

Μετρήσεις και Ανάλυση της Ακουστικής του Θεάτρου της Επιδαύρου

Σταμάτης Βασιλαντωνόπουλος¹

Λέκτορας,

vasilan@mech.upatras.gr

Παναγιώτης Χατζηαντωνίου¹

Ερευνητής,

Δημήτρης Σκαρλάτος²,

Λέκτορας,

skarlat@mech.upatras.gr

Τηλέμαχος Ζακυνθινός²

Ερευνητής,

Νικόλαος – Αλέξανδρος

Τάτλας¹, Ερευνητής,

Ιωάννης Μουρτζόπουλος¹,

Αναπληρωτής Καθηγητής,

mourjor@wcl.ee.upatras.gr

¹Τμήμα Ηλεκ.Μηχ.&Τεχν. Υπολ., ²Τμήμα Μηχαν-Μηχ. & Αερον.,

Πανεπιστήμιο Πατρών

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία παρουσιάζει αποτελέσματα από πρόσφατες ακουστικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο αρχαίο θέατρο της Επιδαύρου. Οι μετρήσεις αυτές βασίζονται στην χρήση σύγχρονων μεθόδων και επιτρέπουν τον υπολογισμό ακουστικών παραμέτρων όπως: Clarity C-80, Definition D-50, RASTI, IACC, LEF, κ.λ.π. Οι μετρήσεις συγκρίνονται με υπολογιστικό μοντέλο ακουστικής προσομοίωσης του θεάτρου. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων παρουσιάζει μερικά πρωτότυπα συμπεράσματα για τις ακουστικές ιδιότητες του θεάτρου σε σχέση με την μορφή και προέλευση των πρώιμων ανακλάσεων, την συχνοτική απόκριση του θεάτρου την χρονο-συχνοτική αλληλοεπίδραση και την αντίληψη του χώρου από τον ακροατή. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων επιβεβαιώνουν την πασίγνωστη καλή ακουστική ποιότητα του θεάτρου για την ομιλία, με την καταληπτότητα να παραμένει σε άριστα επίπεδα σε όλες τις θέσεις.

Measurements and Analysis of the Acoustics of the Ancient Theater of Epidauros

ABSTRACT

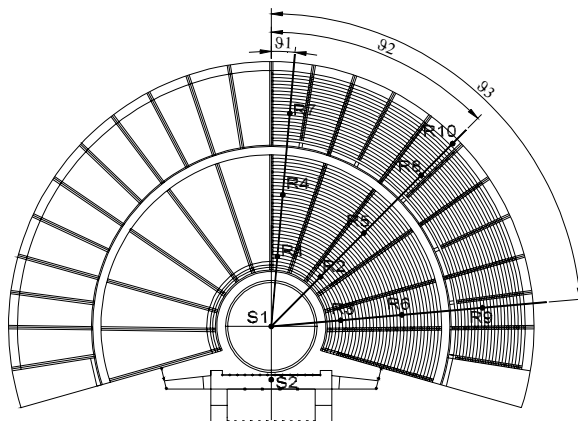
Recent results are presented, from acoustic measurements performed in the ancient open theater of Epidauros. These measurements were obtained using modern techniques, allowing evaluation of numerous acoustic parameters for the theater, such as: Clarity C-80, Definition D-50, RASTI, IACC, LEF, etc. These measurements and results are also compared to those obtained from a acoustic simulation of the theater's acoustics. The analysis of the results, illustrates many novel aspects of the theater's acoustic properties, such as the pattern and mechanism for the early reflections, the spectral response of the theater, aspects of time-frequency response interaction and aspects of the spatial impression. The results restate the well-known exceptional acoustic quality of the theater for speech, with speech intelligibility remaining nearly perfect at all listener positions.

