

iReflectors – Έξυπνοι Ακουστικοί Ανακλαστήρες από Σύνθετα Υλικά

Διονύσιος Θ. Γ. Κατερέλος
Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου
& Μουσικών Οργάνων
Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων
Στ. Τυπάλδου
Ληξούρι
dkaterel@teiion.gr

Κωνσταντίνος Δρόσος
Τμήμα Τεχνών Ήχου &
Εικόνας
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Πλατεία Τσιριγώτη 7
Κέρκυρα
kdrosos@ionio.gr

Αναστάσιος Κόκκινος
Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου
& Μουσικών Οργάνων
Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων
Στ. Τυπάλδου
Ληξούρι
akokkin@gmail.com

Στυλιανός Ι. Μιμηλάκης
Τμήμα Τεχνολογίας Ήχου
& Μουσικών Οργάνων
Τ.Ε.Ι. Ιονίων Νήσων
Στ. Τυπάλδου
Ληξούρι
smimilak@teiion.gr

Ανδρέας Φλώρος
Τμήμα Τεχνών Ήχου &
Εικόνας
Ιόνιο Πανεπιστήμιο
Πλατεία Τσιριγώτη 7
Κέρκυρα
floros@ionio.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση ανακλαστήρων οροφής για τη βέλτιστη διάδοση του ήχου σε αίθουσες ακροάσεων αποτελεί σημαντικό στοιχείο του ακουστικού σχεδιασμού. Οι μέχρι σήμερα χρησιμοποιούμενοι ανακλαστήρες είναι σταθεροί ως προς τη θέση και το σχήμα και κατασκευάζονται από συμβατικά υλικά. Στο παρόν επιχειρείται η μελέτη της δυνατότητας αντικατάστασης των συμβατικών ανακλαστήρων από νέους, κατασκευασμένους από σύνθετα υλικά. Στόχος είναι η μελέτη και ο σχεδιασμός εύκαμπτων «έξυπνων» ανακλαστήρων με εμβαπτισμένα σύρματα από κράματα μνήμης σχήματος, τα οποία θα μπορούν να μεταβάλλουν το σχήμα του ανακλαστήρα κατά τις εκάστοτε ανάγκες. Η διαδικασία αλλαγής θα ελέγχεται από ηλεκτρονικό σύστημα ενεργοποίησης. Οι ανακλαστήρες θα διαθέτουν εμβαπτισμένο δίκτυο οπτικών ινών για τον έλεγχο της ανάπτυξης και διάδοσης βλάβης.

iReflectors – Smart Acoustical Composite Reflectors

ABSTRACT

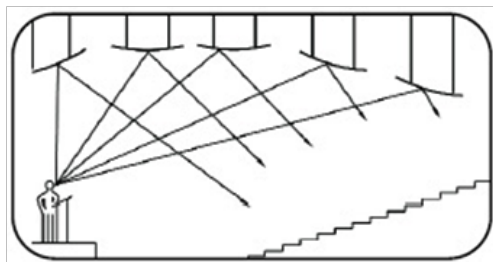
The use of reflectors for the optimal sound diffusion is a major issue in Room Acoustics. Up to now, the applied reflectors are stable, with certain shape and made by conventional materials. In the present is studied the possibility to replace the conventional reflectors by new, manufactured by composite materials. The aim is to

design flexible “intelligent” reflectors that will adapt their shape depending on the certain acoustical needs of a room. This change is planned to be actuated using embedded shape memory alloy (SMA) wires. The adaptation process will be controlled automatically by an electronic system. In order to control damage initiation and growth within the composite panel, an optical fibres network will be applied.

