

Ακουστική Μελέτη και Προσομοίωση Του Ωδείου Του Ηρώδη Του Αττικού

Tavelidou Eleni, Chrostopher Barlow

¹National and Kapodistrian University of Athens

²Solent University, Southampton

*etavelidou@music.uoa.gr *cb@kpacoustics.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μελέτη αφορά στην ανάλυση των ακουστικών ιδιοτήτων του Ωδείου του Ηρώδη Του Αττικού και επικεντρώνεται στην αρχική κατασκευή του Ωδείου προ καταστροφής της οροφής που θεωρείτο ότι έφερε. Τέσσερις ακουστικές παράμετροι έχουν εξεταστεί: ο χρόνος αντήχησης (T30), η ευκρίνεια (C80), ο δείκτης ισχύος (G) και ο δείκτης μετάδοσης ομιλίας (STI) με κατάληψη του Ωδείου από κοινό που φτάνει περίπου το 80%.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν εν μέρει εντός των βέλτιστων τιμών για τον τύπο των παραστάσεων που λάμβαναν χώρα κατά τη ρωμαϊκή εποχή στην οποία ανήκει το Ωδείο, ή/και εντός του εύρους τιμών προηγούμενων δημοσιευμένων δεδομένων σχετικά με προβλέψεις παρόμοιων δομών. Τέλος, οι υλοποιήσεις των παραπάνω εφαρμόστηκαν και σε περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας που επιτρέπει πλοήγηση στον εικονικό χώρο συμπεριλαμβανομένων οπτικοακουστικών ερεθισμάτων, με σκοπό την επίτευξη μιας ολιστικής εμπειρίας.

An Investigation Into The Acoustics Of The Odeon Of Herodes Atticus

ABSTRACT

This study investigates the acoustics of the Odeon of Herodes Attikus, an ancient and currently partly reconstructed Odeon located in Athens, Greece. The model incorporated a roof extending across the whole length of the theatre, which had not been considered in previous studies. The performance of the space with the effect of seated audience occupying 80% of the theatre have been examined in relation to four acoustic indices; Reverberation Time, Clarity, Sound Strength and Speech Transmission Index.

The results indicated that the values of the acoustical parameters under investigation were at times within the proposed optimum values for the type of performances taking place in the Roman era and/or at least within the range of previous published data regarding predictions of similar structures. The implementations of the above were applied in a virtual reality environment which allowed navigation through the virtual space including audio-visual stimuli in the view to achieve an immersive experience.

Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες έχει παρατηρηθεί αυξημένο ενδιαφέρον ως προς τη μελέτη της ακουστικής αρχαίων θεάτρων και ιστορικών μνημείων. Η αναβίωση και η αναπαραγωγή ήχου εντός αυτών των ιστορικών οικοδομημάτων σήμερα επιτυγχάνεται με την βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών χρησιμοποιώντας τεχνικές μοντελοποίησης σε συνδυασμό με επιτόπιες ακουστικές μετρήσεις, ώστε να αποσαφηνιστεί η ακουστική εξέλιξη αυτών των χώρων στο χρόνο[1].

Με την έλευση των τεχνολογιών εικονικής πραγματικότητας και των τρισδιάστατων περιβαλλόντων υψηλής ευκρίνειας μπορεί επίσης να επιτευχθεί μια ρεαλιστική αναπαράσταση και πλοήγηση εντός αυτών των μνημείων [2] που μπορεί να εξυπηρετήσει πολλαπλούς σκοπούς.

Η παρούσα μελέτη διερευνά την ακουστική του Ωδείου του Ηρώδου του Αττικού, του αρχαίου και επί του παρόντος εν μέρει ανακατασκευασμένου Ωδείου που βρίσκεται στην καρδιά της Αθήνας. Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα επικεντρώνεται στην αρχική κατασκευή του Ωδείου, προ καταστροφής της οροφής, που θεωρείτο ότι έφερε μέχρι και το 267 Π.Χ [3].

