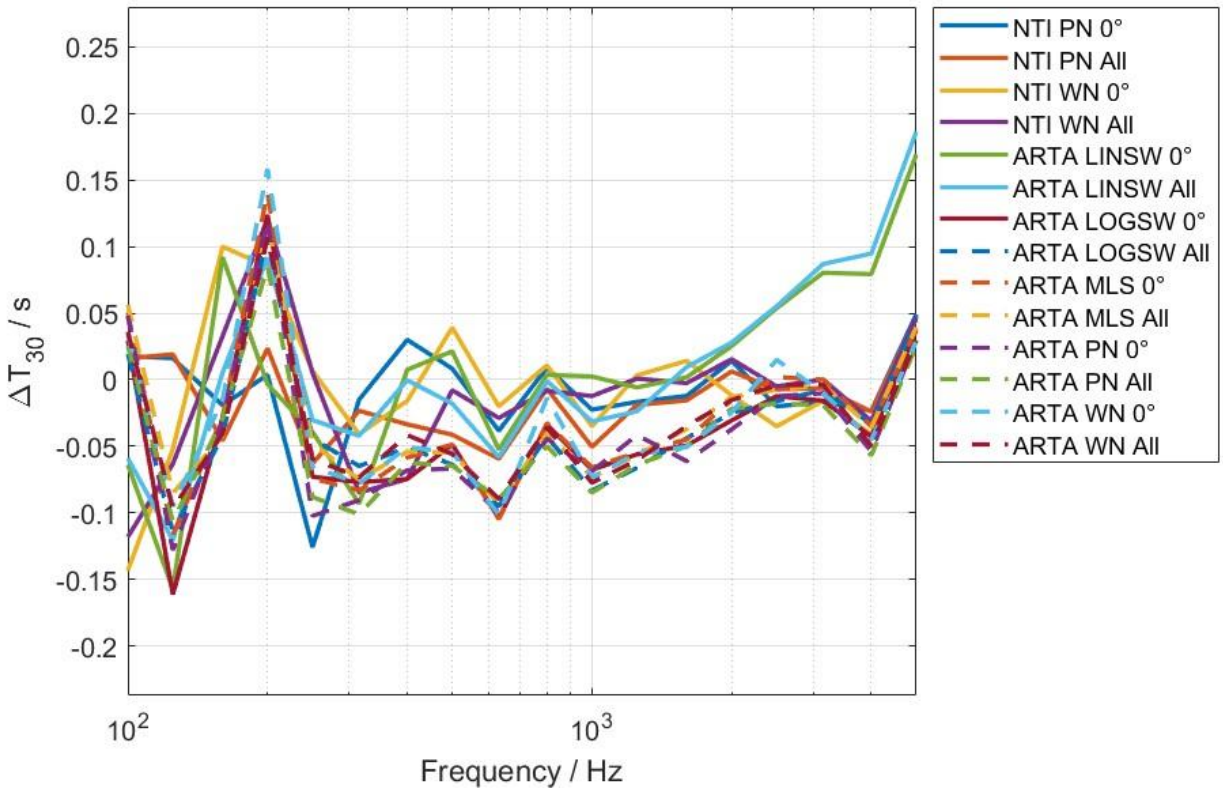
ΓΡΑΦΗΜΑ 15: Γραφήματα των χρόνων T20 και T30 όπου περιέχουν μετρήσεις αναφοράς προς σύγκριση με μετρήσεις γραμμικής-λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης, καθώς και μέσο όρο των μετρήσεων όλων των σημάτων ακουστικής διέγερσης.

Στο γράφημα 15 βλέπουμε τα εξής σήματα, γραμμική και λογαριθμική σάρωση συχνοτήτων με τις πέντε μεθόδους ευθυγράμμισης, τον μέσο όρο του λευκού και ροζ θορύβου, καθώς και τον μέσο όρο της ακολουθίας μέγιστου μήκους προς σύγκριση με τις μετρήσεις αναφοράς (reference) για τους χρόνους T20 και T30. Αυτό που προκύπτει παρατηρώντας τα διαγράμματα είναι ότι οι διαφορές για τον χρόνο T20 είναι ελάχιστες για όλα τα σήματα των μετρήσεων. Στον χρόνο T30 παρατηρείται απόκλιση στις υψηλές συχνότητες για τα σήματα που αφορούν μέτρηση με γραμμική σάρωση συχνοτήτων.

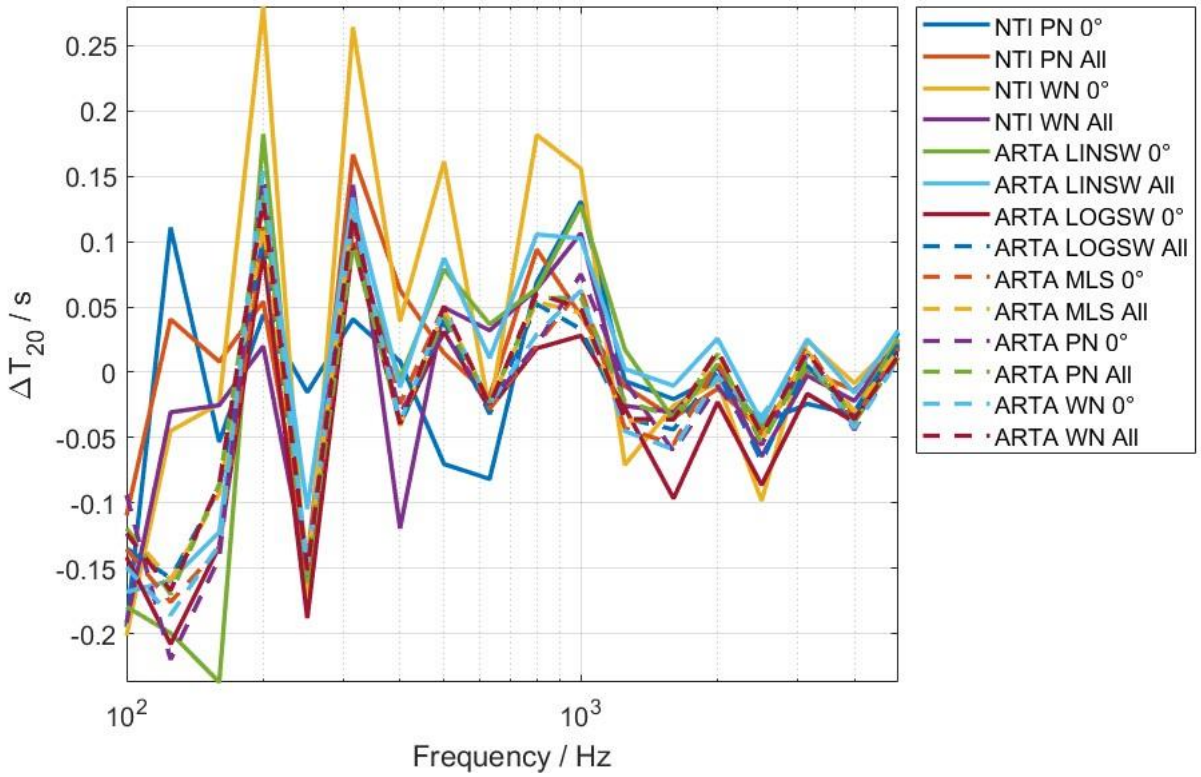


ΓΡΑΦΗΜΑ 16: Διάγραμμα των μετρούμενων χρόνων T20 και T30 και ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης αυτών βάσει του ISO 1996-2:2017 για τον μέσο όρο (mean) των μετρούμενων χρόνων και (max) για τις μέγιστες τιμές τους.

Στο γράφημα 16 παρατίθεται ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης βάσει του ISO 1996-2:2017 για τις μετρήσεις των χρόνων T20 και T30. Έγιναν υπολογισμοί των μετρούμενων χρόνων, του μέσου όρου αυτών αλλά και των μέγιστων τιμών. Σκοπός των παραπάνω υπολογισμών είναι να αποδειχθεί η εγκυρότητα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Παρατηρώντας το διάγραμμα γίνεται ορατό πως οι τιμές της τυπικής απόκλισης των τιμών των μετρήσεων είναι παραπλήσιες με τις τιμές που προκύπτουν εφαρμόζοντας το ISO1996-2 από το οποίο προκύπτει η ορθότητα των μετρήσεων.



ΓΡΑΦΗΜΑ 17: Διάγραμμα του χρόνου T30 που αποτυπώνει τις αποκλίσεις για τις μετρήσεις στις 0° και τον μέσο όρο για όλες τις γωνίες μέτρησης.



ΓΡΑΦΗΜΑ 18: Διάγραμμα του χρόνου T20 που αποτυπώνει τις αποκλίσεις για τις μετρήσεις στις 0° και τον μέσο όρο για όλες τις γωνίες μέτρησης.

Στα γραφήματα 17-18 επιτυγχάνεται η σύγκριση ανάμεσα στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με το ενεργό ηχείο για τις μηδέν μοίρες προς όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις για τους χρόνους T20 και T30 αντίστοιχα. Σκοπός της σύγκρισης αυτής είναι να καταλάβουμε εάν αντί για μια μέτρηση στις μηδέν μοίρες πρέπει να πραγματοποιηθεί περιστροφή του ηχείου ανά 90°, οπότε να προκύψουν τέσσερις μετρήσεις, για τις οποίες θα πρέπει να γίνει χρονική ευθυγράμμιση, ώστε να προκύψει ένα σήμα που θα είναι συγκρίσιμο με το σήμα αναφοράς. Αυτό που παρατηρούμε στα διαγράμματα είναι ότι οι αποκλίσεις είναι μικρές. Οπότε συμπεραίνουμε πως δεν προκύπτει ανάγκη μετρήσεων με περιστροφή του ηχείου.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της πτυχιακής είναι η σύγκριση του χρόνου αντήχησης που έχει μετρηθεί με τη χρήση εξοπλισμού που καλύπτει τις απαιτήσεις προτύπων, με το χρόνο αντήχησης που προκύπτει με τη χρήση εξοπλισμού που δεν καλύπτει τέτοιες απαιτήσεις στο σύνολό του. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά τις οποίες η διέγερση του χώρου πραγματοποιήθηκε με αυτοενισχυόμενο ηχείο δύο δρόμων και όχι πρότυπη δωδεκαεδρική πηγή. Επίσης, η πτώση του ηχητικού πεδίου καταγράφηκε με μη διακριβωμένο μετρητικό μικρόφωνο. Η χρήση του ηχείου δύο δρόμων διερευνήθηκε με βάση δύο άξονες. Σύμφωνα με τον πρώτο, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά τις

οποίες το ηχείο στρέφονταν ανά 90° για κάθε σημείο μέτρησης. Στον δεύτερο άξονα, το ηχείο διέγειρε τους υπό εξέταση χώρους με διαφορετικά σήματα για τη σύγκριση των εκάστοτε αποτελεσμάτων. Στην πρώτη περίπτωση, η κρουστική απόκριση υπό κάθε γωνία τροφοδότησε αλγόριθμο του Matlab για να προκύψει μέσω χρονικής μετατόπισης ένα σήμα από τα τέσσερα επιμέρους. Όπως προκύπτει από τα γραφήματα 11, 12, Π17, Π18, Π41 και Π42, η χρονική μετατόπιση δεν δίδει διαφορετικά αποτελέσματα από αυτά που προκύπτουν από την άθροιση των επιμέρους σημάτων. Αυτό αν και ήταν εν μέρει αναμενόμενο λόγω του μικρού όγκου των υπό εξέταση αιθουσών, αναδεικνύει την ευκολία εφαρμογής της συνάρτησης του Matlab, σε περίπτωση που οι μετρήσεις πραγματοποιηθούν σε μεγαλύτερους χώρους. Αυτό αποτελεί και θέμα μελλοντικής εργασίας.

Από τα γραφήματα 3-10 προκύπτει ότι τα αποτελέσματα με τη χρήση του λογισμικού ARTA παρουσιάζουν υψηλή επαναληψιμότητα λόγω των παραμέτρων κάθε σήματος διέγερσης που εξασφαλίζουν όμοιες συνθήκες μέτρησης. Από την άλλη, οι μετρήσεις με την εξωτερική πηγή σημάτων και με το δωδεκάεδρο παρουσιάζουν μεγαλύτερη διασπορά, όπως αντικατοπτρίζεται από την τυπική απόκλιση. Σε κάθε περίπτωση, όπως φαίνεται στο γράφημα 16, η τυπική απόκλιση είτε υπολογιστεί βάσει των αποτελεσμάτων είτε βάσει μαθηματικών τύπων που περιέχονται στο πρότυπο ISO 1996-2:2017 παραμένει σε χαμηλά επίπεδα, συνηγορώντας στη γενική ορθή χρήση του μετρητικού εξοπλισμού και την τήρηση των απαιτήσεων των προτύπων.

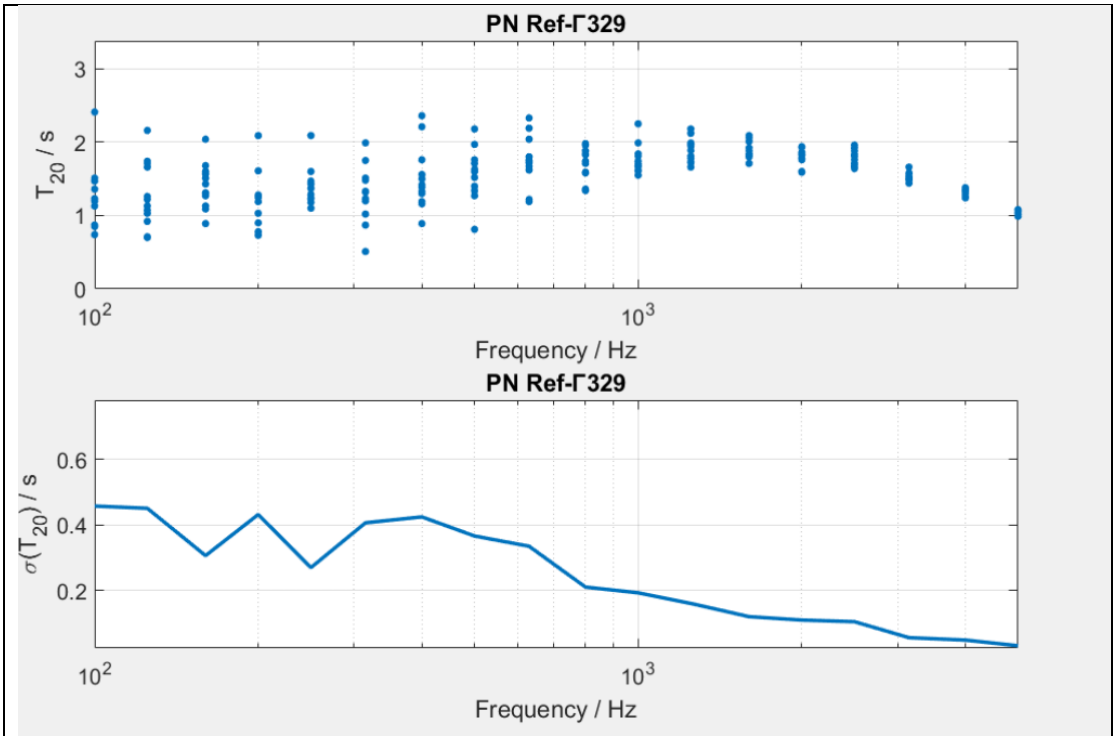
Έχοντας ολοκληρώσει τη διερεύνηση για την ανάγκη περιστροφής του ενεργού ηχείου και της μετέπειτα χρονικής μετατόπισης των κρουστικών αποκρίσεων, πραγματοποιήθηκε σύγκριση του χρόνου αντήχησης για μετρήσεις υπό τον οριζόντιο άξονα του ηχείου (0°) και με τον μέσο όρο των τιμών του χρόνου αντήχησης για τις υπό γωνία μετρήσεις. Αυτά τα αποτελέσματα φαίνονται στα γραφήματα 17, 18, Π23, Π24, Π47 και Π48. Παρατηρώντας αυτά τα γραφήματα, προκύπτει ότι οι χρησιμοποιηθείσες μέθοδοι δίδουν παρόμοια αποτελέσματα στην περίπτωση υπολογισμού του χρόνου Τ20. Όσον αφορά στη σύγκριση των αποτελεσμάτων του χρόνου Τ30, προκύπτει ότι τα αποτελέσματα διαφοροποιούνται. Για τους μεγαλύτερους σε όγκο χώρους (αμφιθέατρο και αίθουσα του IPPL) τα αποτελέσματα του χρόνου Τ30 είναι κοντά στα αποτελέσματα αναφοράς. Μεγαλύτερη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων παρατηρείται για την αίθουσα Γ329. Σε αυτή την περίπτωση, η χρήση της εξωτερικής γεννήτριας σήματος με λευκό και ροζ θόρυβο και η της γραμμικής σάρωσης με το λογισμικό ARTA δίδει κοντινότερες τιμές στις τιμές αναφοράς. Στις υψηλές συχνότητες παρατηρούνται τιμές από τις αναφοράς για τη γραμμικά σάρωση του ARTA, η οποία μπορεί να αποδοθεί σε μη γραμμική συμπεριφορά του συστήματος διέγερσης. Στην περίπτωση των υπόλοιπων σημάτων του λογισμικού ARTA, οι τιμές του χρόνου Τ30 είναι χαμηλότερες από τις τιμές αναφοράς. Αυτό μπορεί να αποδοθεί στα εξής: στην περιορισμένη χρονική διάρκεια του σήματος διέγερσης, σε εσφαλμένη διάρκεια χρονικών παραθύρων και σε παραμέτρους που επηρεάζουν τον υπολογισμό της καμπύλης Schoeder, όπως π.χ. θόρυβος βάθους και λάθος επιλογή των ορίων πτώσης του ηχητικού πεδίου.