Λέξεις κλειδιά: Ανακλαστήρες, σύνθετα υλικά, έξυπνοι ανακλαστήρες

1. Εισαγωγή

Η παροχή φυσικής ενίσχυσης στο φυσικό ήχο είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο στους μικρούς χώρους, αίθουσες διδασκαλίας, συναντήσεων, κλπ, όσο και περισσότερο σε μεγάλους χώρους εκδηλώσεων, όπου η απόσταση ηχητικής πηγής και δέκτη είναι μεγάλη. Κοίλες, κυρτές ή επίπεδες επιφάνειες (ανακλαστήρες) χρησιμοποιούνται για τη φυσική ενίσχυση του ήχου και, γενικότερα, τη διαχείριση της ηχητικής ενέργειας [1]. Η διαχείριση της ηχητικής ενέργειας περιλαμβάνει την βέλτιστη ένταση και κατευθυντικότητα του ήχου καθώς και το συγχρονισμό των ανακλάσεων του από τις περιβάλλουσες επιφάνειες της αίθουσας. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ανακλαστήρων επιδεικνύουν συγκεκριμένες δυνατότητες ανά ζώνη συχνοτήτων. Σε κάθε περίπτωση, κάθε τέτοια διάταξη είναι στατική και δεν μπορεί να μεταβάλει το σχήμα της. Χαρακτηριστική διάταξη αίθουσας με ανακλαστήρες οροφής φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.1. Οι εμφανιζόμενοι ανακλαστήρες έχουν καμπύλο (κυρτό σχήμα). Η διαχείριση της ενέργειας παρουσιάζεται απλουστευμένα ώστε να εντυπωθεί η γενική αρχή λειτουργίας των ανακλαστήρων.



Σχήμα 1.1 Αίθουσα εκδηλώσεων με ανακλαστήρες οροφής

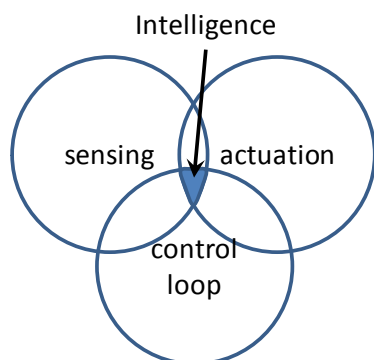
Το συνηθέστερο συμβατικό υλικό κατασκευής ανακλαστήρων είναι το συνθετικό ξύλο (κόντρα πλακέ) με επίστρωση gel coat ενισχυμένου με ίνες γυαλιού.

Οι ανακλώσες κυρτές επιφάνειες βοηθούν στη διάχυση του ήχου, ενώ οι κοίλες στην εστίαση αυτού. Η εστίαση του ήχου θεωρείται αποφευκτέα διότι ενώ ενισχύει τον ήχο στο χώρο της εστίας, εκτός του χώρου αυτού δεν έχει καμία επίδραση. Επομένως, η ένταση του ήχου θα διαφέρει σημαντικά εντός της αίθουσας. Λόγω αυτής της συμπεριφοράς, χρησιμοποιούνται ως ανακλαστήρες, σχεδόν αποκλειστικά, κυρτές επιφάνειες. Στόχος της παρούσας, είναι η μετατροπή του

μειονεκτήματος που παρουσιάζουν οι κοίλες επιφάνειες σε πλεονέκτημα, ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες της αίθουσας. Αναλυτικότερα, σε περιπτώσεις αιθουσών όπου το ακροατήριο δεν καταλαμβάνει όλο το χώρο, αλλά συγκεκριμένες περιοχές, η παραπάνω συμπεριφορά μπορεί να βοηθήσει ώστε η ηχητική ενέργεια να διαχέεται καλύτερα και περισσότερο στις περιοχές κοινού από τα κενά σημεία.

Τα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται σε όλο και περισσότερες εφαρμογές. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους, είναι ότι ο σχεδιασμός αρχίζει από το ίδιο το υλικό, έτσι ώστε να προσφέρει ακριβώς τις ιδιότητες που απαιτούνται. Επί πλέον εμφανίζουν μεγάλες τιμές ειδικών μηχανικών ιδιοτήτων (μέτρο ελαστικότητας, αντοχή, κλπ) καθιστώντας τα ενδεικτικά σε εφαρμογές όπου το βάρος παίζει σημαντικό ρόλο.

