

**Ακουστική προσομοίωση, πρότυπες μετρήσεις και  
ανάλυση της ακουστικής του αμφιθέατρου διδασκαλίας  
“Nelson Haden Auditorium” πανεπιστημίου South Bank  
Λονδίνου**

Γεώργιος Α. Χατζηγεωργίου B.Eng(Hons),MSc,Pg.Dip  
Πολιτικός Μηχανικός-Μηχανικός Ακουστικής  
Μακεδονίας 9, Δράμα, 66.100  
g.hatzigeorgiou@gmail.com

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα ακουστικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο αμφιθέατρο διδασκαλίας “Nelson Haden Auditorium” του Πανεπιστημίου SouthBank με την χρήση του λογισμικού MLSSA καθώς και την σύγκριση με μοντέλο ακουστικής προσομοίωσης τύπου CATT-Acoustic. Ο υπολογισμός διαφόρων ακουστικών παραμέτρων όπως Reverberation Time RT60, Early Decay Time EDT, Clarity C-80, Definition D-50 κτλ δίνει σημαντικά στοιχεία για την ακουστική συμπεριφορά και την αξιολόγηση του συγκεκριμένου χώρου. Οι λεπτομερείς αναλύσεις των ακουστικών παραμέτρων με βάση τις σχετικές θέσεις πηγής και ακροατή, δίνουν επίσης σημαντικά στοιχεία για την μορφή και προέλευση των πρώιμων και δευτερευουσών ανακλάσεων, την κρουστική απόκριση του χώρου και την αλληλεπίδραση χρόνου και συχνότητας. Τέλος, στην συγκεκριμένη εργασία εξετάζεται η μεταβολή των αποτελεσμάτων συγκρίνοντας τρεις διαφορετικές προσομοιώσεις του χώρου, με βάση την πολυπλοκότητα αρχιτεκτονικών λεπτομερειών.

**Acoustical measurements, computer modeling and  
analysis of Nelson Haden auditorium SouthBank  
University of London**

**ABSTRACT**

The project deals with the investigation of the acoustics of Nelson Haden Auditorium, presenting the results of acoustical measurements with the use of MLSSA computer software that had been carried out in the specific auditorium and the comparison with CATT-Acoustic stimulation model. The prediction of different acoustical parameters such as Reverberation Time RT60, Early Decay Time EDT, Clarity C-80, Definition D-50 etc will give very important information about the acoustical behaviour and the judgement of the auditorium. The detailed analysis of the results according to source and receiver position, will give us an insight about the origin of early and secondary reflections, the impulse response and the interaction among time and frequency. Finally, there will be carried out an analysis based on the comparison of three different simulation models of the space, according to the level of architectural detailing.

## Εισαγωγή

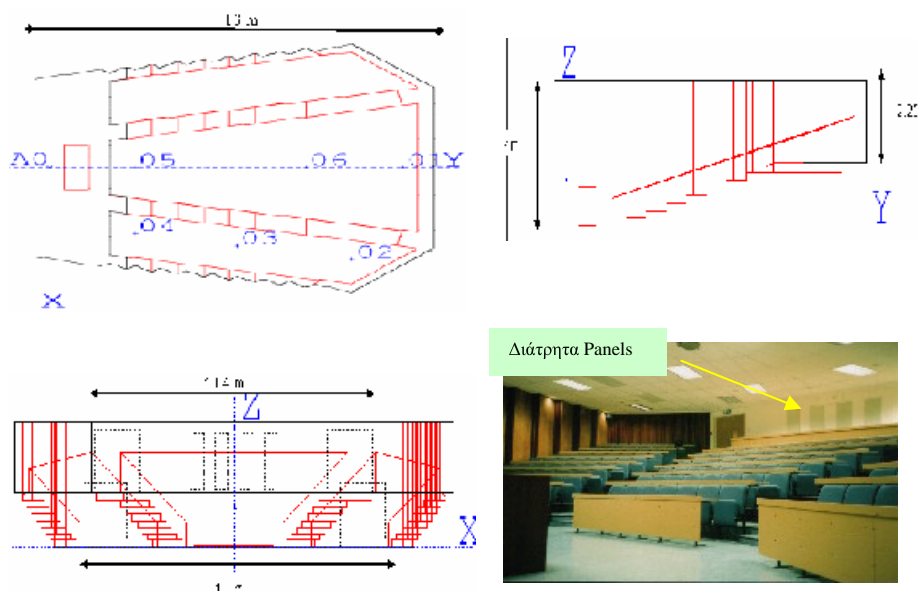
Στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος στο πανεπιστήμιο South Bank Λονδίνου, η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα από ακουστικές μετρήσεις με την χρήση λογισμικού τύπου MLSSA που πραγματοποιήθηκαν στο παραπάνω αμφιθέατρο διδασκαλίας για διάφορες θέσεις ακροατή και ομιλητή, με σκοπό την καλύτερη δυνατή κατανόηση των ακουστικών παραμέτρων. Παράλληλα γίνεται και σύγκριση των αποτελεσμάτων με το μοντέλο ακουστικής προσομοίωσης τύπου CATT-Acoustic.