Οι πληροφορίες σχετικά με την κατασκευή και τα επιμέρους τμήματά της λήφθηκαν από τον Δρ. Μανώλη Κορρέ, αρχιτέκτονα, πολιτικό μηχανικό και καθηγητή της ιστορίας της αρχιτεκτονικής στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ο οποίος είχε ασχοληθεί με την εν λόγω μελέτη και έχει παραθέσει λεπτομερείς περιγραφές της κατασκευής στο αντίστοιχο βιβλίο του [3]. Σημαντικό να αναφερθεί ότι ακουστική μελέτη του Ωδείου, συμπεριλαμβανομένης της πλήρους σκεπής, δεν είχε εξεταστεί σε προηγούμενες ακουστικές μελέτες.

Η παρούσα μελέτη στόχευε στη διερεύνηση των ακουστικών χαρακτηριστικών της αρχικής κατασκευής του Ωδείου του Ηρώδου του Αττικού κατελιμμένο κατά ένα 80% από ακροατές στο κοίλο του. Τα αποτελέσματα της έρευνας χρησιμοποιήθηκαν σε ένα περιβάλλον Εικονικής Πραγματικότητας όπου ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να περιηγηθεί στο εσωτερικό και να «ακούσει» το χώρο σε συγκεκριμένες θέσεις.

Επιτόπιες μετρήσεις δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθούν κατά την περίοδο της έρευνας. Επομένως, ένα γεωμετρικό ακουστικό μοντέλο της ανοιχτής εκδοχής του θεάτρου (τρέχουσα κατάσταση), χρησιμοποιήθηκε ως βάση για την εκδοχή του Ωδείου με τη στέγη. Το παρόν δημιουργήθηκε και βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας δεδομένα από επιτόπιες μετρήσεις και προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν το 2004, 2009 και 2016 από άλλους ερευνητές [4]-[6].

1. Μέθοδος

1.1 Λογισμικά

Αρχικά δημιουργήθηκε ένα γεωμετρικό μοντέλο του Ωδείου χρησιμοποιώντας το λογισμικό SketchUp Make 2017 το οποίο ύστερα εισάχθηκε στο λογισμικό CATT Acoustic v9.1 για την μετέπειτα ακουστική μοντελοποίηση.

Το μοντέλο εκτελέστηκε με αρχικό αριθμό που έφτανε τις 50000 ακτίνες κάνοντας χρήση του τρίτου αλγόριθμου ανάλυσης που διατίθεται στο λογισμικό, όπως συνιστάται στο [7]. Η θερμοκρασία στο Ωδείο ορίστηκε στους 25°C (τυπική θερμοκρασία δωματίου) και η υγρασία στο 50%.

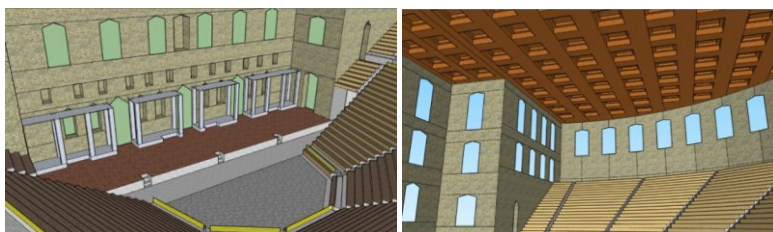
Οι βέλτιστες τιμές για τους ακουστικούς δείκτες που μελετήθηκαν στην παρούσα έρευνα, οι οποίες προέρχονται από δεδομένα και ανάλυση που διενεργήθηκαν στα [8]–[12] και συνάδουν με τον τύπο των παραστάσεων για τις οποίες κατασκευάστηκε το Ωδείο, παρατίθενται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1 Βέλτιστες Τιμές σε Ωδεία για τις Επιλεγμένες Παραμέτρους