1. Εισαγωγή

Η καλή ακουστική του αρχαίου θεάτρου της Επιδαύρου, προκαλεί το ενδιαφέρον τόσο των ειδικών όσο και των απλών επισκεπτών. Κατά καιρούς υπήρξαν μετρήσεις της ακουστικής του θεάτρου [1,2] αλλά κυρίως λόγω περιορισμών του εξοπλισμού, οι μετρήσεις αυτές παρουσίασαν μόνο μερικές πτυχές του θέματος. Εδώ, παρουσιάζονται νέες αναλυτικές μετρήσεις της ακουστικής του θεάτρου για διάφορες θέσεις ακρόασης, που θα βοηθήσουν στην πληρέστερη κατανόηση των ακουστικών χαρακτηριστικών. Ταυτόχρονα, γίνεται και σύγκριση των αποτελεσμάτων με ακουστικές προσομοιώσεις για τις ίδιες θέσεις πηγής - δέκτη [3].

1. Μεθοδολογία

Η ακουστική μέτρηση του θεάτρου πραγματοποιήθηκε στις 28/4/2004 από 2 ομάδες ερευνητών του Παν/μίου Πατρών (Τμήματα Ηλ.-Μηχ. & Τεχ. Υπολ. και Μηχαν.-Μηχ.) και βασίστηκε σε σύγχρονες μετρητικές μεθόδους με χρήση φορητών προσωπικών υπολογιστών (κάρτες ήχου RME και Tascam US 122), λογισμικό WinMLS και B&K Dirac 2.7, μικρόφωνα ACO Pacific και Probe Norsonic 1234, Probe έντασης Norsonic 240, ηχεία ATC SMC 20-2 Active Monitor και JBL EON power 15. Οι μετρήσεις λήφθηκαν σε θέσεις που φαίνονται στο **Σχήμα 1**, σε αποστάσεις που δίνονται και στο [3]. Η πηγή τοποθετήθηκε σε ύψος 1,5 m στο κέντρο της ορχήστρας (S1), καθώς και μετατοπισμένη κατά 5m προς το κοίλο. Το σήμα διέγερσης (MLS ή sine sweep) παρήχθη με στάθμη 105 dB-SPL/1m, ενώ ο θόρυβος περιβάλλοντος ήταν κατά μέσο όρο 55 dB (40 dB(A)).



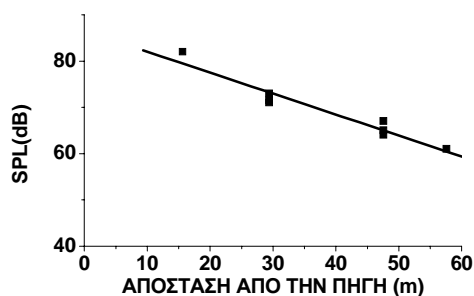
Σχήμα 1. Κάτοψη του αρχαίου θεάτρου και θέσεις πηγής (S_N) και δεκτών (R_N)

2. Αποτελέσματα

2.1 Η διακόμανση της ηχητικής στάθμης

Η ηχητική στάθμη παρουσιάζει την αναμενόμενη για ανοιχτούς χώρους μείωση με την απόσταση, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2**. Μικρές διακυμάνσεις από την ιδανική

