



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

# Ήχος και Τέχνες

ΤΟΜΟΣ Β

Δρ. Αλέξανδρος  
Τσιλφίδης

Ακουστική  
και Αρχιτεκτονική







Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ  
*επένδυση στην ποιότητα της γνώσης*

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ  
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ  
2007-2013  
πρόγραμμα για την ανάπτυξη  
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του υποέργου 2 με τίτλο «Ανάπτυξη έντυπων εκπαιδευτικού υλικού για τα νέα Προγράμματα Σπουδών» της Πράξης «Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο» η οποία έχει ενταχθεί στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση» (ΕΠΕΔΒΜ) του ΕΣΠΑ (2007-2013), Άξονας Προτεραιότητας 7: «Ενίσχυση της Διά Βίου Εκπαίδευσης Ενηλίκων στις 8 Περιφέρειες Σύγκλισης» με κωδικό MIS 296121 και η οποία συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους, μέσω του Προγράμματος Δημοσίων Επενδύσεων (ΠΔΕ) του Υ.ΠΑΙ.Θ.

## Ακουστική και Αρχιτεκτονική

### Σημείωση

Το ΕΑΠ είναι υπεύθυνο για την επιμέλεια έκδοσης και την ανάπτυξη των κειμένων σύμφωνα με τη Μεθοδολογία της εξ Αποστάσεως Εκπαίδευσης. Για την επιστημονική αριότητα και πληρότητα των συγγραμμάτων την αποκλειστική ευθύνη φέρουν οι συγγραφείς, κριτικοί αναγνώστες και ακαδημαϊκοί υπεύθυνοι που ανέλαβαν το έργο αυτό.

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών

---

Πρόγραμμα Σπουδών  
ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ – ΠΟΛΥΜΕΣΑ

Θεματική Ενότητα  
ΗΧΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΕΣ

Τόμος Β'  
Ακουστική και Αρχιτεκτονική

Συγγραφή  
ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΤΣΙΛΦΙΔΗΣ

Δρ. Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών

Κριτική Ανάγνωση  
ΣΤΕΛΙΟΣ ΠΟΤΗΡΑΚΗΣ

Επίκουρος Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρονικών Μηχανικών ΤΕ ΤΕΙ Πειραιά

Ακαδημαϊκός Υπεύθυνος για την ανάπτυξη του έντυπου διδακτικού υλικού του ΠΣ  
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΖΕΥΓΩΛΗΣ

Καθηγητής Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου

Συντονίστρια για την ανάπτυξη του έντυπου διδακτικού υλικού της ΘΕ  
ΕΙΡΗΝΗ ΜΑΥΡΟΜΜΑΤΗ

Λέκτορας Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου

Ειδικός στη Μεθοδολογία της Ανοικτής και εξ Αποστάσεως Εκπαίδευσης  
ΑΔΑΜΑΝΤΙΑ ΣΠΑΝΑΚΑ

Γλωσσική Επιμέλεια  
ΕΛΕΝΗ ΟΡΓΑΝΟΠΟΥΛΟΥ

Τεχνική Επιμέλεια – Καλλιτεχνική Επιμέλεια – Σελιδοποίηση  
ΒΙΒΛΙΟΤΕΧΝΙΑ

ΠΑΠΠΑΣ ΦΩΤΙΟΣ – ΔΟΥΒΟΥ ΣΕΒΑΣΤΗ Ο.Ε.

---

ISBN: 978-960-538-923-9

Κωδικός Έκδοσης: ΑΣΠ 50/Β

---

Copyright © 2013 για την Ελλάδα και όλο τον κόσμο  
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Πάροδος Αριστοτέλους 18, 26335 Περιβόλα Πατρών – Τηλ.: 2610 367300, Φαξ: 2610 367650

Το παρόν έργο πνευματικής ιδιοκτησίας προστατεύεται κατά τις διατάξεις του Ελληνικού Νόμου (Ν. 2121/1993 όπως έχει τροποποιηθεί και ισχύει σήμερα) και τις διεθνείς συμβάσεις περί πνευματικής ιδιοκτησίας. Απαγορεύεται απολύτως η άνευ γραπτής αδείας του εκδότη, κατά οποιονδήποτε τρόπο ή μέσο, αντιγραφή, φωτοανατύπωση και εν γένει αναπαραγωγή, εκμίσθωση ή δανεισμός, μετάφραση, διασκευή, αναμετάδοση στο κοινό σε οποιαδήποτε μορφή (ηλεκτρονική, μηχανική κ.λπ.) και η εν γένει εκμετάλλευση του συνόλου ή μέρους του έργου.



