

ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΚΜ ΣΤΗΝ ΑΥΛΗ ΙΣΤΟΡΙΚΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ : Ηχοπροστασία & Εφαρμογές Κατασιγασμού

Δ. Κεραμίδας, διπλ. ηλεκτρολόγος μηχανικός Π.Π. δρ. ακουστικής

Ν. Μπάρκας, δρ. πολ. μηχανικός Δ.Π.Θ. - duar ακουστικής Le Mans France

μνήμη Αδριανού Βανού
συνοδοιπόρου στο δύσβατο μονοπάτι
... αυτά τ' ανάγλυφα μιας τέχνης ταπεινής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Κατά την επαναλειτουργία ενός ιστορικού κτιρίου, όταν δεν εξευρεθεί κατάλληλος ή επαρκής χώρος για Η/Μ εγκαταστάσεις, κατασκευάζεται ένα ανεξάρτητο, εξωτερικό μηχανοστάσιο ή συνδυάζονται οι εσωτερικές εγκαταστάσεις με κάποιο πρόσθετο, εξωτερικό τμήμα. Με αυτή την επιλογή, το πλέον θορυβώδες σύστημα του κτιρίου οδηγείται στο ύπαιθρο, με αποτέλεσμα να παρενοχλούνται οι περίοικοι, αλλά και η ίδια η λειτουργία του μνημείου. Με αφορμή τα παραδείγματα της έδρας του Οργανισμού Πολιτιστικής Πρωτεύουσας «Θεσσαλονίκη '97» και του Βυζαντινού Μουσείου Βέροιας, η ανακοίνωση διαπραγματεύεται τα προβλήματα ηχοπροστασίας που εμφανίζονται από την εγκατάσταση μιας κεντρικής κλιματιστικής μονάδας (ΚΚΜ) στην αυλή ενός ιστορικού κτιρίου. Στόχος της ανακοίνωσης είναι η ανάλυση των παραμέτρων του θέματος, η παρουσίαση της τεχνικής επίλυσης και η επισήμανση της ανεπάρκειας των κανονιστικών διατάξεων που διέπουν την ηχοπροστασία από το θόρυβο των Η/Μ εγκαταστάσεων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο κλιματισμός των χώρων ενός ιστορικού κτιρίου κρίνεται απαραίτητος, ιδίως στις περιπτώσεις επαναλειτουργίας με αλλαγή χρήσης (από κατοικία ή βιομηχανικό κτίριο σε γραφείο, μουσείο ή πολιτιστικό κέντρο). Οι λόγοι που το επιβάλλουν είναι οι μικροκλιματικές αλλαγές (πολύ υψηλές θερμοκρασίες θέρους), τα αυξημένα εσωτερικά θερμικά κέρδη (εκπομπές θερμότητας από δραστηριότητες, τεχνητό φωτισμό και μηχανήματα) ή η λειτουργική απαίτηση σταθερών συνθηκών (διατήρηση, συντήρηση μουσειακών εκθεμάτων σε επιβεβλημένα όρια θερμοκρασίας – υγρασίας) [1]. Σε περίπτωση στενότητας χώρου, η ενδεδειγμένη λύση (αντί της προμήθειας μικρών μονάδων ή της εγκατάστασης μηχανοστασίου σε κλειστό χώρο με παράλληλη τροφοδοσία νωπού αέρα) είναι η εγκατάσταση κεντρικής κλιματιστικής μονάδας στην αυλή του κτιρίου, απ' όπου θα τροφοδοτηθούν οι τοπικές μονάδες κλιματισμού κάθε χώρου [2].

Με τον όρο «κεντρική μονάδα κλιματισμού» (ΚΚΜ) εννοούμε συνήθως έναν αερόψυκτο ψύκτη νερού, με ψυκτική ισχύ 200 έως 700KW. Η λειτουργία της μονάδας προϋποθέτει εναλλαγή πολύ μεγάλων ποσοτήτων αέρα. Για παράδειγμα, μία μονάδα ψυκτικής ισχύος 238KW της Carrier εναλλάσσει αέρα 72.000 m³/h και απαιτεί ελεύθερο χώρο εγκατάστασης 550x450 cm, ενώ μια αντίστοιχη μονάδα 725KW εναλλάσσει αέρα 228.000 m³/h και απαιτεί ελεύθερο χώρο 950x450 cm. Ταυτόχρονα, επειδή οι ανεμιστήρες της μονάδας (που συνήθως αποστέλλουν τον αέρα προς τα πάνω) λειτουργούν με μικρή στατική πίεση, απαιτείται η διάθεση μιας ευρύχωρης θέσης, χωρίς εμπόδια, για την ελεύθερη ροή του αέρα.

Οι ΚΚΜ εκπέμπουν στάθμες θορύβου που κυμαίνονται από 80 ως 100 dB(A) (σε απόσταση αναφοράς 1 ή 3m), με αποτέλεσμα να παρενοχλούν τις γειτονικές κατοικίες, ιδίως τις μεταμεσημβρινές και βραδινές ώρες κοινής ησυχίας, όταν χαμηλώνει ο θόρυβος βάθους (background

noise) της περιοχής. Παράγοντες που επιδεινώνουν τη θορυβική όχληση είναι η απόσταση των παρακείμενων κατοικιών και η πυκνότητα δόμησης της περιοχής ενώ αντίθετα, παράγοντες που επικαλύπτουν την παρενόχληση είναι η λειτουργία οδικού κόμβου, κυκλοφοριακής αρτηρίας ή άλλης βιομηχανικής εγκατάστασης [3], [4].

2. ΤΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1. Στρατηγικές περιορισμού των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου

Η εγκατάσταση ΚΚΜ σε ιστορικά κτίρια παρακολουθεί τη ραγδαία αύξηση της χρήσης κλιματιστικών μηχανημάτων στα δημόσια κτίρια. Οι προσπάθειες εξασφάλισης κλιματικής άνεσης και βελτίωσης των συνθηκών εργασίας (ως απάντηση στην επιβάρυνση της ατμόσφαιρας και του αστικού ηχητικού περιβάλλοντος) εκμεταλλεύονται τη σημαντική μείωση του κόστους προμήθειας - εγκατάστασης κλιματιστικών μηχανημάτων την τελευταία δεκαετία [2].