Με βάση τα παραπάνω, οι μετρήσεις με το ενεργό ηχείο και την εξωτερική γεννήτρια σήματος δίδουν παρόμοια αποτελέσματα με αυτά της δωδεκαεδρικής πηγής. Στην περίπτωση του λογισμικού ARTA, από τις μετρήσεις για τον υπολογισμό του χρόνου

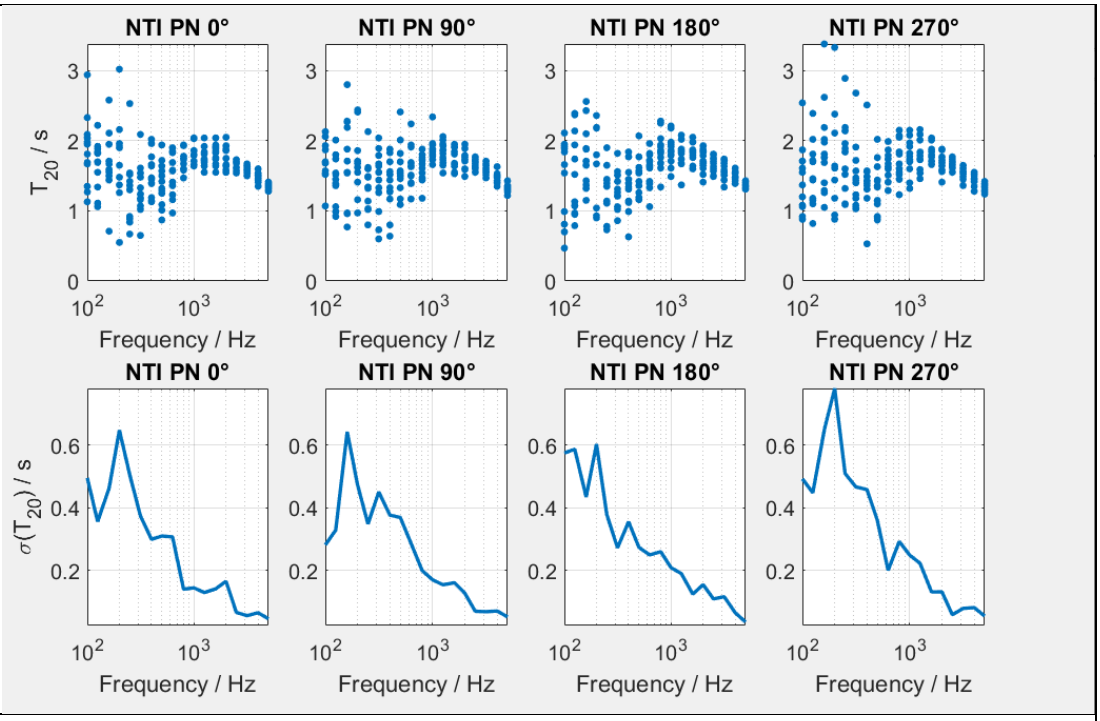
Τ20 προκύπτουν τιμές με μικρή απόκλιση από τις μετρήσεις αναφοράς. Για τις μετρήσεις του χρόνου Τ30, περαιτέρω διερεύνηση που θα εστιάζει στη σύνδεση της εναλλαγής των παραμέτρων μέτρησης μέσω των επιλογών του λογισμικού και των αποτελεσμάτων, αποτελεί πεδίο μελλοντικής εργασίας. Επιπλέον, η χρήση κρουστικών αποκρίσεων από λογισμικά ακουστικής προσομοίωσης για τον υπολογισμό των ακουστικών παραμέτρων από το λογισμικό ARTA και σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα από τα λογισμικά προσομοίωσης, είναι επίσης πιθανή βάση μελλοντικής έρευνας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

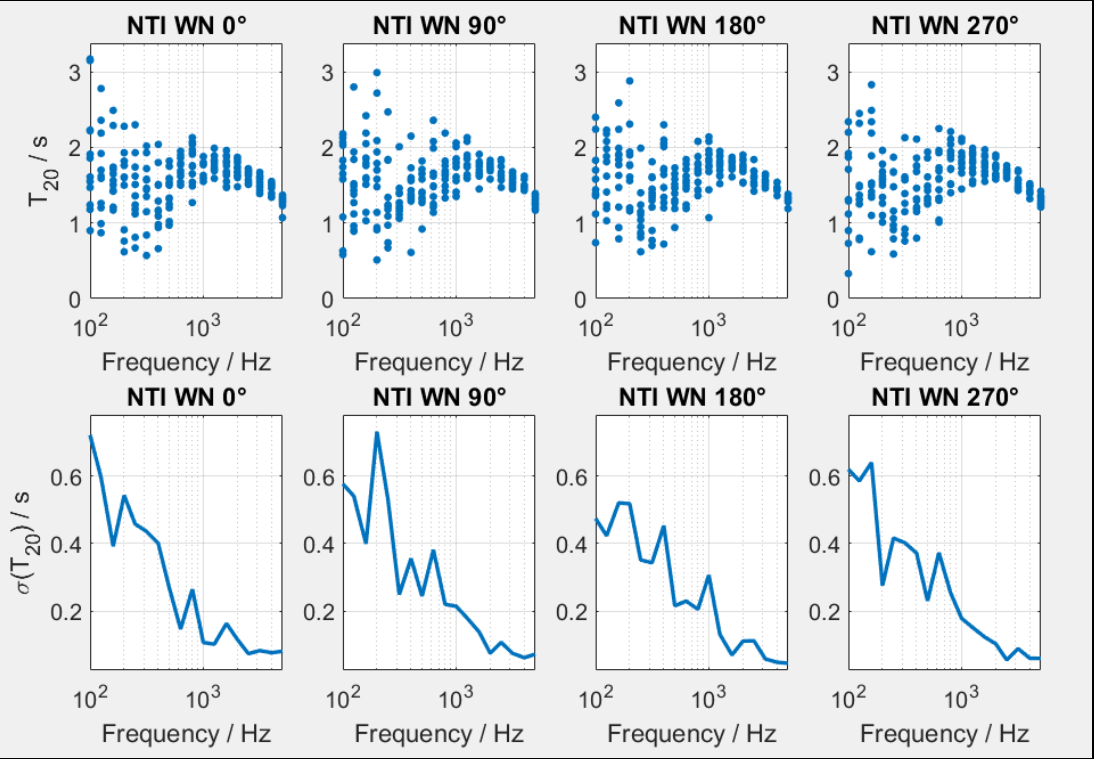
Διαγράμματα που αφορούν την αίθουσα διδασκαλίας Γ329.



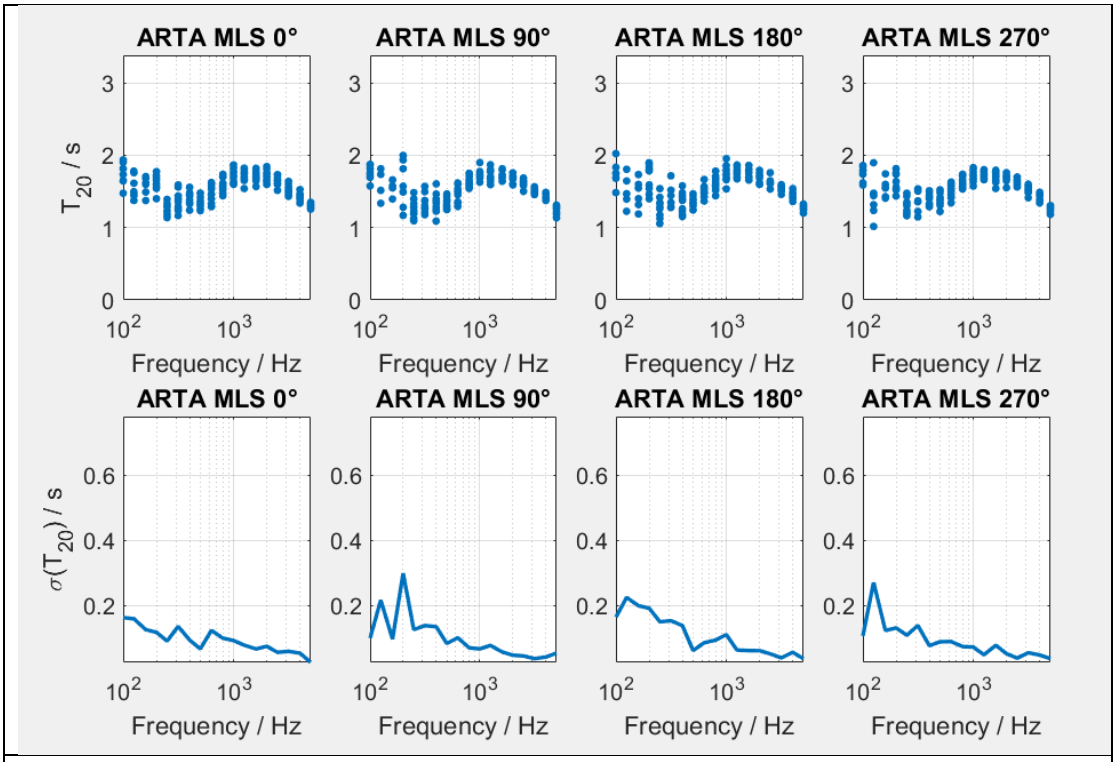
ΓΡΑΦΗΜΑ Π1: Διαγράμματα μετρήσεων αναφοράς του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού, με ροζ θόρυβο.



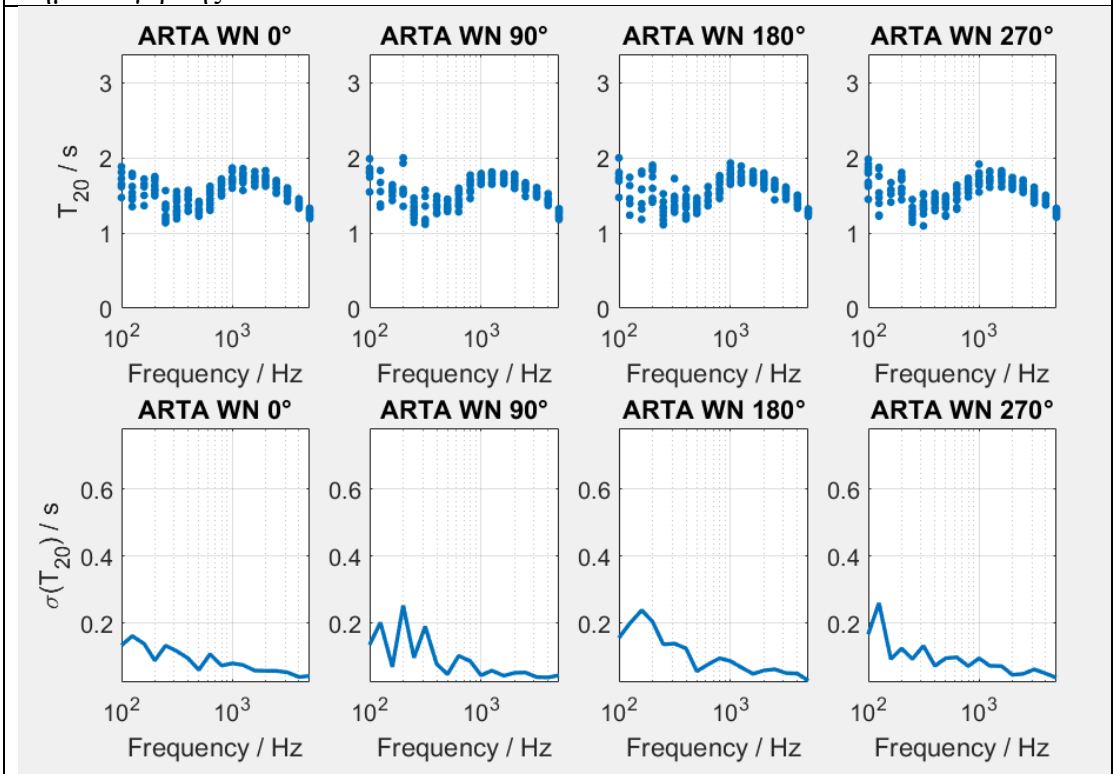
ΓΡΑΦΗΜΑ Π2: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και γεννήτρια συχνοτήτων με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου



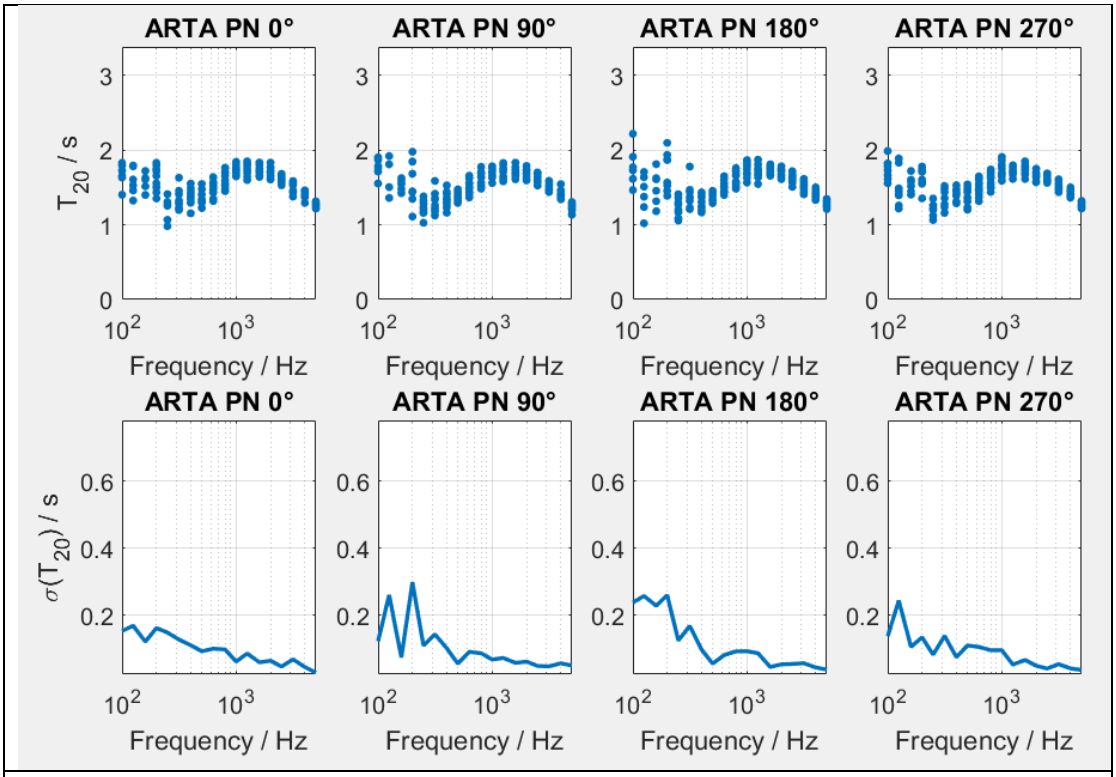
ΓΡΑΦΗΜΑ Π3: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και γεννήτρια συχνοτήτων με σήμα διέγερσης λευκού θορύβου