### 1. Περιγραφή του αμφιθεάτρου

Η συγκεκριμένη αίθουσα βρίσκεται στο κτίριο Borough Building στην πανεπιστημιούπολη και η κύρια χρήση της είναι για διαλέξεις από το επιστημονικό προσωπικό και τους φοιτητές όλων των ειδικοτήτων.

Παράλληλα με, τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων-προσομοιώσεων, θα δοθούν πληροφορίες για την γεωμετρία της αίθουσας και τον ακουστικό σχεδιασμό.

Τα παρακάτω σχέδια (Σχήμα 1.1) μας δίνουν μια γενική εικόνα της γεωμετρίας του χώρου.



Σχήμα 1.1 Κάτοψη, τομή (Y-Z) και τρισδιάστατος απεικόνιση

Ο όγκος του αμφιθεάτρου είναι  $428\text{m}^3$  και χωρητικότητας 190 ατόμων. Πρέπει να αναφέρουμε ότι οι δύο κύριοι πλευρικοί τοίχοι του αμφιθεάτρου δίνουν ένα αισθητικό αποτέλεσμα οδοντωτών προεξοχών τύπου zig-zag (Σχήμα 1.1). Στη οροφή χρησιμοποιήθηκε ψευδοροφή επί μεταλλικού σκελετού με αναρτημένα

ακουστικά πλακίδια πάχους 2cm, δάπεδο με μεταβλητό διάκενο επί μεταλλικού σκελετού, πάνω σε πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος και καθίσματα με ταπετσαρία από ύφασμα. Οι τοίχοι της αίθουσας αποτελούνται από ξύλινες επενδύσεις (κυρίως πλευρικά), ενώ οι λοιπές επιφάνειες είναι κατασκευασμένες από διπλές γυψοσανίδες. Είναι αξιοσημείωτο να αναφέρουμε επίσης και την χρήση τεσσάρων διάτρητων panels από διάτρητη λαμαρίνα πάχους 2mm και ορυκτοβάμβακα 5cm.

## 2. Μεθοδολογία Ακουστικών Μετρήσεων

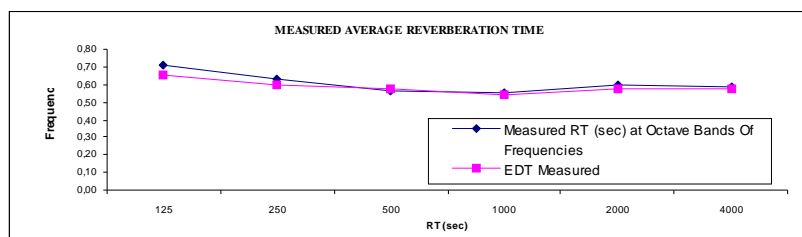
Η ακουστική μέτρηση του αμφιθεάτρου πραγματοποιήθηκε στις 15/05/2002 με την χρήση προσωπικού φορητού υπολογιστή με το λογισμικό MLSS (MLSS settings Stimulus: Burst MLLS, amplitude: +/- 1.6 Volts. Period: 65535 samples, 868.3 msec), προενισχυμένο μικρόφωνο τύπου (Reading: 95 dB without absorption, 91.5 with absorption. Input gain: 40dB, Output gain: 10dB), πολυκατευθυντικό ηχείο δωδεκάεδρο τύπου (Type: 223, Nr: 16258, Lautsprecher and Serial no: 902231) και ενισχυτή τύπου (Type: 2610 B&K).

