

## **Μελέτη για την Βελτιστοποίηση των Ακουστικών Ιδιοτήτων Αμφιθεάτρου**

Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης/Καθηγητής Μουσικής Ακουστικής,  
Πληροφορικής/Πάρου 33 Αθήνα/ hspyridis@music.uoa.gr  
Ιωάννης Γ. Μαλαφής/ΠΔ 407/80/Αγ. Σοφίας 122 Αθήνα/ymalafis@music.uoa.gr  
Ακριτίδης Αχιλλέας/Φοιτητής/Τροίας 3 Αγ.Βαρβάρα Τ.Κ.12351/  
achilleas.a@gmail.com  
Δασκαλάκη Κωνσταντίνα/Φοιτήτρια/Δωδεκανησου 43 Πέραμα Τ.Κ. 18863/  
konstantinadaskalaki\_ml@yahoo.com  
Δασκαλάκη Σοφία /Φοιτήτρια/Δωδεκανησου 43 Πέραμα Τ.Κ. 18863/  
sofiadaskalaki\_ml@yahoo.gr  
Κόχυλας Χάρης/Φοιτητής/Ταΰγετου 49/har\_koh\_ath@hotmail.com  
Παναγιωτοπούλου Σοφία/Φοιτήτρια/Καισαρείας 39 Κερατσίνι Τ.Κ.18756  
Παπάς Νείλος/Φοιτητής/Φλέμιγκ 48 & Μπαλτατζή Αγ. Ι. Ρέντης Τ.Κ.18233  
Σιγάλας Κυριάκος/Φοιτητής/Μακεδονίας 187/airborne@ath.forthnet.gr

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

*Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος «Ακουστική Διαμόρφωση Κλειστών Χώρων με χρήση Η/Υ», που πραγματοποιήθηκε στο τμήμα Μουσικών Σπουδών του Πανεπιστημίου Αθηνών, το χειμερινό εξάμηνο του πανεπιστημιακού έτους 2005-2006. Το παραπάνω μάθημα προσφέρεται στους φοιτητές του τμήματος ως ένας κρίκος μιας αλυσίδας μαθημάτων που πραγματοποιούνται από το πρόγραμμα 'Ε.Π.Ε.Α.Ε.Κ.' για την αναμόρφωση του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μουσικών Σπουδών.*

*Σκοπός της εργασίας ήταν η ακουστική μελέτη του αμφιθεάτρου 436 της φιλοσοφικής σχολής Αθηνών, με τη βοήθεια Η/Υ και του λογισμικού Catt Acoustic v8 της εταιρείας CATT. Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να αναπαραστήσουμε σε τρισδιάστατη μορφή τον χώρο που θέλουμε να μελετήσουμε, να παρατηρήσουμε την ακουστική συμπεριφορά του χώρου, και να πραγματοποιήσουμε αλλαγές ούτως ώστε να βελτιώσουμε την ακουστική του.*

### **Research for the Optimization of Amphitheater's Acoustic Characteristics**

### **ABSTRACT**

*The present work was created for the course "Acoustic Configuration of Closed Spaces with Computer Assistance", that was carried out in the department of "Musical Studies" of University of Athens, the wintry half-year period of academic year 2005-2006. The above course is offered to the students of the department as a part of a chain of courses that is realized by the "Ε.Π.Ε.Α.Ε.Κ." program.*

*The aim of the work was the acoustic study of amphitheatre 436 of the Philosophy University of Athens, with PC assistance and the CATT's Catt Acoustic v8 software. This program gives us the possibility of representing the space that we want to study in 3D form, to observe the acoustic behavior of the space, and to commit changes so that we can improve its acoustic behaviour.*

## Εισαγωγή

Το μάθημα «Ακουστική Διαμόρφωση Κλειστών Χώρων με χρήση Η/Υ» απευθύνεται σε φοιτητές με προαπαιτούμενες γνώσεις, οι οποίες αποκομίζονται από τα μαθήματα «Εισαγωγή στη Φυσική και Μουσική Ακουστική», «Εισαγωγή στους Η/Υ» και «Ακουστική Σχεδίαση Κλειστών Χώρων».