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

**Σχολή Εφαρμοσμένων Τεχνών**

*Πρόγραμμα Σπουδών*

ΑΚΟΥΣΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ – ΠΟΛΥΜΕΣΑ

*Θεματική Ενότητα*

ΗΧΟΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΕΣ

*Τόμος Β'*

# Ακουστική και Αρχιτεκτονική

**ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ ΤΣΙΛΦΙΔΗΣ**

*Δρ. Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών*

ΠΑΤΡΑ 2013

## **Βιογραφικό**

*Ο Αλέξανδρος Τσιλφίδης είναι διπλωματούχος μηχανικός του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών και κάτοχος διδακτορικού διπλώματος από το ίδιο Τμήμα. Είναι επίσης κάτοχος Μάστερ Ακουστικής (MPhil) του Πολυτεχνείου της Μασσαλίας. Έχει εργαστεί ως διευθυντής πληροφοριακών συστημάτων σε ΚΕΚ εθνικής εμβέλειας, οργανώνοντας προγράμματα κατάρτισης ενηλίκων και τηλε-εκπαίδευσης. Επίσης έχει εργαστεί ως μηχανικός πληροφορικής και σύμβουλος ακουστικής. Είναι συνιδρυτής της εταιρείας «accusonus», η οποία αναπτύσσει εφαρμογές τεχνολογίας ήχου για ακουστικά βαρηκοΐας και στούντιο ηχογράφησης. Έχει δημοσιεύσει περισσότερα από 20 άρθρα σε διεθνή περιοδικά και συνέδρια με κρίση και έχει συμμετάσχει σε πλήθος ελληνικών και ευρωπαϊκών ερευνητικών προγραμμάτων.*

*Στους γονείς μου, Αγνή και Βασίλη*





## Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	13
---------------	----

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

#### **Αρχιτεκτονική ακουστική**

---

<i>Σκοπός, Προσδοκώμενα Αποτελέσματα, Έννοιες-Κλειδιά, Εισαγωγικές Παρατηρήσεις .....</i>	<i>17</i>
1.1 Αρχιτεκτονική και ήχος .....	20
1.1.1 Η ακουστική επίγνωση ενός αρχιτεκτονικού χώρου .....	20
1.1.2 Γνωσιακοί χάρτες χωρικής ακουστικής επίγνωσης .....	21
1.1.3 Σχέσεις της ακουστικής και της αρχιτεκτονικής στο σχεδιασμό χώρων .....	23
1.1.4 Χρήση του ακουστικού χώρου στη μουσική.....	25
1.2 Υποκειμενική αντίληψη και ακουστικός χώρος .....	28
1.2.1 Χρωματισμός και οι ουρές της αντήχησης.....	28
1.2.2 Η ικανότητα εντοπισμού της θέσης πηγής σε κλειστούς χώρους .....	30
1.2.3 Χωρική εντύπωση (spatial impression)/χωριότητα (spaciousness).....	31
1.3 Ιστορική εξέλιξη της ακουστικής χώρων.....	33
1.3.1 Η ακουστική χώρων από την προϊστορία ως την Αρχαιότητα.....	34
1.3.2 Η ακουστική στους αρχαίους και ρωμαϊκούς χρόνους .....	35
1.3.3 Η ακουστική αρχιτεκτονική από το Μεσαίωνα ως την εποχή του μπαρόκ .....	47
1.3.4 Η ακουστική αρχιτεκτονική στην κλασική και ρομαντική περίοδο.....	54

1.3.5 Η μοντέρνα ακουστική επιστήμη .....	62
Σύνοψη .....	64
Λίστα Ελέγχου Γνώσεων .....	66
Γλωσσάρι .....	67
Βιβλιογραφία .....	68
Οδηγός για Περαιτέρω Μελέτη .....	70
Απαντήσεις σε Ασκήσεις Αυτοαξιολόγησης .....	71
Ενδεικτικές απαντήσεις/οδηγίες για τις Δραστηριότητες .....	74
Κατάλογος εικόνων .....	76

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### **Αναπαραγωγή του ήχου σε κλειστούς χώρους: οι ηλεκτροακουστικές εγκαταστάσεις**