Κρίσιμο σφάλμα για τη συστηματική αντιμετώπιση του κλιματισμού είναι η αποσπασματική τοποθέτηση συσκευών μικρής δυναμικότητας σε επιμέρους ζώνες ή δωμάτια, εξαιτίας της περιορισμένης ετήσιας πίστωσης των δημοσίων προϋπολογισμών, κατάσταση που τελικά επιβαρύνει και το συνολικό κόστος και την αποδοτικότητα των παρεμβάσεων. Σοβαρότατο επίσης παρεπόμενο αναδεικνύεται η, δια της αναβολής, διαιώνιση του ενεργοβόρου χαρακτήρα των κτιρίων, παραγνωρίζοντας τις οικοδομικές και βιοκλιματικές παραμέτρους του προβλήματος :

- χαμηλή θερμομονωτική ικανότητα του κελύφους (εξωτερικές θερμικές πρόσοδοι),

- πενιχρές θερμοπροστατευτικές αποδόσεις των κουφωμάτων και των υαλοπινάκων (ψυκτικές απώλειες, άμεση μεταφορά θερμότητας από ακτινοβολία) [2].

Δυσμενής συνέπεια αυτής της εξέλιξης είναι η μερική βελτίωση των συνθηκών άνεσης και, κυρίως, η διόγκωση των ψυκτικών φορτίων, δηλαδή η απαίτηση επαύξησης της δυναμικότητας των μονάδων και του λειτουργικού τους θορύβου.

Η υιοθέτηση των κατευθύνσεων της βιοκλιματικής, στο πλαίσιο των ήπιων επεμβάσεων σε ιστορικά κτίρια, δεν είναι πάντα μια εύκολη υπόθεση :

- ηλιακός έλεγχος (σκιασμός, ελαχιστοποίηση της θερμικής συσσώρευσης),

- εξαερισμός (αποβολή του θερμού αέρα και φυσικός δροσισμός),

- φυσική ψύξη (μεταφορά της θερμικής περίσσειας στο περιβάλλον) [1].

Η λειτουργία με ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, ή με επικουρική μόνο χρήση κλιματιστικών μηχανημάτων, ή έστω, ο περιορισμός των ψυκτικών απαιτήσεων στα συμβατικά συστήματα, συνιστά ένα στοίχημα που ούτε χάθηκε εκ προοιμίου, ούτε δικαιολογεί την αναβολή του. Το μέλλον δεν είναι ευοίωνο, αν αναλογιστούμε το χαμηλό επίπεδο εκμηχανισμού των Υπηρεσιών, δηλαδή την αναμενόμενη αύξηση των εσωτερικών θερμικών προσόδων, σε συνδυασμό με τη διατήρηση των αναγκών σε τεχνητό φωτισμό [2].

2.2. Υπαίθρια ηχοπροστασία και ακουστική περίθλαση

Βασικός στόχος της υπαίθριας ηχοπροστασίας είναι η παρεμβολή εμποδίων, «ηχοφραγμάτων», ανάμεσα στη πηγή του θορύβου και την προστατευόμενη περιοχή, ώστε να δημιουργηθούν κώνοι «ηχητικής σκιάς», να περιοριστεί το συχνοτικό φάσμα του θορύβου και να εξοικονομηθεί ένα κρίσιμο μέγεθος ηχητικής απομείωσης.

Κατά την ηχοδιάδοση δεν ισχύουν απόλυτα οι νόμοι της γεωμετρικής οπτικής (η αυστηρά γεωμετρική ηχοανάκλαση αφορά ένα περιορισμένο συχνοτικό τμήμα, τα μήκη κύματος του οποίου σχετίζονται με το μέγεθος των εμποδίων). Κατά την περίθλαση, όταν στην πορεία της ηχοδιάδοσης παρεμβάλλονται εμπόδια, τα ηχητικά κύματα υφίστανται σημαντικές παραμορφώσεις. Για τη προσομοίωση και επίλυση των φαινομένων της περίθλασης έχουν προταθεί διάφορες θεωρητικές προσεγγίσεις [5] :

-η θεωρία Helmholtz - Huygens αναλύει περιοχές με τοπικές ανωμαλίες στην ειδική πυκνότητα ή στο συντελεστή συμπίεσης (συνθήκες Sommerfeld, επίλυση κατά Born),

-η θεωρία Kirchhoff - Fresnel επικεντρώνεται σε περιοχές σχισμών - οπών όπου το ένα τοίχωμα θεωρείται ανύπαρκτο και το άλλο ημίαπειρο (1η και 2η υπόθεση Kirchhoff, για μικρά μήκη κύματος σε σχέση με τις διαστάσεις του ανοίγματος και απόλυτη ηχοαπορρόφηση στην επιφάνεια του ηχοφράγματος),

-η θεωρία Keller αναγνωρίζει πρόσκαιρες περιδινήσεις στην ακμή του ηχοφράγματος (μεταβολή της συνθεταντίστασης του μέσου, ως συνισταμένης της προσπίπτουσας, της ανακλώμενης και της διαχεόμενης κύμανσης).

2.3. Κατασιγασμός οδεύσεων και ηχοπαγίδες

Σε ακουστικά κελύφη ή ηχομονωμένα δωμάτια, είναι απαραίτητη η εναλλαγή αέρα. Για την αποτελεσματικότητα της ηχομόνωσης, απαιτείται η εφαρμογή μιας διάταξης ηχοπαγίδων, στην είσοδο και στην έξοδο του αέρα. Οι διατάξεις των ηχοπαγίδων είναι συνήθως :

- α) αεραγωγοί επενδεδυμένοι με ηχοαπορροφητικό υλικό,
- β) γωνίες αεραγωγού επενδεδυμένες με ηχοαπορροφητικό υλικό,
- γ) ηχοπαγίδες τύπου θαλάμου εκτόνωσης (plenum chamber),
- δ) βιομηχανικές ηχοπαγίδες ηχητικής αντίδρασης (reactive silencer).

