

Βελτιστοποίηση της απόδοσης των φραγμάτων θορύβου με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων

Σπύρος Πολυχρονόπουλος

Αναστάσιος Σκαρλάτος

Δημήτρης Σκαρλάτος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή μελετάται η επίδραση της γεωμετρίας των ηχοφραγμάτων στην απόδοσή τους. Με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων κατασκευάζεται ένα μοντέλο εξομοίωσης και για σταθερό ύψος φράγματος και με δεδομένες θέσεις πηγής αποδέκτη μελετάται η επίδραση της κλίσης του ηχοφράγματος στην ηχομείωση που προσφέρει σε τρεις χαρακτηριστικές συχνότητες (125 Hz, 250 Hz, 1000 Hz). Από την απόκριση του συστήματος πηγή- φράγμα – δέκτης σε κάθε περίπτωση υπολογίζεται η βέλτιστη τιμή της παραπάνω παραμέτρου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ηχοφράγματα , πεπερασμένα στοιχεία.

ABSTRACT

The main goal of this paper is to study the effect of the geometry of sound barriers to their performance concerning the noise reduction with the aid of a Finite Element Method (FEM) simulation code. The height of the sound barriers as well as the sound pressure of the source is considered constant. It is studied the decrease of the sound pressure at the receiver's position as a function of the sound barrier angle in two critical frequencies (250Hz, 1000Hz). The sound pressure is calculated along an observation line which extends from the source to the receiver point passing through the sound barrier, and the corresponding sound level in dB is calculated. The calculated barrier response at different angles is then used to estimate the angle which maximizes the noise reduction.

KEY WORDS: Sound Barriers, Finite Element Method (F.E.M.).

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ένα από τα βασικά προβλήματα των αυτοκινητοδρόμων είναι ο θόρυβος που προέρχεται από διερχόμενα αυτοκίνητα και κυρίως τα μεγάλης ιπποδύναμης φορτηγά. Η κατασκευή ήσυχων δρόμων, που ακόμη βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο, καθώς και η κατασκευή ηχοφραγμάτων αποτελεί δύο από τους σπουδαιότερους τρόπους μείωσης του δημιουργούμενου θορύβου. Ένα βασικό πρόβλημα είναι η απόδοση των φραγμάτων που εξαρτάται από πολλούς παράγοντες μερικοί από τους οποίους είναι το ύψος των φραγμάτων, το πάχος και γενικότερα η γεωμετρία τους καθώς και η διαμόρφωση του περιβάλλοντος χώρου. Η βασικότερη αιτία που μειώνει την απόδοση των φραγμάτων είναι το φαινόμενο της περίθλασης από την πάνω πλευρά του φράγματος. Γενικά υπάρχουν τρεις τρόποι υπολογισμού της απόδοσης των φραγμάτων

1. Με μετρήσεις στο φυσικό τους περιβάλλον ή με μετρήσεις σε μοντέλα υπό κλιμακα,
2. Με την βοήθεια αναλυτικών μοντέλων και
3. Με την βοήθεια αριθμητικών μοντέλων.

Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα τα οποία μπορούν με ικανοποιητική προσέγγιση να υπολογίσουν την ηχομείωση από τα φράγματα. Για παράδειγμα στην Ε.Ε. και ειδικότερα στο πρόγραμμα HARMONOISE προτείνεται η χρήση του μοντέλου των Defrance και Gabilet, το οποίο όμως δεν λαμβάνει υπόψη άλλους παράγοντες εκτός από το ύψος του φράγματος (Harmonoise WP 3 2005). Επί προσθέτως άλλα μοντέλα προσδιορίζουν με την μορφή διορθωτικών όρων την επίδραση άλλων παραμέτρων όπως το πάχος του φράγματος, την επίδραση του εδάφους καθώς και την απορρόφηση του ήχου από αυτά.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η επίδραση της κλίσης και της απορρόφησης των φραγμάτων με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Για την εφαρμογή της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Comsol Multiphysics.

2. ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Η διάδοση ηχητικών κυμάτων μικρού πλάτους σε ομογενές μέσο περιγράφεται από την κυματική εξίσωση που μπορεί να γραφεί με την γενική μορφή:

$$\Delta p(x,t) - c^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(x,t) = -\rho \frac{\partial}{\partial t} \gamma(x,t) \quad x \in \Omega, \quad t \geq 0 \quad (1)$$

Η ποσότητα $\gamma(x,t)$ δηλώνει την πυκνότητα των ηχητικών πηγών στο εσωτερικό του χωρίου Ω

Αν λάβουμε υπόψη την εξάρτηση από την συχνότητα καταλήγουμε στην εξίσωση του Helmholtz:

$$(\Delta + \kappa^2) \hat{p}(x) = i\rho c \kappa \hat{\gamma}(x) \quad (2)$$

Όπου κ η ακουστική αγωγιμότητα και \hat{p} , $\hat{\gamma}$ τα ανεξάρτητα του χρόνου εύρη.

Υποθέτοντας ομογενείς αρχικές συνθήκες (δηλαδή ηρεμία του μέσου σε προθύτερες χρονικές στιγμές του ακουστικού πεδίου), ο καθορισμός της κατανομής του ήχου σε μία περιοχή Ω , εσωτερικά ή εξωτερικά της συνοριακής επιφάνειας Γ η λύση των εξισώσεων (1) και (2) ικανοποιεί τις παρακάτω συνοριακές συνθήκες στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial n_x} p(x,t) &= q(x,t) = \tilde{q}(x,t) \quad x \in \Gamma \quad t \geq 0 \\ \frac{\partial}{\partial n_x} p(x) &= q(x) = \tilde{q}(x) \quad x \in \Gamma \end{aligned} \quad (3)$$

Οι συνθήκες αυτές περιγράφουν την περίπτωση της σκέδασης από σκληρές επιφάνειες και την ηχητική ακτινοβολία από επιφάνειες με γνωστή κατανομή ταχύτητας. Οι επιφάνειες με απορρόφηση χαρακτηρίζονται από την συνθήκη του Robin στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} q(x,t) &= -\frac{1}{c} \left[\frac{1-a_r(x)}{1+a_r(x)} \right] \frac{\partial}{\partial t} p(x,t) = -A \frac{\partial}{\partial t} p(x,t) \\ \hat{q}(x) &= A(x) i\omega \hat{p}(x) \end{aligned} \quad (4)$$

Όπου $a_r(x)$ ο συντελεστής ανάκλασης της επιφάνειας και $A(x)$ το φανταστικό μέρος της ακουστικής της εμπέδησης.

Ξεκινώντας από την ολοκληρωτική εξίσωση του Kirchhoff και χρησιμοποιώντας την μέθοδο των υπολοίπων οι διδιάστατες ολοκληροδιαφορικές εξισώσεις στο πεδίο του χρόνου μπορούν να γραφούν με την μορφή:

$$d\xi p(\xi, t) - \int_0^t \oint_{\Gamma} \frac{\partial r}{\partial n} \frac{c}{2\pi R} H(t' - \frac{r}{c}) \left[\frac{1}{c} \dot{p}(x, \tau) + \frac{1}{ct' + r} p(x, \tau) \right] d\Gamma_x d\tau =$$

$$\int_0^t \left\{ \oint_{\Gamma} \frac{c}{2\pi R} H(t' - \frac{r}{c}) q(x, \tau) d\Gamma_x + \rho \int_{\Omega} \dot{\gamma}(x, \tau) \frac{c}{2\pi R} H(t' - \frac{r}{c}) d\Omega_x \right\} d\tau$$
(5)

Όπου ο συντελεστής βήματος $d\xi$ έχει τις τιμές 1 και 0.5 για τα σημεία ξ στο εσωτερικό της Ω και στο σύνορο Γ αντίστοιχα.