Οι μετρήσεις λήφθηκαν σε θέσεις που απεικονίζονται στην παραπάνω κάτοψη του αμφιθεάτρου (βλέπε Σχήμα 1.1). Συγκεκριμένα κάθε θέση της πηγής αντιστοιχεί σε ένα δέκτη και αντιστρόφως, διότι αμφότεροι πρέπει να ελεγχθούν από ακουστικής άποψης.

Η πολυκατευθυντική πηγή με ύψος 1,5 m τοποθετήθηκε σε εννιά διαφορετικές θέσεις. Το μικρόφωνο ύψος 1,2 m, κατευθυνθεί προς την πηγή, τοποθετήθηκε σε δέκα διαφορετικές θέσεις. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι 4 m.

### 2.1 Χρόνος αντήχησης

Ο χρόνος αντήχησης είναι μια σπουδαία παράμετρος που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ακουστικής των χώρων. Στην ακόλουθη γραφική παράσταση καταγράφονται οι τιμές του χρόνου αντήχησης και του πρώιμου χρόνου αντήχησης όπως μετρήθηκαν με την χρήση του λογισμικού MLSSA.



Σχήμα 2.1 Χρόνος Αντήχησης και πρώιμος χρόνος αντήχησης

Ο χρόνος αντήχησης της αίθουσας σε συνάρτηση με το συγκεκριμένο όγκο είναι αρκετά ικανοποιητικός. Ο προτεινόμενος χρόνος αντήχησης της αίθουσας σε συνάρτηση με τον όγκο της είναι 0,7sec[3], επιβεβαιώνοντας το αποτέλεσμα των μετρήσεων που καταγράφηκε 0,6 sec.

Επίσης οι τιμές του πρώιμου χρόνου αντήχησης (Early Decay Time) συμπίπτουν σχεδόν με τις τιμές του χρόνου αντήχησης (βλέπε Σχήμα 2.1). Είναι σημαντικό να

αναφέρουμε ότι και ο “EDT είναι εξίσου σημαντική παράμετρος για την εκτίμηση της καταληπτότητας ο οποίος εξαρτάται βέβαια από τις σχετικές θέσεις πηγής και ακροατή αλλά και από την κατευθυντικότητα της πηγής”[5]. Το γεγονός ότι ο λόγος του χρόνου αντήχησης  $RT_{60}$  και του πρώιμου χρόνου αντήχησης EDT τείνει κοντά στην μονάδα (βλέπε Πίνακα 2.1) αποδεικνύει την ομοιόμορφη κατανομή της ηχητικής ενέργειας και έχει σαν συνέπεια την καθαρότητα της ομιλίας [2].

Πίνακας 2.1 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για  $RT_{60}$  και EDT

Frequency	125	250	500	1000	2000	4000
RT	0.72	0.63	0.56	0.55	0.60	0.59
EDT	0.66	0.60	0.58	0.54	0.58	0.57
EDT/RT	0.92	0.96	1.03	0.98	0.97	0.97

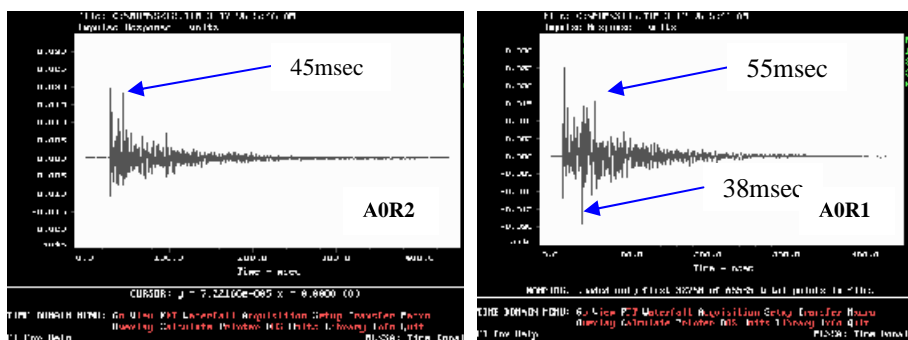
## 2.2 Ακουστική ευκρίνεια (D-50) και διαύγεια (C-80)