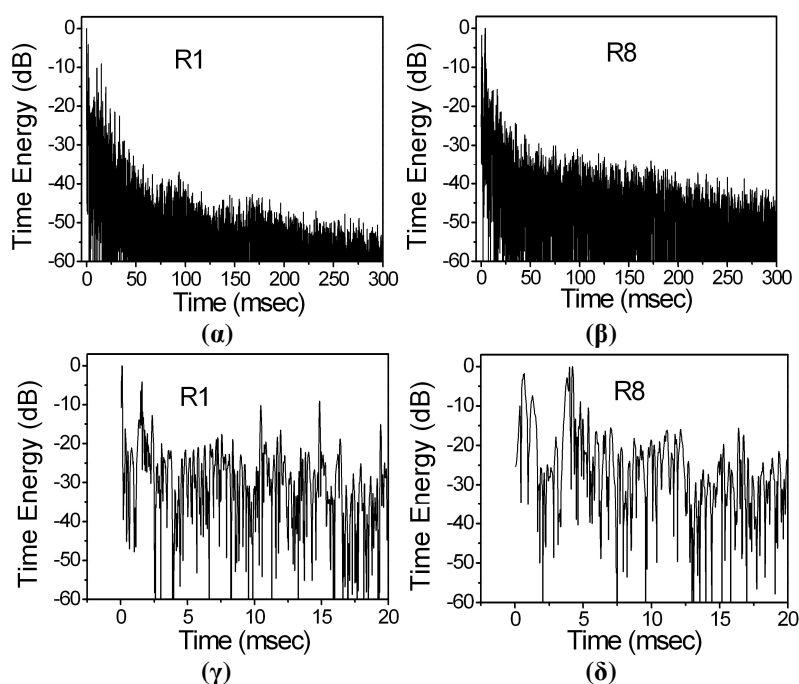
κλίση εμφανίζονται λόγω του θορύβου (κυρίως από ρεύματα αέρα), αλλά και της διαφοροποίησης της στάθμης των διάχυτων ανακλάσεων (για διαφορετικές γωνίες).



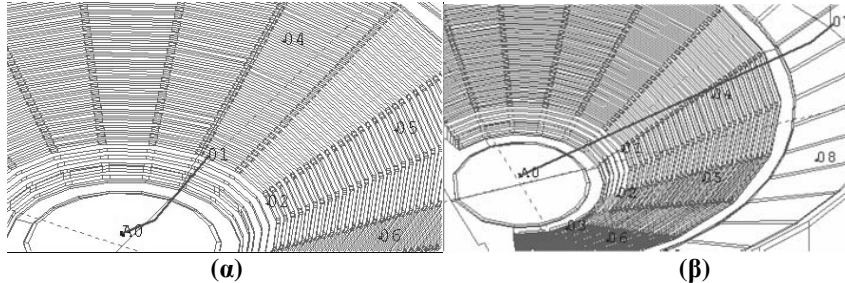
Σχήμα 2: Ηχοστάθμη για διαφορετικές αποστάσεις του δέκτη από την πηγή

2.2 Η χρονική σύνθεση του ηχητικού πεδίου

Το ηχητικό πεδίο του θεάτρου [3] σχηματίζεται από ορισμένες διακριτές ανακλάσεις και σημαντική ενέργεια από το διάχυτο πεδίο που φθίνει σχετικά σύντομα (περίπου στα 300 msec), στη στάθμη του θορύβου. Με βάση τις



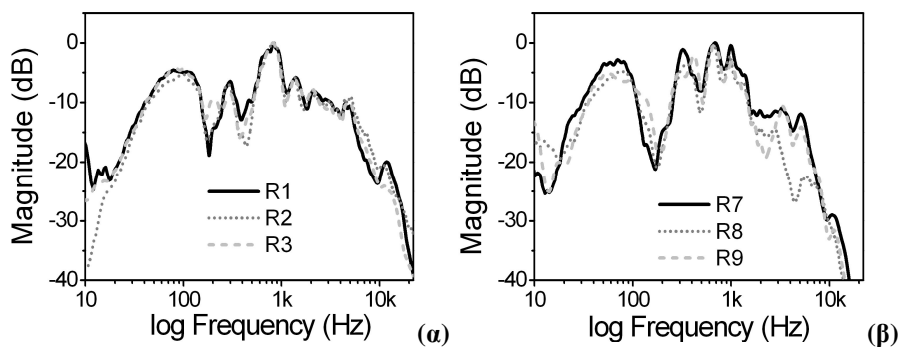
Σχήμα 3: Χρονική απόκριση (κανονικοποιημένη ενέργεια σε dB) του θεάτρου για πηγή στο κέντρο της ορχήστρας (θέση S1) και για τις θέσεις δεκτών: R1 ((α) και (γ)) και R2 ((β) και (δ)). Οι αποκρίσεις λήφθηκαν μετά από αποσυνέλιξη της ανηχοϊκής απόκρισης της πηγής διέγερσης.



