



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Ακουστική Χώρου

Δρ. Φώτης Κοντομύχος

Δρ. Θωμάς Ζαρούχας

Δρ. Παναγιώτης
Χατζηπαντωνίου

Βασικές Αρχές και
Σύγχρονες Εξελίξεις
στην Κτιριακή Ακουστική



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑ ΒΙΟΥ ΜΑΘΗΣΗ
επένδυση στην κοινωνία της γνώσης
ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του υποέργου 2 με τίτλο «Ανάπτυξη έντυπου 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.

Βασικές Αρχές και Σύγχρονες Εξελίξεις στην Κτιριακή Ακουστική

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
ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΧΩΡΟΥ

Τόμος
Βασικές Αρχές και Σύγχρονες Εξελίξεις στην Κτιριακή Ακουστική

Συγγραφή
ΦΩΤΗΣ ΚΟΝΤΟΜΙΧΟΣ

Δρ. Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών
ΘΩΜΑΣ ΖΑΡΟΥΧΑΣ

Δρ. Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών
ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΧΑΤΖΗΑΝΤΩΝΙΟΥ

Δρ. Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών

Κριτική Ανάγνωση
ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής Τμ. Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κών Πανεπιστημίου Πατρών

Ακαδημαϊκός Υπεύθυνος για την ανάπτυξη του έντυπου διδακτικού υλικού του Π.Σ.
ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΖΕΥΓΩΛΗΣ

Καθηγητής Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου

Συντονιστής για την ανάπτυξη του έντυπου διδακτικού υλικού της Θ.Ε.

ΙΩΑΝΝΗΣ ΜΟΥΡΤΖΟΠΟΥΛΟΣ

Καθηγητής Τμ. Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών

Ειδικός στη Μεθοδολογία της Ανοικτής και εξ Αποστάσεως Εκπαίδευσης
ΑΔΑΜΑΝΤΙΑ ΣΠΑΝΑΚΑ

Γλωσσική Επιμέλεια
ΣΤΑΥΡΟΣ ΠΑΠΑΚΥΡΙΤΣΗΣ

Τεχνική Επιμέλεια – Καλλιτεχνική Επιμέλεια – Σελιδοποίηση
οrυSMAGNUM

ISBN: 978-960-538-933-8

Κωδικός Έκδοσης: ΑΣΠ 60

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 αδειάς 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

ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΧΩΡΟΥ

Τόμος

Βασικές Αρχές και Σύγχρονες Εξελίξεις στην Κτιριακή Ακουστική

ΦΩΤΗΣ ΚΟΝΤΟΜΙΧΟΣ

Δρ. Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών

ΘΩΜΑΣ ΖΑΡΟΥΧΑΣ

Δρ. Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ ΧΑΤΖΗΑΝΤΩΝΙΟΥ

Δρ. Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πατρών

ΠΑΤΡΑ 2013

Βιογραφικά

Ο Φώτης Κοντομίχος είναι απόφοιτος του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών. Το 2011 αναγορεύθηκε διδάκτορας του ίδιου Τμήματος, όπου και εξακολουθεί να εργάζεται ως μεταδιδάκτορας ερευνητής. Παράλληλα παραδίδει διαλέξεις ως επιστημονικός και εργαστηριακός συνεργάτης στη βαθμίδα του Επίκουρου Καθηγητή στο Τμήμα Διοίκησης, Οικονομίας & Επικοινωνίας Πολιτιστικών και Τουριστικών Μονάδων του ΤΕΙ Δυτικής Ελλάδας (Πύργος). Στα ερευνητικά του ενδιαφέροντα περιλαμβάνονται οι νέες τεχνολογίες ακουστικών πηγών, οι ψηφιακές συστοιχίες μεγαφώνων, η εκπομπή χαμηλών συχνοτήτων και οι διατάξεις συλλογής ακουστικής ενέργειας.

Ο Θωμάς Ζαρούχας είναι διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και διδάκτορας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών. Στα ερευνητικά του ενδιαφέροντα περιλαμβάνονται η ψηφιακή επεξεργασία σήματος, η κωδικοποίηση ηχητικών σημάτων, οι μετρήσεις ακουστικής ποιότητας και πιστότητας ηχητικών σημάτων, οι εφαρμογές ψηφιακού ήχου για πολυμέσα και δίκτυα επικοινωνίας καθώς και οι τεχνολογίες ασύρματης μετάδοσης δεδομένων με έμφαση σε πολυμεσικές εφαρμογές. Από το 2010 συνεργάζεται με το Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Δυτικής Ελλάδας ως επιστημονικός συνεργάτης και από το 2012 εργάζεται στη Διεύθυνση Πανελλήνιου Σχολικού Δικτύου και Δικτυακών Τεχνολογιών του Ερευνητικού Ακαδημαϊκού Ινστιτούτου Τεχνολογίας Υπολογιστών και Εκδόσεων «Διόφαντος».