Στο πίνακα 2.2 δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των μετρήσεων για τον δείκτη ευκρίνειας και διαύγειας στην περιοχή του 1 KHz, για 6 θέσεις μικροφώνου οι οποίες χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και τον προσδιορισμό της καταληπτότητας για ομιλία. Το αμφιθέατρο παρουσιάζει ευκρίνεια ομιλίας σε ένα εύρος 66-81% και τιμές διαύγειας 7-10dB. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την πολύ καλή ακουστική συμπεριφορά του αμφιθεάτρου με την υψηλότερη τιμή 82% για την μπροστά και μεσαία θέση του δέκτη 6 (βλέπε Σχήμα 1.1), όπου έχουμε και την πιο κοντινή απόσταση 2.8m από την πηγή. Οι πλάγιες θέσεις δεκτών (R2,R3,R4) παρουσιάζουν εξίσου πολύ καλά αποτελέσματα 77-78% αποδεικνύοντας την βέλτιστη κατανομή ενέργειας των πλευρικών ανακλάσεων. Τέλος η χαμηλότερη τιμή 66% αντιστοιχεί στην θέση R1 όπου έχουμε και την μεγαλύτερη απόσταση 11.70m πηγής και δέκτη.

Πίνακας 2.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα μετρήσεων για D-50 και C-80 (1KHz)

Microphone Position	D <sub>50</sub>	C <sub>80</sub>
Microphone 1	66 %	7.81 dB
Microphone 2	77 %	10 dB
Microphone 3	77%	9.72 dB
Microphone 4	78 %	9.35 dB
Microphone 5	81 %	10.02 dB
Microphone 6	75 %	7.16 dB

Τα ακόλουθα σχήματα κρουστικών αποκρίσεων (Σχήμα 2.2) υποδηλώνουν την παρουσία κάποιων πρώιμων ενεργητικών ανακλάσεων στα 45msec για το δέκτη R2 και 38msec-55msec για το δέκτη R1 δηλαδή σχεδόν μέσα στα πρώτα 50msec, χρονικό διάστημα σημαντικό για την καταληπτότητα της ομιλίας στον χώρο.



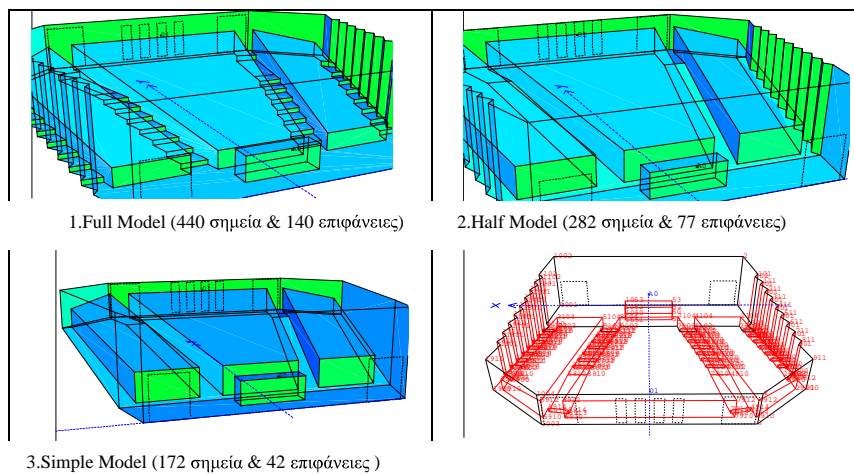
Σχήμα 2.2 Μετρήσεις κρουστικών αποκρίσεων για A0R2 και A0R1