Σχήμα 4: Σχηματική απεικόνιση του μηχανισμού παραγωγής 1^{ης} ανάκλασης για τις θέσεις ακροατηρίου του θεάτρου της Επιδαύρου: (α) θέση R1 (β) θέση R7.

μετρήσεις που λήφθηκαν (**Σχήμα 3**), αλλά και με την υπολογιστική προσομοίωση για τις ίδιες θέσεις (με βάση το γεωμετρικό μοντέλο του θεάτρου, **Σχήμα 4**), εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα: για τις κοντινές θέσεις (R1, R2, R3), η πρώτη ανάκλαση φθάνει περίπου στα 1,7 ms μετά το απευθείας σήμα και προέρχεται από το δάπεδο της ορχήστρας (**Σχήμα 4(α)**). Η δεύτερη ανάκλαση φθάνει περίπου στα 6 ms και προέρχεται από την πίσω του ακροατή μέτωπο των εδωλίων. Δεύτερης τάξης ανακλάσεις φθάνουν επίσης στα 11 msec και 16 msec περίπου. Λόγω του σχήματος και της κλίσης του κοίλου, στις επάνω θέσεις (R7, R8, R9) παρατηρείται μία διαφορετική σειρά στην άφιξη των ανακλάσεων: η πρώτη ανάκλαση φθάνει στα 1,3 ms και προέρχεται από τα εμπρόσθια εδώλια του ακροατή (**Σχήμα 4(β)**). Η δεύτερη ανάκλαση φθάνει περίπου στα 3,5 - 4 ms και προέρχεται από το δάπεδο της ορχήστρας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο εστιασμός ανακλάσεων για αυτές τις μακρύτερες αποστάσεις, έχει σαν αποτέλεσμα την ενίσχυση του πλάτους αυτής της δεύτερης ανάκλασης, έτσι ώστε να εμφανίζεται σε υψηλότερη στάθμη από το απευθείας σήμα **Σχήμα 3 (β), (δ)**. Όπως είναι αναμενόμενο, όλες αυτές οι πρώιμες ανακλάσεις, ενισχύουν το απευθείας σήμα της πηγής και την καταληπτότητα, ιδίως για τις μακρινές θέσεις ακρόασης.

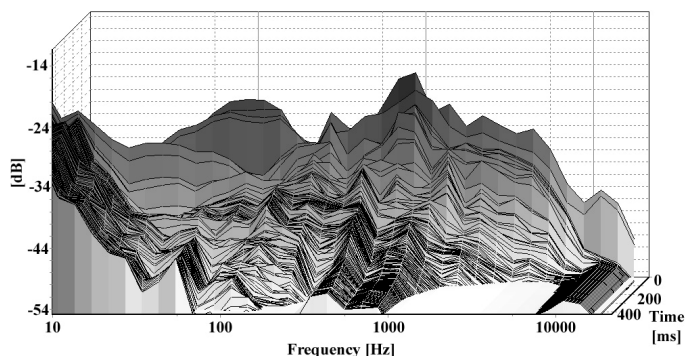
2.3 Η συχνοτική σύνθεση του ηχητικού πεδίου



Σχήμα 5: Μέτρο της απόκρισης συχνότητας του θεάτρου σε: (α) κοντινές θέσεις / διαφορετικές γωνίες και (β) για μακρινές θέσεις / διαφορετικές γωνίες.