Ο Παναγιώτης Χατζηαντωνίου είναι διπλωματούχος Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής και διδάκτορας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών. Στο ίδιο τμήμα εργάστηκε από το 1995 ως μέλος της Ομάδας Τεχνολογίας Ήχου και Ακουστικής του Εργαστηρίου Ενσύρματης Τηλεπικοινωνίας σε ερευνητικά προγράμματα. Η έρευνά του επικεντρώθηκε σε τεχνικές ψηφιακής ισοστάθμισης ηχείων και χώρων ακρόασης και μέτρησης και προσομοίωσης της ακουστικής χώρων. Από το ακαδημαϊκό έτος 2009-2010 έχει εργαστεί ως διδάσκων (στη βαθμίδα του λέκτορα) βάσει του Π.Δ. 407/80 στο Τμήμα Διαχείρισης Πολιτισμικού Περιβάλλοντος και Νέων Τεχνολογιών του Πανεπιστημίου Δυτικής Ελλάδας (Αγρίνιο). Έχει συγγράψει και παρουσιάσει περισσότερα από 20 επιστημονικά άρθρα σε διεθνή επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Βασικές έννοιες και προσεγγίσεις για την ανάλυση της ακουστικής των κλειστών χώρων

Φ. Κοντομίχος

<i>Σκοπός, Προσδοκώμενα Αποτελέσματα, Έννοιες-Κλειδιά, Εισαγωγικές Παρατηρήσεις</i>	13
1.1 Βασικές έννοιες της ακουστικής των κλειστών χώρων	17
1.1.1 Η συμπεριφορά του ήχου σε ανοιχτούς και κλειστούς χώρους	17
1.1.2 Διαστάσεις, επιφάνειες και σχήμα κλειστών χώρων	20
1.2 Ανάλυση της συμπεριφοράς του ήχου σε κλειστούς χώρους	24
1.2.1 Ακουστική κατηγοριοποίηση κλειστών χώρων	24
1.2.2 Συχνοτικές περιοχές και μεθοδολογία	25
1.3 Κυματική ανάλυση και θεωρία	29
1.3.1 Οδεύοντα και στάσιμα ηχητικά κύματα	31
1.3.2 Στάσιμα κύματα σε κλειστούς χώρους	37
1.3.3 Πυκνότητα και εξασθένιση συντονισμών	40
1.3.4 Σημασία των συντονισμών στη χροιά και την αναπαραγωγή του ήχου	43
1.4 Στατιστική ανάλυση και θεωρία	47
1.4.1 Ήχος σε κλειστούς χώρους και αντήχηση	47
1.4.2 Απορρόφηση ηχητικής ενέργειας από τα υλικά των επιφανειών – Η σταθερά του δωματίου	51
1.4.3 Στατιστικός υπολογισμός του ηχητικού πεδίου σε κλειστούς χώρους	58
1.4.4 Χρόνος αντήχησης	65

1.5	Γεωμετρική προσέγγιση και θεωρία	73
1.5.1	Μέθοδος ειδώλων για την ανάλυση ανακλάσεων σε κλειστούς χώρους	75
1.5.2	Μέθοδοι προσομοίωσης για το σχεδιασμό τριδιάστατων χώρων	78
	Σύνοψη	82
	Λίστα Ελέγχου Γνώσεων	83
	Ευρετήριο Όρων	84
	Γλωσσάρι	85
	Βιβλιογραφία	86
	Οδηγός για Περαιτέρω Μελέτη	87
	Απαντήσεις σε Ασκήσεις Αυτοαξιολόγησης	89
	Απαντήσεις Δραστηριοτήτων	98
	Κατάλογος εικόνων	102
	Κατάλογος πινάκων	104

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ανάλυση της ακουστικής των κλειστών χώρων

Θ. Ζαρούχας

	<i>Σκοπός, Προσδοκώμενα Αποτελέσματα, Έννοιες-Κλειδιά, Εισαγωγικές Παρατηρήσεις</i>	105
2.1	Η εφαρμογή της Θεωρίας Σημάτων και Συστημάτων στη διάδοση του ήχου σε κλειστούς χώρους	108
2.1.1	Βασικές έννοιες Θεωρίας Σημάτων και Συστημάτων	108
2.1.2	Ο ακουστικός χώρος ως ένα γραμμικό χρονικά αναλλοίωτο σύστημα	124
2.1.3	Σχέσεις εισόδου/εξόδου και συνάρτηση μεταφοράς	128
2.1.4	Η απόκριση του χώρου ακρόασης στα πεδία χρόνου και συχνότητας	134
2.2	Ακουστικές παράμετροι χώρου, ομιλία και μουσική	141

