

«Ακουστική μελέτη και εικονική ακουστική διαμόρφωση Αμφιθεάτρου Διδασκαλίας»

Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης¹, Ιωάννης Γ. Μαλαφής²,
Σταύρου Ανθή, Σολωμού Μύρω, Σαριδάκη Στέλλα, Καβαλλιέρου Σταματία, Αλατάς Δημήτριος, Μήτση Αντιγόνη, Φωτεινού Αγλαΐα³.

¹ Καθηγητής Μουσικής Ακουστικής, Πληροφορικής –Διευθυντής Εργαστηρίου Μουσικής Ακουστικής τεχνολογίας, Τμήματος Μουσικών Σπουδών Πανεπιστημίου Αθηνών.

² Π.Δ. 407/80.

³ Φοιτητές/τριες Τμήματος Μουσικών Σπουδών Πανεπιστημίου Αθηνών.

Στα πλαίσια του ΕΠΕΑΕΚ για την αναμόρφωση του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μουσικών Σπουδών του Πανεπιστημίου Αθηνών διδάσκεται κατά τα χειμερινά εξάμηνα το μάθημα «Ακουστική Σχεδίαση Χώρων με Η/Υ». Διδάσκοντες είναι ο κ. Χαράλαμπος Χ. Σπυρίδης, καθηγητής “Μουσικής Ακουστικής - Πληροφορικής” και ο κ. Ιωάννης Γ. Μαλαφής, Π.Δ. 407/80.

Το μάθημα αυτό 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».

№3 Ως πρακτική άσκηση στα πλαίσια του μαθήματος, ανατέθηκε σε μια επταμελή ομάδα φοιτητών η ακουστική μελέτη του αμφιθεάτρου 433 της Φιλοσοφικής Σχολής του Πανεπιστημίου Αθηνών για συνθήκες διάλεξης.

№4 Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού CATT-Acoustic v8.0e. Πρόκειται για ένα λογισμικό, το οποίο μας παρέχει τη δυνατότητα να επεξεργαστούμε και να διαμορφώσουμε ακουστικά ένα χώρο 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.

№6 Καθορίζοντας τη γεωμετρία του χώρου και μεταβάλλοντας τις άλλες παραμέτρους, μπορούμε αφενός, να εξετάσουμε, μέσω διαγραμμάτων:

- 1.τη διάχυση του ήχου στο χώρο,
 - 2.την καθαρότητα/διαύγεια/ευκρίνεια κατά την ομιλία,
 - 3.το πλήθος, την ένταση και την κατεύθυνση των ανακλάσεων, που δημιουργούνται
 - 4.το χρόνο αντίληψης του χώρου,
- και να παρατηρήσουμε πώς αυτοί οι παράγοντες διαμορφώνονται μετά από κάθε παρέμβασή μας.

№7 Τις διαγραμματικές αυτές διαπιστώσεις μπορούμε να τις διασταυρώνουμε ταυτόχρονα και ακουστικά, αφού υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής ηχητικών αρχείων που προσομοιάζουν στην ακουστική εντύπωση εικονικών ακροατών. Θα πρέπει βέβαια να τονίσουμε ότι ακριβής ακρόασή τους μπορεί να γίνει μόνο με ακουστικά και όχι από

κάποιο σύστημα ηχείων, καθώς στην δεύτερη περίπτωση εμπλέκεται και η ακουστική απόκριση του χώρου ακρόασης.

№8 Το μελετούμενο αμφιθέατρο έχει διαστάσεις 14,28X8,06X4,7/3,17 m και όγκο 453 m³.

№9 Το ακροατήριο έχει 99 θέσεις, βρίσκεται σε κεκλιμένο επίπεδο και καλύπτει περιοχή 46,94 m².