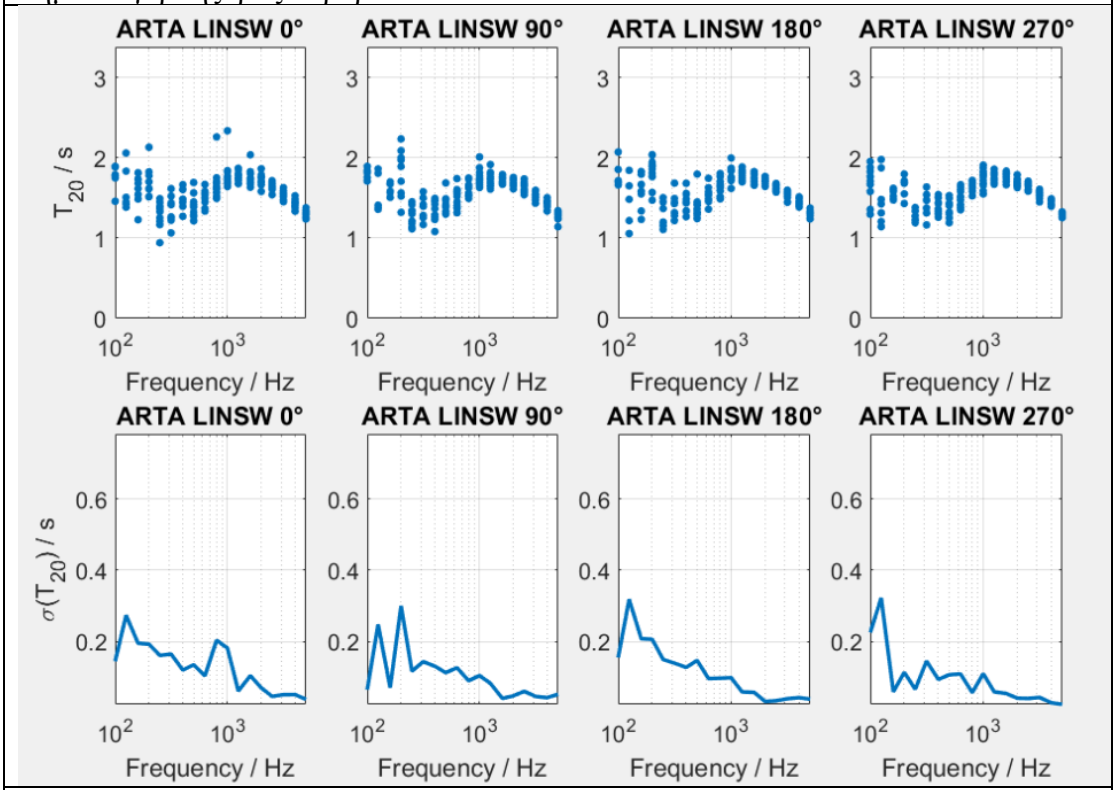
ΓΡΑΦΗΜΑ Π4: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης MLS.



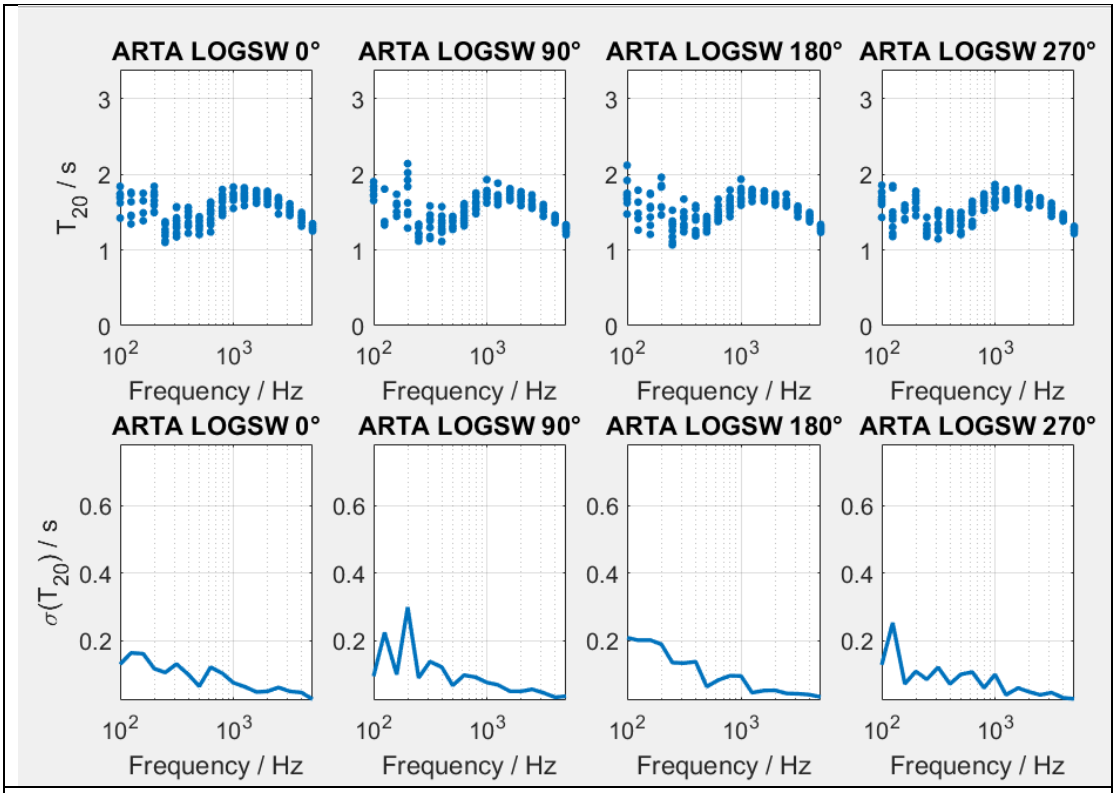
ΓΡΑΦΗΜΑ Π5: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης λευκού θορύβου.



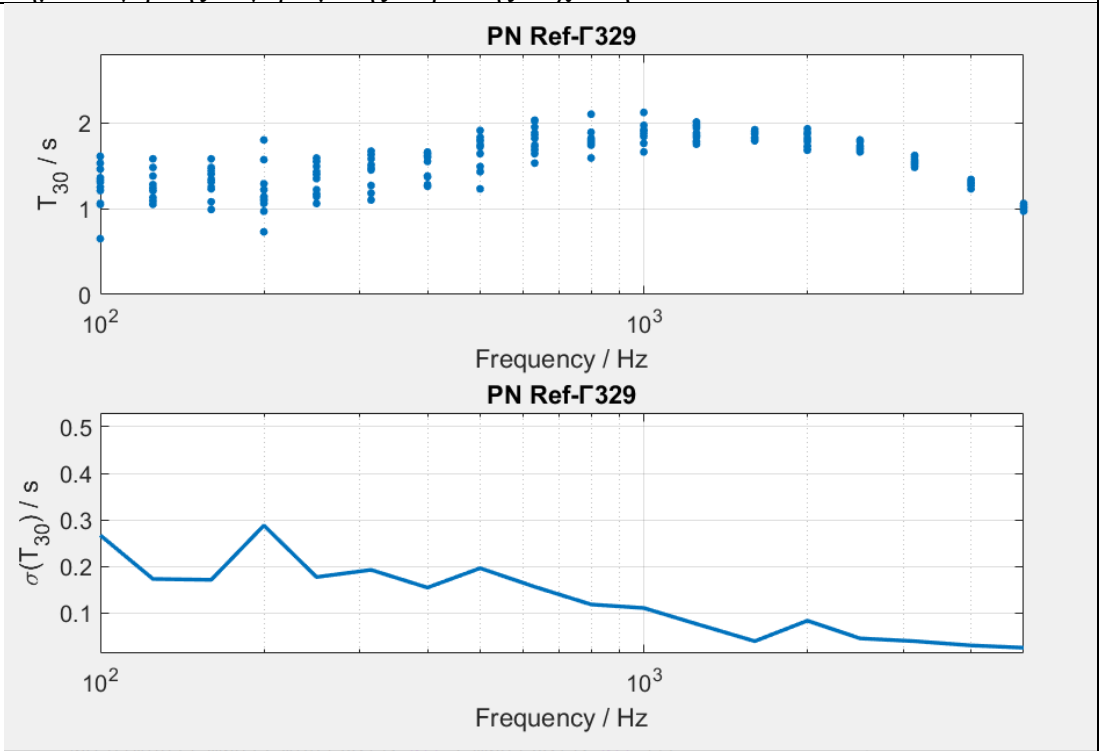
ΓΡΑΦΗΜΑ Π6: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου.



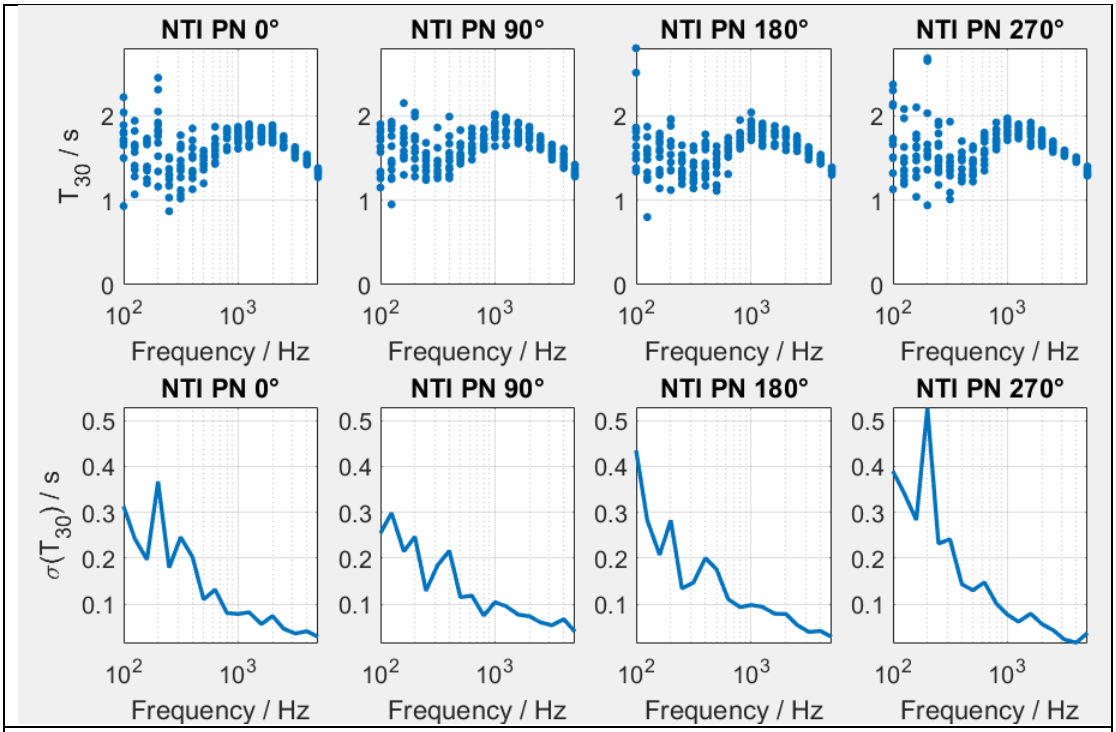
ΓΡΑΦΗΜΑ Π7: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης γραμμικής σάρωσης συχνοτήτων



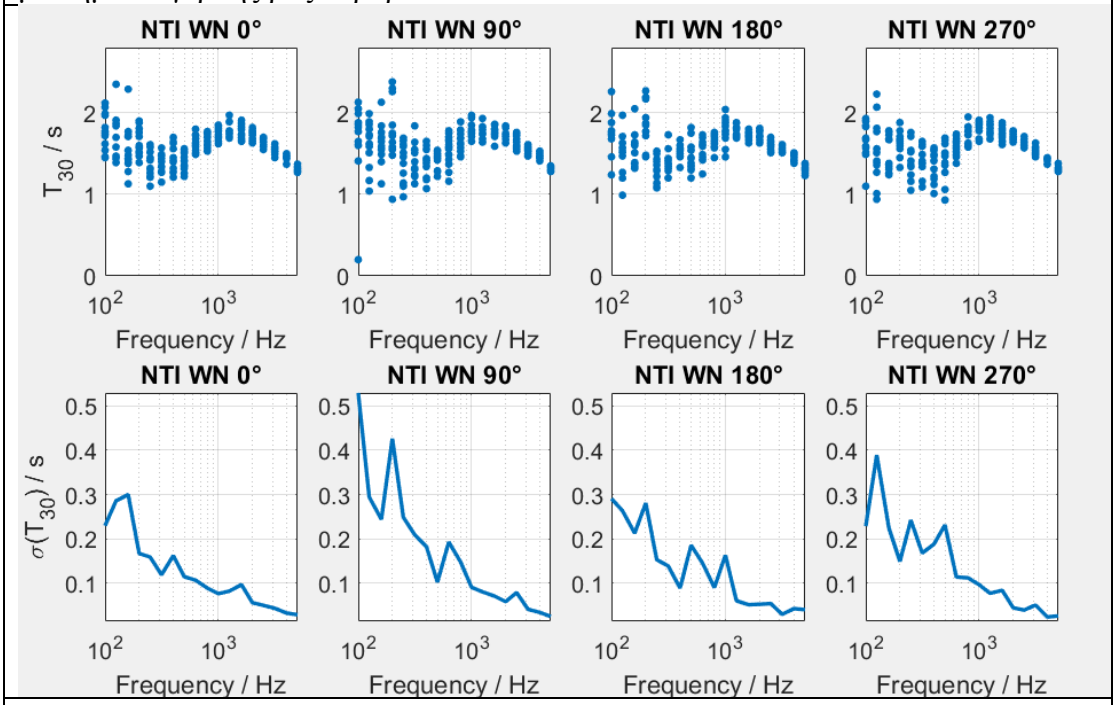
ΓΡΑΦΗΜΑ Π8: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων



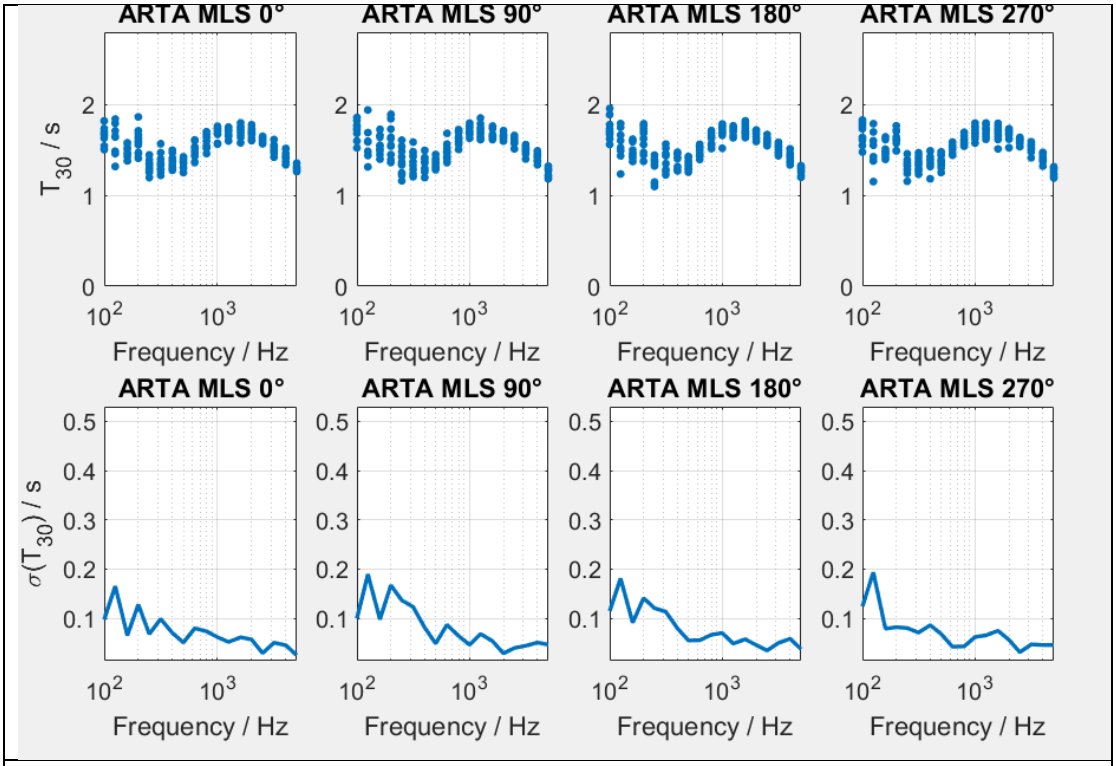
ΓΡΑΦΗΜΑ Π9: Διαγράμματα μετρήσεων αναφοράς του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού, με ροζ θόρυβο