Η εξασθένιση του ήχου σε αεραγωγό ορθογωνικής διατομής (μια πλευρά ή δύο απέναντι πλευρές επενδεδυμένες με ηχοαπορροφητικό υλικό) υπολογίζεται σύμφωνα με τα νομοδιαγράμματα της θεωρίας των L.Cremer - U.Kurze [6], [7]. Παράμετροι υπολογισμού της εξασθένισης (D_n) είναι [8], [9] : το μήκος κύματος λ , το πλάτος του αεραγωγού h , το μέτρο $|Z|$ και η φάση φ της μιγαδικής συνθεταντίστασης του ηχοαπορροφητικού υλικού. Η θεωρία ισχύει για επίπεδα κύματα και έχει εφαρμογή μόνο στο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων, όπου το μήκος κύματος είναι πολύ μεγαλύτερο από τις γεωμετρικές διαστάσεις του αεραγωγού.

3.ΤΟ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

3.1. Κτιριοδομικός Κανονισμός & κριτήρια ακουστικής ησυχίας

Οι μελέτες ηχοπροστασίας (ΜΠΕ) των περιοχών κατοικίας, θέτουν ως προστατευόμενο αγαθό την οικιακή δραστηριότητα, την αναψυχή και την ανάπαυση. Σύμφωνα με την ελληνική και διεθνή νομοθεσία, όλες οι τεχνικές εφαρμογές οφείλουν να εξασφαλίζουν καθορισμένες παραμέτρους ησυχίας - ακουστικής άνεσης και να τηρούν τα, κατά περίπτωση, ανεκτά όρια θορύβου.

Με βάση το άρθρο 12 του Κτιριοδομικού Κανονισμού, η μέγιστη επιτρεπόμενη όχληση από εξωτερικούς θορύβους στις όψεις των κτιρίων υψηλής ή κανονικής ακουστικής άνεσης (Α', Β' κατηγορίας αντίστοιχα) είναι 30 - 35 dB(A), σε ωριαία ισοδύναμη Α-ηχοστάθμη θορύβου ($L_{Aeq,h}$) [5]. Οι διεθνείς κανονισμοί (και τα σχέδια του ΕΛΟΤ), για διακεκριμένες συνθήκες ακουστικής άνεσης υιοθετούν τις τυπικές καμπύλες θορύβου (Noise Criteria, NC), οι τιμές των οποίων αντιστοιχίζονται, αλλά δεν ταυτίζονται με τα ανεκτά όρια θορύβου του Ελληνικού Κανονισμού. Με τον τρόπο αυτό, εκτός από τη μέγιστη ανεκτή στάθμη θορύβου (σε σφαιρικές τιμές ωριαίας ισοδύναμης Α-ηχοστάθμης), προσδιορίζεται η αντίστοιχη ανώτερη διακύμανση των συχνοτικών τιμών [11].

3.2. Κανονιστικές διατάξεις & νομικές ασάφειες

Οι παραπάνω επιστημονικές διατυπώσεις, μεταφραζόμενες στην καθημερινή μας τεχνική πρακτική μετατρέπονται σε εικονική πραγματικότητα :

-η ελληνική νομοθεσία δεν κάνει διάκριση χρήσεων γης ή χρονικών περιόδων αναφοράς (όπως τα σχετικά Outdoor Noise Levels της Ε.Ε.),

-το Σχέδιο Νόμου του ΥΠΕΧΩΔΕ (1983), στο οποίο προβλεπόταν μέτρα προστασίας από τους θορύβους μηχανημάτων - εγκαταστάσεων, δεν νομοθετήθηκε,

-από το 1989, εξακολουθεί να εκκρεμεί η θεσμοθέτηση των αστικών περιοχών όπου θα ισχύουν οι διατάξεις της ακουστικής άνεσης Α` ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ του Κτιριοδομικού Κανονισμού,

-τα ζητήματα Ηχοπροστασίας των ΜΠΕ παραπέμπονται για έλεγχο πληρότητας (αλλά όχι αρτιότητας) στο Συμβούλιο Επικρατείας,

-η έκδοση οικοδομικής άδειας σε νεοαναγειρόμενα ή μετασκευαζόμενα κτίρια δεν απαιτεί την υποβολή Μελέτης Ηχομόνωσης (δηλαδή δεν υφίσταται προληπτικός τεχνικός έλεγχος ως προς τις απαιτήσεις του άρθρου 12, ούτε για την ακουστική άνεση Β` ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ).

Ουσιαστικά, με το υφιστάμενο πλαίσιο της Ελληνικής Πολιτείας, η ακουστική άνεση μιας περιοχής ή ενός κτιρίου επαφίεται στον πατριωτισμό των κατασκευαστών. Τα θέματα θορύβου δεν αποτελούν αυτεπάγγελα αδικήματα, αντιμετωπίζονται κατόπιν έγκλισης και δίνονται ύστερα από αυτοψία (τεχνική ή / και εμπειρική), σε περίπτωση πραγματικής (αλλά όχι εν δυνάμει) διαπίστωσης της παραβίασης ορισμένων ορίων θορύβου :

-υπερβασή στάθμης 35dB(A) σε χώρους κατοικίας, τις ώρες κοινής ησυχίας (από γειτονικές κατοικίες ή κέντρα διασκέδασης, Υγειονομική Διάταξη Α5/3010/1985),

-υπερβασή στάθμης 45dB(A) στο εσωτερικό των κατοικιών με ανοικτά παράθυρα, σε επαφή με βιομηχανική εγκατάσταση (Προεδρικό Διάταγμα 1180/1981),

-υπερβασή στάθμης 50dB(A) στα όρια του οικοπέδου, σε περιοχές κατοικιών κατά τις ώρες κοινής ησυχίας, από προϋπάρχουσες βιοτεχνικές εγκαταστάσεις (Π.Δ. 1180/ 1981),

-υπερβασή στάθμης 65dB(A) στα όρια του οικοπέδου, από επαγγελματική δραστηριότητα σε βιοτεχνικές ή βιομηχανικές περιοχές (Π.Δ. 1180/1981),

Παρά την αλματώδη αύξηση των μηχανημάτων κλιματισμού την τελευταία δεκαετία, ο προσδιορισμός των ανώτατων ορίων λειτουργικού θορύβου παραμένει ασαφής. Οι αρμόδιες υπηρεσίες (Αστυνομία, Υγειονομικό, ΥΠΕΧΩΔΕ) αποφαινόμενοι με βάση το Π.Δ. 1180/1981. Δηλαδή το ζήτημα των ψυκτικών μονάδων αστικής χρήσης ανάγεται στην εκτίμηση του χαρακτήρα της περιοχής και στη θεώρηση του προϋπάρχοντος της βιομηχανικής εγκατάστασης.