Η εμφάνιση μεταλλικών κράματων με ξεχωριστές ιδιότητες, όπως η μνήμη σχήματος, η υπερελαστικότητα και η μεγάλη απόσβεση κατέστησε δυνατή την «ενεργοποίηση» κατασκευών κάτω από θερμικά, μηχανικά, μαγνητικά και ηλεκτρικά ερεθίσματα. Τα κράματα αυτά είναι γνωστά ως «κράματα με μνήμη σχήματος» - Shape Memory Alloys (SMA). Ο συνδυασμός των συνθέτων υλικών και των SMA οδήγησε στην κατασκευή υλικών που παρουσιάζουν «ευφυΐα». Οι Kelly κ.α. [2] ορίζουν την «ευφυΐα» όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.2 ως το σημείο τομής των ικανοτήτων αίσθησης, ενεργοποίησης και του ελέγχου αυτών:



Σχήμα 1.2 Το σημείο τομής των τριών κύκλων της αίσθησης, της ενεργοποίησης και του βρόχου ελέγχου ορίζει την «ευφυΐα» [2]

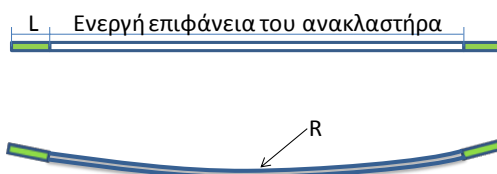
Στο παρόν μελετάται η δυνατότητα σχεδιασμού ανακλαστήρων οροφής, οι οποίοι να διαθέτουν ευφυΐα, σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό.

2. Ακουστικοί Ανακλαστήρες

Οποιοδήποτε φάνωμα (panel) με λεία επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως ακουστικός ανακλαστήρας αν τηρούνται ορισμένες συνθήκες, οι οποίες είναι [3, 4]:

- α) συντελεστής απορρόφησης επιφάνειας, $\alpha < 0.1$
- β) ανενεργό μήκος ανακλαστήρα, $2L > \lambda$ (βλ. Σχήμα 2.1)
- γ) ακτίνα καμπυλότητας, $R > 2\lambda$
- δ) η μικρότερη διάσταση του ανακλαστήρα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 1.5λ
- ε) το βάρος του ανακλαστήρα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από 9.79 kg/m^2 για

ομίλια και 19.58 kg/m^2 για μουσική



Σχήμα 2.1 Επίπεδος και καμπύλος ανακλαστήρας. Βασικά μεγέθη

Επιπλέον, ο ήχος ενισχύεται από ανακλάσεις που συμβάλλουν με τον απευθείας ήχο εντός 50 ms. Οι ανακλάσεις που φθάνουν μετά από αυτό το χρονικό διάστημα μπορεί να ακουστούν ως ηχώ και μειώνουν την καταληπτότητα. Το χρονικό διάστημα των 50 ms είναι όσο απαιτείται ώστε ο ήχος να ταξιδέψει σε απόσταση 17 m. Επομένως, μια παράμετρος σχεδιασμού τοποθέτησης των ανακλαστήρων είναι ότι ο ανακλώμενος ήχος δεν πρέπει να ταξιδεύει πάνω από 17 m έως ότου συμβάλει με τον απευθείας στο σημείο του δέκτη. Γενικά προτείνεται κάλυψη οροφής από ανακλαστήρες από 50% – 70%. Τα κενά μεταξύ αυτών βοηθούν στη σύζευξη του όγκου του αέρα πάνω και κάτω από τους ανακλαστήρες. Πυκνότερη τοποθέτηση δε θα επέτρεπε την ακουστική σύζευξη με αρνητική επίδραση στην αντήχηση του χώρου. Η ανακλαστήρες πρέπει να είναι ακουστικά ορατοί από την ηχητική πηγή [3, 4].