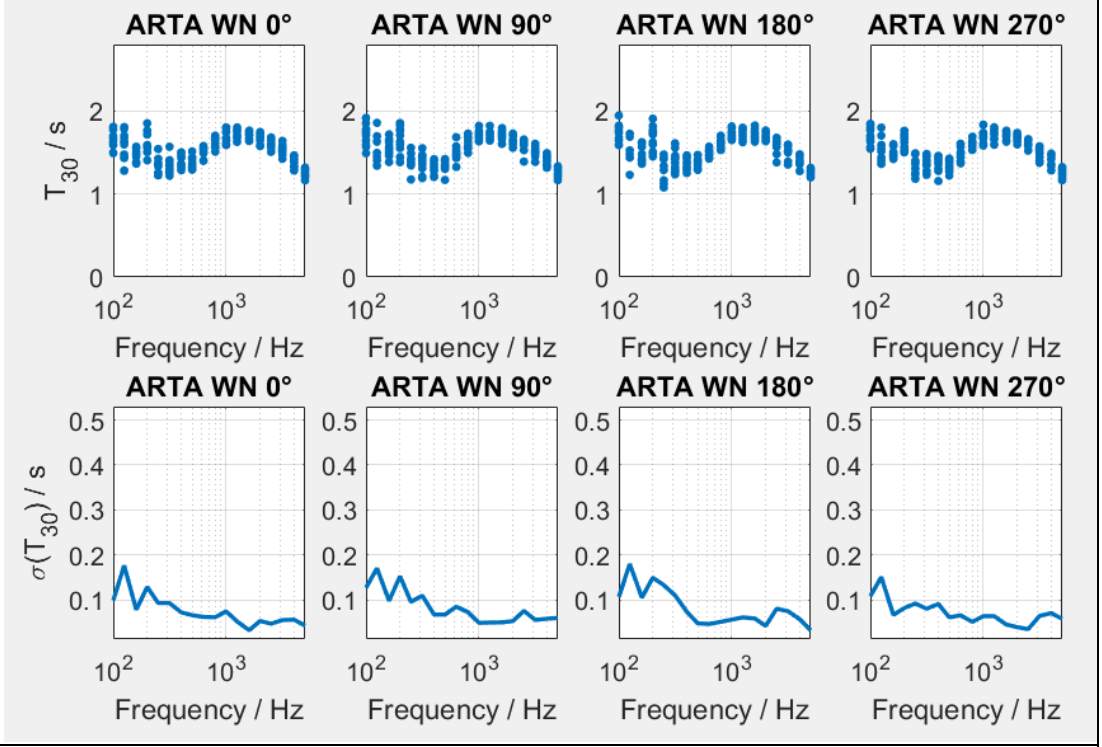
ΓΡΑΦΗΜΑ Π10: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και γεννήτρια συχνοτήτων με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου



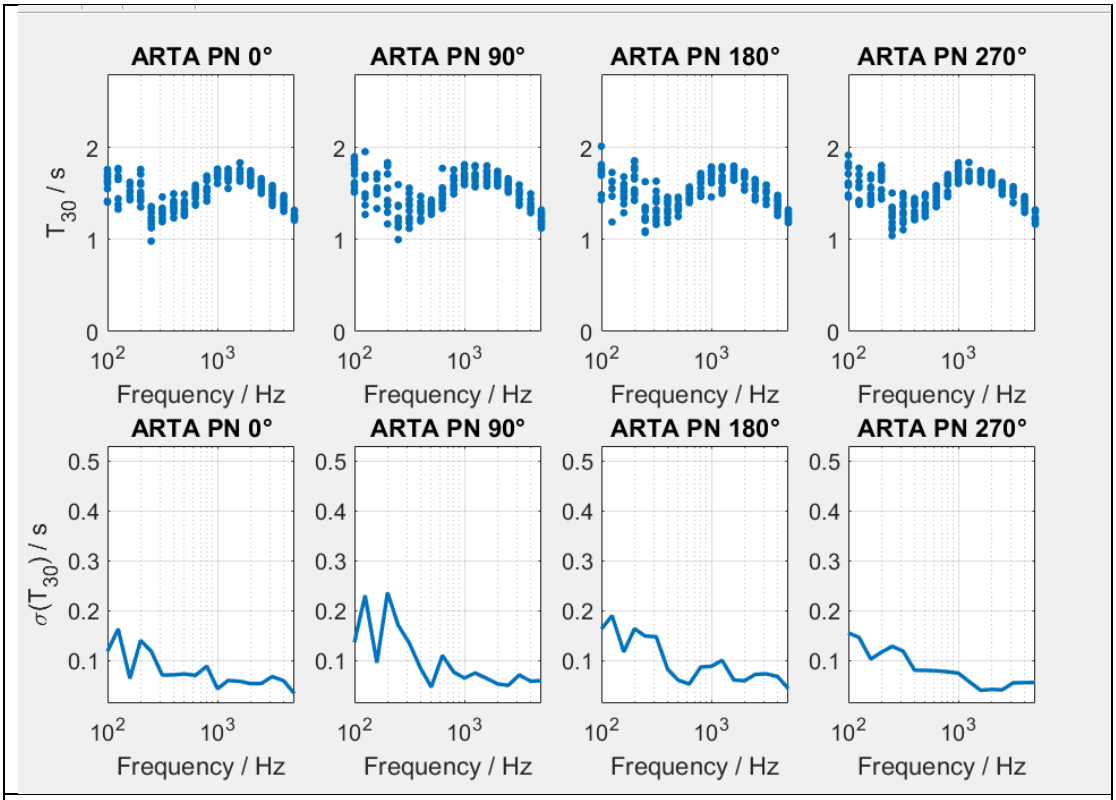
ΓΡΑΦΗΜΑ Π11: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και γεννήτρια συχνοτήτων με σήμα διέγερσης λευκού θορύβου



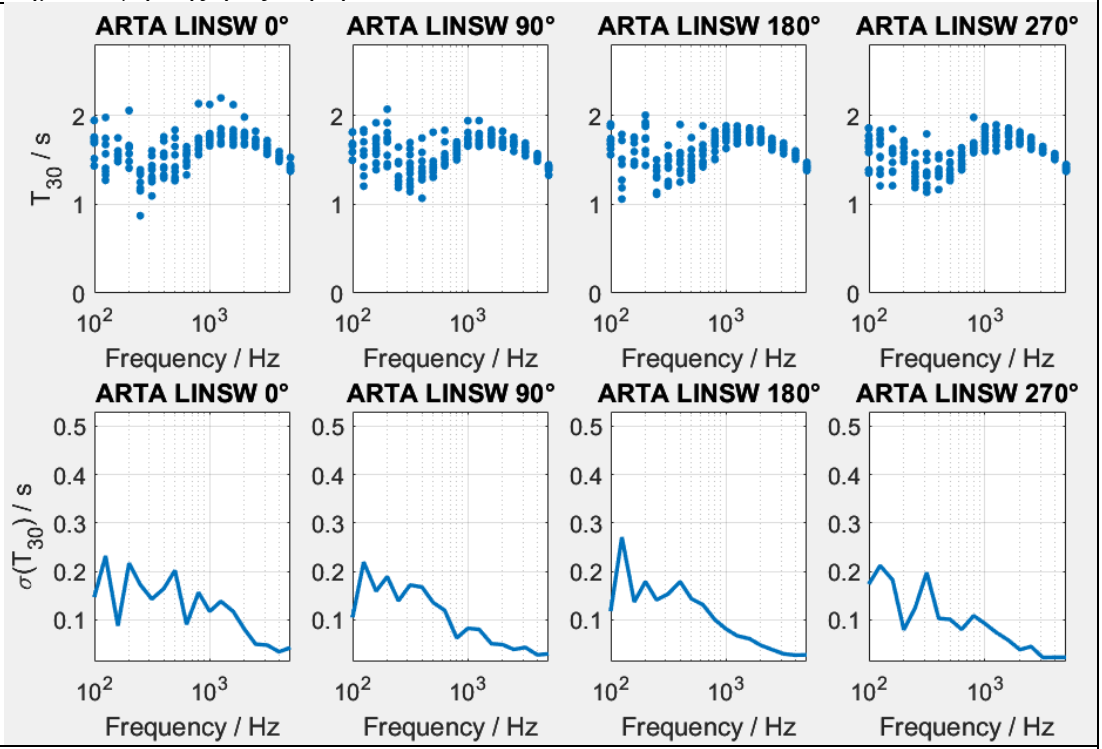
ΓΡΑΦΗΜΑ Π12: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης MLS.



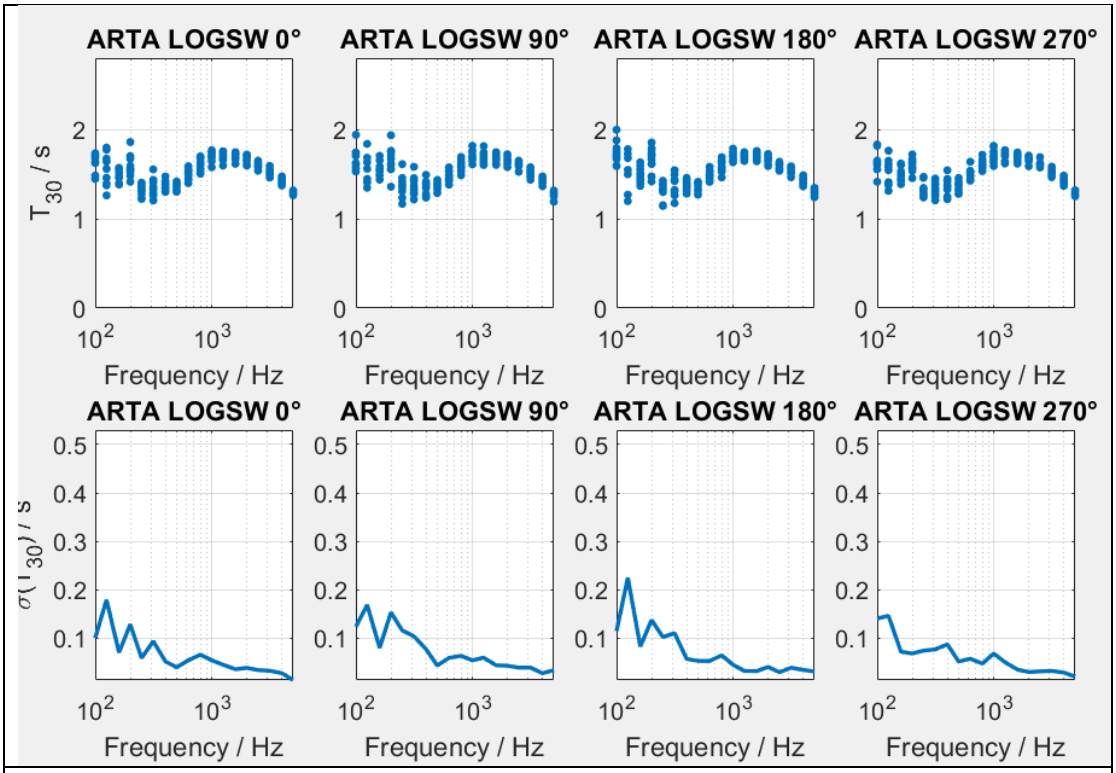
ΓΡΑΦΗΜΑ Π13: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης λευκού θορύβου.



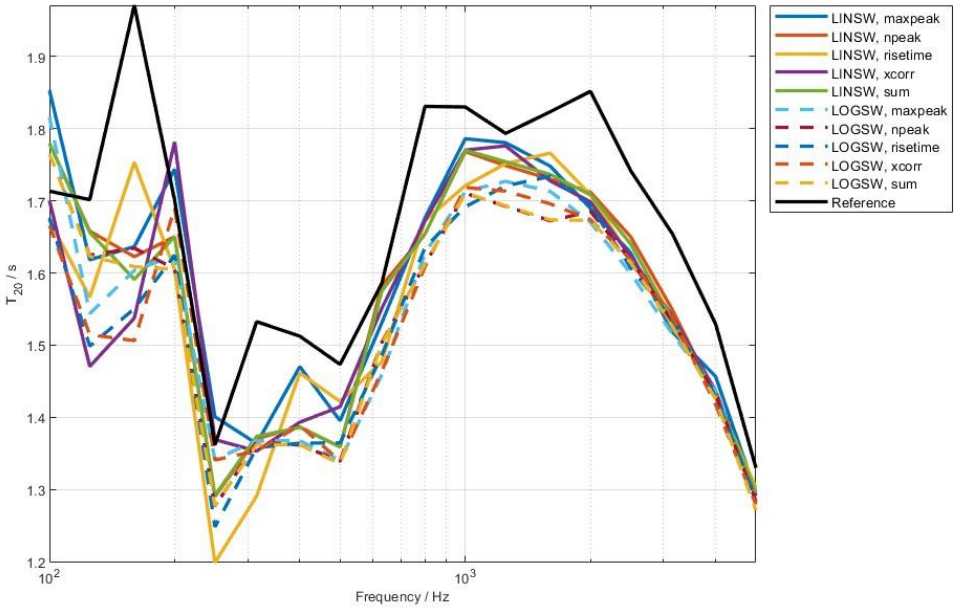
ΓΡΑΦΗΜΑ Π14: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου.