Ως πρακτική άσκηση στα πλαίσια του μαθήματος, ανατέθηκε σε μια επταμελής ομάδα φοιτητών η ακουστική μελέτη του αμφιθεάτρου 436 της Φιλοσοφικής Σχολής του Πανεπιστημίου Αθηνών για συνθήκες διάλεξης.

### 1. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε και οι Δυνατότητες του.

Για την πραγματοποίηση της εν λόγω μελέτης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό *Catt Acoustic* της Σουηδικής εταιρίας *CATT*. Το λογισμικό αυτό παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας και ακουστικής διαμόρφωσης ενός χώρου σε περιβάλλον Η/Υ, εισάγοντας ως δεδομένα τη γεωμετρία του χώρου, τις μεταβλητές θέσεις ηχητικής πηγής και ακροατών, καθώς και τις ακουστικές ιδιότητες των διαφόρων υλικών των επιφανειών με τους αντίστοιχους συντελεστές ηχοαπορρόφησής τους.

#### 1.1. Δυνατότητες του λογισμικού

Καθορίζοντας τη γεωμετρία του χώρου και μεταβάλλοντας τις απαραίτητες παραμέτρους, δίνεται η δυνατότητα αφενός, να εξεταστούν, μέσω διαγραμμάτων: 1) η διάχυση του ήχου στο χώρο, 2) η διαύγεια της ομιλίας, 3) το πλήθος, η ένταση και η κατεύθυνση των ανακλάσεων που δημιουργούνται και 4) ο χρόνος αντήχησης του χώρου, και αφετέρου να διαπιστωθεί αν και κατά πόσο διαμορφώνονται τα παραπάνω έπειτα από την εκάστοτε παρέμβασή μας.

Επιπροσθέτως, οι διαγραμματικές αυτές διαπιστώσεις μπορούν να διασταυρωθούν ταυτόχρονα και ακουστικά, εφόσον παρέχεται η δυνατότητα παραγωγής ηχητικών αρχείων που προσομοιάζουν στην ακουστική εντύπωση εικονικών ακροατών.

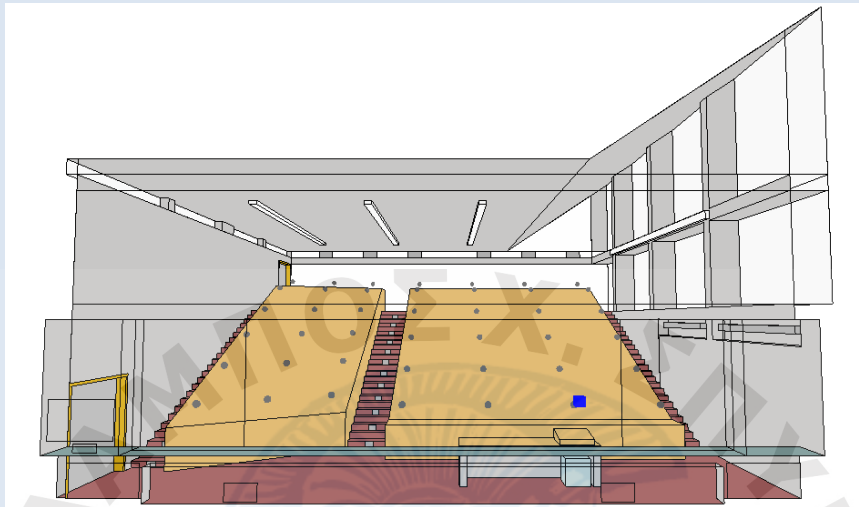
### 2. Χαρακτηριστικά του αμφιθεάτρου και η αναπαράστασή του.

Τα χαρακτηριστικά του χώρου είναι τα ακόλουθα: Όγκος:  $491 \text{ m}^3$ , Βάθος (=Πλάτος):  $14,27 \text{ m}$ , Ύψος ( $\cong \frac{1}{2}$  Βάθους):  $6,36 \text{ m}$ , Οροφή η οποία για  $9,75 \text{ m}$  -κατά πλάτος- είναι παράλληλη με το δάπεδο, ενώ για τα υπόλοιπα  $4,52 \text{ m}$  υπό κλίση  $33,6^\circ$  μέχρι το μέγιστο ύψος των  $9,36 \text{ m}$ . Και κεκλιμένο επίπεδο επί του οποίου βρίσκονται τα καθίσματα των ακροατών ( $102 \text{ m}^2$ , 203 θέσεις)

Ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου: Χαμηλός συντελεστής ηχοαπορρόφησης και αντίστοιχα μεγάλος συντελεστής ηχοανάκλασης, καθώς και μεγάλη αντήχηση και μειωμένη ευκρίνεια λέξεων.