Για σημειακές πηγές στην θέση x' με $R_l = \sqrt{c^2 t'^2 - |x' - \xi|^2}$ ισχύει

$$\int_0^t \rho \int_{\Omega} \dot{\gamma}(x, \tau) \frac{c}{2\pi R} H(t' - \frac{r}{c}) d\Omega_x d\tau = \int_0^t \rho \sum_{l=1}^L \dot{g}_l(\tau) \frac{c}{2\pi R_l} H(\frac{x' - \xi}{c}) d\tau$$
(6)

Όπου H είναι η βηματική συνάρτηση του Heaviside

Σε δύο διαστάσεις κατα μήκος καθε συνοριακού στοιχείου Γ^e η πίεση δίνεται από

$$p(x, \tau) = \frac{1}{\Delta t} \left[(t_{m+1} - \tau) p^{em} + (\tau - t_m) p^{em+1} \right] \quad x \in \Gamma^e$$

$$q(x, \tau) = q^{em+1} \quad x \in \Gamma^e$$
(7)

Όπου Δt το χρονικό διάστημα του βήματος $[t_m, t_{m+1}]$.

Στο πεδίο της συχνότητας η διαφορική εξίσωση του προβλήματος προκύπτει από την εφαρμογή του θεωρήματος του Betti και η εξίσωση (3) στο πεδίο της συχνότητας καταλήγει στην μορφή:

$$d(\xi) \hat{p}(\xi) = \oint_{\Gamma} \left[\hat{q}(x) \hat{p}^*(x, \xi; \kappa) - \hat{p}(x) \hat{q}^*(x, \xi; \kappa) \right] d\Gamma_x - \rho i c \kappa \int_{\Omega} \hat{\gamma}(x) \hat{p}^*(x, \xi; \kappa) d\Omega_x$$
(8)

Η γενική λύση και η πρώτη παράγωγος $\hat{q}^*(x, \xi; \kappa)$ δίνεται από τις σχέσεις:

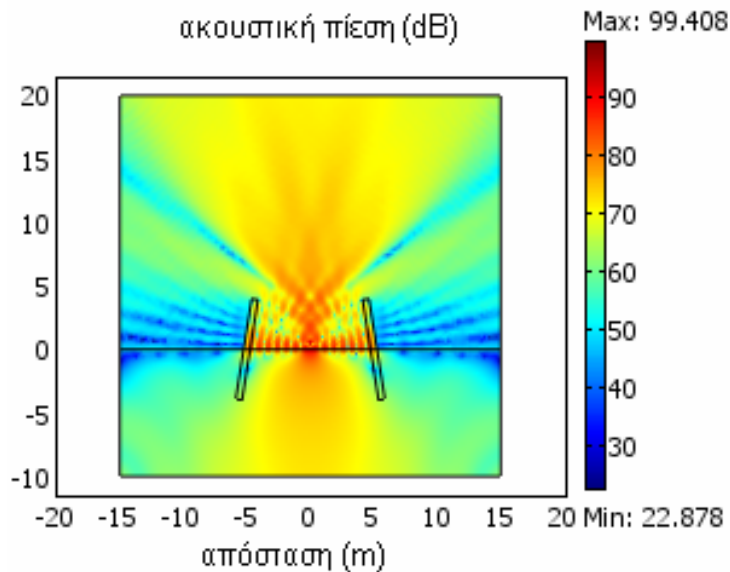
$$p^* = \frac{1}{2\pi} K_0(i\kappa r)$$
(9)

Και

$$q^* = \frac{i\kappa}{2\pi} K_1(i\kappa r) \frac{\partial r}{\partial n}$$
(10)