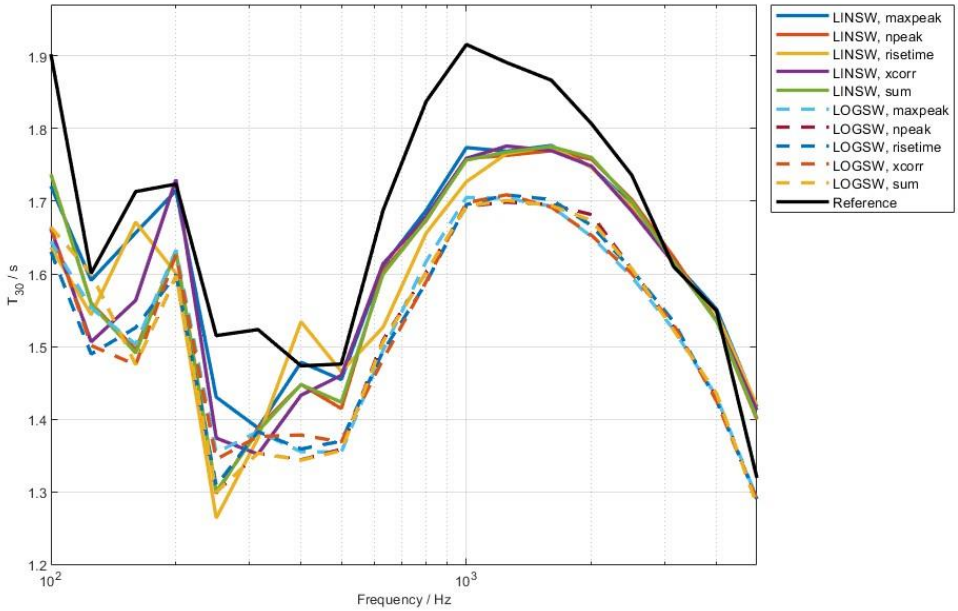
ΓΡΑΦΗΜΑ Π15: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης γραμμικής σάρωσης συχνοτήτων



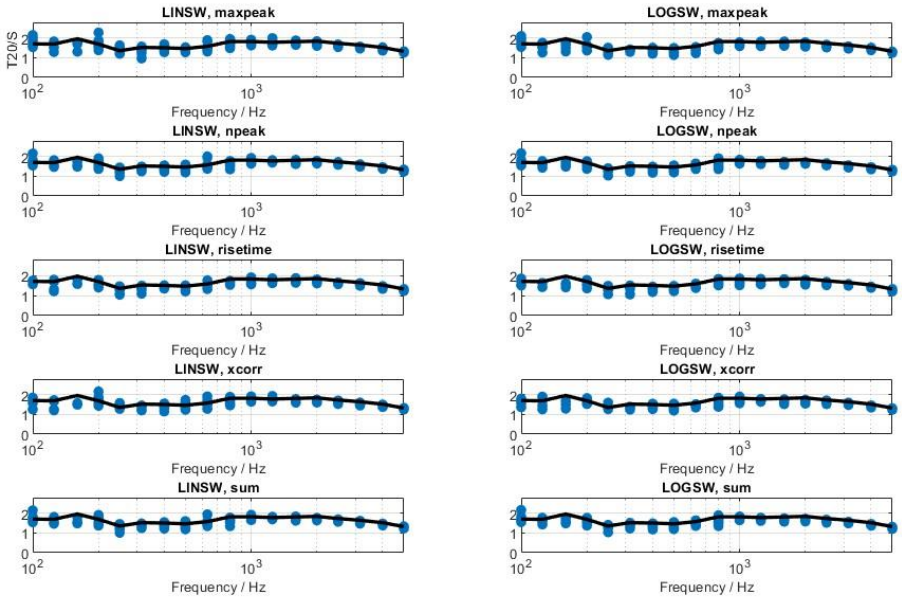
ΓΡΑΦΗΜΑ Π16: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων



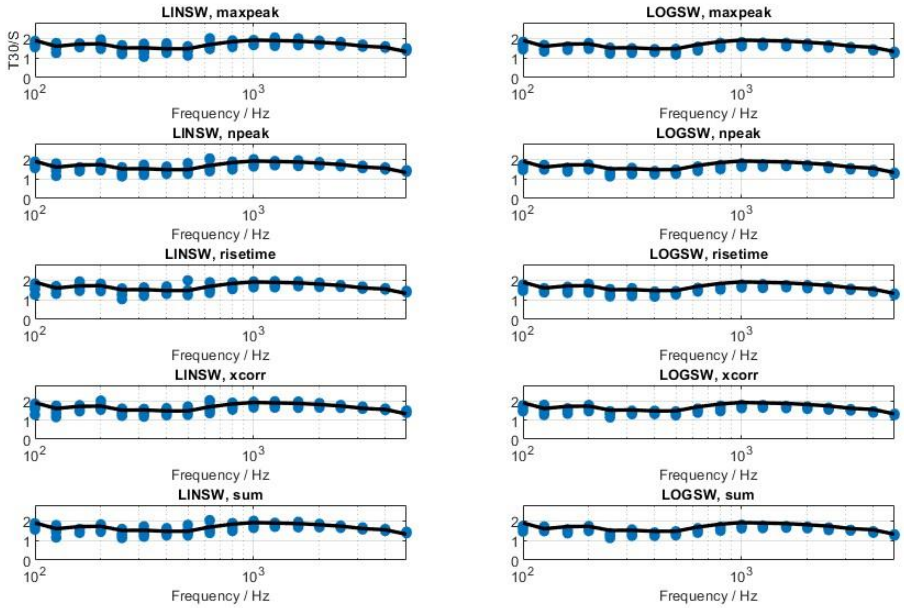
ΓΡΑΦΗΜΑ Π17: Γράφημα του χρόνου T20 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς σύγκριση των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.



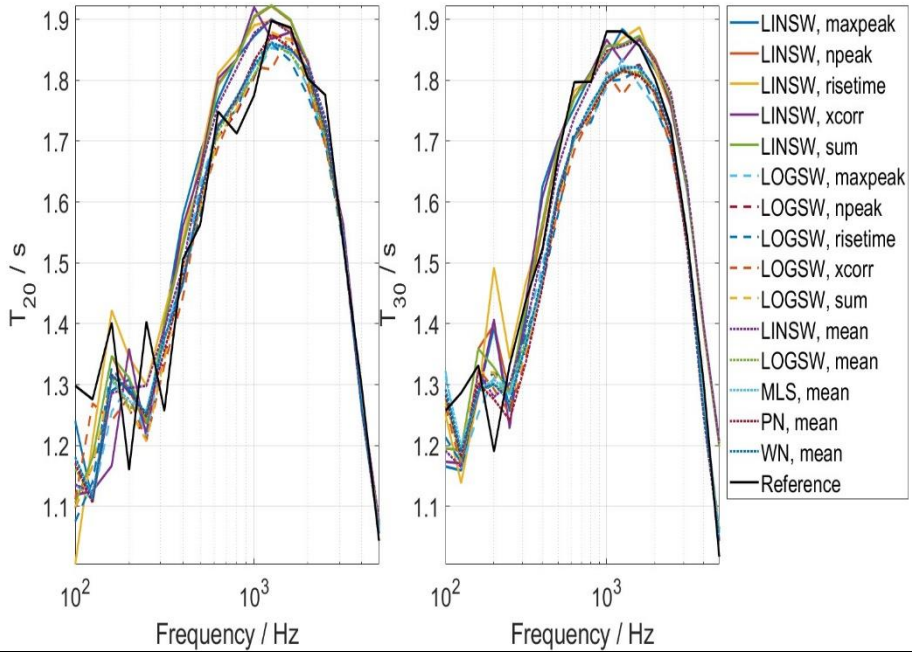
ΓΡΑΦΗΜΑ Π18: Γράφημα του χρόνου Τ30 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς σύγκριση των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.



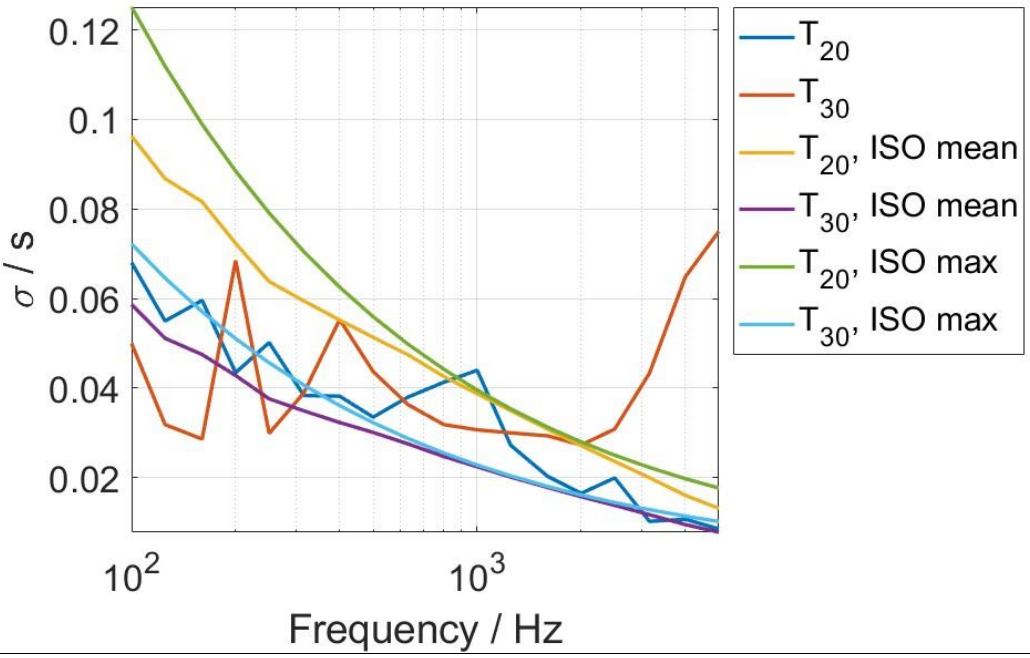
ΓΡΑΦΗΜΑ Π19: Γραφήματα του χρόνου Τ20 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς έλεγχο της διασποράς των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.



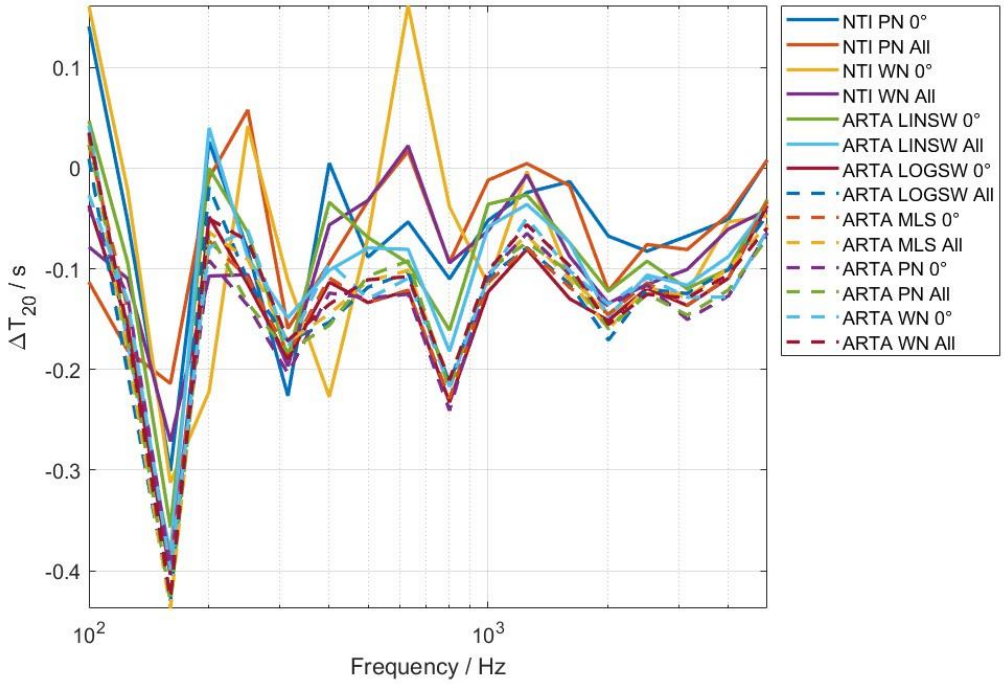
ΓΡΑΦΗΜΑ Π20: Γραφήματα του χρόνου Τ30 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς έλεγχο της διασποράς των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.



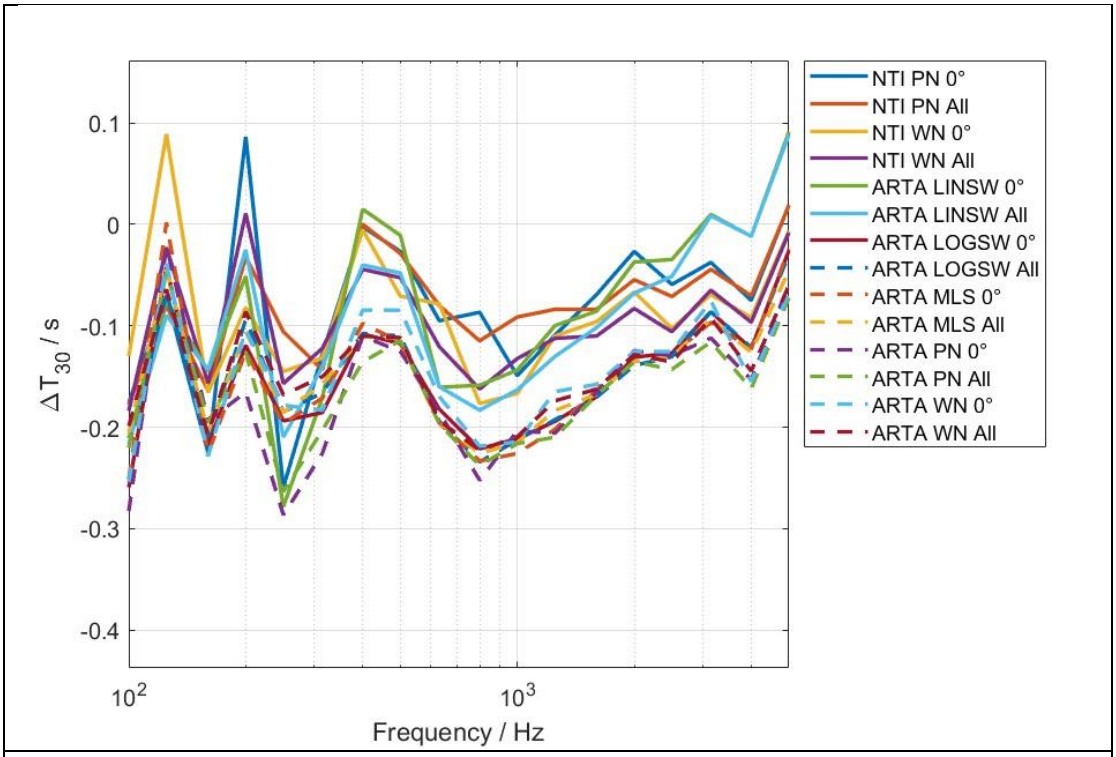
ΓΡΑΦΗΜΑ Π21: Γραφήματα των χρόνων Τ20 και Τ30 όπου περιέχουν μετρήσεις αναφοράς προς σύγκριση με μετρήσεις γραμμικής-λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης, καθώς και μέσο όρο των μετρήσεων όλων των σημάτων ακουστικής διέγερσης.



ΓΡΑΦΗΜΑ Π22: Διάγραμμα των μετρούμενων χρόνων Τ20 και Τ30 και ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης αυτών βάσει του ISO 1996-2:2017 για τον μέσο όρο (mean) των μετρούμενων χρόνων και (max) για τις μέγιστες τιμές τους.

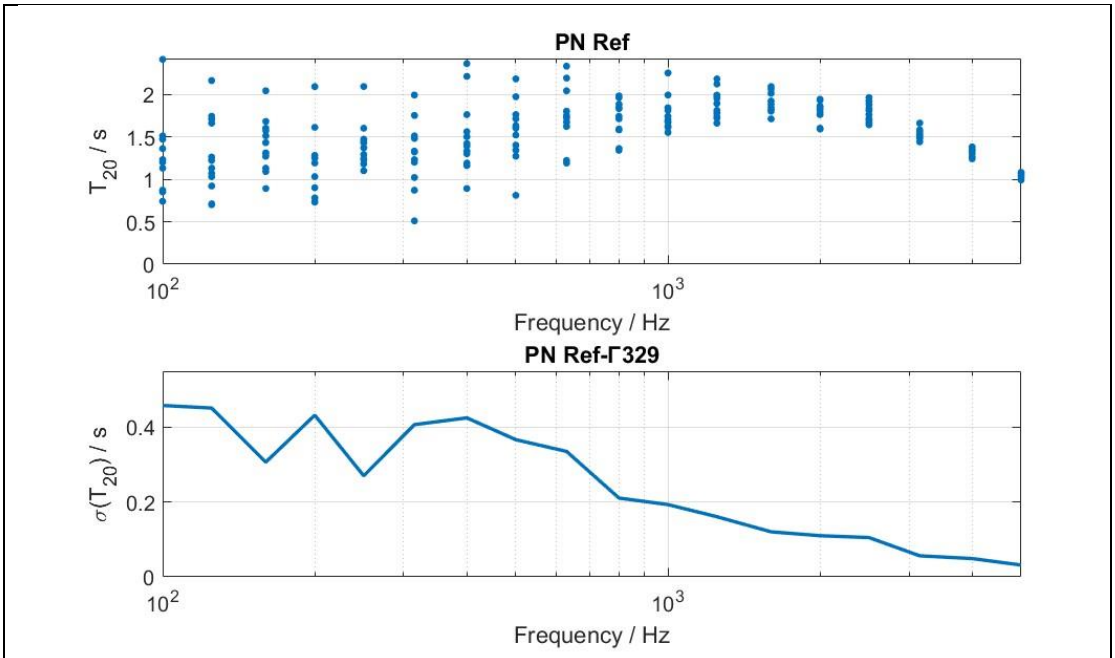


ΓΡΑΦΗΜΑ Π23: Διάγραμμα του χρόνου Τ20 που αποτυπώνει τις αποκλίσεις για τις μετρήσεις στις 0° και τον μέσο όρο για όλες τις γωνίες μέτρησης.