#### 2.1. Εικονική αναπαράσταση

Έπειτα από την ολοκλήρωση της εικονικής αναπαράστασης των ανωτέρω χαρακτηριστικών στο εν λόγω λογισμικό, τοποθετήσαμε μία παγκατευθυντική ηχητική πηγή-ομιλήτη  $A0$  πίσω από το έδρανο, και 42 ενδεικτικούς αμφιωτικούς ακροατές συμμετρικά στο χώρο.



Σχήμα 2.1 Εικονική αναπαράσταση

### 3. Αντικειμενικοί παράγοντες που μελετήθηκαν.

Η ακουστική μελέτη της διάχυσης του ήχου, της καθαρότητας της ομιλίας και των ανακλάσεων περιορίστηκε στο συχνοτικό εύρος τεσσάρων οκτάβων από 125Hz έως 2kHz, μέσα στο οποίο βρίσκονται οι κύριες συχνότητες ομιλίας της αντρικής και γυναικείας φωνής.

Κατά την ακουστική μελέτη λάβαμε υπόψη κάποιους αντικειμενικούς παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν και επηρεάζουν την ευκρίνεια ενός χώρου και στους οποίους θα μπορούσαμε με κάποιο τρόπο να επέμβουμε. Αυτοί είναι ο χρόνος αντήχησης (T-60), η διαύγεια του ήχου (C-80) και η στάθμη έντασης (SPL).

#### 3.1. Χρόνος αντήχησης T-60

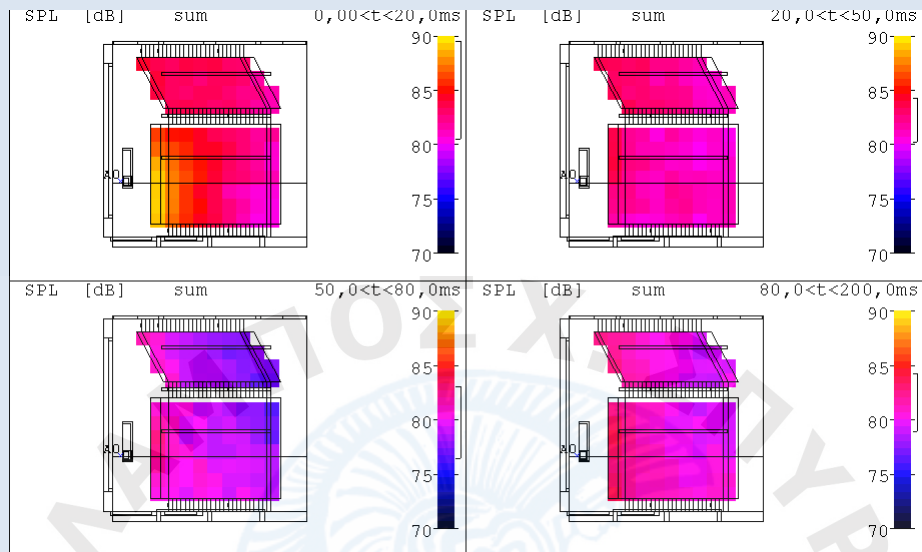
Στην αρχική κατάσταση του αμφιθεάτρου ο μέσος όρος του χρόνου αντήχησης υπολογίστηκε στα 1550 ms, ενώ ο βέλτιστος χρόνος αντήχησης για μια αίθουσα ανάλογων διαστάσεων και για τη συγκεκριμένη χρήση είναι 700 ms.