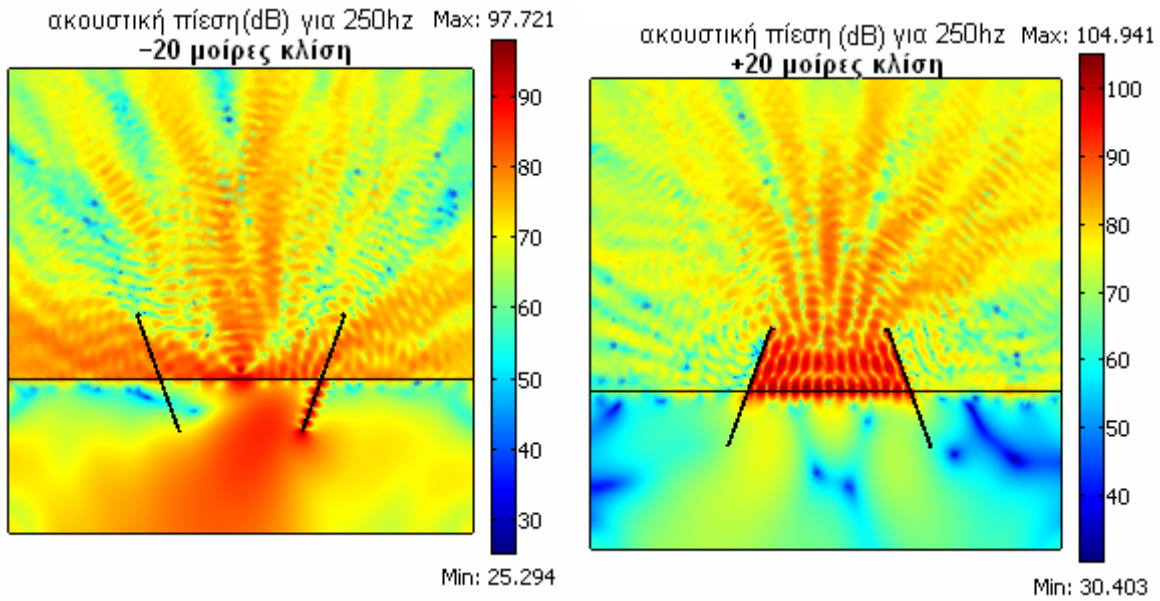
Όπου K_0, K_1 οι συναρτήσεις Bessel δευτέρου τύπου μηδενικής και πρώτης τάξης αντίστοιχα