Βέλτιστες Τιμές Ακουστικών Παραμέτρων		
T30	C80	G
0.7 – 2.3	-2 – 3	>3

1.2 Σχεδιασμός Μοντέλου

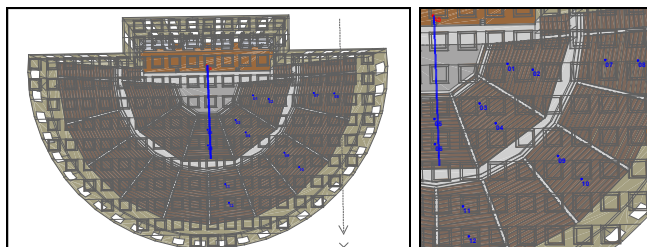
Οι διαστάσεις και οι περισσότερες αρχιτεκτονικές λεπτομέρειες μοντελοποιήθηκαν βάση των σχεδίων που δίνονται στο [3]. Οι δομικές λεπτομέρειες στο εσωτερικό του θεάτρου φαίνονται στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1 Εσωτερικό Θεάτρου Μοντελοποιημένο στο λογισμικό SketchUp Make

1.3 Ηχητική Πηγή και Δέκτες

Αυτή η μελέτη αφορά στην ανάλυση της ανθρώπινης φωνής και της μετάδοσής της στο Ωδείο. Ως ηχητική πηγή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα ανθρώπινης φωνής (φάσμα, κατευθυντικότητα, ένταση) επαγγελματιών τραγουδιστών που ηχογραφήθηκαν στις ειδικές εγκαταστάσεις του στούντιο του Τμήματος Μουσικών Σπουδών LabMAT στο ΕΚΠΑ, όπως περιγράφεται στο [13]. Η πηγή στην προσωμοίωση τοποθετήθηκε 1.7 μέτρα πάνω από το δάπεδο της σκηνής με προσανατολισμό προς το κέντρο του ακροατηρίου. Η συνολική στάθμη ηχητικής πίεσης (SPL) ρυθμίστηκε στα 77dB(A), που βρίσκεται στα όρια μεταξύ δυνατής και πολύ δυνατής φωνής [14]. Ο αριθμός των δεκτών που επιλέχθηκαν σε βασικές θέσεις του άνω και κάτω κοίλου ήταν δώδεκα και οι θέσεις των δεκτών στο ακροατήριο καταλάμβαναν μόνο το αριστερό μισό του Ωδείου, καθώς αναμένονταν παρόμοια κατανομή ήχου στο υπόλοιπο μισό λόγω της δομικής συμμετρίας. Το ύψος των δεκτών που χρησιμοποιήθηκε για την χαρτογράφηση του κοινού ρυθμίστηκε στα 0,8 μέτρα πάνω από την περιοχή καθισμάτων, αντιπροσωπεύοντας το ύψος των αυτιών ενός καθισμένου ατόμου.



Σχήμα 1.2 Τοποθεσία Ηχητικής Πηγή και Δεκτών

Οι ακριβείς θέσεις της επιλεγμένης πηγής και των δεκτών φαίνονται στο Σχήμα 1.2. Το στοιχείο A0 (κόκκινου χρώματος) στο εν λόγω σχήμα αντιπροσωπεύει την ηχητική πηγή, ενώ οι αριθμοί 01 - 12 (μπλε χρώματος) αποτελούν τους δέκτες.

1.4 Υλικά

Η επιλογή των υλικών που εφαρμόστηκαν στις μοντελοποιημένες επιφάνειες του Ωδείου βασίστηκαν σε πληροφορίες που αναγράφονταν στο [3] ενώ οι συντελεστές απορρόφησης και σκέδασης λήφθηκαν από δεδομένα ερευνών στο [15] καθώς και στις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν με επιτόπιες μετρήσεις και προσομοιώσεις στα [4]-[6], [16].

Έχει θεωρηθεί ότι τα Ωδεία είχαν ανοιχτά παράθυρα για φυσικό φως και αερισμό, επομένως, τα ανοιχτά παράθυρα μαζί με το καθισμένο κοινό ήταν τα κύρια απορροφητικά στοιχεία εντός του χώρου [8].