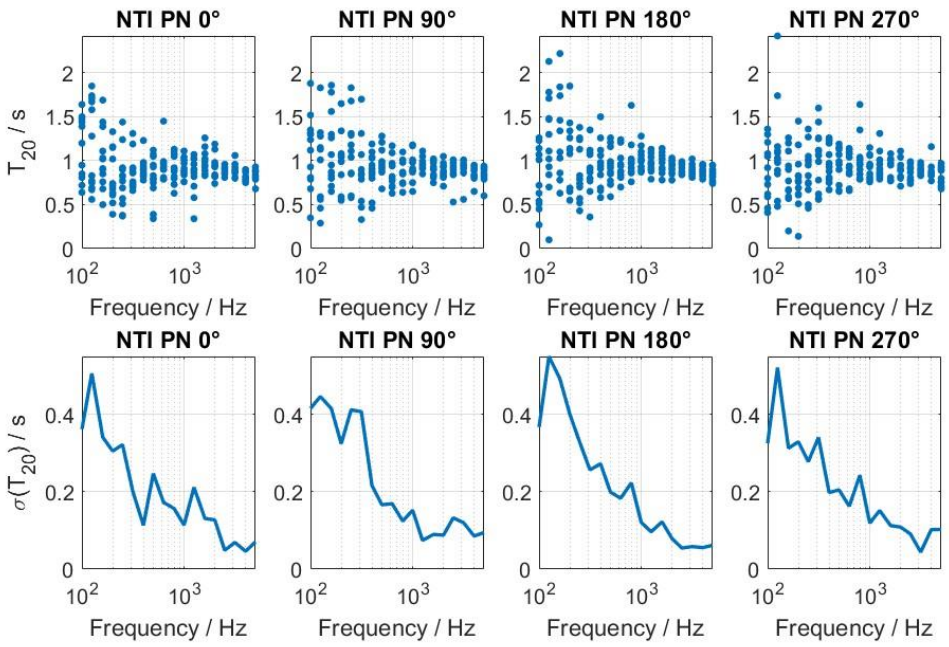


ΓΡΑΦΗΜΑ Π24: Διάγραμμα του χρόνου Τ30 που αποτυπώνει τις αποκλίσεις για τις μετρήσεις στις 0° και τον μέσο όρο για όλες τις γωνίες μέτρησης.

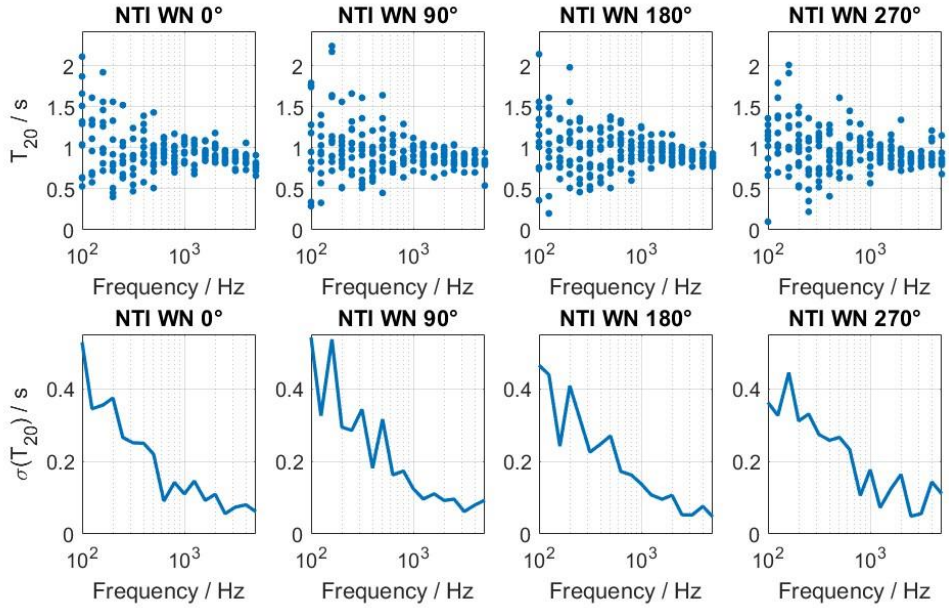
Διαγράμματα που αφορούν την αίθουσα του αμφιθεάτρου.



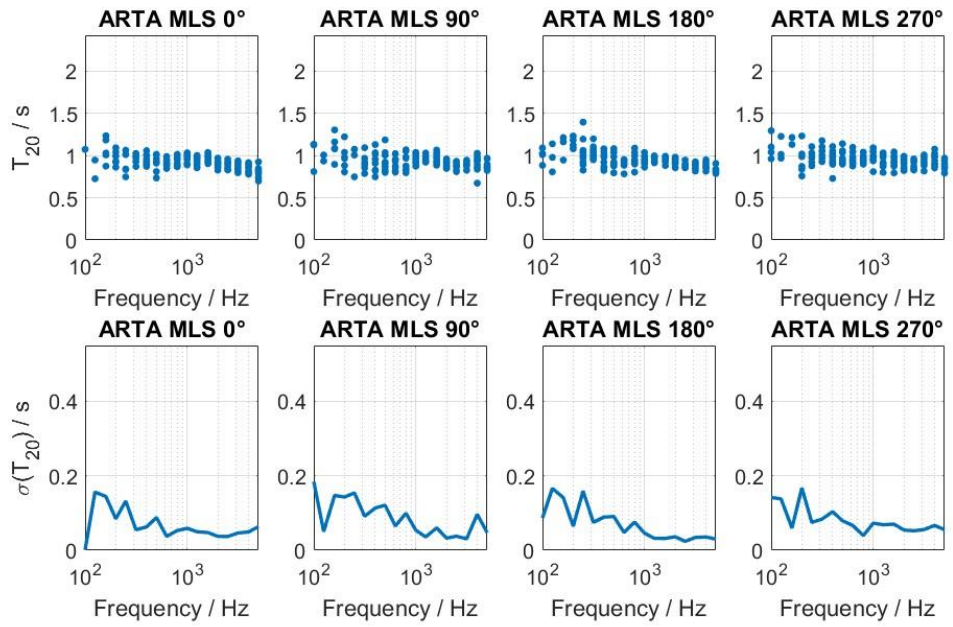
ΓΡΑΦΗΜΑ Π25: Διαγράμματα μετρήσεων αναφοράς του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού, με ροζ θόρυβο



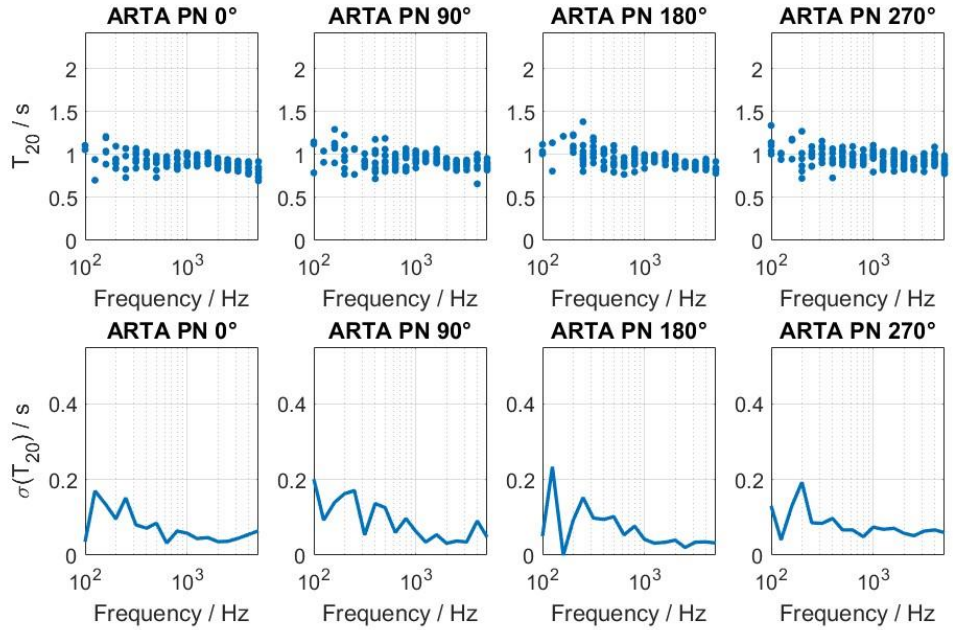
ΓΡΑΦΗΜΑ Π26: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και γεννήτρια συχνοτήτων με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου



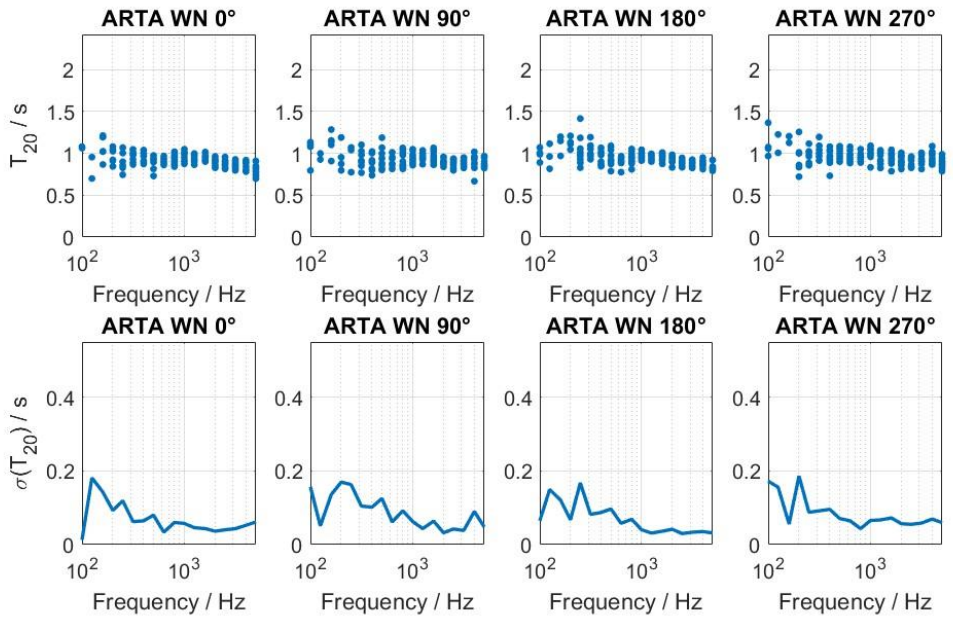
ΓΡΑΦΗΜΑ Π27: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και γεννήτρια συχνοτήτων με σήμα διέγερσης λευκού θορύβου



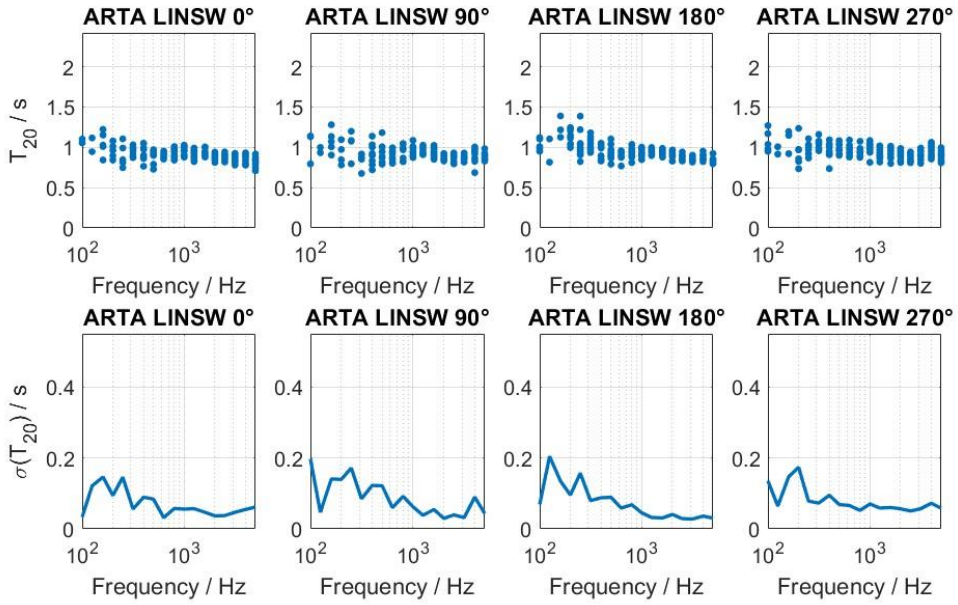
ΓΡΑΦΗΜΑ Π28: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης MLS.



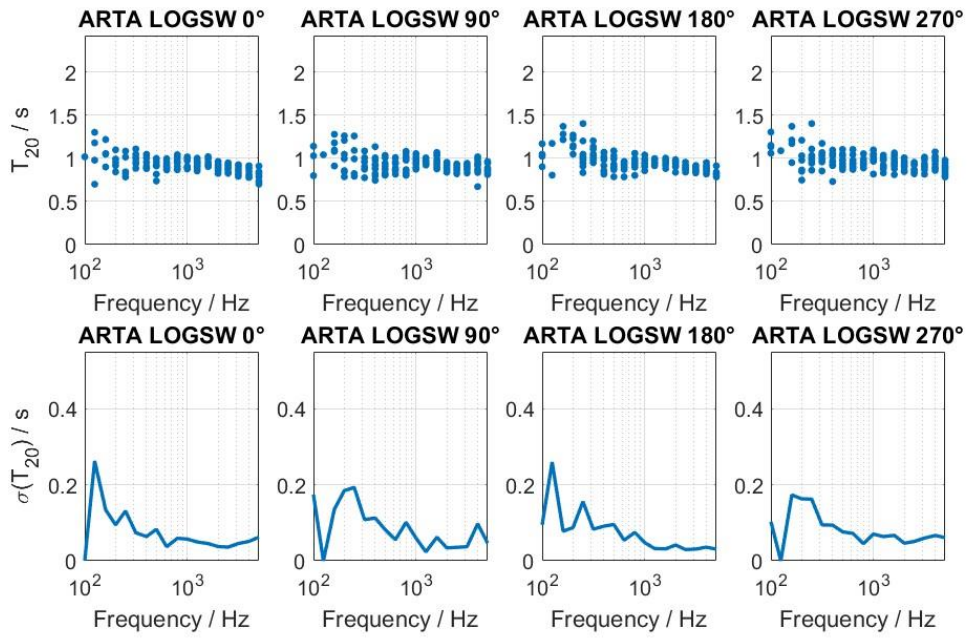
ΓΡΑΦΗΜΑ Π29: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου.



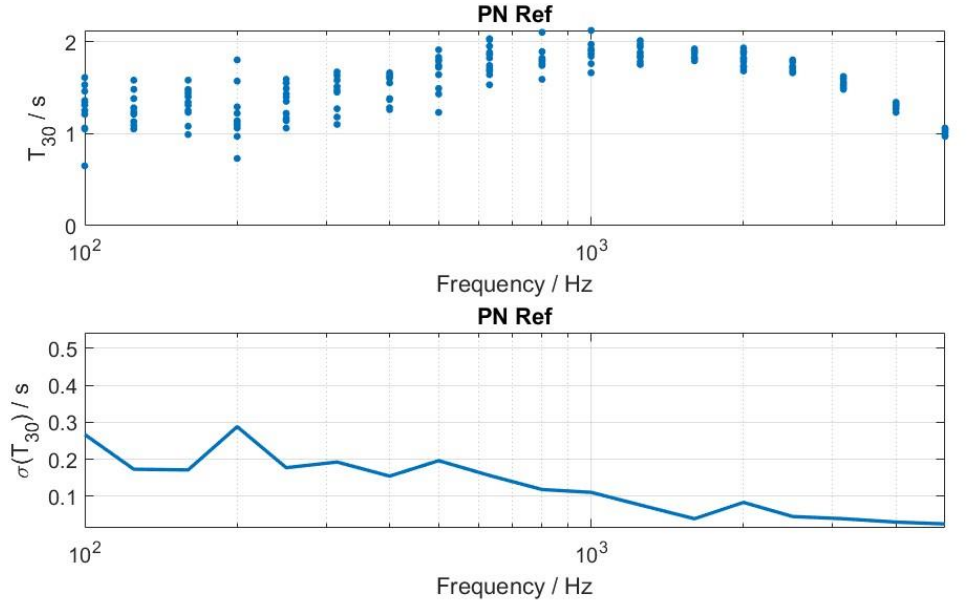
ΓΡΑΦΗΜΑ Π30: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης λευκού θορύβου.