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

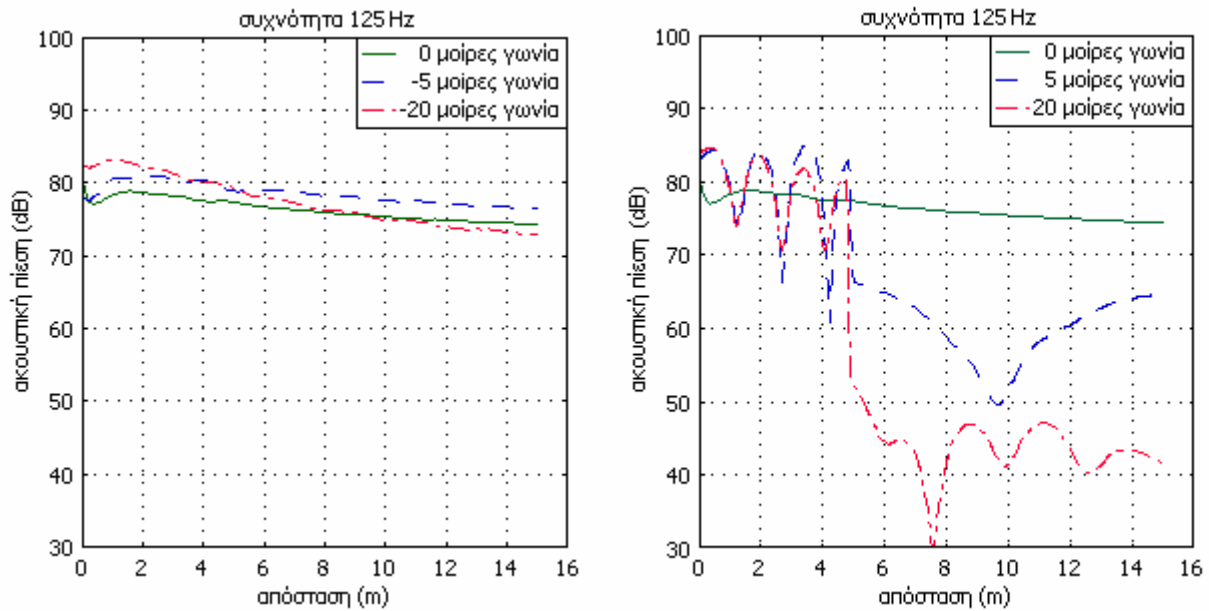


Σχήμα 1 Το μοντέλο εξομίωσης

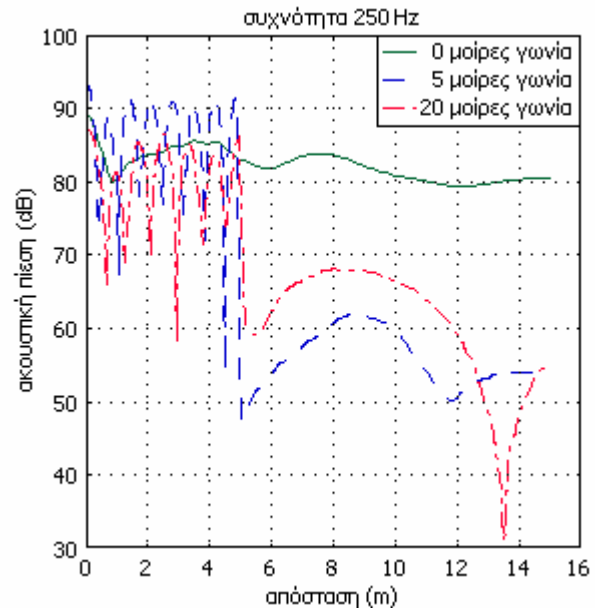
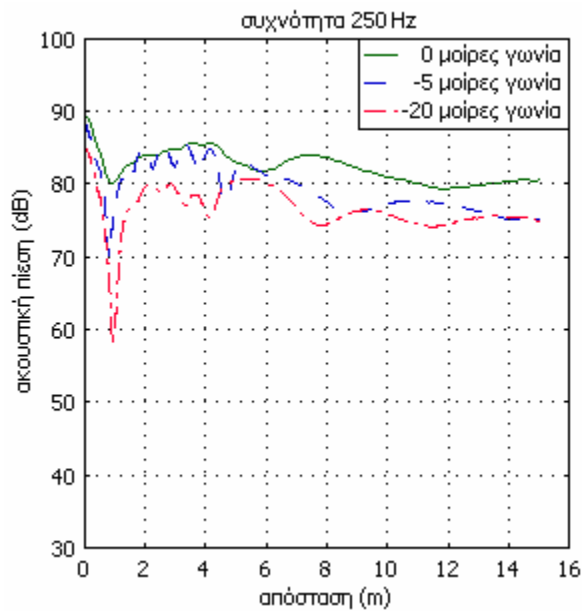
Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται το δισδιάστατο μοντέλο εξομείωσης, το οποίο αποτελείται από δύο ηχοφράγματα τοποθετημένα παραλλήλα σε κάθε πλευρά του δρόμου. Τα ηχοφράγματα επεκτείνονται και μέσα στο έδαφος για τον περιορισμό της διάδοσης του ήχου μέσα από αυτό. Για το μοντέλο χρησιμοποιήθηκαν τρία υλικά. Ο δρόμος (πλάτους 10 μέτρων) και γενικότερα το υπέδαφος θεωρήθηκε ότι είναι από τσιμέντο. Τα ηχοφράγματα ύψους 4 μέτρων το καθένα επεκτείνονται σε ίσο βάθος μέσα στο έδαφος. Το υλικό των ηχοφραγμάτων είναι από plexiglass συνολικού πάχους 10 εκατοστών. Ο αέρας στο μοντέλο αντιστοιχεί σε πίεση 1atm θερμοκρασία 27°C και πυκνότητα 1,25 kg/m³. Η πηγή βρίσκεται στο γεωμετρικό μέσο της απόστασης των φραγμάτων και σε ύψος 0.5 μέτρα από το έδαφος και συμπίπτει με την αρχή του άξονα των X. Ο υπολογισμός της σταθμής πίεσης έγινε για τις συχνότητες 125, 250 και 1000 Hz. Στις γραφικές παραστάσεις έχει υπολογιστεί η στάθμη πίεσης του ήχου σε dB κατά μήκος μιας ευθείας από το σημείο $x=0$ έως $x=15$ όπως φαίνεται στα σχήματα. Λόγω της συμμετρίας του προβλήματος δεν έγινε γραφική παράσταση για αρνητικές τιμές του άξονα των x . Θεωρήθηκε όμως απαραίτητο να σχεδιαστούν δύο ηχοφράγματα στο μοντέλο διότι λόγω των ανακλάσεων στις δύο επιφάνειες των φραγμάτων δημιουργούνται φαινόμενα συμβολής ηχητικών κυμάτων γεγονός που έχει σαν συνέπεια την αύξηση της σταθμής στην περιοχή του δρόμου μεταξύ των δύο φραγμάτων. Οι υπολογισμοί έγιναν τόσο για θετικές όσο και αρνητικές κλίσεις των φραγμάτων. Στο σχήμα 2. φαίνεται η κατανομή της πίεσης στον χώρο για τις δυο ακραίες κλίσεις των ηχοφραγμάτων -20° και 20° που έχουν μελετηθεί με την πηγή να εκπέμπει τόνο συχνότητας 250 Hz..