Με βάση τα παραπάνω συμπεράσματα πρέπει να εξεταστεί και η παρουσία των δευτερευουσών ανακλάσεων δηλαδή μετά τα πρώτα 50msec. Από τα αποτελέσματα των κρουστικών αποκρίσεων παρατηρούμε ότι μέχρι τα 200msec φθίνουν σχετικά σύντομα και με σταθερή κλίση. Η πίσω πλευρά του αμφιθεάτρου είναι κατασκευασμένη από σκληρή ανακλαστική επιφάνεια γυψοσανίδας, κατάσταση όχι επιθυμητή για τέτοιου είδους αμφιθέατρα. Το μήκος της αίθουσας είναι σχετικά μικρό (13m) με αποτέλεσμα οι δευτερεύουσες ανακλάσεις σε ανάλογες περιπτώσεις να παραμένουν αρκετά δυνατές σε ένταση και σε πολλές περιπτώσεις να φτάνουν σε λάθος χρόνο, ειδικά όταν οι συνθήκες ακρόασης είναι ευπαθείς για διακοπή. Βέβαια στην συγκεκριμένη περίπτωση όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2 οι ευδιάκριτες δευτερεύουσες ανακλάσεις έχουν εξαλειφθεί με την χρήση των τεσσάρων διάτρητων ηχοαπορροφητικών panels (βλέπε Σχήμα 1.1), καλύπτοντας έτσι μεγάλο μέρος της ανακλαστικής επιφάνειας με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας δυσάρεστων ακουστικών φαινομένων όπως το φαινόμενο της πολλαπλή ηχούς, ηχητικούς χρωματισμούς κ.α .

### 3. Ακουστική Προσομοίωση

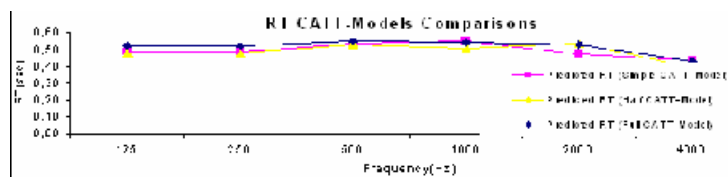
Σαν πρώτο βήμα ήταν να γίνει η μοντελοποίηση της αίθουσας με τον καθορισμό ενός συστήματος συντεταγμένων για όλες τις γωνίες του αμφιθεάτρου. Κάθε γωνία έπρεπε να οριστεί από τρεις διαστάσεις στο χώρο x,y,z με σκοπό τέσσερις τουλάχιστον γωνίες να ορίζουν μια επιφάνεια π.χ. ταβάνι, δάπεδο, τοίχους κ.τ.λ. Για κάθε επιφάνεια ορίστηκαν συντελεστές απορρόφησης και διάχυσης και τέλος ορίστηκαν οι θέσεις της ηχητικής πηγής ( $A_N$ ) και δεκτών ( $R_N$ ) ίδιες με τις πραγματικές κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

Τρία διαφορετικά μοντέλα σχεδιάστηκαν (Σχήμα 3.1) για το συγκεκριμένο αμφιθέατρο με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων, αλλά και την παράλληλη σύγκριση με τα αποτελέσματα που έδωσε η χρήση του MLSSA. Η διαφοροποίηση μεταξύ τους στηρίχτηκε στο βαθμό της γεωμετρικής πολυπλοκότητας.

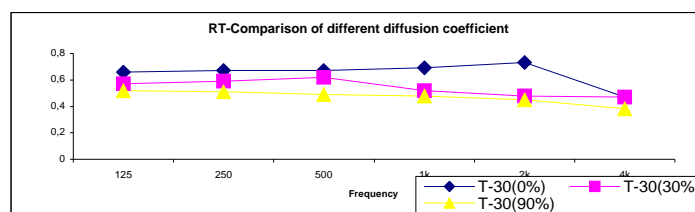


Σχήμα 3.1 Απεικόνιση τριών ακουστικών προσομοιώσεων 1.Full Model 2.Half Model 3.Simple Model

Οι χρόνοι αντήχησης που δόσανε τα τρία διαφορετικά μοντέλα παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφοροποιήσεις, με τις μεγαλύτερες στην περιοχή των 2000Hz ειδικά μεταξύ του Full model-Simple Model (βλέπε Σχήμα 3.2). Το γεγονός ότι σε αυτή την περιοχή συχνοτήτων, κυριαρχούν έντονα φαινόμενα γεωμετρικής ακουστικής (διάχυση, περίθλαση, ανάκλαση) θα μπορούσε να δώσει μια εξήγηση στην διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων. Βέβαια το σφάλμα μεταξύ των τιμών κυμαίνεται στην τάξη του 2-8% και μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτό. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι δύσκολες κατασκευαστικές λεπτομέρειες π.χ. σκάλες, για την συγκεκριμένη περίπτωση μπορούν να αγνοηθούν και έτσι ο μελετητής να κερδίσει πολύτιμο χρόνο κατά την διάρκεια της ακουστικής μελέτης.