4. Η ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

4.1. Ο χώρος εγκατάστασης της ΚΚΜ

Η πρόβλεψη χώρου και η επιλογή της θέσης εγκατάστασης μιας ΚΚΜ αποτελούν βασικές συνιστώσες των προβλημάτων ηχοπροστασίας. Τα ψυκτικά μηχανήματα είναι ογκώδη και χρειάζονται ελεύθερο πεδίο για τροφοδοσία - απαγωγή αέρα. Η στέγασή τους, ακόμα και στην περίπτωση διαθέσιμου υπόγειου χώρου, επιφέρει σοβαρές δευτερογενείς επιπλοκές (τοποθέτηση, έδραση, εξαερισμός) στο εγχείρημα μιας ήπιας επέμβασης. Η συνήθης, δόκιμη πρακτική είναι η εξωτερική εγκατάσταση των μηχανημάτων στο δώμα, σε ανεξάρτητο κτίσμα ή σε υπόσκαφη θέση της αυλής, επιλογές που στα ιστορικά κτίρια τίθενται αντιμέτωπες με την ύπαρξη στέγης, την εξοικονόμηση υπαίθριου χώρου ή την αισθητική προστασία του περιβάλλοντος.

Κρίσιμο ζήτημα για την επιλογή μιας θέσης εγκατάστασης είναι η τοπογραφία της περιοχής και οι σχετικές θέσεις των γειτονικών κτιρίων (περιορισμός των κώνων εκπομπής και λήψης) [12] :

-εάν η εγκατάσταση και η προστατευόμενη περιοχή είναι περίπου συνεπίπεδες, στην απομείωση της όχλησης συνεισφέρουν αποκλειστικά τα τεχνητά ηχοφράγματα,

-εάν η εγκατάσταση βρίσκεται σχετικά υψηλότερα, η επίδραση της θέσης κινδυνεύει να αποβεί αρνητική (πιθανές ηχοανακλάσεις στα ανάντη πρανή),

-τέλος εάν η εγκατάσταση βρίσκεται σχετικά χαμηλότερα, δηλαδή σε υπόσκαφη θέση της αυλής, τότε η ηχοπροστασία βελτιώνεται με την τοποθέτηση ενός ηχοφράγματος σχετικά χαμηλού (αλλά στην πραγματικότητα ενεργά μεγάλου) ύψους.

Η ακριβής αποτίμηση της επίδρασης του ορύγματος στην απομείωση του θορύβου προκύπτει από το «νομοδιάγραμμα της σχετικής γωνίας εκπομπής – λήψης», με τιμές διόρθωσης από την επίδραση σε συνεπίπεδη θέση.

4.2. Τα ηχοφράγματα

Στη γενική μορφή του φαινομένου της περίθλασης, η ηχητική ένταση εμφανίζει [5] :

- διακυμάνσεις περί τη μέγιστη τιμή, έξω από τη ζώνη της ηχητικής σκιάς,
- υποδιπλασιασμό, στο όριο του ηχοφράγματος, και
- μηδενισμό, στο εσωτερικό της σκιασμένης περιοχής.

Η ακριβής αποτίμηση της επιρροής ενός ηχοφράγματος επιτυγχάνεται με τον «τύπο του Bruckmayer» (ολοκληρωματική προσέγγιση είτε κατά Fresnel, για σφαιρικό προσπίπτον κύμα, είτε κατά Sommerfeld, για επίπεδο προσπίπτον κύμα), όπου η επιθυμητή στάθμη ηχομείωσης (R_w) εκφράζεται ως λογαριθμική συνάρτηση [12] :

-ανάλογη της οριακής συχνότητας (f_c) και του ενεργού ύψους του ηχοφράγματος (h_a), καθώς επίσης και

-αντιστρόφως ανάλογη των αποστάσεων του ηχοφράγματος από την πηγή και την προστατευμένη περιοχή (r, d).

Σε απλοποιημένες επιλύσεις προσφέρεται η γραφική μέθοδος Harris, όπου η απομείωση της ηχητικής έντασης (R_w) εμφανίζεται ως συνάρτηση :

-των σχετικών διευθύνσεων προσπίπτουσας- περιθλώμενης ακτίνας (γωνία φ)

-της αναλογίας του ενεργού ύψους του ηχοφράγματος ως προς το οριακό μήκος κύματος του θορύβου (λόγος h/λ).

Για την αποδοτική εφαρμογή των ηχοφραγμάτων απαιτείται η εξαντλητική διερεύνηση του τρόπου ηχοδιάδοσης και των αρχικών - οριακών συνθηκών (ανοικτό ή κλειστό πεδίο, σημειακή ή γραμμική πηγή, σφαιρικό ή κυλινδρικό κύμα, πρόσθετα εμπόδια, δευτερογενείς ηχοανακλάσεις κλπ). Προϋπόθεση για την δημιουργία μιας εκτεταμένης ηχητικής σκιάς αποτελεί ο περιορισμός της γωνίας εκπομπής και η μεγένθυση των διαστάσεων του ηχοφράγματος σε σχέση με το οριακό μήκος κύματος. Αντίθετα από την οπτική, στην ακουστική η δημιουργία σκιάς δεν είναι εύκολη υπόθεση, επειδή ένα αποτελεσματικό ηχοφράγμα απαιτεί τεράστιες διαστάσεις, συγκριτικά με τα μήκη κύματος των θορύβων του περιβάλλοντος.