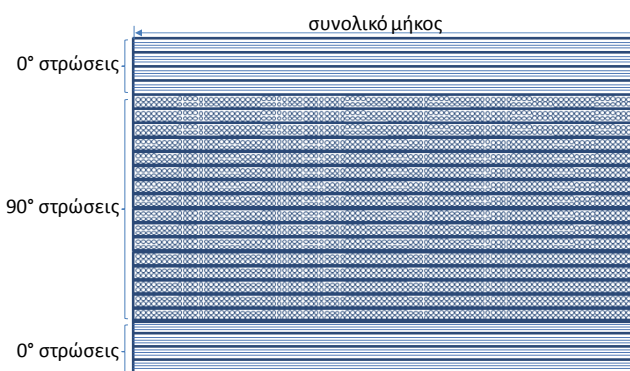
3. Υλικά

Το συνηθέστερο συμβατικό υλικό κατασκευής ανακλαστήρων είναι το συνθετικό ξύλο (κόντρα πλακέ). Το υλικό αυτό είναι δύσκαμπτο και επομένως δε μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εφαρμογή που προτείνεται στο παρόν. Σήμερα είναι διαθέσιμη πληθώρα υλικών που μπορεί να καλύψει της ανάγκες κατασκευών με ιδιαιτερότητες, παρέχοντας τη δυνατότητα σχεδιασμού από το ίδιο το υλικό. Αυτό σημαίνει ότι είναι εφικτό να σχεδιαστεί υλικό που θα προσφέρει συγκεκριμένες απαιτούμενες θερμομηχανικές ιδιότητες.

Στην παρούσα εργασία, το υλικό από το οποίο θα κατασκευαστούν οι ανακλαστήρες οφείλει να έχει συγκεκριμένες ιδιότητες με βασικότερη την ανάκλαση του ήχου. Αφού εξασφαλιστεί η επιθυμητή ακουστική συμπεριφορά, αναζητείται η «ευφυΐα» στη δυνατότητα μεταβολής του σχήματός τους, ώστε να προσαρμόζονται στις εκάστοτε ανάγκες της αίθουσας. Επομένως, το βασικό υλικό απαιτείται να είναι εύκαμπτο. Επειδή η κατασκευή θα βρίσκεται συνεχώς υπό μηχανική τάση ελλοχεύει ο κίνδυνος ανάπτυξης βλάβης λόγω της ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς του υλικού και κόπωσης. Για τη μείωση του κινδύνου αυτού, το υλικό πρέπει να έχει υψηλή στερρότητα (toughness). Τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας (Polymer Composite Materials) αποτελούν ομάδα υλικών η οποία κατάλληλα σχεδιαζόμενη μπορεί να ανταποκριθεί στις ως άνω απαιτήσεις. Ως πρώτη προσέγγιση θα χρησιμοποιηθεί εποξειδική ρητίνη ενισχυμένη με ίνες Kevlar® και επικάλυψη από gel coat ενισχυμένο με ίνες γυαλιού ώστε να παρέχει τις απαιτούμενες ακουστικές ιδιότητες.

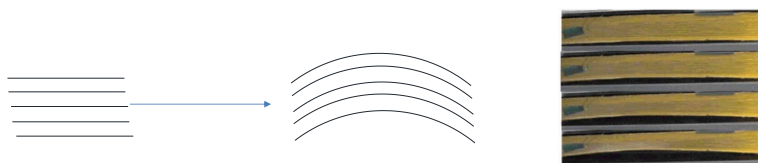
4. Σχεδιασμός

Λόγω της καμπτικής μορφής της φόρτισης που θα υφίστανται οι ανακλαστήρες, ώστε να καμπυλώνονται, η ακολουθία στρώσεων της πλακός θα είναι $[0_4/90_8]_s$. Αυτό σημαίνει ότι θα αποτελείται από 8 στρώσεις πάχους 0.125 mm η κάθε μία (συνολικό πάχος 3 mm) εκ των οποίων, οι μεν 8 εξωτερικές (4 στην πάνω πλευρά και 4 στην κάτω πλευρά) θα είναι προσανατολισμένες ώστε να μπορούν να φέρουν τα εφελκυστικά και θλιπτικά φορτία που αναπτύσσονται στην πάνω και κάτω επιφάνεια της πλάκας, αντίστοιχα, ενώ οι 16 εσωτερικές θα είναι προσανατολισμένες κάθετα στις πρώτες, έτσι ώστε να μη φέρουν ιδιαίτερη αντίσταση κατά τη διαδικασία αλλαγής σχήματος της πλακός (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Ακολουθία στρώσεων ανακλαστήρα από σύνθετα υλικά (σημασιακά)