Οι μέσες τιμές για τους συντελεστές απορρόφησης και σκέδασης που επιλέχθηκαν για αυτό το μοντέλο παρατίθενται στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.2 Μέσες Τιμές Συντελεστών Απορρόφησης Και Σκέδασης

Επιφάνεια	Υλικό	Συντελεστής Απορρόφησης	Συντελεστής Σκέδασης
Σκηνή	Πορώδης Πέτρα	0.2	0.9
Προσκήνιο	Ξύλο	0.1	-
Ορχήστρα	Μάρμαρο	0.02	0.55
Ακροατήριο	Μάρμαρο	0.7*	0.55
Περιβάλλοντα Τοιχία	Πορώδης Πέτρα	0.2	0.9
Στέγη	Ξύλο	0.1	-
Σκηνικά	Μάρμαρο	0.02	0.55

2. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Τα αποτελέσματα των παραμέτρων T30, C80 και G για τις συχνοτικές μάντες 500Hz και 1kHz των επιλεγμένων δεκτών εντός του Ωδείου, καθώς και της παραμέτρου STI παρατίθενται στον Πίνακα 2.1.

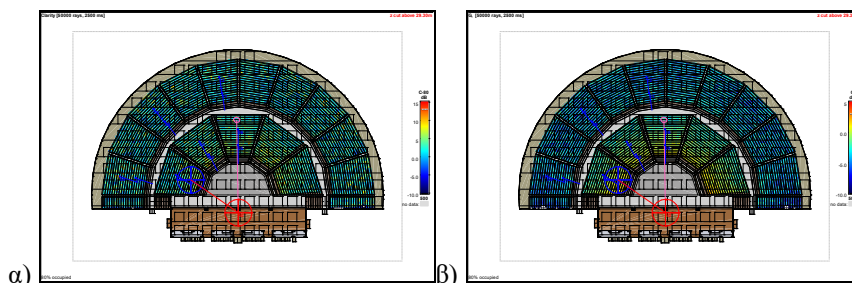
Πίνακας 2.1 Τιμές Ακουστικών Παραμέτρων για τους Επιλεγμένους Δέκτες

Δέκτης	T30	C80	G	STI
01	2.6	1.7	0.4	0.53 (Fair)
02	2.4	-1.3	-0.3	0.46 (Fair)
03	2.1	1.7	0.4	0.55 (Fair)
04	2.0	-0.9	-0.4	0.50 (Fair)
05	2.0	1.0	0.0	0.56 (Fair)
06	2.1	-1.2	-0.7	0.48 (Fair)
07	2.0	-1.8	-1.6	0.43 (Poor)
08	2.0	-1.6	-2.6	0.41 (Poor)
09	2.0	-2.6	-2.5	0.43 (Poor)
10	2.0	-1.8	-2.5	0.43 (Poor)
11	2.0	-2.4	-2.1	0.44 (Poor)
12	2.0	-2.3	-3.2	0.43 (Poor)

Οι προβλεπόμενοι χρόνοι αντήχησης για την παράμετρο T30 στις θέσεις των επιλεγμένων δεκτών κυμαίνονται μεταξύ 2s και 2.6s. Οι κύριοι παράγοντες συμβολής στη συσσώρευση ενέργειας και αύξησης τιμών της παραμέτρου είναι η σκηνή, το προσκήνιο, η στέγη και η ορχήστρα· επιφάνειες που αποτελούνται από υλικά με χαμηλούς δείκτες ηχοαπορρόφησης.

Σύμφωνα με τα δεδομένα που αναγράφονται στον Πίνακα 1.1 οι τιμές της παραμέτρου T30 που αφορούν στην παρούσα προσομοίωση είναι κατά βάση εντός των βέλτιστων ορίων καθώς και εντός του εύρους τιμών (2.2s – 5.97s) που έχουν δημοσιευτεί σε έρευνες προσομοιώσεων παρόμοιου τύπου δομών [2],[4],[11],[17].