<i>Σκοπός, Προσδοκώμενα Αποτελέσματα, Έννοιες-Κλειδιά, Εισαγωγικές Παρατηρήσεις</i> .....	77
2.1 Εισαγωγή .....	80
2.1.1 Αναπαραγωγή ήχου .....	80
2.1.2 Αλληλεπίδραση ηχείων-δωματίου .....	81
2.1.3 Ανάγκη χρήσης ηλεκτροακουστικών συστημάτων .....	82
2.2 Ηλεκτροακουστικοί μετατροπείς.....	85
2.2.1 Συστήματα μικροφώνων.....	85
2.2.2 Συστήματα μεγαφώνων .....	95
2.2.3 Συστήματα ηχείων .....	98
2.3 Βαθμίδες ενίσχυσης και μείξης του ήχου .....	108
2.3.1 Προενισχυτής .....	108
2.3.2 Ενισχυτής ισχύος .....	109
2.3.3 Κονσόλα μείξης.....	113

2.4	Ηλεκτροακουστικές εγκαταστάσεις.....	115
2.4.1	Προσαρμογή σύνθετης αντίστασης των ηλεκτροακουστικών εγκαταστάσεων .....	116
2.4.2	Συνδεσμολογίες ηχείων.....	117
2.4.3	Συστοιχίες ηχείων .....	122
2.4.4	Επιλογή καλωδίων και διασυνδετικών .....	125
2.5	Τυπικά παραδείγματα ηλεκτροακουστικών εγκαταστάσεων .....	128
2.5.1	Οικιακή εγκατάσταση.....	128
2.5.2	Εγκατάσταση σε στούντιο ηχογραφήσεων.....	130
2.5.3	Εγκατάσταση σε κέντρα διασκέδασης.....	131
2.5.4	Εγκατάσταση σε ξενοδοχεία, πλοία, σταθμούς μέσων μαζικής μεταφοράς, εμπορικά καταστήματα .....	132
2.5.5	Εγκατάσταση σε αίθουσες συναυλιών .....	133
2.5.6	Εγκατάσταση σε συνεδριακά κέντρα.....	138
	<i>Σύνοψη</i> .....	140
	<i>Λίστα Ελέγχου Γνώσεων</i> .....	142
	<i>Γλωσσάρι</i> .....	143
	<i>Βιβλιογραφία</i> .....	145
	<i>Οδηγός για Περαιτέρω Μελέτη</i> .....	147
	<i>Απαντήσεις σε Ασκήσεις Αυτοαξιολόγησης</i> .....	148
	<i>Ενδεικτικές απαντήσεις/οδηγίες για τις Δραστηριότητες</i> .....	158
	<i>Κατάλογος εικόνων</i> .....	160

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### **Εικονική ακουστική**

<i>Σκοπός, Προσδοκώμενα Αποτελέσματα, Έννοιες-Κλειδιά, Εισαγωγικές Παρατηρήσεις</i> .....	163
---	-----

3.1	Εισαγωγή .....	166
3.1.1	Ο ακουστικός χώρος ως στοιχείο της μουσικής .....	166
3.1.2	Αμφιωτική ακοή .....	168
3.2	Τεχνητή αντήχηση και συστήματα εικονικής ακρόασης.....	174
3.2.1	Τεχνητή αντήχηση .....	174
3.2.2	Αμφιωτική αναπαραγωγή από ακουστικά .....	177
3.2.3	Αμφιωτική αναπαραγωγή με ηχεία .....	179
3.2.4	Αναπαραγωγή από πολυκαναλικά συστήματα .....	180
3.2.5	Εικονική ακρόαση με βάση μοντέλα ακουστικής χώρων .....	182
	<i>Σύνοψη</i> .....	184
	<i>Λίστα Ελέγχου Γνώσεων</i> .....	185
	<i>Γλωσσάρι</i> .....	186
	<i>Βιβλιογραφία</i> .....	187
	<i>Οδηγός για Περαιτέρω Μελέτη</i> .....	188
	<i>Απαντήσεις σε Ασκήσεις Αυτοαξιολόγησης</i> .....	189
	<i>Ενδεικτικές απαντήσεις/οδηγίες για τις Δραστηριότητες</i> .....	195
	<i>Κατάλογος εικόνων</i> .....	196
	<i>Παράρτημα έγχρωμων εικόνων</i> .....	197