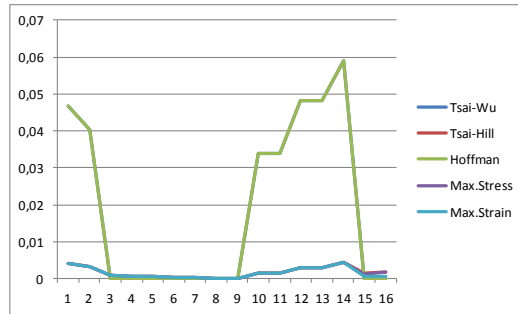
Η ενεργοποίηση του ανακλαστήρα, δηλ. η αλλαγή του σχήματός του, θα γίνεται με τη χρήση SMA στη μορφή συρμάτων, τα οποία θα είναι εμβαπτισμένα μέσα στο σώμα της κατασκευής, στο μέσο του πάχους της. Η αλλαγή που προκαλείται με τη θερμοκρασία στο σχήμα των SMA φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 4.2(α). Η αλλαγή σχήματος των SMA γίνεται με τη θερμοκρασία, η οποία μεταφέρεται στο σύνθετο ως ηλεκτρική ενέργεια και χρησιμοποιώντας την αντίσταση των συρμάτων μετατρέπεται σε θερμότητα. Στο σχήμα 4.2(β) φαίνεται η αλλαγή σχήματος που προκαλεί σε ένα σύνθετο από Kevlar®/Epoxy η ενεργοποίηση συρμάτων SMA.



Σχήμα 4.2 (α) Αλλαγή σχήματος συρμάτων από SMA. (β) ενεργοποίηση συνθέτου από Kevlar® με τη χρήση SMA [5]

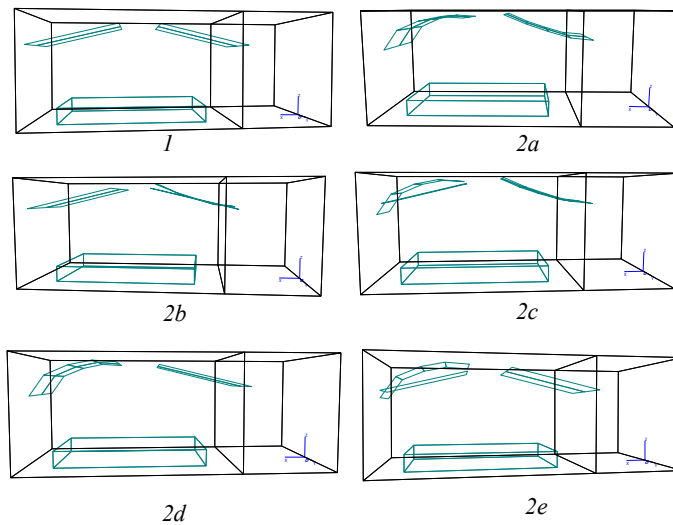
Το επόμενο στάδιο αφορά τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας του συνθέτου. Ένας πρώτος έλεγχος μπορεί να γίνει με τη χρήση της Κλασσικής Θεωρίας Πολυστρώτων Πλακών (Classical Lamination Theory – CLT) [8] για πολυστρωτη

πλάκα η οποία υφίσταται φόρτιση υπό ροπή κάμψης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης φαίνονται στο σχήμα 4.3.



Σχήμα 4.3 Πιθανότητα αστοχίας ανακλαστήρα από Kevlar®/Epoxy

Χρησιμοποιήθηκαν 5 κριτήρια αστοχίας για τον έλεγχο της δομικής ακεραιότητας του ανακλαστήρα. Η τιμή που ορίζεται από τα κριτήρια ώστε να θεωρείται αστοχία στην κατασκευή είναι 1. Από το σχήμα φαίνεται ότι κανένα από τα κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν δεν προβλέπει αστοχία του ανακλαστήρα.