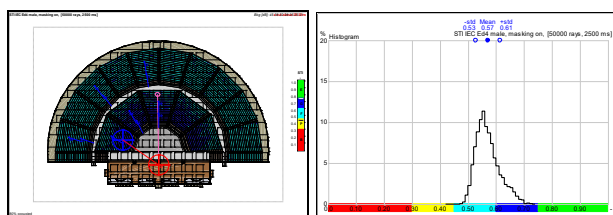
Η ακουστική χαρτογράφηση της Ευκρίνειας (C80) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2(α). Η Ευκρίνεια κυμαίνεται μεταξύ των τιμών -2.6dB και 1.7dB στις θέσεις των επιλεγμένων δεκτών εντός του Ωδείου αναφορικά με τις συχνοτικές μπάντες 500Hz και 1kHz, ενώ παρουσιάζει ένα μέσο όρο της τάξεως των 2.2dB με τυπική απόκλιση 2.6dB εντός της συνολικής επιφάνειας του ακροατηρίου. Συγκεκριμένα, οι τιμές της Ευκρίνειας είναι εντός των επιτρεπτών ορίων κατά βάση στη περιοχή του κάτω κοίλου του Ωδείου.



Σχήμα 1.2 Τοποθεσία Ηχητικής Πηγή και Δεκτών

Η ακουστική χαρτογράφηση του δείκτη ισχύος (G) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2(β). Με βάση τα παραπάνω, η μέγιστη ενίσχυση ήχου λόγω γεωμετρίας του Ωδείου που παρατηρείται στο κάτω κοίλο του Ωδείου και κυρίως στις πρώτες θέσεις είναι της τάξεως των 1 με 2dB για την συχνοτικές μπάντες 500Hz και 1kHz. Οι τιμές της συγκεκριμένης παραμέτρου, που είναι εντός του εύρους τιμών που έχουν παρατηρηθεί και σε αντίστοιχη βιβλιογραφία, αφορούν ως επί το πλείστον την περιοχή του κάτω κοίλου. Παρά ταύτα ο μέσος όρος της παραμέτρου στο σύνολο του Ωδείου φαίνεται να βρίσκεται στα -3.3dB με τυπική απόκλιση 1.9dB που είναι εκτός των βέλτιστων τιμών. Η σταδιακή μείωση αυτών των τιμών παρατηρείται καθώς απομακρυνόμαστε από την πηγή λόγω απόστασης από την αυτήν καθώς και άλλων βασικών επιφανειών ανάκλασης.

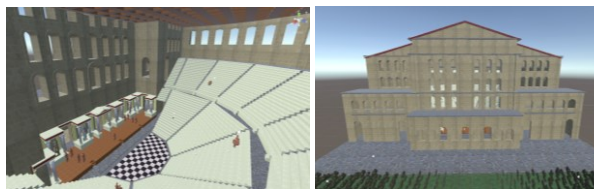
Τέλος, η απεικόνιση του Δείκτη Μετάδοσης Ομιλίας (STI) και της κατανομής του στην περιοχή των καθισμάτων, σύμφωνα με την προτεινόμενη κλίμακα αξιολόγησης ευκρίνειας ομιλίας [18], δίνεται στο Σχήμα 1.3. Ο μέσος όρος του STI στο Ωδείο φαίνεται να ήταν περίπου 0.57. Βάσει των παραπάνω, η ευκρίνεια της ομιλίας ταξινομείται ως «επαρκής» (fair). Σημειώνεται ότι οι υψηλότερες τιμές αυτής της παραμέτρου που αγγίζουν και το 0.7 παρατηρούνται στις κεντρικές και χαμηλότερες θέσεις του κάτω κοίλου. Παρόμοιες τιμές STI έχουν παρατηρηθεί σε αντίστοιχες προσομοιώσεις θεάτρων [19].



Σχήμα 1.3 Τοποθεσία Ηχητικής Πηγή και Δεκτών

3. Εφαρμογή σε Περιβάλλον Εικονικής Πραγματικότητας (VR)

Ένας από τους βασικούς στόχους αυτής της μελέτης ήταν και η πρακτική υλοποίηση των παραπάνω ευρημάτων σε ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας που προσφέρει δυνατότητα περιήγησης στο εσωτερικό του Ωδείου. Η παρούσα προσομοίωση περιλαμβάνει οπτικά και ηχητικά ερεθίσματα για να επιτευχθεί μια όσο το δυνατό πιο ολοκληρωμένη εμπειρία εικονικής πραγματικότητας με στοιχεία διάδρασης στο χώρο.