4.3. Οι ηχομονωτές

Οικονομική και πρόσφορη λύση στο πρόβλημα των ΚΚΜ είναι ο "ηχομονωτής", ένας αεραγωγός ορθογωνικής διατομής με κατάλληλη ηχοαπορροφητική επένδυση (ανάλογα με την επιθυμητή απομείωση και την ταχύτητα του διερχόμενου αέρα) [9]. Η εξασθένιση του ήχου, κατά τη διάδοση σε ηχομονωτή ορθογωνικής διατομής με σκληρά τοιχώματα, εξαρτάται από :

- το μήκος κύματος λ (ή τη συχνότητα f) και το πλάτος του ηχομονωτή h ,
- το μήκος του αεραγωγού l ,
- το πάχος d και την πυκνότητα της ηχοαπορροφητικής επένδυσης των τοιχωμάτων του.

Η θεωρία αποδεικνύει ότι, η ικανότητα απόσβεσης του ήχου (σε δεδομένο ηχομονωτή) εξαρτάται από τη συχνοτική περιοχή [13], [14], [15]. Για παράδειγμα, η απόσβεση σε ηχομονωτή μήκους 1m και πλάτους διακένου διέλευσης αέρα 25cm, με πάχος ηχοαπορροφητικού χωρίσματος 20cm, εμφανίζεται ως εξής :

Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
dB	1	5	7	10	13	7	6	3

Η αναγκαστική διέλευση του αέρα μέσα από έναν αεραγωγό αυξάνει την αντίσταση ροής, η οποία εκφράζεται με πτώση πίεσης (Δp). Η πτώση πίεσης αυξάνει ανάλογα με την ταχύτητα του αέρα, επομένως μειώνεται ανάλογα με το πλάτος διακένου του ηχομονωτή. Για παράδειγμα, ηχομονωτής πλάτους διακένου 25 cm, με ταχύτητα αέρα 8 m/s επιφέρει πτώση πίεσης 25Pa.

Επειδή οι ανεμιστήρες εναλλαγής αέρα στις μονάδες κλιματισμού έχουν πολύ μικρή στατική πίεση (συνήθως 5 -10 Pa), η δυνατότητα απόσβεσης του θορύβου (με ελάττωση του πλάτους διακένου ενός ηχομονωτή), περιορίζεται σημαντικά από τη στατική πίεση των ανεμιστήρων. Στη πράξη, αυξάνοντας το μήκος του ηχομονωτή σε 2 ως 2,5m και μειώνοντας την ταχύτητα του αέρα στα 5m/s περίπου, επιτυγχάνουμε αποσβέσεις 10 ως 14dB στις κεντρικές οκταβικές συχνότητες.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

5.1. Κατασκευαστικές διατάξεις

Βασικά στοιχεία για την εκπόνηση της μελέτης ηχομόνωσης μιας ΚΚΜ είναι η ηχητική χαρτογράφηση της περιοχής και η αποτύπωση της θέσης των μηχανημάτων σε σχέση με τις παρενοχλούμενες, γειτονικές κατοικίες. Η ακρίβεια της προσομοιώσεως έγκειται στο είδος της πηγής του θορύβου (η ΚΚΜ δεν είναι σημείο, αλλά συγκρότημα διαφορετικών πηγών όπως ανεμιστήρες, αντλίες, συμπιεστές κτλ) και στην έκταση της προστατευόμενης περιοχής (ο δέκτης δεν είναι σημείο, αλλά σύνολο κατοικιών ή κουφωμάτων). Συνήθως επιλέγουμε τις δυσμενέστερες, εγγύτερες περιπτώσεις. Οι προτεινόμενες κατασκευαστικές διατάξεις περιλαμβάνουν το συνδυασμό των εξής στοιχείων :

α) ηχοαπορροφητικά πετάσματα στα πρηνή του σκάμματος και στις εσωτερικές πλευρές του περιμετρικού θωρακίου, για την εκτόνωση του θορύβου λειτουργίας, κοντά στα μηχανήματα,

β) ηχοφράγματα στην περίμετρο της ΚΚΜ (σε κατάλληλη απόσταση ώστε να εξυπηρετείται η συντήρηση και τροφοδοσία της μονάδας), για τον περιορισμό του κώνου εκπομπής και την απομείωση της ηχητικής έντασης του θορύβου,

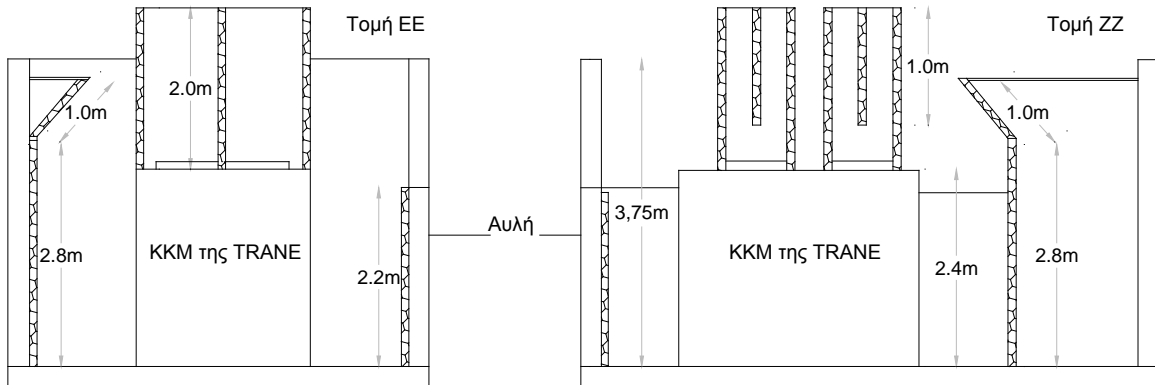
γ) ηχοπαγίδες στα ανοίγματα της μονάδας, για την ελάττωση της άμεσης εκπομπής και των ανακλώμενων συνιστωσών του θορύβου.