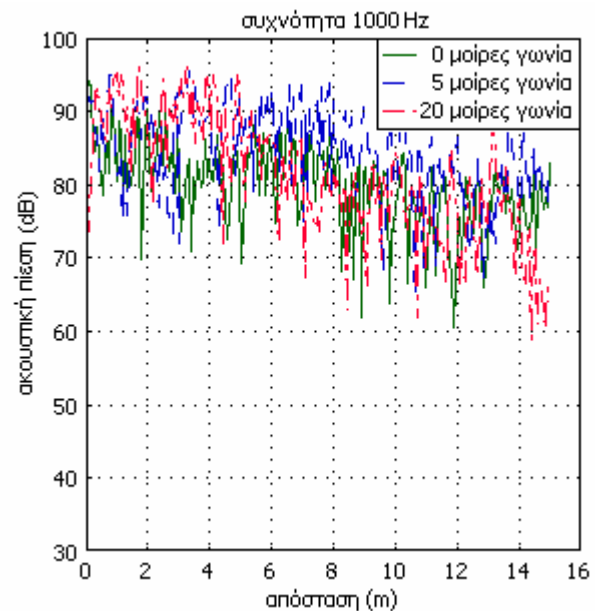
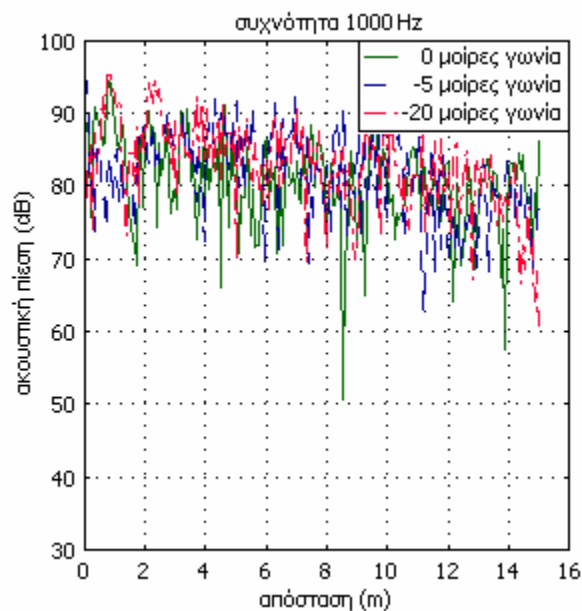
Σχήμα 2 Μέγιστες κλίσεις των φραγμάτων