Το θέατρο εμφανίζει μία χαρακτηριστική διαμόρφωση της ηχητικής χροιάς σε σήματα, η οποία προέρχεται από τη μορφή των αποκρίσεων συχνότητας. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5(α), (β)**, για μετρήσεις με την πηγή στο κέντρο της ορχήστρας, η απόκριση αυτή χαρακτηρίζεται από μία σημαντική βύθιση στα 170-200 Hz και ενίσχυση στην περιοχή 800-1500 Hz. Ταυτόχρονα οι χαμηλές συχνότητες (80-100 Hz) μεταδίδονται με ικανοποιητικό πλάτος. Η μορφή της φασματικής απόκρισης δεν μεταβάλλεται δραστικά ούτε με την απόσταση, ούτε με την γωνία ακρόασης. Όμως, εάν η πηγή μετακινηθεί στο μπροστινό μέρος της ορχήστρας (κοντά στα πρώτα εδάλια), τότε το εμφανίζεται μία μετακίνηση προς χαμηλότερες συχνότητες τόσο του βυθίσματος, όσο και της περιοχής ενίσχυσης (από τα 800Hz στα 600Hz). Η χαρακτηριστική αυτή και σταθερή με τη θέση απόκριση, λειτουργεί ευεργετικά για τη μετάδοση σημάτων ομιλίας, αφού η σημαντική για την καταληπτότητα περιοχή του 1 KHz ενισχύεται. Επιπλέον ένα ποσοστό της μη-σημαντικής για την καταληπτότητα ενέργειας κοντά στην τονική συχνότητα μειώνεται, ταυτόχρονα παραμένοντας αναλλοίωτος ο «όγκος» του σήματος. Στις ψηλές συχνότητες υπάρχει η αναμενόμενη μείωση του πλάτους, όπου στις περιπτώσεις με ακροατήριο (δεν πραγματοποιήθηκαν τέτοιες μετρήσεις), αναμένεται να είναι περισσότερο έντονη.

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις και εξετάζοντας την χρονοσυχνοτική απόκριση του θεάτρου (**Σχήμα 6**), είναι προφανές ότι ο μηχανισμός των πρώιμων



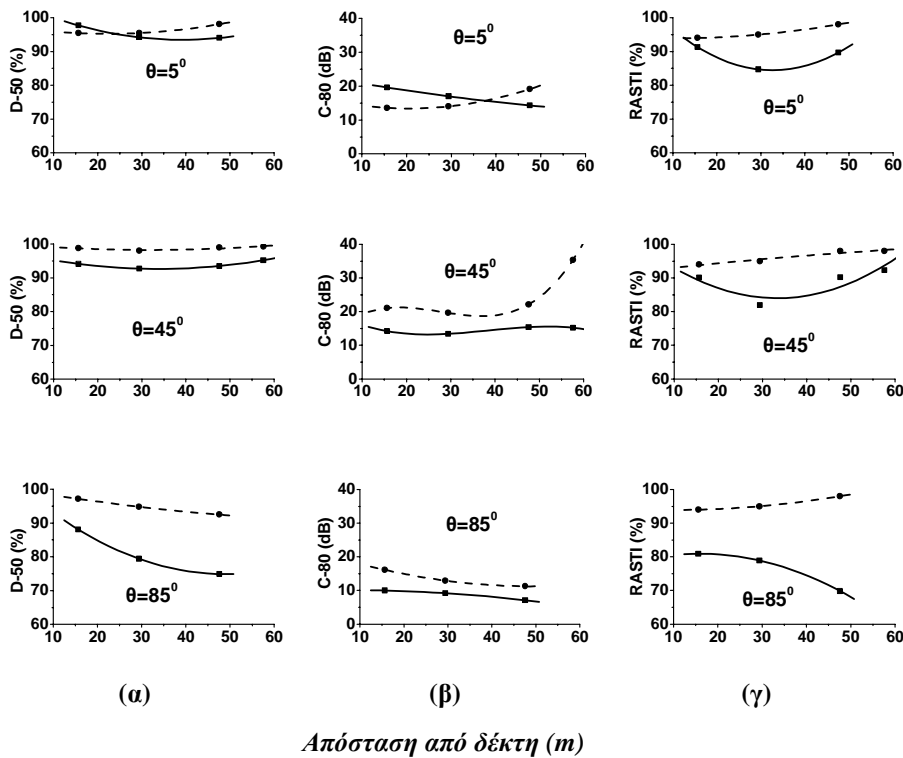
Σχήμα 6: Χρονοσυχνοτική ανάλυση της απόκρισης του θεάτρου για τη θέση δέκτη R1