Επειδή για τη λειτουργία των μηχανημάτων είναι απαραίτητη η ύπαρξη μεγάλων ανοιγμάτων (εισαγωγή και απαγωγή αέρα), αυτά σχεδιάζονται με γνώμονα τη μεγαλύτερη δυνατή διαφορά του απ' ευθείας ως προς τον ανακλώμενο ήχο και τον μικρότερο επιτρεπόμενο στραγγαλισμό του αέρα.

Η απόσβεση στις ηχοπαγίδες και η απομείωση στα ηχοφράγματα υπολογίζονται αναλυτικά ή από διαγράμματα. Αποδείχτηκε πειραματικά ότι, η ηχομονωτική ικανότητα των πετασμάτων δεν εξαρτάται από το επιφανειακό βάρος του πετάσματος (με κατώτατο όριο 7 - 8 kg/m²). Αυτή η απαίτηση εξασφαλίζεται με φύλλο λαμαρίνας (πάχους τουλάχιστον 1mm), γαλβανισμένο και βαμμένο (ώστε να αντέχει στις εξωτερικές συνθήκες), το οποίο έχει μικρό κόστος και ευκολία κοπής - συναρμολόγησης. Άλλα κατάλληλα υλικά είναι οι τσιμεντοσανίδες, τα κόντρα-πλακάζ θαλάσσης κλπ. Το ηχοαπορροφητικό υλικό είναι συνήθως πλάκες υαλοβάμβακα (πυκνότητας 50 - 60kg/m³) ή πετροβάμβακα (πυκνότητας 100 - 150kg/m³), επικαλυμμένες με υαλοϋφασμα ή διάτρητη λαμαρίνα [16], [17].

Για την αποτίμηση των δυνατοτήτων ηχοπροστασίας, παραθέτουμε δύο παραδείγματα ηχομόνωσης ΚΚΜ στην αυλή ιστορικών κτιρίων. Πρόκειται για την έδρα του Οργανισμού Πολιτιστικής Πρωτεύουσας «Θεσσαλονίκη '97» (Ιούνιος – Αύγουστος 1995) και το Βυζαντινό Μουσείο Βέ-

ροιας (Σεπτέμβριος 2002- Ιούλιος 2003), τεχνικές εφαρμογές με τις οποίες οι συγγραφείς ασχολήθηκαν ως μελετητές και επιβλέποντες. Στα σχέδια που ακολουθούν, εμφανίζονται αποσπάσματα από τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες που σχεδίασε ο Αδριανός Βανός για τη μελέτη εφαρμογής στο κτίριο του Ο.Π.Π.Θ. (Ιούλιος 1995).



5.2. Οργανισμός Πολιτιστικής Πρωτεύουσας (πρώην κτίριο Ε.Ε.Σ.)

Στο κτίριο γραφείων του Ο.Π.Π.Θ`97 στη Θεσσαλονίκη, η ΚΚΜ λειτουργεί τις εργάσιμες ώρες (μέχρι αργά το απόγευμα). Η μονάδα εγκαταστάθηκε σε υπόσκαφο χώρο της ευρύχωρης πίσω αυλής, η οποία περιβάλλεται από αστικές πολυκατοικίες (συνεχές σύστημα δόμησης), δίπλα στον κεντρικό κυκλοφοριακό άξονα της Λεωφόρου Β. Όλγας.

Για τη μείωση του λειτουργικού θορύβου, μελετήθηκε η ηχομόνωση του ψυκτικού μηχανήματος και κατασκευάστηκε ένα ολοκληρωμένο περιμετρικό θωράκιο με τα εξής τμήματα :

- 1) ηχοαπορροφητικά πετάσματα στα εσωτερικά πρηνή του υπόσκαφτου δώματος,
- 2) κατακόρυφα (χαμηλά) και κεκλιμένα (ψηλά) ηχοφράγματα στην περίμετρο του σκάμματος,
- 3) δύο ζεύγη ηχοπαγίδων (τύπου παραλλήλων πλαισίων) πάνω από το μηχάνημα,

Σε συνεννόηση με την κατασκευάστρια εταιρία καθορίστηκαν τα επιτρεπτά όρια τοποθέτησης των ηχομονωτικών επενδύσεων - ηχοπαγίδων και προσδιορίστηκε η αναμενόμενη μείωση της απόδοσης του ψυκτικού μηχανήματος σε ποσοστό 3 ως 5% (μη σημαντικό).

ηχομετρημένες στάθμες	πριν την επέμβαση	μετά την επέμβαση
Θέση Μέτρησης	dB(A)	
Μέσα στο σκάμμα, 1m από τη μονάδα, δίπλα στο πρηνές	88	81
Πάνω στη μονάδα, σε ανοιχτό πεδίο	72	61,5
Στην απέναντι πολυκατοικία, σε διαμέρισμα του 1ου ορόφου, έξω από το παράθυρο	54	45
Στην απέναντι πολυκατοικία, σε διαμέρισμα του 1ου ορόφου, μέσα στο δωμάτιο με ανοικτό παράθυρο	41	34,5
Θόρυβος βάθους στην πίσω αυλή (μεσημέρι)	50 -54	51

Πριν την ηχομονωτική επέμβαση, εξαιτίας της πυκνής δόμησης και της μειωμένης ηχομονωτικής ικανότητας των γειτονικών κτιρίων, τα παράπονα των περιοίκων ήταν έντονα, ιδίως τις μεσημβρινές ώρες κοινής ησυχίας. Μετά τις ηχομονωτικές εφαρμογές επιτεύχθηκε μείωση των οχλήσεων από 6,5 έως 10,5 dB(A) και κυρίως συνεχίστηκε απρόσκοπτα η λειτουργία της ΚΚΜ τις μεταμεσημβρινές ώρες.