Σχήμα 4.3 Μελέτες περιπτώσεων: 1. Επίπεδοι ανακλαστήρες, 2a. Εμπρός κυρτοί – πίσω κοίλοι, 2b. Εμπρός ένας κυρτός, ένας επίπεδος – πίσω δύο επίπεδοι, 2c. Εμπρός κυρτοί – πίσω ένας κοίλος, ένας επίπεδος, 2d. Εμπρός επίπεδοι – πίσω κοίλοι, 2e. Εμπρός επίπεδοι – πίσω ένας κοίλος, ένας επίπεδος

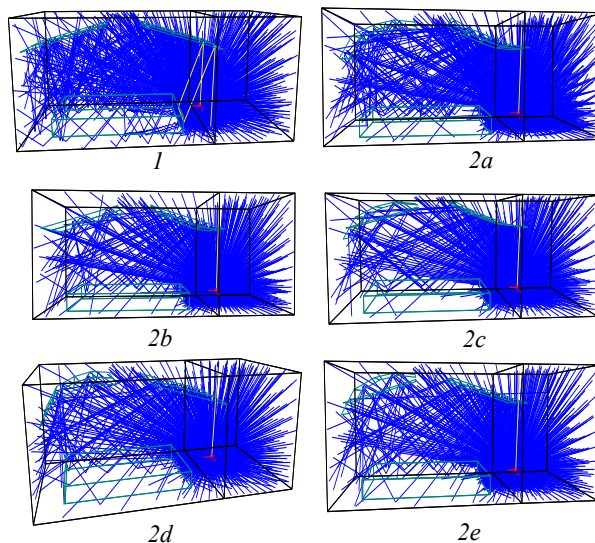
Η ακουστική της αίθουσας μελετήθηκε με προσομοίωση στο λογισμικό Odeon της Brüel & Kjaer [6]. Ως αίθουσα χρησιμοποιήθηκε κοινός ορθογώνιος χώρος διαστάσεων 20m × 10m × 7.5m και όγκου $V = 1500 \text{ m}^3$. Για την πληρέστερη

κατανόηση της συμπεριφοράς των ανακλαστήρων, θεωρήθηκε ότι οι τοίχοι της αίθουσας είναι πλήρως απορροφητικοί ($a = 1$). Οι θέσεις του ακροατηρίου μοντελοποιήθηκαν σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προγράμματος προσομοίωσης [7] ως ξύλινες θέσεις εμβαδού 1 m^2 (κωδικός 11003). Το χαμηλότερο σημείο των ανακλαστήρων βρίσκεται σε όλες τις περιπτώσεις σε απόσταση 4.8 m από το δάπεδο της αίθουσας. Μελετήθηκαν έξι (6) διαφορετικοί συνδυασμοί ανακλαστήρων, οι οποίοι φαίνονται στο Σχήμα 4.1.

Το «ευφές» της κατασκευής εξασφαλίζεται με την προσθήκη δικτύου οπτικών ινών μέσω των οποίων καταγράφεται η συμπεριφορά αυτής, καθώς και με κατάλληλους αισθητήρες τοποθετημένους σε προεπιλεγμένα σημεία της αίθουσας. Η πληροφορία από τα δύο δίκτυα μεταφέρεται σε σύστημα ελέγχου, μέσω του οποίου γίνεται η ενεργοποίηση των συρμάτων SMA και λειτουργεί η κατασκευή.

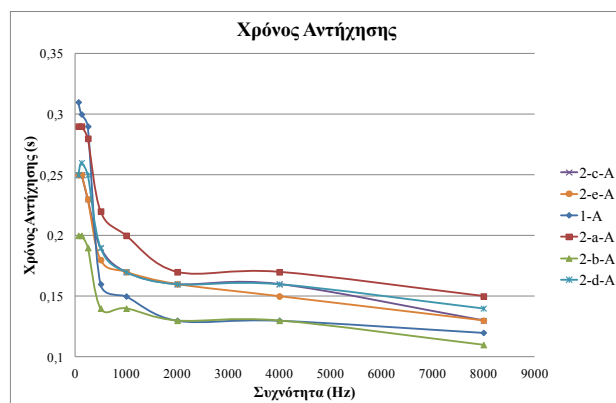
5. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Στο παρακάτω σχήμα 5.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ακουστικής προσομοίωσης του χώρου για τις ως άνω (σχήμα 4.4) 6 μελέτες περίπτωσης.