ανακλάσεων (όπως προαναφέρθηκε, από το δάπεδο της ορχήστρας ή τα εδάλια) είναι υπεύθυνος για τη χαρακτηριστική φασματική απόκριση (μέχρι τα 100 msec περίπου), ενώ για μετέπειτα χρόνους, το διάχυτο πεδίο, παράγει ένα σχεδόν επίπεδο φάσμα. Βέβαια, ο συντονισμός στη περιοχή του 1 KHz (που προσδίδει και την χαρακτηριστική χροιά στο θέατρο), φαίνεται να διατηρείται μέχρι τα 300 msec περίπου, όπου μετά το πλάτος των ανακλάσεων πέφτει στα συνήθη επίπεδα του θορύβου. Στο **Σχήμα 6** φαίνεται επίσης και η - αθροιστική στην απόκριση - συμπεριφορά του χαμηλόσυχνου θορύβου του χώρου (κάτω από την περιοχή διέγερσης, π.χ. στα 10 Hz) κυρίως λόγω των ρευμάτων του αέρα, στα οποία στο παρελθόν έχει αναφερθεί ότι εν μέρει συνεισφέρουν στην «καλή ακουστική» του θεάτρου. Όπως φαίνεται και στο σχήμα, είναι πιθανό ότι τα ρεύματα αυτά να συνδυάζονται με την απόκριση του χώρου (κυρίως μετά τα 100 msec) και να

δημιουργούν σύνθετες διαμορφώσεις της ακουστικής πίεσης οι οποίες μπορεί να συντελούν στην μεταγενέστερη ομαλοποίηση του φάσματος στις χαμηλές συχνότητες (κοντά στα 200 Hz). Πρακτικά ένα τέτοιο φαινόμενο γίνεται αντιληπτό σαν συνηχήσεις του χαμηλόσυχνου σήματος, συνδυασμένες με την προαναφερθείσα περιορισμένη «αντήχηση» στην περιοχή του 1 KHz, η οποία συνεχίζει να παράγεται από το διάχυτο πεδίο και που σχετίζεται με τη γεωμετρία του κοίλου του θεάτρου.

2.4 Ακουστική ευκρίνεια (D-50), διαύγεια (C-80) και καταληπτότητα (RASTI)

Στο Σχήμα 7, δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων για όλες τις αποστάσεις και γωνίες ακρόασης ($\theta = 0^\circ$ θεωρείται η γωνία όπου ταυτίζονται ο οριζόντιος ακουστικός άξονας της πηγής και ο άξονας συμμετρίας του θεάτρου, βλέπε Σχήμα 1). Ταυτόχρονα, δείχνονται και τα αποτελέσματα της ακουστικής προσομοίωσης του θεάτρου, για τις ίδιες θέσεις [3]. Εξετάζοντας την Ευκρίνεια D-50 (Σχήμα 7 (α)) και τη Διαύγεια ομιλίας C-80 (Σχήμα 7 (β)) παρατηρείται ότι το