№10 Προκειμένου κατά την διαδικασία της μελέτης να εξασφαλιστεί η ομοιόμορφη κάλυψη ολοκλήρου του ακροατηρίου:

№11 τοποθετήθηκαν εικονικά 72 ενδεικτικοί ακροατές συμμετρικά στο χώρο,

№12 οι οποίοι συμβολίζονται με αριθμούς από το 00 έως το 71.

№13 Μια παγκατευθυντική (ομπι) ηχητική πηγή συχνότητας 500 Hz και στάθμης έντασης 94 dB, που συμβολίζεται με A0, τοποθετήθηκε στην έδρα.

№15 Η ακουστική μελέτη της διάχυσης του ήχου, της καθαρότητας της ομιλίας και των ανακλάσεων περιορίστηκε στο συχνοτικό εύρος τριών οκτάβων από 125Hz έως 1 kHz, μέσα στο οποίο βρίσκονται οι κύριες συχνότητες ομιλίας της αντρικής και γυναικείας φωνής.

№16 Κατά την ακουστική μελέτη λάβαμε υπόψη δύο αντικειμενικούς παράγοντες, οι οποίοι καθορίζουν και επηρεάζουν την ευκρίνεια ενός χώρου και στους οποίους θα μπορούσαμε με κάποιο τρόπο να επεμβούμε.

- **№17** Ο πρώτος ήταν ο χρόνος αντήχησης (T60). Εντοπίζεται στο σημείο όπου τέμνεται ο άξονας των sec στη γραφική παράσταση. **№17** Στην αρχική κατάσταση του αμφιθεάτρου ο χρόνος αντήχησης υπολογίστηκε (ο μέσος όρος) στα T = 1,70s (1700 ms) **№18** ενώ ο ενδεδειγμένος (βέλτιστος) χρόνος αντήχησης (RT60) για μια αίθουσα ανάλογων διαστάσεων και για τη συγκεκριμένη χρήση είναι T=0,75s (750 ms)
- **№19** Ο δεύτερος παράγοντας αφορούσε 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 (με την ίδια στάθμη έντασης) ανεξάρτητα από τη θέση τους.

№20 Εξετάζοντας τα διαγράμματα χαρτογράφησης του ακροατηρίου στα χρονικά διαστήματα, 0-20, 20-50, 50-80, 80-200 ms, αντλήσαμε πληροφορίες σχετικά με την διασπορά του ήχου (σε συγκεκριμένες συχνοτικές περιοχές).

№21 Στο διάγραμμα, η κλίμακα χρωματισμών μας υποδεικνύει τη διασπορά του ήχου. Η αγκύλη μας δείχνει το φάσμα της έντασης ήχου, το οποίο (σε αυτή την περίπτωση 125 στα 50-80) κυμαίνεται από τα 75- dB μέχρι τα 77+ dB, δηλαδή η διαφορά αυτού που ακούει καλύτερα με αυτόν που ακούει χειρότερα είναι 2+ dB. Δεν μας ενδιαφέρουν τόσο τα δύο πρώτα διαγράμματα, γιατί ο χώρος είναι αρκετά μεγάλος και ο ήχος δεν προλαβαίνει να απλωθεί σε όλο το εύρος του ακροατηρίου.

№18 Στο διάγραμμα της διαύγειας (clarity) βλέπουμε χαμηλές (ακόμα και αρνητικές) τιμές.

[Υπάρχουν 2 μέθοδοι υπολογισμού από το πρόγραμμα

1.υπάρχει ένα ιδεατό απορροφητικό υλικό (absorber material), πόσο αφήνει να περάσει

2.το καθορίζουμε εμείς]

№22-23 Παρακολουθούμε επίσης τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις συχνότητες των 250, 500 και 1000 Hz, όπου έχουμε αντίστοιχες τιμές.

Μέσα από τη δυνατότητα που προσφέρει το Catt να ακούμε το πώς θα άκουγαν την ηχητική πηγή οι συγκεκριμένοι δέκτες, αν κάθονταν στη συγκεκριμένη θέση, παρατηρήσαμε (διασταυρώσαμε αυτό που μας έδειξε η χαρτογράφηση) ότι στην μπροστινή περιοχή του ακροατηρίου υπάρχει επαρκής ένταση από τον απευθείας ήχο, λόγω της μικρής απόστασης από την πηγή.