#### 3.2. Στάθμη έντασης SPL

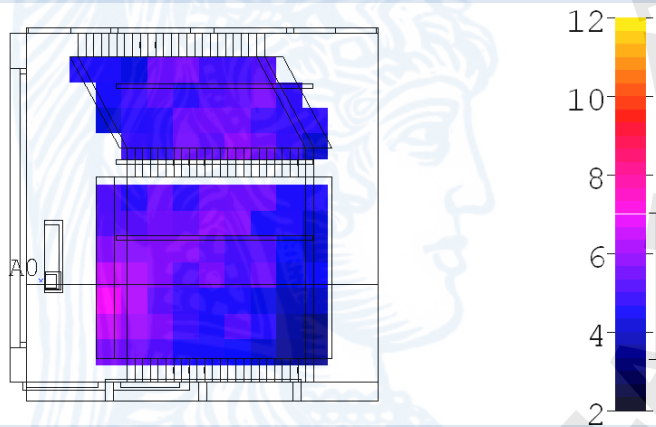
Ο δεύτερος παράγοντας αφορά στη διάχυση του ήχου συναρτήσει του χρόνου και την ομοιόμορφη κατανομή του στο σύνολο του ακροατηρίου, δηλαδή κατά πόσο ακούνε όλοι οι ακροατές εξίσου καλά ανεξάρτητα από τη θέση τους. Εξετάζοντας τα διαγράμματα χαρτογράφησης του ακροατηρίου στα χρονικά διαστήματα, 0 έως 20, 20 έως 50, 50 έως 80 και 80 έως 200 ms, αντήχασαμε πληροφορίες σχετικά με την διασπορά του ήχου και τις διαφοροποιήσεις της στάθμης έντασης σε συγκεκριμένες συχνοτικές περιοχές. Η προσοχή μας επικεντρώθηκε στα 2 τελευταία διαγράμματα, γιατί ο χώρος είναι αρκετά μεγάλος και ο ήχος δεν προλαβαίνει να απλωθεί σε όλο το εύρος του ακροατηρίου μέχρι τα 50 ms.

#### 3.3. Διαύγεια του ήχου C-80

Τρίτος παράγοντας είναι η διαύγεια. Στο διάγραμμα της διαύγειας παρατηρήθηκαν χαμηλές (ακόμα και αρνητικές) τιμές, σε όλες τις συχνότητες.



Σχήμα 3.2 Στάθμη έντασης SPL80 (Μέσος όρος συχνοτήτων)



Σχήμα 3.3 Διαύγεια του ήχου C-80 (Μέσος όρος συχνοτήτων)

#### 4. Μέθοδος εργασίας.

Το γενικότερο πρόβλημα της αίθουσας ήταν η ύπαρξη μεγάλου χρόνου αντήχησης. Για να εντοπίσουμε τα σημεία όπου προσπίπτουν προβληματικές ανακλάσεις με χρονική καθυστέρηση άνω των 50 ms, παρατηρήσαμε τα αντίστοιχα διαγράμματα που παρουσιάζουν αναλυτικά τις ανακλάσεις με: **α)** ηχογράμματα (echograms), όπου βλέπουμε τον χρόνο σε ms και τα dB SPL στον οριζόντιο και κάθετο άξονα., αντίστοιχα δηλ., τη στάθμη έντασης των ανακλάσεων συναρτήσει του χρόνου. **β)** Πολικά διαγράμματα, όπου βλέπουμε σε οριζόντιο και κάθετο άξονα την γωνία με την οποία δέχεται ο κάθε ακροατής τον ήχο από την πηγή και, αντίστοιχα, **γ)** με ποια γωνία φεύγει ο ήχος από την πηγή για να φτάσει στον ακροατή. **δ)** Με το τρισδιάστατο διάγραμμα που μας δείχνει τις ανακλάσεις και τα διάφορα επίπεδα στα οποία προσπίπτουν για τον εκάστοτε ακροατή.