2.2.1 Επίδραση της αντήχησης στην ομιλία	141
2.2.2 Σχέσεις και πρόβλεψη καταληπτότητας ομιλίας σε χώρους με αντήχηση	142
2.2.3 Ακουστικές παράμετροι	145
<i>Σύνοψη</i>	159
<i>Λίστα Ελέγχου Γνώσεων</i>	160
<i>Ευρετήριο Όρων</i>	161
<i>Γλωσσάρι</i>	162
<i>Βιβλιογραφία</i>	166
<i>Οδηγός για Περαιτέρω Μελέτη</i>	168
<i>Απαντήσεις σε Ασκήσεις Αυτοαξιολόγησης</i>	169
<i>Απαντήσεις Δραστηριοτήτων</i>	180
<i>Παράρτημα Α – Μετασχηματισμός Fourier</i>	181
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	183
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	186

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ακουστικός σχεδιασμός κλειστών χώρων

Π. Χατζηαντωνίου

<i>Σκοπός, Προσδοκώμενα Αποτελέσματα, Έννοιες-Κλειδιά, Εισαγωγικές Παρατηρήσεις</i>	187
3.1 Γενικές αρχές σχεδιασμού	190
3.1.1 Γενικές απαιτήσεις και πολυπλοκότητα σχεδιασμού	190
3.1.2 Όγκος, διαστάσεις, σχήμα χώρου και διάταξη ακροατηρίου	197
3.1.3 Ανακλαστικές επιφάνειες	204
3.1.4 Βέλτιστος χρόνος αντήχησης	206
3.1.5 Υπολογιστικά εργαλεία προσομοίωσης και απεικόνισης ακουστικών παραμέτρων	210

3.2	Διάχυση και απορρόφηση του ήχου.....	213
3.2.1	Ηχοδιάχυση.....	213
3.2.2	Πορώδη απορροφητικά υλικά.....	215
3.2.3	Απορροφητικές μεμβράνες.....	218
3.2.4	Συντονιστές ή συνηχητές.....	219
3.2.5	Διάτρητες επιφάνειες.....	221
3.3	Ειδικές απαιτήσεις χώρων ακρόασης ανάλογα με τη χρήση τους.....	223
3.3.1	Χώροι μικρών διαστάσεων.....	223
3.3.2	Συναυλιακοί χώροι (concert halls).....	229
	Σύνοψη.....	233
	Λίστα Ελέγχου Γνώσεων.....	235
	Ευρετήριο Όρων.....	236
	Γλωσσάρι.....	237
	Βιβλιογραφία.....	238
	Οδηγός για Περαιτέρω Μελέτη.....	240
	Απαντήσεις σε Ασκήσεις Αυτοαξιολόγησης.....	241
	Απαντήσεις Δραστηριοτήτων.....	244
	Κατάλογος εικόνων.....	248
	Κατάλογος πινάκων.....	251

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μέθοδοι μέτρησης και εξομίωσης

Π. Χατζηαντωνίου

	Σκοπός, Προσδοκώμενα Αποτελέσματα, Έννοιες-Κλειδιά, Εισαγωγικές Παρατηρήσεις.....	253
4.1	Μέτρηση ακουστικής χώρων.....	256
4.1.1	Σήματα μόνιμης κατάστασης (steady state signals).....	256
4.1.2	Μέθοδοι μέτρησης της κρουστικής απόκρισης χώρου.....	258

4.1.3 Πρακτική διαδικασία μέτρησης ακουστικής απόκρισης χώρου	265
4.1.4 Οδηγίες και τύποι ακουστικών μετρήσεων βασισμένα σε διεθνή πρότυπα	275
4.1.5 Μέτρηση του χρόνου αντήχησης.....	279
4.2 Εξομοίωση ακουστικής χώρων.....	287
4.2.1 Αναλογικές και ψηφιακές μέθοδοι εξομοίωσης	287
<i>Σύνοψη</i>	<i>291</i>
<i>Λίστα Ελέγχου Γνώσεων</i>	<i>293</i>
<i>Ευρετήριο Όρων</i>	<i>294</i>
<i>Γλωσσάρι</i>	<i>295</i>
<i>Βιβλιογραφία</i>	<i>297</i>
<i>Οδηγός για Περαιτέρω Μελέτη</i>	<i>299</i>
<i>Απαντήσεις σε Ασκήσεις Αυτοαξιολόγησης</i>	<i>301</i>
<i>Απαντήσεις Δραστηριοτήτων</i>	<i>305</i>
<i>Κατάλογος εικόνων</i>	<i>308</i>
<i>Παράρτημα έγχρωμων εικόνων</i>	<i>311</i>