Οι πίσω ακροατές ακούνε σχετικά καλά, δεν είναι πάρα πολύ μεγάλη η διαφοροποίηση της ακουστικής ενέργειας από τους μπροστινούς ακροατές. Στόχος μας είναι να διατηρήσουμε αυτή την ενέργεια εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα περισσότερη διαύγεια.

Ακούμε (2) ηχητικά αρχεία, ένα από μπροστινή και ένα από πίσω πλευρά του ακροατηρίου (π.χ. 04 και 70).

Για λόγους οικονομίας χρόνου, περιοριζόμαστε στην ακρόαση κάποιων ενδεικτικών/αντιπροσωπευτικών ηχητικών αρχείων. Υπενθυμίζουμε, ότι ούτως ή άλλως οι συνθήκες κάτω από τις οποίες τα ακούμε τώρα, μέσα σε αυτή την αίθουσα, δηλ. χωρίς την χρήση ακουστικών, δεν είναι οι ενδεδειγμένες.

№24 Το γενικό πρόβλημα, που αντιμετωπίζουμε, είναι ακριβώς η μεγάλη αντήχηση καθώς και η μειωμένη ευκρίνεια λέξεων κατά την ομιλία. (Διαγράμματα C-80)

№25 Αυτό οφείλεται ακριβώς στον εξαιρετικά μεγάλο χρόνο αντήχησης T60, που παρουσιάζεται στο αμφιθέατρο, λόγω πολλών ανακλαστικών επιφανειών με υλικά κατασκευής το τσιμέντο, το γυαλί και το ξύλο. Επειδή τα υλικά αυτά έχουν μικρό συντελεστή ηχοαπορρόφησης, η συνολική ηχοαπορρόφηση είναι μικρή.

№26 Ως πρώτος στόχος, λοιπόν, τέθηκε η προσέγγιση της τιμής αναφοράς T60, με την τοποθέτηση κατάλληλων ηχοαπορροφητικών διατάξεων σε διάφορα σημεία του χώρου. Κύριο μέλημά μας στην επιλογή αυτών των σημείων ήταν να διασφαλίσουμε την λειτουργικότητα των διατάξεων σύμφωνα με την κατασκευή και τη διαρρύθμιση του χώρου, ώστε να μην δυσκολεύουν την καθημερινή χρήση του αμφιθεάτρου από τους φοιτητές.

№27 Για να επιτευχθούν οι επιθυμητοί χρόνοι αντήχησης θα ήταν ιδανικό να τοποθετούσαμε μοκέτα στο δάπεδο, που θεωρητικώς θα βοηθούσε πολύ. Όμως για πρακτικούς λόγους, όπως φθορά από την καθημερινή χρήση της αίθουσας από μεγάλο αριθμό φοιτητών, δεν ενδείκνυται. Έτσι καλύφθηκε όλο το δάπεδο με ελαστικό πλακάκι (το οποίο είναι πολύ πιο ανθεκτικό) με την εμπορική ονομασία elastic tile της RPG,

№28 συνολικού εμβαδού 55 m². Η εν λόγω εταιρία προτιμήθηκε καθώς στην ιστοσελίδα της διατίθεντο φωτογραφίες και πληροφορίες για τους συντελεστές ηχοαπορρόφησης, τις διαστάσεις και την εγκατάσταση των υλικών.

№29 Αρχικά σκεφτήκαμε να καλύψουμε και την περιοχή της οροφής γύρω από τα φώτα με απορροφητικό υλικό acoustic tile, πετυχαίνοντας, έτσι, μεγαλύτερο ποσοστό απορρόφησης στην αίθουσα. Όμως παρατηρήσαμε ότι αυτό είχε αρνητική επίπτωση στη διαύγεια, κάτι που θελήσαμε να αποφύγουμε.