Σχήμα 3.1 Περιβάλλον Εικονικής Πραγματικότητας

Ο σχεδιασμός του μοντέλου για χρήση σε VR περιβάλλον περιλαμβάνει στοιχεία που δημιουργήθηκαν από την συγγραφέα καθώς και την βιβλιοθήκη 3D μοντέλων

3dWarehouse όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1. Η μηχανή παιχνιδιών που χρησιμοποιήθηκε για την διαμόρφωση του εικονικού περιβάλλοντος ήταν η Unity Engine (v2022.3 LTD). Η συγκεκριμένη μηχανή δίνει την δυνατότητα χρήσης αλγορίθμων που αξιοποιούν υπολογιστικά μοντέλα Head Related Transfer Function (HRTF) για αίσθηση χωρικού ήχου αλλά και εφέ απόσβεσης ήχου βάσει της απόστασης του χρήστη από συγκεκριμένα ακουστικά ερεθίσματα. Τα ηχητικά ερεθίσματα που προστέθηκαν τόσο στις εσωτερικές όσο και στις εξωτερικές περιοχές του θεάτρου αφορούν περιβαλλοντικούς ήχους (πουλιά, ήχοι φύσης κτλ.), κουβέντα στο κοινό, τον ήχο των βημάτων του χαρακτήρα καθώς κινείται στο χώρο καθώς και τα auralised αρχεία ήχου που εισήχθησαν στην Unity από το CATT acoustic, στις μελετημένες θέσεις ακρόασης.

4. Συμπεράσματα

Συνοπτικά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το Ωδείο θα είχε μια καλή ακουστική απόκριση όντας κατειλημμένο στο 80% περίπου της χωρητικότητας του από ακροατές. Ο χρόνος αντήχησης και η ευκρίνεια βρέθηκαν να είναι εντός των βέλτιστων τιμών για μουσικές παραστάσεις στην πλειονότητα των θέσεων στο θέατρο. Υψηλή ευκρίνεια ομιλίας καθώς και επαρκής ισχύς του ήχου αναμένονταν σε κεντρικές θέσεις και στις χαμηλότερες περιοχές της κερκίδας.

Οι παλμικές αποκρίσεις που δημιουργήθηκαν υπολογιστικά σε επιλεγμένες θέσεις στο άνω και κάτω κοίλο του Ωδείου εξήχθησαν στη μηχανή παιχνιδιών Unity Engine 2022. Εκεί δημιουργήθηκε ένα περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας που παρέχει την δυνατότητα οπτικοακουστικής πλοήγησης στο χώρο του Ωδείου. Η επέκταση της παρούσας μελέτης θα αποτελεί μια ενίσχυση του τρισδιάστατου μοντέλου με την προσθήκη οπτικοακουστικών στοιχείων, τα οποία θα βελτιώσουν τη συνολική εμπειρία στο περιβάλλον εικονικής πραγματικότητας.

5. Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να εκφράσουν την ευγνωμοσύνη τους στον ελληνικό σύλλογο «ΔΙΑΖΩΜΑ» για την καθοδήγηση και την υποστήριξή τους σε σχέση με την παροχή σημαντικών πληροφοριών σχετικά με το Ωδείο του Ηρώδη Αττικού. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Δρ. Μανώλη Κορρέ, καθηγητή ιστορίας της αρχιτεκτονικής στο ΕΜΠ και συγγραφέα του βιβλίου «Η στέγη του Ηρωδείου», το οποίο χρησιμοποιήσαμε εκτενώς σε αυτήν την μελέτη. Το ερευνητικό έργο υποστηρίχθηκε από το ερευνητικό πρόγραμμα SONICOM (www.sonicom.eu), το οποίο χρηματοδοτείται από το πρόγραμμα «Ορίζοντας Ευρώπη 2020» (European Union's Horizon 2020) με αριθμό έργου 101017743.