Σχήμα 3.2 Χρόνοι αντήχησης τριών προσομοιώσεων



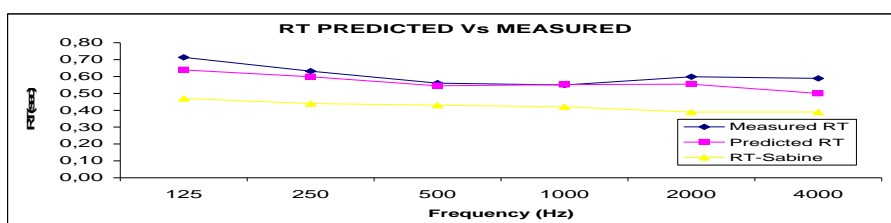
Σχήμα 3.3 Χρόνοι αντήχησης τριών προσομοιώσεων(Διάχυση)

Για τον έλεγχο της ευαισθησίας των αποτελεσμάτων όσον αφορά την επιλογή των συντελεστών διάχυσης, χρησιμοποιήθηκαν για όλες τις επιφάνειες ποσοστά διάχυσης 0%, 30% και 90% για κάθε προσομοίωση ξεχωριστά, αναφερόμενοι στην χρήση της “Full Model” προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα του χρόνου αντήχησης, έδωσαν μεγάλες αποκλίσεις ειδικά στην περιοχή των συχνοτήτων 1000-2000Hz (βλέπε Σχήμα 3.3). Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι ο παράγοντας διάχυση παίζει καθοριστικό ρόλο για την απόδοση ακριβή αποτελεσμάτων. Βέβαια είναι γνωστό ότι μια από τις μεγαλύτερες δυσκολίες στην χρήση των λογισμικών για ακουστική προσομοίωση, είναι να δοθούν τιμές για τους συντελεστές διάχυσης των επιφανειών. Βέβαια για τις περισσότερες περιπτώσεις συνιστάται να θεωρούμε ανακλάσεις διάχυσης για όλες τις επιφάνειες του μοντέλου. Και εδώ προκύπτει το ερώτημα: “Πώς να επιλεγθούν συντελεστές διάχυσης αφού δεν υπάρχει βάση δεδομένων ή πρότυπη μέθοδος για την μέτρηση τους;” [4]

#### 4. Ακουστικές μετρήσεις και Ακουστική προσομοίωση

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, το λογισμικό προβλέπει τις ακουστικές παραμέτρους, λαμβάνοντας υπ’ όψιν την μορφή του χώρου και τις θέσεις των πηγών και δεκτών. Για την επαλήθευση της αξιοπιστίας του μοντέλου, οι ακουστικές παράμετροι που μετρήθηκαν στο αμφιθέατρο συγκρίνονται με τις τιμές που υπολογίστηκαν από το μοντέλο.

Από τότε που οι ακουστικές παράμετροι σχετίζονται με το χρόνο αντήχησης σε διάχυτο πεδίο, μια λογική πρώτη προσέγγιση θα ήταν να παρουσιάσουμε τις διαφορές των αποτελεσμάτων με την ακόλουθη γραφική παράσταση.



Σχήμα 4.1 Χρόνοι αντήχησης μετρήσεων, προσομοίωσης και κατά Sabine.

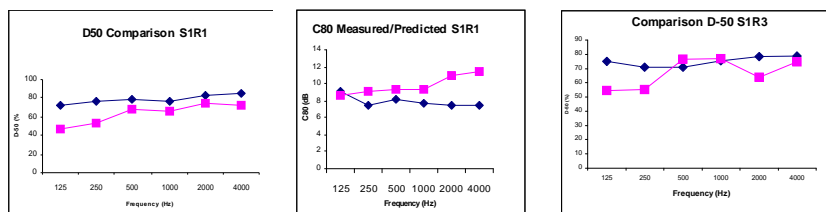
Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι τιμές των χρόνων αντήχησης συμπίπτουν μεταξύ τους (μετρήσεις-προσομοίωσης) με κάποιες μικρές αποκλίσεις της τάξεως του 10% για τις χαμηλές συχνοτήτες και 15% για τις υψηλές.