№30 Έτσι προχωρήσαμε στο επόμενο βήμα, το οποίο ήταν να καλύψουμε τις ανακλαστικές επιφάνειες των τζαμιών με 4 κουρτίνες πυκνότητας

№31-34 14 oz/sq. yd., με συνολικό εμβαδόν 44,95 m², χωρίς πτυχές, με χαλαρή πλέξη και ανοιχτό χρώμα, ώστε να εξασφαλίσουμε τον απαραίτητο φυσικό φωτισμό της αίθουσας κατά τη διάρκεια της χρήσης της.

№35 Τοποθετήσαμε επίσης ηχοπερατό σκουρόχρωμο ύφασμα

№36 αντίστοιχων διαστάσεων μπροστά από τις κουρτίνες, το οποίο θα τις καλύπτει κατεβαίνοντας με μηχανισμό roll top και θα προκαλεί συσκότιση για τις ανάγκες ενδεχόμενης προβολής διαφανειών.

№37 Ακολούθησε συστηματική μελέτη όλων των ανακλάσεων, οι οποίες προσέπιπταν στα διάφορα επίπεδα του χώρου πριν φτάσουν σε κάποιον ακροατή.

№38 Στο πρώτο διάγραμμα βλέπουμε Time (ms) vs dB SPL στον οριζόντιο και κάθετο άξονα., αντίστοιχα (δηλ τη στάθμη έντασης των ανακλάσεων συναρτήσει του χρόνου). Οι πρώιμες ανακλάσεις επισημαίνονται με κόκκινο χρώμα.

№39 Στα πολικά διαγράμματα βλέπουμε σε οριζόντιο και κάθετο άξονα την γωνία με την οποία δέχεται ο κάθε ακροατής τον ήχο από την πηγή και, αντίστοιχα, με ποιά γωνία φεύγει ο ήχος από την πηγή για να φτάσει στον ακροατή. Το μήκος της διακεκομμένης κόκκινης γραμμής μας πληροφορεί σχετικά με την ένταση της κάθε ανάκλασης.

№40 Το τελευταίο διάγραμμα μας δείχνει όλες τις ανακλάσεις, που προσπίπτουν στα διάφορα επίπεδα και αντιστοιχούν σε κάθε ακροατή.

№41 Ο απευθείας ήχος σημειώνεται με μαύρο χρώμα, ενώ, όσο ανεβαίνει η τάξη των ανακλάσεων, τα χρώματα διαφοροποιούνται σε κόκκινο, πράσινο και μπλε, αντίστοιχα..

Με αυτόν τον τρόπο εντοπίστηκαν και κατεγράφησαν όλα τα σημεία του χώρου, στα οποία προσέπιπταν ανακλάσεις που είχαν πολλά dB.

№43 Συγκεκριμένα, μεγάλο πρόβλημα εδημιουργείτο στον πίσω τοίχο, όπου προσέπιπταν ανακλάσεις απ' ευθείας από την πηγή και μετά κατευθύνονταν προς άλλα επίπεδα πριν φτάσουν στο ακροατήριο.

№44 Οι ανακλάσεις μεγάλης τάξεως, οι οποίες έφταναν κυρίως στους μπροστινούς ακροατές με μεγάλη καθυστέρηση, οφείλονταν στο μεγάλο βάθος του χώρου από το οποίο συνεπάγεται μεγάλο μήκος διαδρομής των ανακλάσεων.

№45 Σημαντικό πρόβλημα προκαλούσαν και οι ανακλάσεις στον πλαϊνό τοίχο στο ύψος του ομιλητή, όπως και στο παράθυρο δίπλα από την έδρα. Μεταξύ των δύο επιπέδων δημιουργούνταν πολλαπλές επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις, οι οποίες δημιουργούσαν αίσθημα ηχούς.