Ο θόρυβος λειτουργίας της ΚΚΜ του Ο.Π.Π.Θ. '97 περιορίστηκε στα νόμιμα και παραδεκτά όρια του κριτηρίου ακουστικής άνεσης NC-25 (μέγιστη ηχητική όχληση 35 dB(A) στο πλησιέστερο διαμέρισμα, με ανοικτά παράθυρα). Κατά τις εργάσιμες ώρες (ουσιαστικά μέχρι αργά τη νύχτα), ο θόρυβος βάρους από τον κυκλοφοριακό απόηχο της Λεωφόρου Β.Όλγας υπερκαλύπτει τη στάθμη λειτουργίας του μηχανήματος. Ωστόσο τις μεταμεσονύκτιες ώρες κοινής ησυχίας, σε περίπτωση συνεχούς λειτουργίας της ΚΚΜ, η όχληση των περιοίκων θα παραμένει υπαρκτή.

5.3. Βυζαντινό Μουσείο Βέροιας

Στο κτίριο του Βυζαντινού Μουσείου της Βέροιας, η ΚΚΜ εγκαταστάθηκε σε περιορισμένο χώρο (κατάντη) δίπλα στο διαχωριστικό πρανές της πίσω αυλής (ανάντη). Η θέση εγκατάστασης βρίσκεται στην εσωτερική γωνία του οικοπέδου και περιβάλλεται (ανάντη) από κήπους και κτίρια κατοικιών ποικίλου ύψους, σε απόλυτη επαφή με το παράθυρο διπλανής μονοκατοικίας. Το Βυζαντινό Μουσείο Βέροιας βρίσκεται στη συμβολή της οδού Θωμαΐδου με τον αστικό κόμβο Λαδόμυλοι. Αντίθετα με την περίπτωση της Θεσσαλονίκης, η κυκλοφοριακή κίνηση δεν είναι διαρκής, ενώ η λειτουργία της ψυκτικής μονάδας παραμένει συνεχής (εξαιτίας της συντήρησης και διατήρησης μουσειακών εκθεμάτων).

Για τη μείωση του λειτουργικού θορύβου, όπως παραπάνω, μελετήθηκε και κατασκευάστηκε ένα ολοκληρωμένο περιμετρικό θωράκιο με τα εξής τμήματα :

- 1) ηχομονωτικό περικάλυμμα δύο πλευρών μέσα στην υπόσκαφη θέση (πάνω και δίπλα από τη ψυκτική μονάδα, αφήνοντας ακάλυπτη μια πλευρά 6m² για την παροχή νωπού αέρα),
- 2) ηχοαπορροφητικά πετάσματα στα τρία περιμετρικά τοιχώματα του θωρακίου (το πρανές και τα δύο ηχοφράγματα),
- 3) έξι ηχοπαγίδες (τύπου παράλληλων πλαισίων) στις εξόδους των ανεμιστήρων,

Στις ηχομετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν πριν και μετά τις ηχομονωτικές εφαρμογές, παρατηρείται σημαντική μείωση των οχλήσεων από 7 έως 13 dB(A) ανάλογα με τη θέση παρατήρησης. Ο θόρυβος λειτουργίας της ΚΚΜ στην περίμετρο του οικοπέδου, περιορίστηκε στο όριο των 50dB(A), κατά την ερμηνεία του Π.Δ. 1180/1981 (σε αντιστοιχία με κριτήριο ακουστικής άνεσης NC - 40).

ηχομετρημένες στάθμες	πριν την επέμβαση	μετά την επέμβαση
Θέση Μέτρησης	dB(A)	
Μέσα στο σκάμμα, 1m από τη μονάδα, δίπλα στο πρανές	86	79
Πάνω από τη μονάδα, σε ανοιχτό πεδίο	79	66
Στο μέσον της πίσω αυλής του Μουσείου	55	48
Στην αυλή της γειτονικής μονοκατοικίας, πίσω από το πρανές	58	47
Θόρυβος βάρους στην αυλή του Μουσείου, (μεσημέρι)	52 - 56	52

Στη διάρκεια της ημέρας, αυτή η στάθμη ηχητικής έντασης είναι ανεπαίσθητη, επειδή υπερκαλύπτεται από τον κυκλοφοριακό θόρυβο. Κατά τις ώρες κοινής ησυχίας φαίνεται πως καθίσταται ανεκτή, καθώς σταμάτησαν οι εγκλίσεις από τους περιοίκους της περιοχής, εξέλιξη που επιτρέπει την απρόσκοπτη λειτουργία της ΚΚΜ. Ωστόσο είναι προφανές ότι στη γειτονική μονοκατοικία, εξαιτίας της άμεσης εγγύτητας (σε επαφή με την ΚΚΜ), η όχληση παραμένει ισχυρή, διότι είναι τεχνικά ανέφικτη η εξασφάλιση μεγαλύτερης απομείωσης.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο σχεδιασμός της ηχομόνωσης μιας εγκατάστασης ΚΚΜ σε ιστορικό κτίριο ξεκινά από την ενίσχυση της θερμομονωτικής ικανότητας του κελύφους και των κουφωμάτων, καθώς επίσης και τις επιλογές χαμηλών εσωτερικών προσόδων (π.χ. ψυχρός φωτισμός) με στόχο τον περιορισμό των ψυκτικών απαιτήσεων. Η μείωση των ψυκτικών φορτίων συνεπάγεται ΚΚΜ μικρότερης ισχύος και επομένως χαμηλότερες στάθμες εκπεμπόμενου θορύβου. Η προβληματική των ήπιων επεμβάσεων, από τα πρώιμα στάδια της Μελέτης, οφείλει να ενσωματώσει την ακουστική συμβουλή, όσον αφορά τον τύπο του μηχανήματος και το χώρο τοποθέτησης. Η προσεκτική επιλογή ΚΚΜ με γνώμονα τα τεχνικά χαρακτηριστικά και τη χαμηλή στάθμη θορύβου μεταφράζεται σε μηδενικό ή ελάχιστο κόστος ηχοπροστασίας.

Ο θόρυβος λειτουργίας, ύστερα από τον προσδοκώμενο κατασιγασμό δεν μπορεί να υπερβαίνει το όριο των 50dB(A) στην περίμετρο της αυλής. Η διασταλτική ερμηνεία των διατάξεων (ότι η κλιματιστική εγκατάσταση είναι προϋπάρχουσα, επειδή το κτίριο είναι ιστορικό) βρίσκεται στην επαπτομένη των απαιτήσεων ηχοπροστασίας. Το δικαίωμα των περιοίκων για ελάχιστη ακουστική άνεση 35dB(A) στην πρόσοψη των κτιρίων (κριτήριο ησυχίας NC - 25) είναι απαραίτητο και πρέπει να γίνεται σεβαστό.