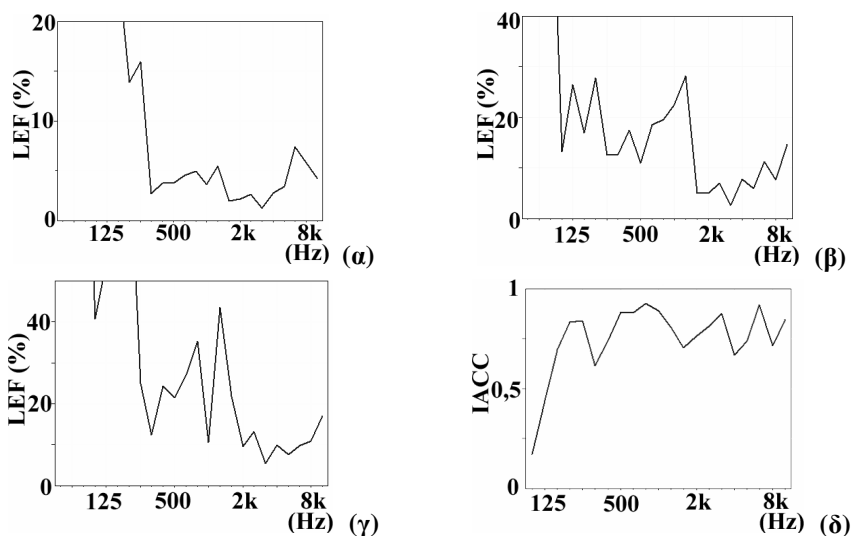


Σχήμα 7 (α): Ευκρίνεια D-50, (β): Διαύγεια C-80, (γ): % Καταληπτότητα ομιλίας RASTI, σε σχέση με την απόσταση του δέκτη από την πηγή (στο κέντρο της ορχήστρας) και τη γωνία ακρόασης. Οι τιμές - - είναι από μετρήσεις, οι τιμές — είναι από προσομοιώσεις.

θέατρο παρουσιάζει αξιόλογη απόδοση, ανεξάρτητα της απόστασης πηγής-δέκτη. Το θέατρο παρουσιάζει ευκρίνεια ομιλίας κοντά στη περιοχή του 95%, η διαύγεια είναι πάνω από 15dB, ενώ για κεντρικές και μεσαίες θέσεις ($\theta = 5^\circ$, $\theta = 45^\circ$) η παράμετρος αυτή αυξάνει με την απόσταση υποδηλώνοντας την ευεργετική ανακατανομή του λόγου πρώιμης προς καθυστερημένης ενέργειας ανάκλασης. Σημαντικό είναι ότι οι αντίστοιχες προσομοιώσεις, παρόλο ότι υποδεικνύουν παραπλήσιες τιμές, φαίνεται ωστόσο να υπολογίζουν σχετικά υποδεέστερη απόδοση, ειδικά για τις πλάγιες θέσεις. Η μικρή διαφοροποίηση μεταξύ μετρήσεων και προσομοίωσης οφείλεται στο γεγονός ότι η προσομοίωση βασίζεται σε λείες επιφάνειες και απλοποιημένα μοντέλα διάχυσης των ανακλάσεων. Σε αντίθεση, οι μετρήσεις έγιναν με διαβρωμένο το υλικό των επιφανειών του θεάτρου, πράγμα που προσεγγίζει καλύτερα τα αποτελέσματα προσομοιώσεων με ακροατήριο.

Όμοια εξαιρετική είναι και η καταληπτότητα της ομιλίας RASTI (**Σχήμα 7 (γ)**), η οποία εμφανίζεται στις μετρήσεις να είναι ανεξάρτητη της απόστασης και γωνίας και σε όλες τις περιπτώσεις κοντά στο ιδανικό (κοντά 100%). Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την εξαιρετική ακουστική συμπεριφορά του θεάτρου για ομιλία.

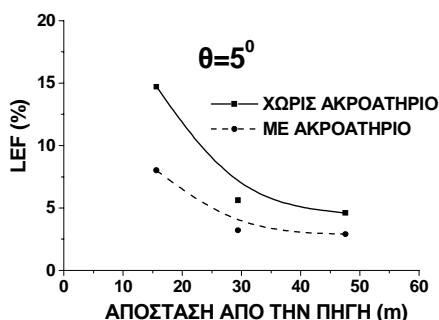
2.5 Η ακουστική αίσθηση χώρου (spatial impression)



Σχήμα 8: Ποσοστό ενέργειας πλευρικών ανακλάσεων (LEF) συναρτήσει της συχνότητας για την θέση R1. (α) στον άξονα X, (β) στον άξονα Y, (γ) στον άξονα Z. (δ) Δείκτης Ετεροσυσχέτιση (IACC) συναρτήσει της συχνότητας για την θέση R1.