№46 Η πρώτη ενέργειά μας ήταν να καλύψουμε ολόκληρο τον πίσω τοίχο από το ύψος του ακροατηρίου μέχρι την οροφή εκτός από τους εξαεριστήρες και τον πίνακα της ΔΕΗ

№47 με ηχοαπορροφητικά πανέλα συνολικού εμβαδού 9,49 m² με την εμπορική ονομασία RPG Absorbtor.

№48 Για να αντιμετωπίσουμε τις πολλαπλές επαναλαμβανόμενες ανακλάσεις μεταξύ του πλαϊνού τοίχου και του παράθυρου δίπλα από την έδρα, τοποθετήσαμε στη:

№49 μέσα εσοχή του τοίχου

№50 πάνω στη διπλανή κολώνα και

№51 κατά μήκος του τοίχου δίπλα στην μπροστινή πόρτα

№52 πανέλα συνολικού εμβαδού $3,89 \text{ m}^2$ από το προαναφερθέν ηχοαπορροφητικό υλικό.

Προκειμένου να μειώσουμε ακόμα περισσότερο τον χρόνο αντήχησης, θελήσαμε να τοποθετήσουμε περισσότερο απορροφητικό υλικό στην αίθουσα.

№53 καλύψαμε την περιοχή πάνω από τον πίνακα με υλικό συνολικού εμβαδού $5,31 \text{ m}^2$

№54 και τοποθετήσαμε στα μικρά παράθυρα του αριστερού τοίχου μια κουρτίνα διαστάσεων $1,10 \times 13,63 \text{ m}$ δηλαδή συνολικού εμβαδού $14,99 \text{ m}^2$,

№55 πετυχαίνοντας ταυτόχρονα την εξουδετέρωση μερικών ακόμα

№56 προβληματικών ανακλάσεων.

Με τόση απορρόφηση, που βάλαμε, θα εξασθενούσε την ένταση στους πίσω ακροατές. Γι' αυτό έπρεπε με κάποιο τρόπο να ενισχύσουμε την ακουστική τους. Τα ακάλυπτα σημεία της οροφής όσο και τα φώτα πάνω στα οποία προσέπιπταν συχνά ανακλάσεις λειτουργούσαν ως ανακλαστές και έστελναν πρώιμες ανακλάσεις κυρίως στους μπροστινούς ακροατές. Έτσι, θελήσαμε να τοποθετήσουμε κάποιες άλλες ανακλαστικές επιφάνειες σε σημεία και με τρόπο που να ευνοούν την εκμετάλλευση αυτών των πρώιμων ανακλάσεων. Με την τοποθέτηση ανακλαστών τις κατευθύναμε αλλού.

№58 Μετά από αρκετούς πειραματισμούς, οι οποίοι περιλάμβαναν ποικίλα στάδια τοποθέτησης διαφόρων διατάξεων,

№59 καταλήξαμε στον καθορισμό της ακριβούς θέσης, των σωστών διαστάσεων και της κατάλληλης κλίσης τεσσάρων διατάξεων, αποτελούμενων από φύλλα κόντρα πλακέ 6 mm πάνω σε κασετάρισμα $50 \times 100 \text{ cm}$ με 50 mm διάκενο.

№60 Μια τέτοια διάταξη μας εξασφάλισε τους επιθυμητούς συντελεστές ηχοανάκλασης.

№61 Συγκεκριμένα, ο πρώτος ανακλαστήρας, συνολικού εμβαδού $2,51 \text{ m}^2$, τοποθετήθηκε στο ταβάνι μπροστά από την πηγή με κλίση 23 μοιρών ως προς αυτό.

№62 Το πρόγραμμα μας παρέχει τη δυνατότητα να βλέπουμε προς τα πού οδεύουν οι ανακλάσεις, οι οποίες προσπίπτουν στο συγκεκριμένο επίπεδο. Διαπιστώσαμε ότι συγκεκριμένη διάταξη ενισχύει τις πίσω θέσεις του ακροατηρίου.