Η τεχνική επίλυση των προβλημάτων υπαίθριας ηχοπροστασίας και κατασιγασμού μιας ΚΚΜ είναι εφικτή, η εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου (ανάλογα με την περίπτωση και τις συνθήκες) περιμετρικού θωρακίου από ηχοφράγματα, ηχοαπορροφητικά πετάσματα και ηχοπαγίδες μπορεί να ανακουφίσει την ηχητική όχληση των περιοίκων κατά 6 ως 13 dB. Η πρόβλεψη της δαπάνης ηχομόνωσης στον αρχικό προϋπολογισμό προμήθειας και εγκατάστασης, εκτός του οικονομικού συμφέροντος, προσφέρει διπλωματικά και ψυχολογικά πλεονεκτήματα.

Η επιλογή του χώρου της εγκατάστασης (κατάντη, σε υπόσκαφη θέση ώστε να αυξηθεί το ενεργό ύψος του περιβλήματος) εξασφαλίζει ένα κρίσιμο μέγεθος ηχητικής απομείωσης (μέχρι 6dB, σε συνδυασμό με την ηχοαπορρόφηση στο εσωτερικό του ορύγματος). Η αναζήτηση επικάλυψης της παρενόχλησης από τους κυκλοφοριακούς θορύβους της περιοχής είναι θεμιτή. Η αυτονόητη τήρηση των αποστάσεων της εγκατάστασης από τα όρια της αυλής και η εκμετάλλευση της ηχητικής σκιάς του κτιριακού όγκου (προς όφελος των περιοίκων) δεν πρέπει να αποκλειστεί αβασάνιστα. Σε τελευταία ανάλυση, η συμμετοχή στο τίμημα της ηχητικής ρύπανσης είναι υποχρέωση των οχλούντων.

Η ριζική αντιμετώπιση των προβλημάτων ηχοπροστασίας, όσον αφορά το λειτουργικό θόρυβο των ΚΚΜ, βρίσκεται στην κατεύθυνση της ικανοποίησης των κλιματιστικών ανέσεων με ταυτόχρονη μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων. Η συνετή χρήση και αξιοποίηση των ιστορικών κτιρίων δεν μπορεί να αγνοεί την ενεργειακή διάσταση του προβλήματος. Ο σχεδιασμός λειτουργιών σε μια χαμηλότερη στοιβάδα ενεργειακών απαιτήσεων αποτελεί στρατηγική επιλογή.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Ευρωπαϊκή Επιτροπή : **Ενεργειακός Σχεδιασμός**, μετάφραση Ε. Τσίγκας, Μαλλιάρης - Παιδεία, 1994, Θεσσαλονίκη

- [2] Λιβέρης Π., Αραβαντινός Δ., Παπαδόπουλος Α., Τσακίρης Ν. : **Οδηγός Εξοικονόμησης Ενέργειας στα Δημόσια Κτίρια**, 1996, Θεσσαλονίκη
- [3] Atkins Research and Development: **The Control of Noise in Ventilation Systems**, 1997, London.
- [4] Τσινίκας Ν. : **Διερεύνηση Προβλημάτων Θορύβου στην Πολυκατοικία των Αστικών Κέντρων στην Ελλάδα**, διδακτορική διατριβή, 1983, Θεσσαλονίκη.
- [5] Bruneau M. : **Introduction aux Theories de l'Acoustique**, πανεπιστημιακή έκδοση, 1984, Le Mans.
- [6] Cremer L.: **Theorie der Luftschall – Dämpfung in Rechteckkanal mit Schluckender Wand und das Sich Dabei Ergebende Höchste Dämpfungsmass**, περιοδική έκδοση Acustica, v. 3, b 2, 1953.
- [7] Kurze U.: **Schallausbreitung im Kanal mit Periodischer Wandstruktur**, περιοδική έκδοση Acustica, v. 21, n 2, 1969.
- [8] Berenek L.L.: **Noise and Vibration Control**, πανεπιστημιακή έκδοση, 1971, M.I.T.
- [9] Κεραμίδας Δ. : **Διάδοση του Ήχου σε Αεραγωγούς Ορθογωνικής Διατομής Επενδεδυμένους με Ηχοαπορροφητικό Υλικό**, διδακτορική διατριβή, 1979, Βουδαπέστη.
- [10] Αθανασόπουλος Χ. : **Προστασία Κτιρίων**, 1991, Αθήνα.
- [11] Lienard P. : **Decibels et Indices de Bruit**, Masson, 1978, Paris.
- [12] Stryjenski J.: **L' Acoustique Applique a l' Urbanisme**, πανεπιστημιακή έκδοση, 1975, Geneve.
- [13] Αεροκλίμα, Πίνακες Επιλογής : **Ηχομονωτές**, 2000, Θεσσαλονίκη.
- [14] Fyrogenis, Sound Attenuation Selection: **Rectangular Sound Attenuators**, 1999, Αθήνα.
- [15] Trox Selection Tables: **Rectangular Splitter Attenuators**, 1999, Neukirchen.
- [16] Sound Research Laboratories: **Practical Building Acoustics**, 1976, Suffolk.
- [17] Dare & Technical Press: **Handbook of Noise and Vibration Control**, 1979, Surrey.

Δημήτρης Κεραμίδας, διπλ. ηλεκτρολόγος μηχανικός Π.Π. δρ. ακουστικής πανεπιστημίου Βουδαπέστης, προϊστάμενος τεχνικού τμήματος ΕΡΤ3, e-mail : dkeramidas@ert3.gr

Νίκος Κ. Μπάρκας, δρ. πολιτικός μηχανικός Δ.Π.Θ. - duap ακουστικής Le Mans France, επίκουρος καθηγητής Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών Δ.Π.Θ. e-mail : nbarkas@arch.duth.gr