

Ακουστικές Μετρήσεις στον Κόλπο του Ηρακλείου *

Π. Παπαδάκης^{1,a}, Εμμ. Σκαρσουλής^{1,b}, Γ. Πιπεράκης^{1,c},
Μιχ. Καλογεράκης^{2,d} & Εμμ. Ορφανάκης^{1,e}

¹ Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών ΙΤΕ, Ν. Πλαστήρα 100, Βασιλικά Βουτών,
70 013 Ηράκλειο

² Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών Τ.Ε. - ΤΕΙ Κρήτης, Εσταυρωμένος 71 004 Ηράκλειο

^a panos@iacm.forth.gr, ^b eskars@iacm.forth.gr, ^c piperak@iacm.forth.gr,
^d michalis@iacm.forth.gr, ^e morf@iacm.forth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στα πλαίσια του προγράμματος *SeaEars* έγιναν το Μάιο 2014 προκαταρκτικές ακουστικές μετρήσεις στον κόλπο του Ηρακλείου. Οι μετρήσεις αυτές αποσκοπούσαν αφ' ενός στη δοκιμή των οργάνων και αφ' ετέρου σε μια αρχική μελέτη των συνθηκών ακουστικής διάδοσης στην περιοχή. Μεταξύ άλλων μετρήθηκε η εξάρτηση της ταχύτητας του ήχου από το βάθος και τα επίπεδα θορύβου περιβάλλοντος στην περιοχή, ενώ κατεγράφησαν ακουστικές λήψεις σε διάφορες αποστάσεις από μια παλμική ακουστική πηγή και συγκρίθηκαν με αποτελέσματα μοντελοποίησης.

Acoustic Measurements in the Gulf of Heraklion

ABSTRACT

In the framework of SeaEars project preliminary acoustic measurements were conducted in May 2014 in the Gulf of Heraklion. The purpose of these measurements was to test the instruments and also to perform an initial study of sound propagation conditions in the area of interest. Among others, the sound-speed profile and the ambient noise levels were measured. Further, acoustic receptions from a pulsed acoustic source (pinger) were recorded at various distances and compared with results from propagation modelling.

Εισαγωγή

Η δυνατότητα προσδιορισμού θέσης υποβρύχιων ηχητικών πηγών ήχου διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στην ασφάλεια υποβρύχιων εργασιών, στην

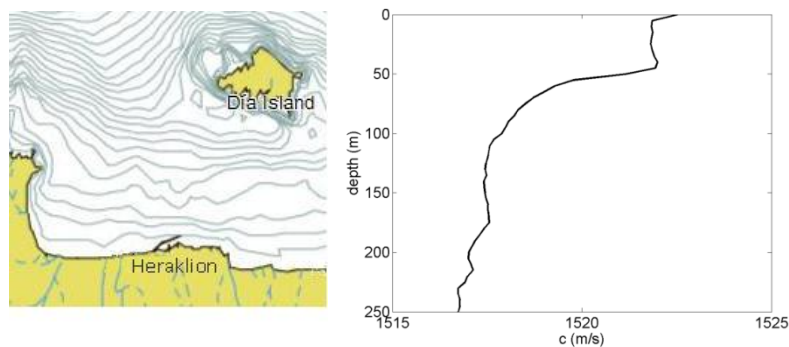
* Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο - ΕΚΤ) και από εθνικούς πόρους μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγικού Πλαισίου Αναφοράς (ΕΣΠΑ) 2007-2013 – Δράση "ΑΡΙΣΤΕΙΑ ΙΙ", έργο *SeaEars* με κωδικό 3495.

παρακολούθηση κητωδών, στην ανάκτηση οργάνων, κλπ. Το πρόγραμμα *SeaEars* έχει ως αντικείμενο τον τρισδιάστατο παθητικό εντοπισμό ευρυζώνιων υποβρυχίων πηγών ήχου στο εσωτερικό της θάλασσας, χρησιμοποιώντας απλές διατάξεις υδροφώνων (ζεύγη υδροφώνων), λαμβάνοντας υπόψη τις επιπτώσεις της διάθλασης και αξιοποιώντας φαινόμενα πολύδρομης ακουστικής διάδοσης [1].