Όπως είναι γνωστό η βέλτιστη κατανομή της ενέργειας των πλευρικών ανακλάσεων (Lateral Energy Fraction, LEF) συμβάλει στη αναβάθμιση της αντίληψης του μεγέθους (όγκου) της πηγής και εισάγει την αίσθηση της ακουστικής άνεσης και οικειότητας του χώρου. Από τα αποτελέσματα προσομοιώσεων [3] συνάγεται ότι τέτοιες ανακλάσεις επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την ακουστική της Επιδαύρου, αφού φαίνεται να φτάνουν στους ακροατές με προοδευτικά οξύτερες γωνίες, με την αύξηση της απόστασης από την πηγή (όπως φαίνεται στο **Σχήμα 9** και συζητείται

και στις [1,3]). Αυτό το αποτέλεσμα συνδυαζόμενο με πρώιμους χρόνους έλευσης, επιδρά ευεργετικά για την ευκρίνεια λόγου και την καταληπτότητα σε αυτές τις περισσότερες μακρινές θέσεις δεκτών.



Σχήμα 9: Ποσοστό ενέργειας πλευρικών ανακλάσεων (LEF) συναρτήσει της απόστασης για τις κεντρικές θέσεις του δέκτη (από προσομοίωση)

Η κατανομή της LEF με τη συχνότητα (για την θέση R1, **Σχήμα 8**), δείχνει επίσης ότι ο κύριος όγκος της διάχυτης ενέργειας στην περιοχή «συντονισμού» της απόκρισης του θεάτρου (δηλαδή κοντά στο 1 KHz), προέρχεται από τις πλευρικές ανακλάσεις (άξονας Y, **Σχήμα 8(β)**) και από τον κάθετο άξονα Z (**Σχήμα 8(γ)**). Η τιμή της IACC (Inter Aural Cross Correlation, **Σχήμα 8(δ)**) δείχνει ότι σε όλες τις συχνότητες, η διάσταση της πηγής παραμένει περιορισμένη στο ηχητικό πεδίο, επιτρέποντας τον καλό εστιασμό του ομιλητή.

6. Συμπεράσματα

- Οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν την εξαιρετική ακουστική του θεάτρου για ομιλία και την άριστη καταληπτότητα λόγου, ανεξάρτητα της θέσης του ακροατή.
- Οι πρώιμες ανακλάσεις από το δάπεδο της ορχήστρας και τα μέτωπα των εδωλίων, συνεισφέρουν σε χρήσιμη για την ομιλία ενέργεια. Για θέσεις στο επάνω μέρος του κοίλου, υπάρχει και εστιασμός πρώιμων ανακλάσεων
- Σημαντική συνιστώσα του πεδίου, μέχρι περίπου τα 300 msec, παράγεται από διάχυτες ανακλάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται εντονότερα από τις πλευρές του κοίλου και τις οριζόντιες επιφάνειες. Η γωνία άφιξης των ανακλάσεων αυτών γίνεται οξύτερη, για τις απομακρυσμένες θέσεις ακρόασης.
- Η συχνотική απόκριση του θεάτρου τονίζει την περιοχή 800Hz – 1 KHz, και αυτός ο συντονισμός διαρκεί για 300 msec περίπου. Το φάσμα γίνεται περισσότερο επίπεδο μετά τα 100 msec περίπου, ενώ παρουσιάζεται και θόρυβος υπό μορφή χαμηλόσυχνων ρευμάτων αέρα.
- Οι εξαιρετικές τιμές C-80, D-50, RASTI που συχνά βελτιώνονται για μακρινές θέσεις, δείχνουν τη θετική συνεισφορά των πρώιμων ανακλάσεων, αλλά και την ευεργετική επίδραση του διάχυτου πεδίου που δεν μπορεί να προβλεφθεί πλήρως από γεωμετρικά ακουστικά μοντέλα του θεάτρου.

7. Αναφορές

- [1] R. Shankland: Acoustics of Greek theaters. Physics Today, pp.30-35, 1973.
- [3] Δ. Γουλαράς: Ακουστική αρχαίων θεάτρων, Διπλωματική εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 1995.
- [3] S. L. Vassilantonopoulos, J. N. Mourjopoulos: A Study of Ancient Greek and Roman Theater Acoustics, Acoustica 89, 2002.