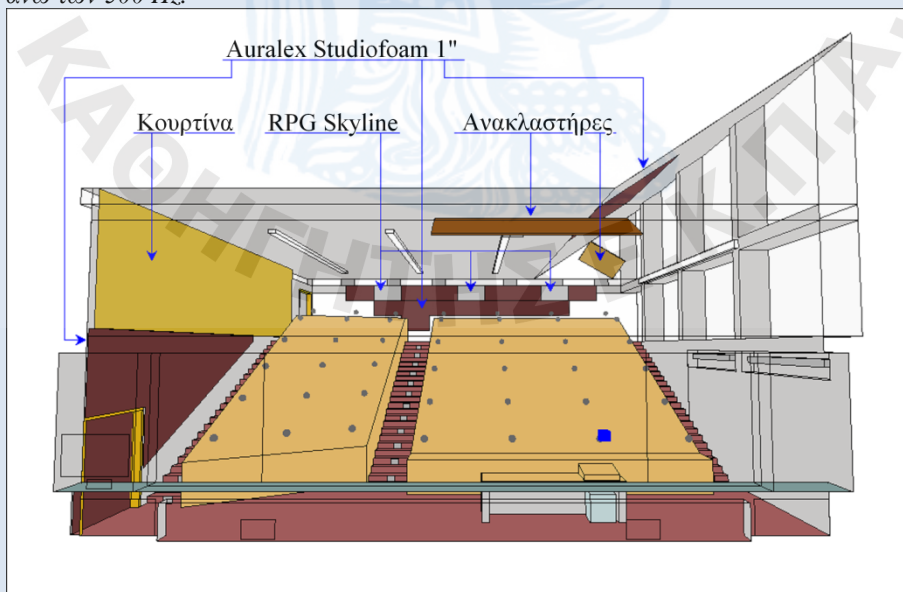
Με αυτή την μέθοδο, παρατηρήσαμε ότι οι περισσότερες προβληματικές ανακλάσεις προσέπιπταν τουλάχιστον μία φορά στον αριστερό τοίχο ή/και την πόρτα.

Έχοντας ως στόχο την απορρόφηση των ανακλάσεων αυτών και την μείωση του χρόνου αντήχησης καθώς και την αύξηση του γενικού συντελεστή απορρόφησης του χώρου στις χαμηλές συχνότητες, που αρχικά ήταν μεγάλος, αποφασίσαμε να τοποθετήσουμε βαμβακερή κουρτίνα με έντονες πτυχώσεις, σε απόσταση 13 cm από τον τοίχο και σε απόσταση 3,75 m από το πάτωμα. Στο υπόλοιπο τμήμα του τοίχου, συμπεριλαμβανομένης και της πόρτας, τοποθετήσαμε Studiofoam 1” της Auralex ([www.auralex.com](http://www.auralex.com)), το οποίο παρέχει την δυνατότητα να κοπεί και να προσαρμοστεί σε επιφάνειες οποιονδήποτε διαστάσεων.

Εν συνέχεια στον πίσω τοίχο, τοποθετήθηκαν Studiofoam 1” για να μειωθεί ο χρόνος αντήχησης στους ακροατές των μπροστινών θέσεων, καθώς και διαχυτές Skyline της RPG ([www.rpginc.com](http://www.rpginc.com)), ώστε κάποιες προβληματικές ανακλάσεις που υπήρχαν και κατευθύνονταν προς έναν και μόνο ακροατή των μπροστινών θέσεων (δημιουργώντας αντήχηση) να διαχυθούν στους ακροατές της τελευταίας σειράς.

Οι ακροατές κυρίως της δεξιάς πτέρυγας, που βρίσκονται κάτω από το κεκλιμένο τμήμα της οροφής, αντιμετώπιζαν προβλήματα με ανακλάσεις μεγάλης χρονικής καθυστέρησης, οι οποίες προέρχονταν από προσπτώσεις στο κεκλιμένο τμήμα της οροφής, στα τζάμια και στον αριστερό τοίχο εισόδου. Για αυτές τις ανακλάσεις η απορρόφηση των Studiofoam 1” του αριστερού τοίχου δεν ήταν αρκετή και κρίθηκε απαραίτητη η απορρόφησή τους σε άλλη επιφάνεια πρόσπτωσης, συγκεκριμένα στο κεκλιμένο τμήμα της οροφής. Έτσι λοιπόν τοποθετήσαμε 5.2m<sup>2</sup> Studiofoam 1” στο κεκλιμένο τμήμα της οροφής.