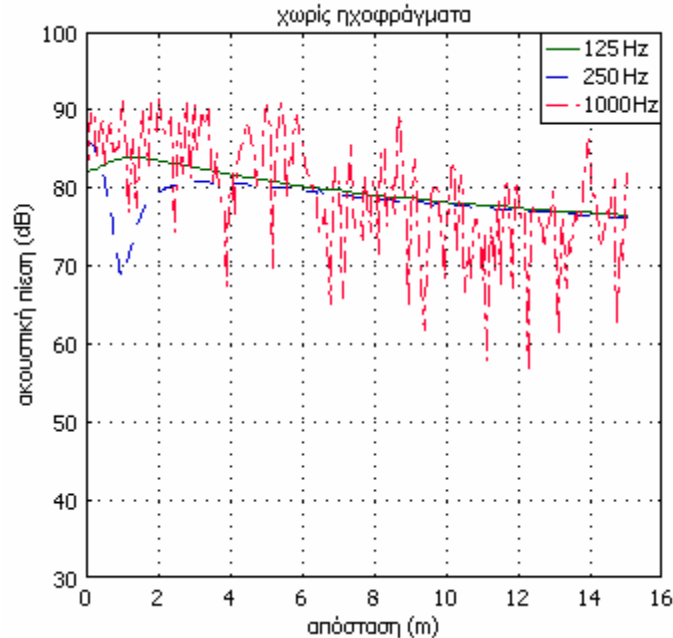
Σχήμα 3 Ηχομείωση τόνου 125 Hz για αρνητικές κλίσεις φραγμάτων(αριστερα) και για θετικές κλίσεις φραγμάτων (δεξιά)



Σχήμα 4 Ηχομείωση τόνου 250 Hz για αρνητικές κλίσεις φραγμάτων (αριστερά) και για θετικές κλίσεις φραγμάτων (δεξιά)



Σχήμα 5 ηχομείωση τόνου 1000 για αρνητικές κλίσεις φραγμάτων (αριστερά) και για θετικές κλίσεις φραγμάτων (δεξιά)



Σχήμα 6 Ηχομείωση χωρίς ηχοφράγμα (σε κάθε συχνότητα)

Από τις παραπάνω γραφικές φαίνεται καθαρά πως οι αρνητικές κλίσεις των ηχοπετασμάτων δεν προσφέρουν ιδιαίτερη ηχομείωση σε καμία από τις συχνότητες. Σε αντίθεση όμως φραγματα με θετικές κλίσεις (προς την πλευρά του δρόμου) παρατηρούνται μειώσεις κυρίως στις χαμηλές κυρίως συχνότητες, ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν την στάθμη στον δρόμο μεταξύ των ηχοφραγμάτων. Πιο συγκεκριμένα για μεγάλες κλίσεις σε τόνους συχνότητας 125 Hz, παρατηρείται σημαντική αύξηση της ηχομείωσης του θορύβου που τοπικά μπορεί να φθάσει τα 40dB σε σχέση με την περίπτωση τα ηχοπετάσματα να τοποθετούνταν χωρίς κλίση (Σχήμα 3 δεξιά). Όσον αφορά την βέλτιστη κλίση των ηχοφραγμάτων για χαμηλές συχνότητες (125 Hz) η μεγαλύτερη δυνατή κλίση (20°) είναι και η βέλτιστη, δε συμβαίνει το ίδιο και για λίγο μεγαλύτερες συχνότητες της τάξης των 250 Hz, που όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4 δεξιά όπου η βέλτιστη κλίση είναι 5° . Για αρκετά μεγαλύτερες συχνότητες της τάξης των 1000 Hz και άνω δεν παρατηρείται μείωση της στάθμης του θορύβου που να σχετίζεται με την κλίση του ηχοφράγματος (Σχήμα 5 δεξιά).

Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι οι μεγάλες θετικές κλίσεις των ηχοφραγμάτων μειώνουν το θόρυβο έξω από αυτά κυρίως στις χαμηλές συχνότητες (μέχρι 125 Hz), για ηχομείωση στη περιοχή συχνοτήτων (125 -250 Hz) η βέλτιστη γωνία κλίσης είναι της τάξης των 5° και στην μεσαία περιοχή συχνοτήτων η κλίση δεν δημιουργεί αξιοσημείωτη μείωση της στάθμης του θορύβου. Η κλίση των ηχοφραγμάτων βοηθά στην αποδοσή τους διότι η ηχομείωση που προσφέρουν αυτά σε χαμηλές συχνότητες είναι πολύ μικρή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Harmonoise WP 3 (2005) «Technical Report HAR32TR-040922-DGMR20 Engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning».
- Meise Th. (1990) "Calculation of scalar wave propagation in 3-D frequency and time domain" Doctorat thesis Ruhr University Bochum Germany.
- Morse P. M. Feshbach H (1953) "Methods of theoretical physics" part I Mc Graw Hill , New York

ΒΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Ο Σπύρος Πολυχρονόπουλος είναι πτυχιούχος Φυσικός του Πανεπιστημίου Πατρων. Ηδη εκπονεί τη διδακτορική του διατριβή στο τμήμα Μηχανολόγων & Αεροναυπηγών Μηχανικών Πάτρας με θέμα «Έλεγχος ακουστικής κλειστών χώρων με προσαρμοσμένα ακουστικά στοιχεία». Ασχολείται με την μουσική σύνθεση επί 15 χρόνια και έχει κυκλοφορήσει 10 δίσκους. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα είναι: Ανάλυση, επεξεργασία και μετατροπή ψηφιακών ηχητικών σημάτων, αναλογικά και ψηφιακά φίλτρα για επεξεργασία ήχου, ηχητικές συσκευές για καταναλωτικές και επαγγελματικές εφαρμογές Μετρήσεις ακουστικής ποιότητας ηχητικών σημάτων. Email επικοινωνίας: spyweirdos@yahoo.gr

Ο Αναστάσιος Σκαρλάτος είναι Διπλωματούχος Μηχανικός του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών από το 1998. Το 2003, ολοκλήρωσε το διδακτορικό του στο Technische Universität (TU) Darmstadt της Γερμανίας, ως υπότροφος του ΙΚΥ. Έχει διατελέσει ερευνητής στο εργαστήριο Theorie Elektromagnetischer Felder του ιδίου Πανεπιστημίου με υποτροφία του Γερμανικού Ιδρύματος Ερευνών (DFG). Σήμερα εργάζεται ως ερευνητής στο Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) στο Saclay στη Γαλλία. Email επικοινωνίας: Anastasios.SKARLATOS@cea.fr

Ο Δημήτρης Σκαρλάτος είναι Πτυχιούχος Φυσικός του ΑΠΘ (1975) και Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός του Πανεπιστημίου Πατρών (1980). Το Διδακτορικό του δίπλωμα το πήρε από την Πολυτεχνική Σχολή Του Πανεπιστημίου Πατρών. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα είναι στον χώρο της ακουστικής. Στο πανεπιστήμιο Πατρών όπου υπηρετεί ως Αναπληρωτής καθηγητής διδάσκει τα μαθήματα Εφαρμοσμένη Ακουστική, Ηχομονώσεις, Ακουστική Μηχανών Ηχορρύπανση, για τα οποία έχει συγγράψει σχετικό βιβλίο. Email επικοινωνίας: skarlat@mech.upatras.gr