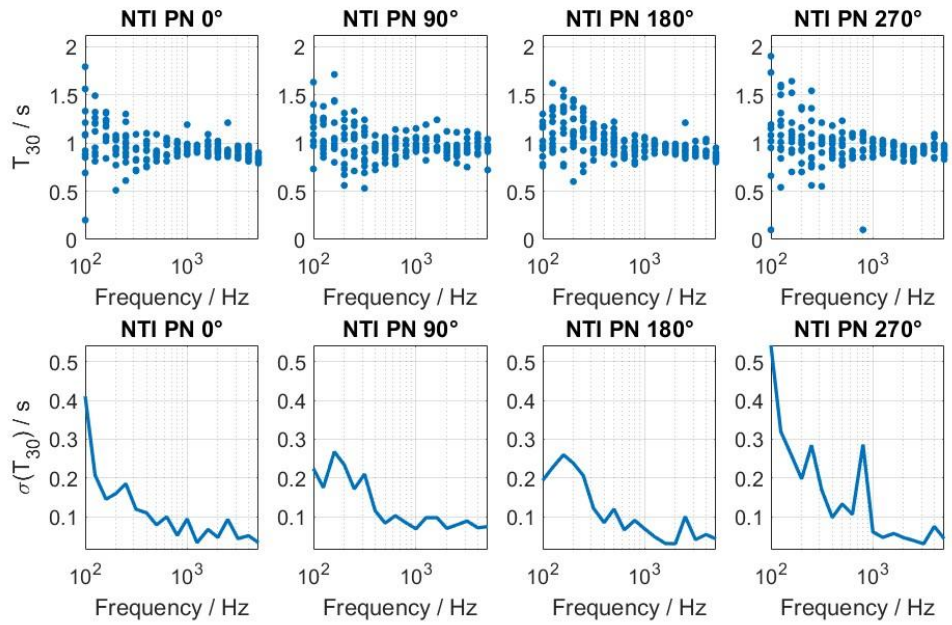
ΓΡΑΦΗΜΑ Π31: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ20 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης γραμμικής σάρωσης συχνοτήτων



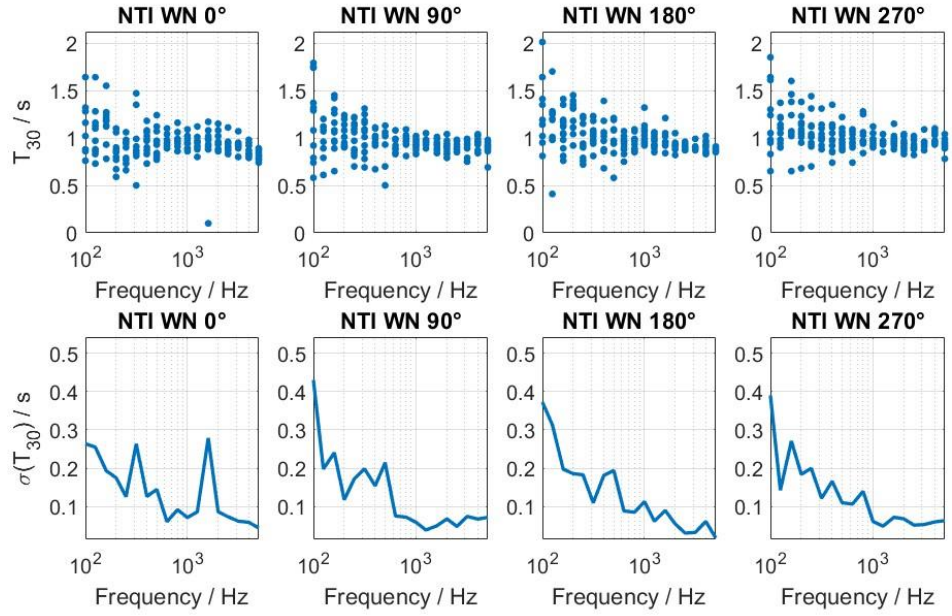
ΓΡΑΦΗΜΑ Π32: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων



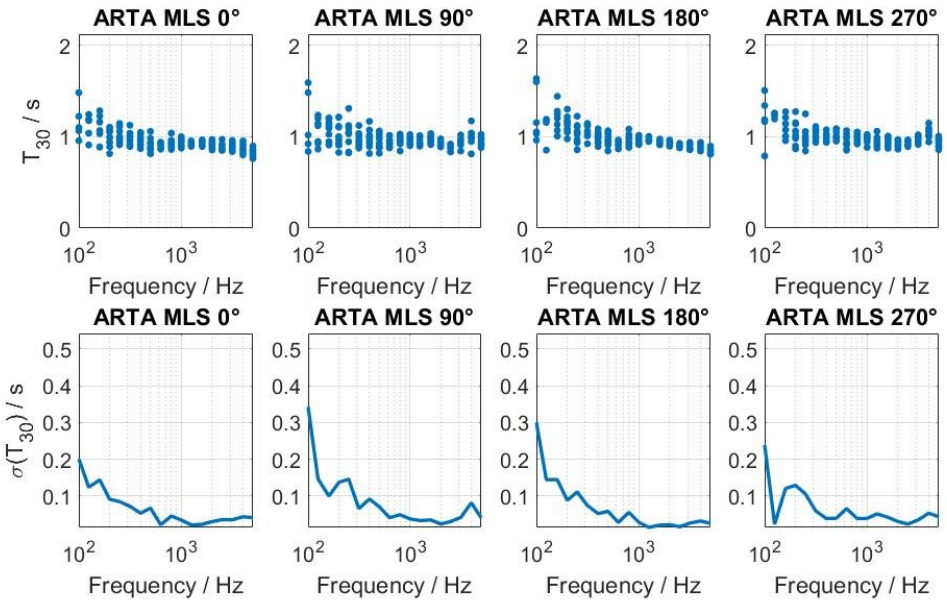
ΓΡΑΦΗΜΑ Π33: Διαγράμματα μετρήσεων αναφοράς του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού, με ροζ θόρυβο



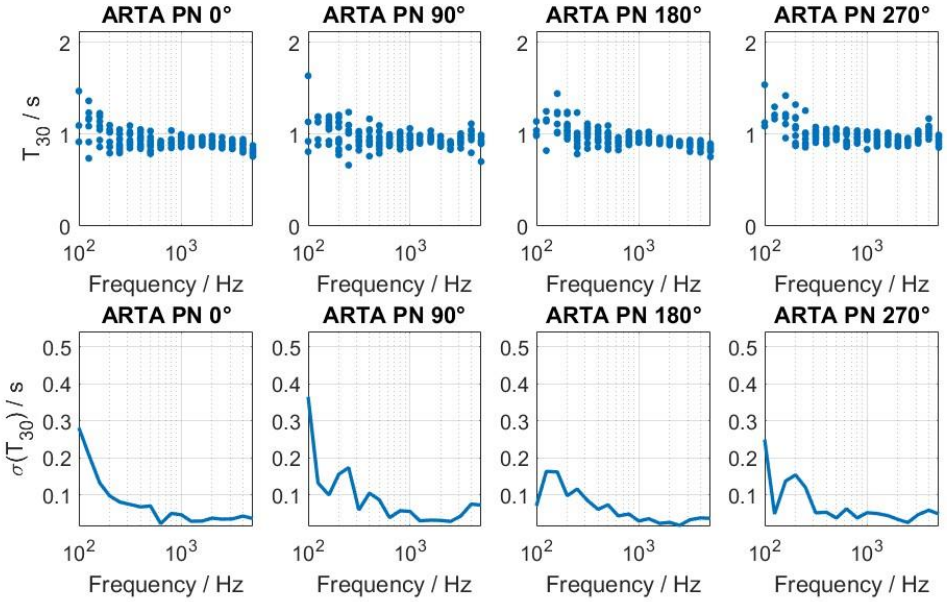
ΓΡΑΦΗΜΑ Π34: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και γεννήτρια συχνοτήτων με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου



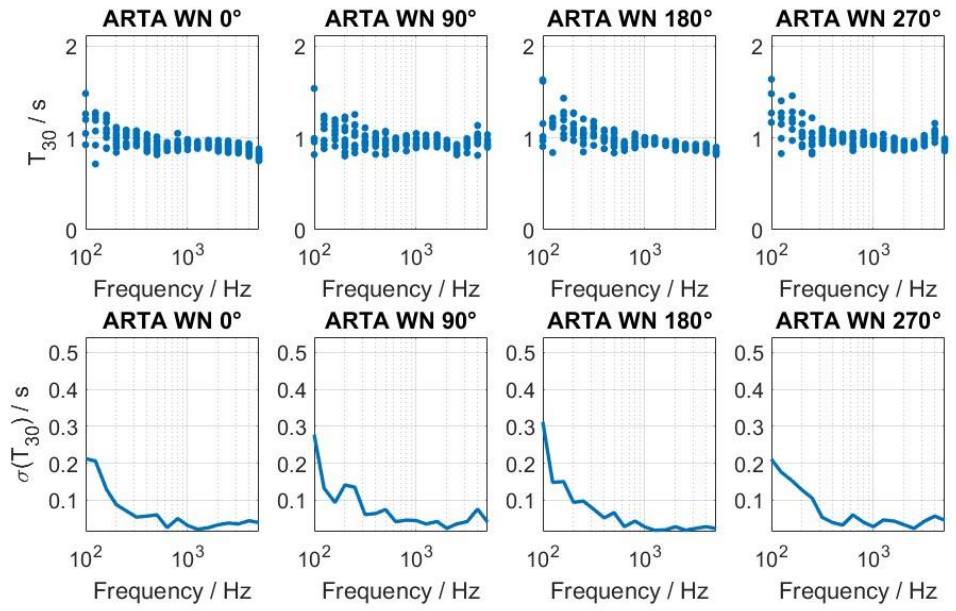
ΓΡΑΦΗΜΑ Π35: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και γεννήτρια συχνοτήτων με σήμα διέγερσης λευκού θορύβου



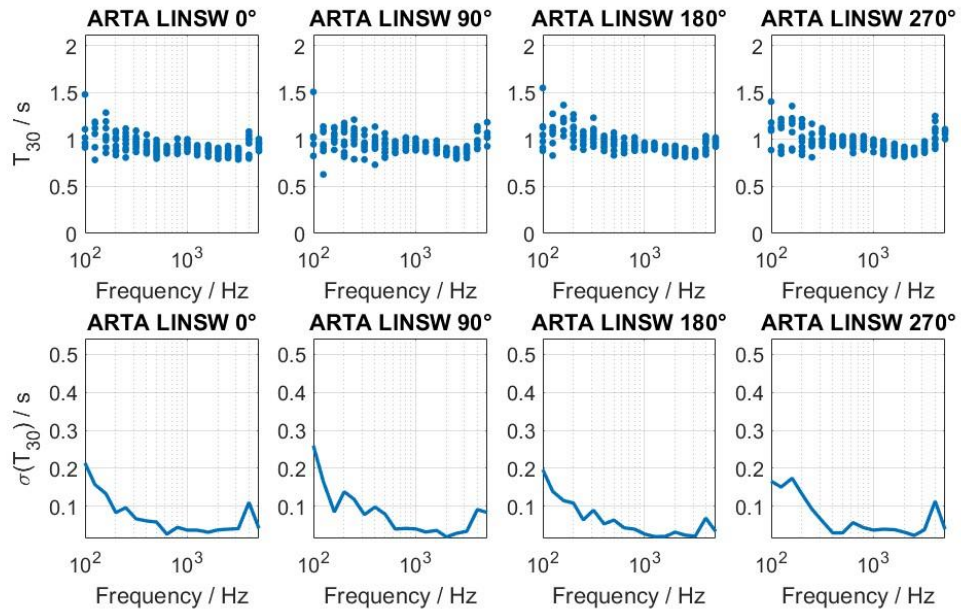
ΓΡΑΦΗΜΑ Π36: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης MLS.



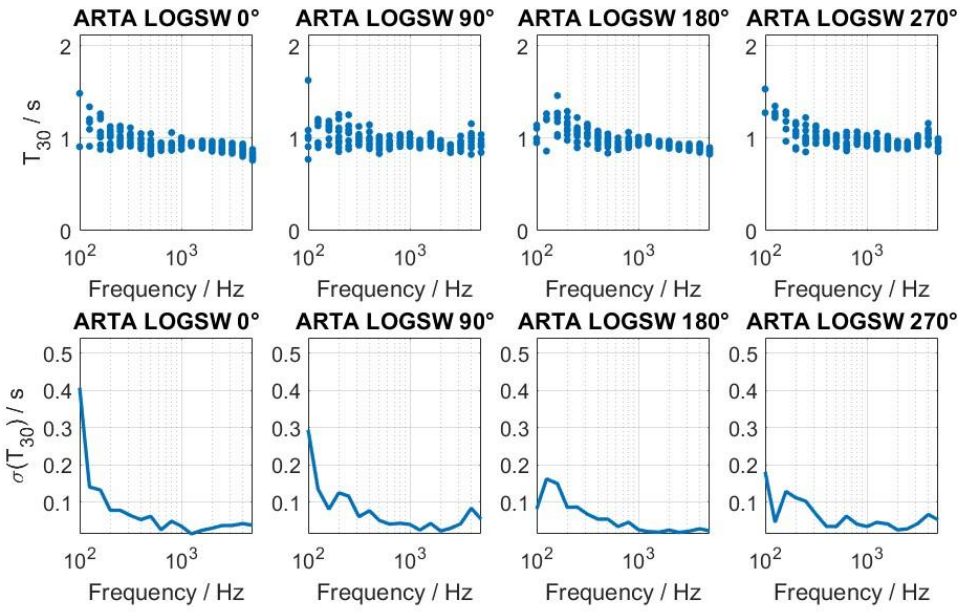
ΓΡΑΦΗΜΑ Π37: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης ροζ θορύβου.



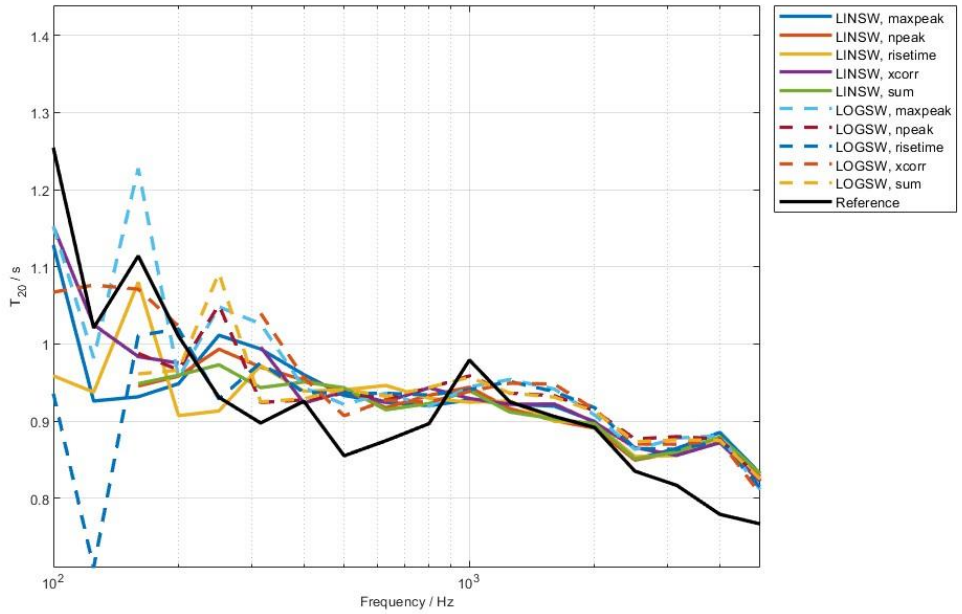
ΓΡΑΦΗΜΑ Π38: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης λευκού θορύβου.