Προκειμένου να βελτιωθεί η διαύγεια του ήχου για τους ακροατές των πίσω θέσεων τοποθετήθηκε ανακλαστήρας πάνω από τον ομιλητή (με διαστάσεις 4,45 x 1,15 m και κλίση 29°), με σκοπό να κατευθύνει ανακλάσεις προς τις τελευταίες σειρές του ακροατηρίου. Πρόκειται για μία ξύλινη κατασκευή όπου η μπροστινή επιφάνειά της είναι βιομηχανικό κοντραπλακέ 5mm σε απόσταση 5cm από την πίσω επιφάνεια πιο χοντρού κοντραπλακέ, δημιουργώντας διάκενο μεταξύ των δύο επιφανειών το οποίο γεμίζουμε με πετροβάμβακα. Ο ανακλαστήρας αυτός παρουσιάζει μεγάλο συντελεστή απορρόφησης στις χαμηλές συχνότητες ανακλώντας κυρίως τις συχνότητες άνω των 500 Hz.



Σχήμα 4. Τελική κατάσταση του αμφιθεάτρου

Η διαφορά ήταν εμφανής. Ο ήχος έγινε πιο διαυγής, η ομιλία κατέστη πιο ευδιάκριτη και η συνολική στάθμη έντασης της εν λόγω περιοχής ενισχύθηκε.

Έπειτα διαπιστώθηκε από το διάγραμμα C-80 αναπαράστασης της διαύγειας του ήχου ότι η ακρόαση ήταν ομοιόμορφη, έκτος από μία περιοχή ακροατών πίσω δεξιά όπου ο ήχος δεν ήταν τόσο διαυγής. Τοποθετήθηκε λοιπόν, με την ίδια φιλοσοφία, ένας ακόμη ανακλαστήρας, διαφορετικών βεβαίως διαστάσεων (1,7 x 1 m), ακριβώς πίσω από την περιοχή αυτή.

## 5. Επίλογος

Έχοντας ολοκληρώσει έτσι την ακουστική μελέτη του αμφιθεάτρου, συγκρίναμε τα διαγράμματα και τους πίνακες που αφορούν τους αντικειμενικούς παράγοντες που μελετήσαμε, στην αρχική και την τελική κατάσταση του.

Πίνακας 5 Αντικειμενικοί παράγοντες

Παράγοντες	Πριν	Μετά
Χρόνος αντήχησης	1550 ms	650 ms
Στάθμη έντασης	Πριν	Μετά
0-20 ms	80-90 dB	80-90 dB
20-50 ms	80-85 dB	77-82 dB
50-80 ms	77-83 dB	74-80 dB
80-200 ms	79-84 dB	75-80 dB
Διάυγεια	2,6-6,6	6,2-10,6

Μετά την ολοκλήρωση της μελέτης, η ακουστική συμπεριφορά του χώρου βελτιώθηκε αισθητά και η ποιότητα της ακρόασης έφτασε σε ικανοποιητικά επίπεδα.

Το κόστος της υλοποίησης των ανωτέρω εισηγήσεων εκτιμάται στα 5500€ (μαζί με τα υλικά στήριξης), ποσό το οποίο θα αυξηθεί περίπου κατά 2500€ συνυπολογίζοντας την τοποθέτησή τους στο εν λόγω αμφιθέατρο. Το ποσό αυτό καθιστά επιτρεπτή μια τέτοια παρέμβαση, η οποία θα αποβλέπει στη βελτίωση της ακουστικής συμπεριφοράς του χώρου, κάτι το οποίο θα χαρακτήριζε κανείς τόσο αναγκαίο όσο και επιβεβλημένο.

## 6. Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε τους διδάσκοντές μας, καθηγητή Μουσικής Ακουστικής, Πληροφορικής κ. Χαράλαμπο Χ. Σπυρίδη και κ. Ιωάννη Γ. Μαλαφή ΠΔ407/80 για τις γνώσεις που μας παρείχαν, καθώς και για την ενθάρρυνσή τους να τολμήσουμε να παρουσιάσουμε την εργασία μας στο 3<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο Ακουστικής «Ακουστική 2006» του Ελληνικού Ινστιτούτου Ακουστικής.