№67 Για να ενισχύσουμε ακουστικά ακόμα περισσότερο τις πίσω θέσεις του ακροατηρίου, τοποθετήσαμε ακόμα δύο ανακλαστές στη οροφή (στοιχεία, εμβαδόν και κλίση τους)

№68 και έναν τελευταίο ανακλαστήρα πάνω από τις τελευταίες σειρές του ακροατηρίου σε κλίση

№69 δημιουργώντας, έτσι, μια ομοιόμορφη κατανομή του ήχου

№70 και συνολική αύξηση της στάθμης έντασης στην περιοχή αυτή.

(Είχαμε τοποθετήσει άλλους δύο στη μέση περίπου της οροφής, αλλά διαπιστώσαμε ότι παρόλο που ανέβαζαν ακόμα περισσότερο τη στάθμη έντασης στους πίσω ακροατές, είχαν αρνητική επίπτωση στον συνολικό χρόνο αντήχησης και τη διαύγεια.

№63 Ο ένας είχε τοποθετηθεί οριζόντια σε απόσταση $0,2$ εκατοστά από το ταβάνι.

№64 Είχε συνολικό εμβαδόν $2,59 \text{ m}^2$. Βλέπουμε ποια περιοχή ενίσχυε.

№65 Ο άλλος είχε τοποθετηθεί σε απόσταση 10 cm από το ταβάνι και με κλίση 3 μοιρών ως προς αυτό.

№66 Το συνολικό του εμβαδόν ήταν $2,55 \text{ m}^2$. Βλέπουμε ποια περιοχή ενίσχυε)

№71 Έλεγχος αποτελεσμάτων ακουστικής μελέτης σε σχέση με την διάχυση του ήχου και τον χρόνο αντήχησης.

№72-74 (125 250 500 1000) Μέσα από την τελική χαρτογράφηση του ακροατηρίου, όπως έχει διαμορφωθεί μετά από τις παρεμβάσεις μας, μπορούμε να επισημάνουμε την ομοιόμορφη διάχυση του ήχου στο χώρο.

№75-76 Διαπιστώνεται η Ευκρίνεια/Διαύγεια σε πολύ ψηλότερες τιμές από τις αρχικές.

№77-78 Μετά από αυτές τις παρεμβάσεις, με τα νέα δεδομένα του χώρου, παρατηρούμε τον χρόνο αντήχησης T60 να κατέρχεται και να παίρνει την τιμή αναφοράς (RT60 = 0,75 ms).

Μπορούμε πλέον να ακούσουμε το τελικό αποτέλεσμα του αμφιθεάτρου, πριν και μετά την διαμόρφωση (**ηχητικά πριν μετά**) Υπενθυμίζεται για άλλη μια φορά η αναγκαιότητα χρήσης ακουστικών, ώστε να επιβεβαιωθεί το αποτέλεσμα της μελέτης μας υπό τις πρέπουσες συνθήκες.

№80 Το κόστος της υλοποίησης των ανωτέρω εισηγήσεων εκτιμάται στα 5500€(μαζί με τα υλικά στήριξης), ποσό το οποίο θα αυξηθεί περίπου κατά 1500€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.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα εξ ονόματος των συνεργατών συμφοιτητών μου να ευχαριστήσω τους διδάσκοντές μας, καθηγητή κ. Χαράλαμπο Χ. Σπυρίδη και κ. Ιωάννη Γ. Μαλαφή για τις γνώσεις που μας παρείχαν, καθώς και για την ενθάρρυνσή τους να τολμήσουμε να παρουσιάσουμε την εργασία μας στο 11^ο Πανελλήνιο Συνέδριο της Ένωσης Ελλήνων Φυσικών.

Όσοι κ.κ. σύνεδροι επιθυμούν μπορούν κατά τη διάρκεια του διαλείμματος να προσέλθουν για να ακούσουν με ακουστικά τα ηχητικά αρχεία.