Σχήμα 5.1 Αποτελέσματα ακουστικής μελέτης περιπτώσεων

Όπως φαίνεται από το πιο πάνω σχήμα εμφανίζεται διαφοροποίηση στην κατανομή της ηχητικής ενέργειας στο χώρο ανάλογα με το συνδυασμό ανακλαστήρων που χρησιμοποιούνται. Στο επόμενο σχήμα 5.2 παρουσιάζεται ο χρόνος αντήχησης στην αίθουσα για τις 6 μελέτες περίπτωσης στο εύρος συχνοτήτων από 0 έως 8kHz. Η μεταβολή του χρόνου αντήχησης δεν είναι ιδιαίτερα έντονη σε σχέση με το εκάστοτε σύστημα ανακλαστήρων. Αυτό είναι σημαντικό διότι επιτυγχάνεται η επιθυμητή διαχείριση της ακουστικής ενέργειας, χωρίς την ουσιαστική μεταβολή της ακουστικής συμπεριφοράς της αίθουσας.



Σχήμα 5.2 Χρόνος αντήρησης αίθουσας ανά μελέτη περίπτωσης

Στο παρόν επιχειρείται η παρουσίαση συστήματος «έξυπνων» ανακλαστήρων με στόχο την καλύτερη διαχείριση της ακουστικής ενέργειας σε σχέση με τη χωροθέτηση του ακροατηρίου σε αίθουσα ακροάσεων. Οι ανακλαστήρες κατασκευάζονται ως πλάκες από εύκαμπτα σύνθετα υλικά (Kevlar®/Epoxy) ακολουθίας στρώσεων $[0_4/90_8]_s$, με εμβαπτισμένα σύρματα SMA για τη μεταβολή του σχήματός τους από επίπεδο σε καμπύλο (κυρτό ή κοίλο). Ο έλεγχος του συστήματος γίνεται με δίκτυο οπτικών ινών όσον αφορά τη δομική τους ακεραιότητα και αισθητήρες θέσεων για το που πρέπει να διαχυθεί η ακουστική ενέργεια. Η προσομοίωση του συστήματος έδειξε ενθαρρυντικά αποτελέσματα για την περεταίρω δυνατότητα κατασκευής και εφαρμογής του. Η ηχητική ενέργεια διαχέεται ελεγχόμενα στο χώρο χωρίς σημαντική μεταβολή της ακουστικής συμπεριφοράς της αίθουσας, ενώ δεν προβλέπεται η ανάπτυξη βλάβης, τουλάχιστον στα πρώτα στάδια λειτουργίας. Η πρόταση χρήζει περεταίρω έρευνας.

6. Αναφορές

- [1] Δ. Ευθυμιάτος, «Ακουστική και Κτιριακές Εφαρμογές – Θεωρία και Πράξη,» Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα, 2007
- [2] A. Kelly, R. Davidson, K. Uchimo, «Smart composite materials systems» in *Comprehensive Composite Materials*, 5.20, 2000
- [3] ASTM C423 Standard Test Method for Sound Absorption and Sound Absorption Coefficients by the Reverberation Room Method
- [4] ASTM E795 Standard Practices for Mounting Test Specimens during Sound Absorption Tests
- [5] G. C. Psarras, J. Parthenios, C. Galiotis, “Adaptive composite incorporating shape memory alloy wires”, *Journal of materials*, 36, 535-546 (2001)
- [6] Odeon version 10.1 Industrial. Odeon A/S, Denmark, 2009
- [7] Claus Lynge Christensen, Odeon A/S, "Odeon Room Acoustics Program version 10.1 Industrial, Auditorium, Combined Editions Manual Paper", 2009
- [8] R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, Taylor & Francis, 1999