Βέβαια θεωρήθηκε αναγκαίο από το μελετητή να υπολογιστεί και ο χρόνος αντήχησης κάνοντας χρήση της εξίσωσης του Sabine, με την προϋπόθεση ότι έχουμε ομοιογενές ηχητικό πεδίο (διάχυτο). Ο υπολογισμός έδωσε ένα χρόνο αντήχησης γραμμικό σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων, το οποίο αποτελεί επιθυμητό αποτέλεσμα σε κάθε περίπτωση ακουστικού σχεδιασμού αιθουσών για ομιλία, με μεγάλη όμως απόκλιση σε σχέση με τις καμπύλες προσομοίωσης και μετρήσεων. Το “CATT-Acoustic” είναι ένα λογισμικό το οποίο στηρίζεται στην θεωρία της γεωμετρικής ακουστικής χωρίς να λαμβάνει φαινόμενα διάθλασης και περίθλασης των ηχητικών κυμάτων, παρά μόνο τους νόμους ανάκλασης, απορρόφησης και διάχυσης από τους τοίχους [4]. Η επίδραση της διάχυσης παίζει



σημαντικό ρόλο στην απόκλιση των αποτελεσμάτων, λόγω της χρησιμοποίησης συντελεστών διάχυσης κατά προσέγγιση από το μελετητή.

Τέλος συγκρίνοντας τα αποτελέσματα δεικτών Ευκρίνειας D-50 και Διαύγειας C-80 (Σχήμα 4.2), παρατηρούμε ότι για ορισμένες θέσεις οι διαφοροποιήσεις είναι ελάχιστες, ενώ σε άλλες περιπτώσεις οι αποκλίσεις απαιτούν περαιτέρω ανάλυση.



Σχήμα 4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων μετρήσεων –προσομοιώσεων για D-50 & C-80

## 5. Συμπεράσματα

1. Οι μετρήσεις επιβεβαιώνουν την πολύ καλή ακουστική του αμφιθεάτρου σχεδόν σε όλες τις θέσεις του ακροατηρίου.
2. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων για δείκτη D-50 ευκρίνειας και C-80 διαύγειας παρουσιάζουν υψηλές τιμές, έχουν ελάχιστες μεταβολές για διάφορες θέσεις ακροατών και αυτό κάνει την αίθουσα να έχει ομοιόμορφη ακουστική συμπεριφορά.
3. Οι κρουστικές αποκρίσεις επιβεβαιώνουν την ύπαρξη διάχυτου πεδίου στο χώρο καθώς επίσης και την σημαντική συνεισφορά των πρώιμων και δευτερευουσών ανακλάσεων για την καθαρή ομιλία.
4. Το λογισμικό CATT-Acoustic αποδείχθηκε χρήσιμο εργαλείο για την λεπτομερή μελέτη των ακουστικών παραμέτρων του αμφιθεάτρου.
5. Κατά την διάρκεια κατασκευής του ακουστικού μοντέλου, η απλοποίηση διαφόρων δύσκολων αρχιτεκτονικών λεπτομερειών, δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα της μελέτης. Έτσι ο μελετητής μπορεί να κερδίσει πολύτιμο χρόνο κατά την διάρκεια της ακουστικής μελέτης.
6. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ μετρήσεων και προσομοιώσεων έδειξε ότι η επίδραση των συντελεστών διάχυσης κατά την δημιουργία του γεωμετρικού μοντέλου παίζει σημαντικό ρόλο στην απόδοση πιο αξιόπιστων ακουστικών παραμέτρων

## 6. Αναφορές

- [1] Barron, M., *Auditorium Acoustics and Architectural Design*, Chapman & Hall, London (1993)
- [2] Barron, M., *21 years of Acoustic Scale Modeling Testing*, Vol.19:Part3, Proceedings of Institute of Acoustics, Published by IOA, pp 67-80 (1997).
- [3] Everest, A.F, *The Handbook of Acoustics*, 4<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill (2002)
- [4] Αμερικανικά τεχνικά επιχειρήσεις, Εμμανουήλ Ε.Κανδύλη, *Ακουστική κτιρίων, Θεωρία – Λογισμικά - Παραδείγματα μετρήσεων*, (2006)
- [5] Διονύσης Ευθυμιάτος, «Μερικές παρατηρήσεις για την σχέση αντήχησης - ευκρίνειας. Εφαρμογή σε χώρους αυξημένης αντήχησης» Ακουστική 2004, Σελίδες 13-18 (2004).