## Πρόλογος

Κάθε αρχιτεκτονικός χώρος έχει τη δική του ακουστική ταυτότητα, η οποία επιδρά στην καθημερινότητα των ατόμων που βρίσκονται μέσα ή γύρω από αυτόν. Μάλιστα, η ακουστική «συμπεριφορά» ενός χώρου είναι σε πολλές περιπτώσεις το ίδιο ή και περισσότερο σημαντική από τα οπτικά χαρακτηριστικά του. Παρ' όλ' αυτά, οι περισσότεροι θεωρούν καλό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό αυτόν που έχει απλώς άρτιο οπτικό αποτέλεσμα. Μέχρι να αλλάξει αυτή η νοοτροπία, είμαστε υποχρεωμένοι να περνάμε αρκετές ώρες σε αίθουσες διαλέξεων/διδασκαλίας στις οποίες βλέπουμε αλλά δεν κατανοούμε τον ομιλητή, σε καφέ-μπαρ με εντυπωσιακή διακόσμηση στα οποία όμως δεν μπορούμε να ακούσουμε το συνομιλητή μας, σε οπτικά άρτιες αίθουσες συναυλιών χωρίς την κατάλληλη ακουστική υποδομή κ.ο.κ. Το βιβλίο αυτό, όπως άλλωστε και όλα τα βιβλία τα οποία γράφτηκαν για το Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Ακουστικός Σχεδιασμός – Πολυμέσα», προσπαθεί ακριβώς να προβάλει και να εξηγήσει τη σημασία του ήχου και της ακουστικής στη ζωή και ειδικότερα στην καθημερινότητά μας.

Στη διάρκεια του 20ού αιώνα, η εξάπλωση των συστημάτων ηλεκτροακουστικής ηχογράφησης και αναπαραγωγής άλλαξε τη σχέση ακουστικής και αρχιτεκτονικής. Πλέον στους περισσότερους χώρους δε μιλάμε απλώς για την επίδραση του χώρου σε μια φυσική ηχητική πηγή, αλλά για την αλληλεπίδραση των ηχείων (και όλων των συστημάτων της ηλεκτροακουστικής αλυσίδας) με τον αρχιτεκτονικό χώρο. Στις περισσότερες περιπτώσεις σήμερα ο αρχιτεκτονικός ακουστικός σχεδιασμός δεν έχει νόημα από μόνος του· πρέπει να λάβει υπόψη του την ηλεκτροακουστική εγκατάσταση: Πού και πόσα ηχεία θα τοποθετηθούν; Ποια θα είναι η στάθμη της αναπαραγωγής; Ποια τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συσκευών της εγκατάστασης; Τα ερωτήματα αυτά πρέπει να απαντηθούν πριν κατασκευαστεί ο χώρος, μια και τα ακουστικά χαρακτηριστικά του χώρου και των συσκευών της ηλεκτροακουστικής αλυσίδας αλληλεπιδρούν και δημιουργούν ενιαίο ακουστικό αποτέλεσμα.

Τις τελευταίες δεκαετίες ένας νέος κλάδος της ακουστικής, η εικονική ακουστική, άλλαξε για μία ακόμα φορά τα δεδομένα. Η ραγδαία αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και οι ανακαλύψεις που αφορούν τον τρόπο λειτουργίας της ανθρώπινης αντίληψης επέτρεψαν την κατασκευή συστημάτων τα οποία

προσομοιώνουν με πολύ μεγάλη επιτυχία πραγματικούς ακουστικούς χώρους ή δημιουργούν τεχνητά, ακουστικά περιβάλλοντα. Απλές υλοποιήσεις αυτών των τεχνολογιών έχουν ήδη αρχίσει να γίνονται εμπορικά διαθέσιμες, σε κονσόλες παιχνιδιών, σε συστήματα τηλεδιασκέψεων, σε ακουστικές προσομοιώσεις κ.α.