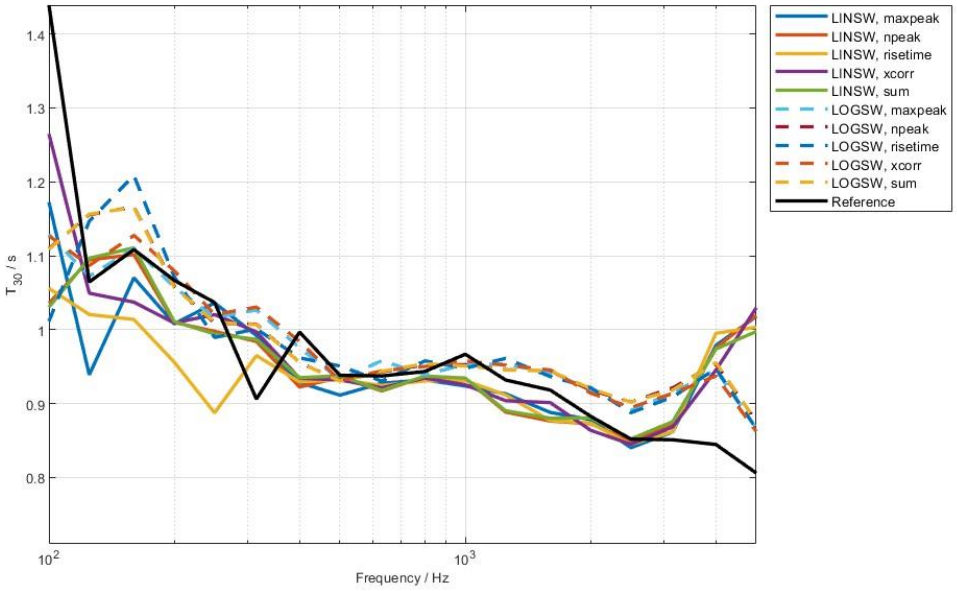
ΓΡΑΦΗΜΑ Π39: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου Τ30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης γραμμικής σάρωσης συχνοτήτων



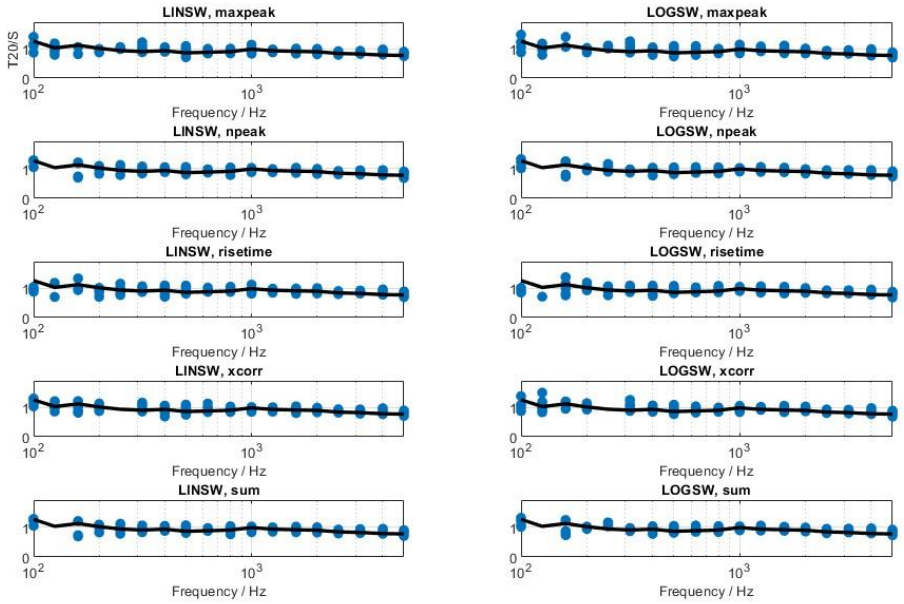
ΓΡΑΦΗΜΑ Π40: Διαγράμματα μετρήσεων του χρόνου T30 και της τυπικής απόκλισης αυτού σε όλες τις γωνίες, με το ενεργό ηχείο και λογισμικό ARTA με σήμα διέγερσης λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων



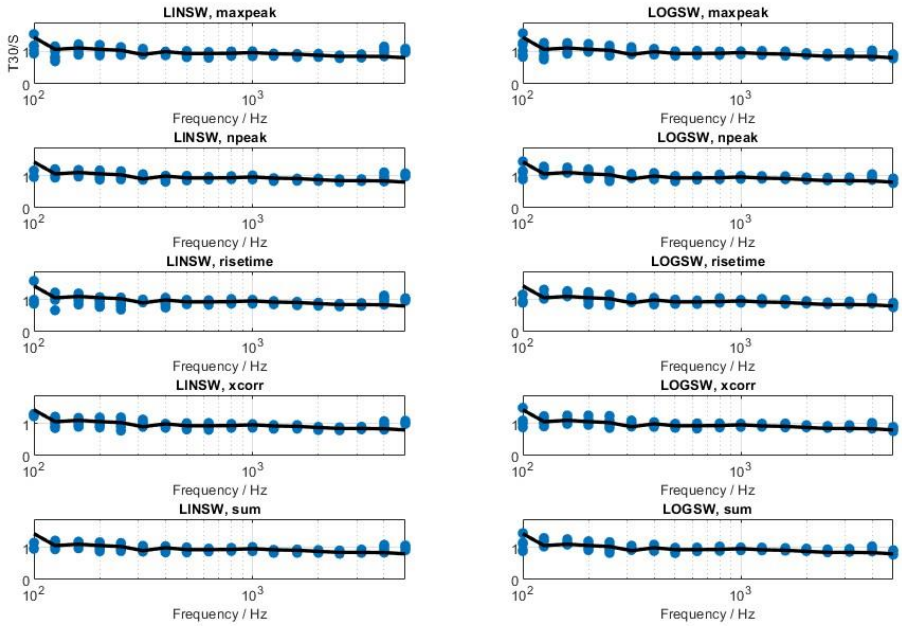
ΓΡΑΦΗΜΑ Π41: Γράφημα του χρόνου T20 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς σύγκριση των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.



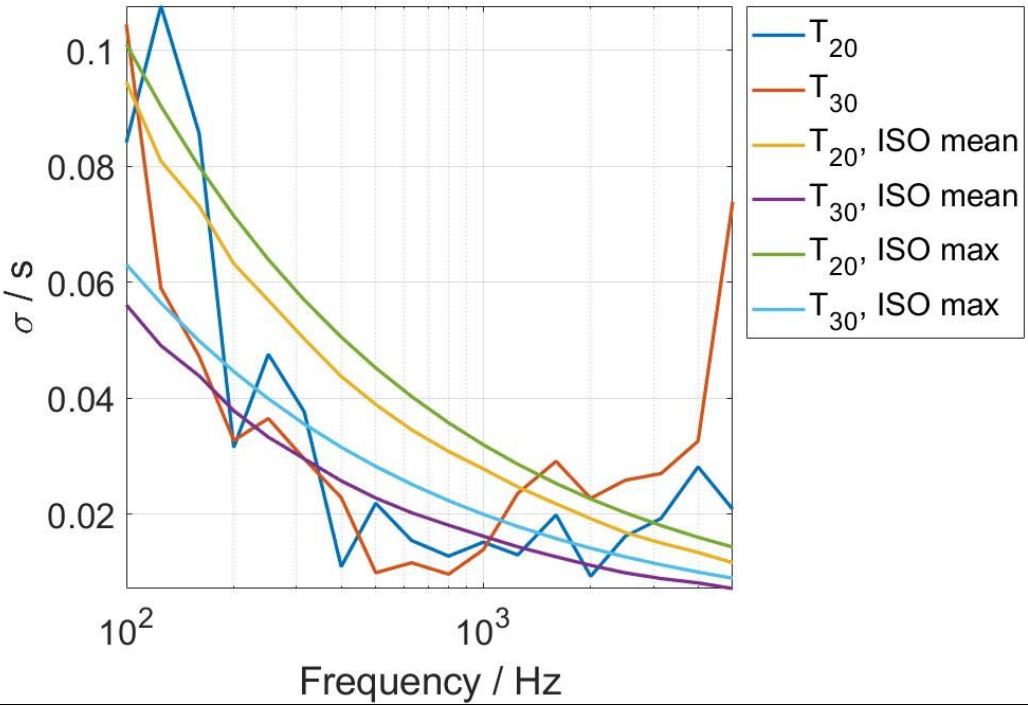
ΓΡΑΦΗΜΑ Π42: Γράφημα του χρόνου Τ30 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς σύγκριση των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.



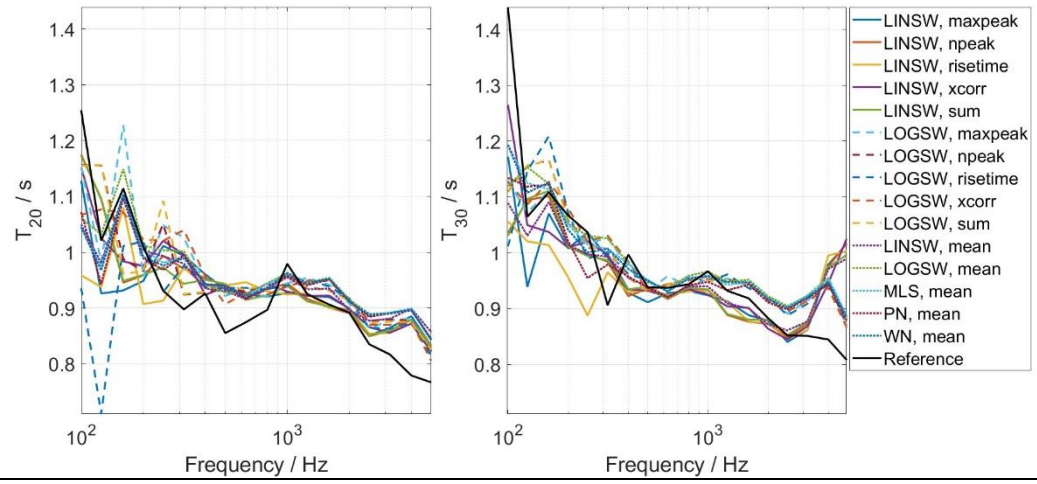
ΓΡΑΦΗΜΑ Π43: Γραφήματα του χρόνου Τ20 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς έλεγχο της διασποράς των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.



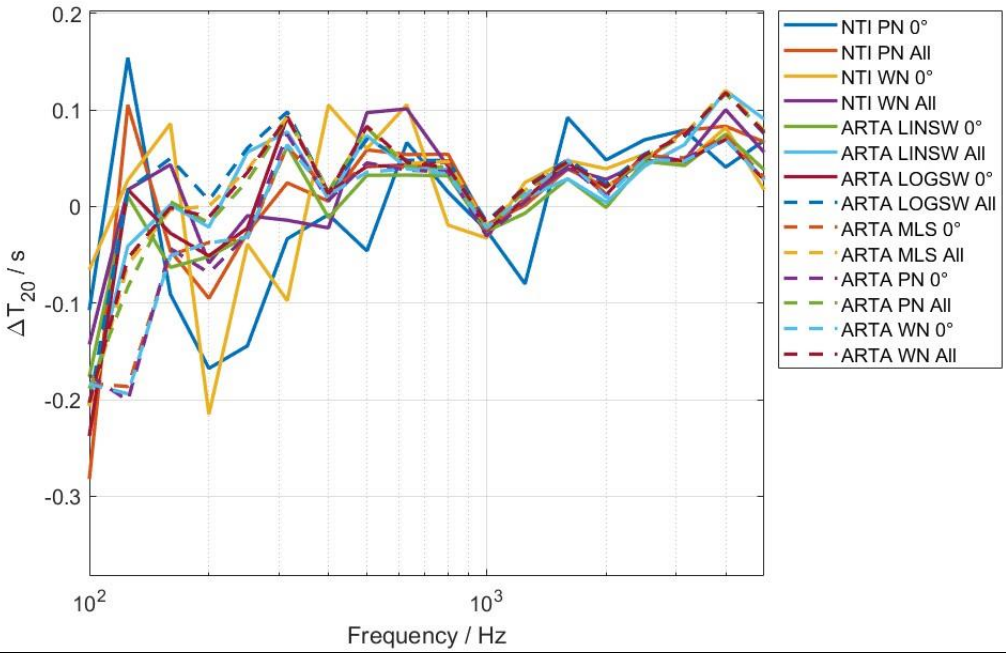
ΓΡΑΦΗΜΑ Π44: Γραφήματα του χρόνου T30 όπου περιέχει μετρήσεις αναφοράς προς έλεγχο της διασποράς των μετρήσεων με λογαριθμική και γραμμική σάρωση συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης των σημάτων.



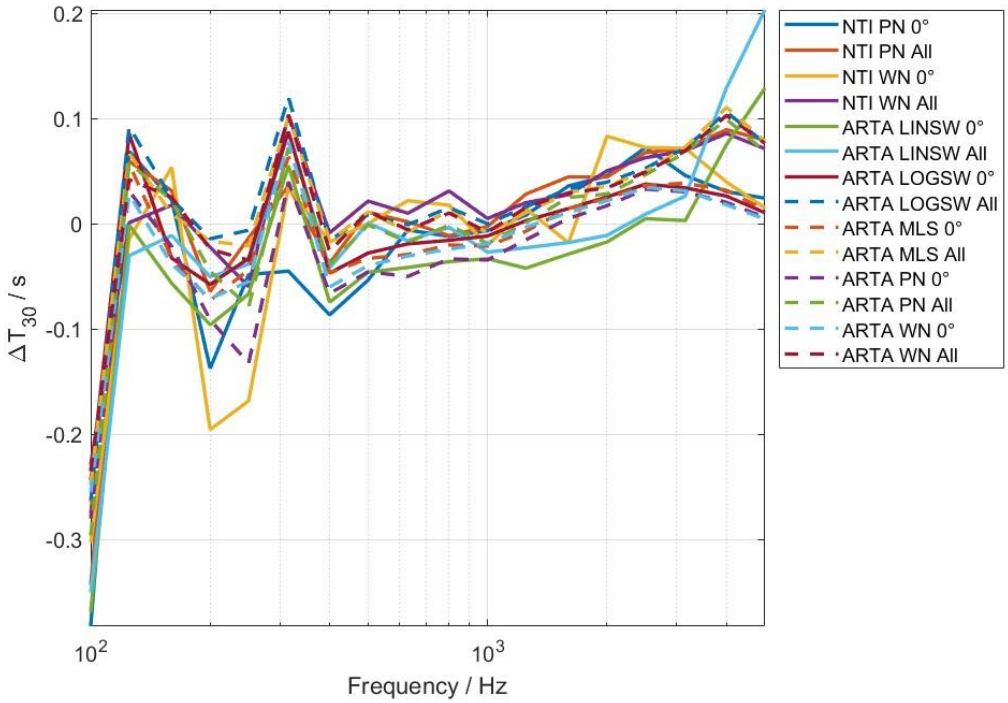
ΓΡΑΦΗΜΑ Π45: Διάγραμμα των μετρούμενων χρόνων T20 και T30 και ο υπολογισμός της τυπικής απόκλισης αυτών βάσει του ISO 1996-2:2017 για τον μέσο όρο (mean) των μετρούμενων χρόνων και (max) για τις μέγιστες τιμές τους.



ΓΡΑΦΗΜΑ Π46: Γραφήματα των χρόνων T20 και T30 όπου περιέχουν μετρήσεις αναφοράς προς σύγκριση με μετρήσεις γραμμικής-λογαριθμικής σάρωσης συχνοτήτων με όλες τις μεθόδους ευθυγράμμισης, καθώς και μέσο όρο των μετρήσεων όλων των σημάτων ακουστικής διέγερσης.



ΓΡΑΦΗΜΑ Π47:Διάγραμμα του χρόνου T20 που αποτυπώνει τις αποκλίσεις για τις μετρήσεις στις 0° και τον μέσο όρο για όλες τις γωνίες μέτρησης.



ΓΡΑΦΗΜΑ Π48: Διάγραμμα του χρόνου Τ30 που αποτυπώνει τις αποκλίσεις για τις μετρήσεις στις 0° και τον μέσο όρο για όλες τις γωνίες μέτρησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Σ. Λουτρίδης, *Ακουστική Αρχές & Εφαρμογές*, Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ, 2015.

[2] Δ. Σκαρλάτος, *Εφαρμοσμένη Ακουστική – Ηχοπροστασία,* 5η Έκδοση, Εκδόσεις GOTSIS, 2018.

[3] Σ. Πασχαλίδου, *Εφαρμοσμένη Ακουστική*, Σημειώσεις Εργαστηρίου, Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο, 2021.

[4] Ν. Τσινίκας, *Ακουστικός Σχεδιασμός Χώρων*, 2η Έκδοση, Εκδόσεις University Studio Press, 2005.

[5] Γ. Σάγος, *Ακουστική Χώρων*, 2012