6. Βιβλιογραφία

- [1] L. Savioja and U. P. Svensson «Overview of geometrical room acoustic modeling techniques» J. Acoust. Soc. Am., vol. 138, no. 2, pp. 708-730 (2015).
- [2] J. H. Rindel «Roman theatres and revival of their acoustics in the ERATO project» Acta Acust. united with Acust., vol. 99, no. 1, pp. 21-29 (2013).

- [3] M. Korres, *Η στέγη του Ηρωδείου και άλλες γιγάντιες γεφυρώσεις*. Μέλισσα Αθήνα (2014).
- [4] S. L. Vassilantonopoulos and J. N. Mourjopoulos «The acoustics of roofed ancient odeia: The case of Herodes Atticus Odeion» *Acta Acust. united with Acust.*, vol. 95, no. 2, pp. 291-299 (2009).
- [5] C. A. Goussios, C. V. Sevastiadis, G. M. Kalliris, and G. V. Papanikolaou «The Acoustics of Ancient Greek Odeia» in *AES 116th Convention* (2004).
- [6] N. Hoekstra, B. Nicolai, B. Peeters, C. Hak, and R. Wenmaekers «Project Ancient Acoustics Part 2 of 4: Large-Scale Acoustical Measurements in the Odeon of Herodes Atticus and the Theatres of Epidaurus and Argos» in *ICSV 2016 - 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics*, pp. 1-8 (2016).
- [7] Rees «Common Pitfalls in Computer Modelling of Room Acoustics» in *Proceedings of the Institute of Acoustics*, vol. 38 Pt.1 (2016).
- [8] J. H. Rindel and M. Lisa «The ERATO project and its contribution to our understanding of the acoustics of ancient Greek and Roman theatres» in *The Acoustics of Ancient Theatres Conference Patras*, September 18-21, 2011 (2011).
- [9] G. Iannace, A. Trematerra, and M. Masullo «The large theatre of pompeii: Acoustic evolution» *Build. Acoust.*, vol. 20, no. 3, pp. 1-6 (2013).
- [10] G. Iannace and A. Trematerra «The rediscovery of Benevento Roman Theatre Acoustics» *J. Cult. Herit.*, vol. 15, no. 6, pp. 698-703 (2014).
- [11] U. Berardi, G. Iannace, and L. Maffei «Virtual reconstruction of the historical acoustics of the Odeon of Pompeii» *J. Cult. Herit.*, vol. 19, no. January, pp. 555-566 (2016).
- [12] M. Aretz and R. Orłowski «Sound strength and reverberation time in small concert halls» *Appl. Acoust.* (2009).
- [13] K. Bakogiannis, E. Tavelidou, and A. Andreopoulou «Estimation and assessment of vocal directivity variations as an effect of small body movements» in *Audio Engineering Society Convention 154*, Audio Engineering Society (May 2023).
- [14] ISO 9921:2003 Ergonomics — Assessment of Speech Communication (2003).
- [15] M. Vorländer *Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms, and Acoustic Virtual Reality*. Springer-Verlag, Berlin, 335 pp. (2008).
- [16] C. Van Loenen, M. Van Der Wilt, A. Diakoumis, R. Wenmaekers, C. Hak, and K. Hooymans «Project ancient acoustics part 3 of 4: Influence of geometrical and material assumptions on ray-based acoustic simulations of two ancient theatres» in *ICSV 2016 - 23rd International Congress on Sound and Vibration: From Ancient to Modern Acoustics* (2016).
- [17] R. Dragonetti, C. Ianniello, F. Mercogliano, and R. Romano «The acoustics of two ancient roman theatres in Pompeii» in *19th International Congress on Acoustics*, no. September (2007).
- [18] IEC 60268-16:2020, “Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index” International Electrotechnical Commission, 2020.
- [19] N. Haddad «Criteria for the assessment of the modern use of ancient theatres and odeia» *Int. J. Herit. Stud.*, vol. 13, no. 3, pp. 265-280 (2007).