Στα κεφάλαια αυτού του βιβλίου εξετάζονται οι ιστορικές αλλαγές στη σχέση αρχιτεκτονικής και ακουστικής. Στο πρώτο κεφάλαιο εξηγείται η αμφίδρομη σχέση ακουστικής και αρχιτεκτονικής από αντιληπτική και ιστορική σκοπιά (δε γίνεται ιδιαίτερη αναφορά σε ειδικά θέματα ακουστικής κλειστών χώρων και ακουστικού σχεδιασμού, αφού αυτά θα καλυφθούν λεπτομερώς σε επόμενες Θεματικές Ενότητες του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών ΑΣΠ και ιδιαίτερα στον τόμο ΑΣΠ 60 *Βασικές αρχές και σύγχρονες εξελίξεις στην κτιριακή ακουστική* και στον τόμο ΑΣΠ 61/Α *Λογισμικό και μέθοδοι για τον ακουστικό σχεδιασμό*). Το δεύτερο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στις ηλεκτροακουστικές εγκαταστάσεις. Εξηγούνται ορισμένες βασικές αρχές των συστημάτων μιας ηλεκτροακουστικής εγκατάστασης, με ιδιαίτερη βαρύτητα στους ηλεκτροακουστικούς μετατροπείς (μικρόφωνα, μεγάφωνα) και στα συστήματα ηχείων, ενώ παρουσιάζονται οι βασικές αρχές σχεδιασμού για διάφορες περιπτώσεις εγκαταστάσεων. Τέλος, το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην εικονική ακουστική. Αφού παρουσιαστούν βασικές αρχές της αμφιωτικής ακοής, περιγράφεται η αρχή λειτουργίας των βασικότερων συστημάτων εικονικής ακουστικής.

Τα ζητήματα τα οποία πραγματεύεται ο τόμος αποτελούν αντικείμενο πολλών και διαφορετικών επιστημών. Εδώ θα προσπαθήσουμε να συνοψίσουμε την έρευνά μας σε ένα βασικό περίγραμμα προβληματισμού. Επίσης, το βιβλίο αυτό έχει γραφτεί όσο το δυνατόν πιο απλά, με βάση τις αρχές της εξ αποστάσεως εκπαίδευσης και με σκοπό να μελετηθεί από αναγνώστες που προέρχονται από διαφορετικές κατευθύνσεις σπουδών. Θα ήθελα λοιπόν να ενθαρρύνω το φοιτητή που ενδιαφέρεται να προχωρήσει περισσότερο, να συνεχίσει με τη μελέτη της προαιρετικής βιβλιογραφίας που προτείνεται στο τέλος κάθε κεφαλαίου.

Τελειώνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους φίλους και συνεργάτες. Καθένας τους συνέβαλε, με το δικό του τρόπο, στην επιτυχή συγγραφή αυτού του τόμου. Αρχικά, ευχαριστώ τον αγαπημένο μου δάσκαλο Γιάννη

Μουρτζόπουλο για τις επιστημονικές συμβουλές και την υποστήριξή του. Εκτός των άλλων, μου έδωσε την αρχική ιδέα για τη δομή της ύλης, ώστε να αποφευχθούν (κατά το δυνατόν) οι επικαλύψεις από άλλες ΘΕ και ειδικά από την ΑΣΠ 60. Επίσης, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κριτικό αναγνώστη Στέλιο Ποτηράκη. Η συνεργασία μας ήταν αβίαστη, οι επιστημονικές του παρατηρήσεις ήταν πάντα καίριες και συνέβαλαν αποφασιστικά στη βελτίωση του τελικού αποτελέσματος. Επιπλέον ευχαριστώ την ειδική στην Ανοικτή και εξ Αποστάσεως Εκπαίδευση Μαντώ Σπανακά, η οποία με βοήθησε να ακολουθήσω τον κατάλληλο τρόπο συγγραφής για την περίπτωση. Τόσο ως προς την ύλη και το επιστημονικό περιεχόμενο όσο και ως προς την εκπαιδευτική προσέγγιση οποιοδήποτε λάθος ή παράλειψη οφείλεται αποκλειστικά σε εμένα. Επίσης, ευχαριστώ τη Συντονίστρια Ειρήνη Μαυρομάτη, η οποία ήταν πάντα πρόθυμη να βοηθήσει σε οτιδήποτε (μικρό ή μεγάλο) προέκυπτε σε κάθε βήμα του έργου. Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω όλους τους συγγραφείς των βιβλίων του ΜΠΣ ΑΣΠ για την εποικοδομητική συνεργασία. Τέλος, ευχαριστώ τη Ρένια Γασπαράτου, η οποία ήταν κάθε μέρα δίπλα μου. Χάρη σε αυτήν, η συγγραφή αυτού του βιβλίου ήταν τελικά για μένα μια ευχάριστη και ξεκούραστη εμπειρία.

Καλή μελέτη!

*Αλ. Τσιλφίδης*