Στα πλαίσια του συγκεκριμένου προγράμματος έγιναν το Μάιο 2014 προκαταρκτικές ακουστικές μετρήσεις στον κόλπο του Ηρακλείου, μεταξύ Ηρακλείου και νήσου Ντίας. Οι μετρήσεις αυτές αποσκοπούσαν αφ' ενός στη δοκιμή νέων οργάνων που αποκτήθηκαν στα πλαίσια του προγράμματος, και αφ' ετέρου σε μια αρχική μελέτη των συνθηκών ακουστικής διάδοσης στην περιοχή. Μεταξύ άλλων μετρήθηκε η εξάρτηση της θερμοκρασίας και κατ' επέκταση της ταχύτητας του ήχου από το βάθος καθώς και τα επίπεδα θορύβου περιβάλλοντος στην περιοχή, ενώ καταγράφηκαν και αναλύθηκαν ακουστικές λήψεις σε διάφορες αποστάσεις από μια παλμική ακουστική πηγή. Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται μερικά από τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών.

1. Μετρήσεις

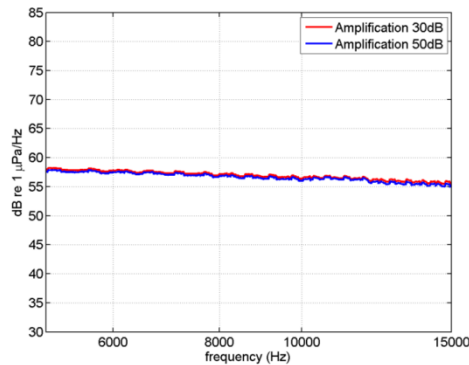
Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει την περιοχή των μετρήσεων και το προφίλ ταχύτητας διάδοσης του ήχου μέχρι βάθος 250 m. Παρατηρούμε ότι πέρα από μια μικρή αύξηση κοντά στην επιφάνεια η ταχύτητα του ήχου έχει μικρές διακυμάνσεις μέχρι βάθος 50 m, ενώ μετά ελαττώνεται σταδιακά λόγω της μείωσης της θερμοκρασίας.



Σχήμα 1.1. Περιοχή των μετρήσεων και προφίλ ταχύτητας διάδοσης του ήχου.

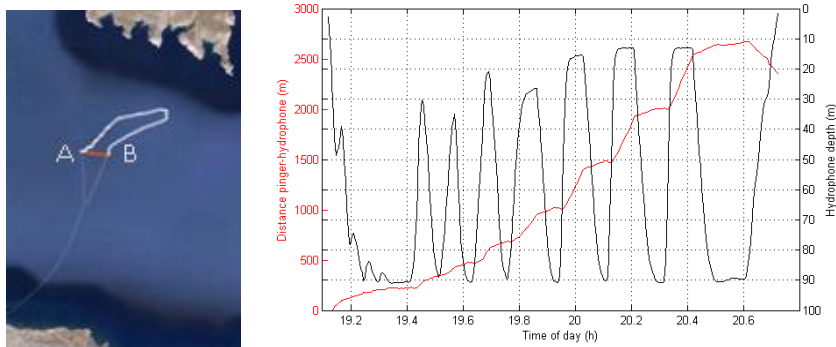
Το Σχήμα 1.2 παρουσιάζει την φασματική πυκνότητα του θορύβου περιβάλλοντος στην περιοχή συχνοτήτων μεταξύ 5 και 15 kHz. Η κατάσταση θάλασσας κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης μέτρησης ήταν μεταξύ 1 και 2. Για τη μέτρηση του θορύβου εφαρμόστηκε ενίσχυση στα σήματα εισόδου ούτως ώστε να ξεπεραστεί ο εσωτερικός θόρυβος του μετρητικού συστήματος. Στη συνέχεια υπολογίστηκε το φάσμα του εκάστοτε ενισχυμένου σήματος και στο τέλος αφαιρέθηκε η ενίσχυση. Τα τελικά αποτελέσματα μετά την αφαίρεση της ενίσχυσης εμφανίζονται στο Σχήμα 1.2 για δύο τιμές της ενίσχυσης, 30 και 50 dB. Παρατηρούμε ότι τα δύο αποτελέσματα είναι ταυτόσημα, πράγμα που επιβεβαιώνει την ορθότητα της μέτρησης. Τα επίπεδα θορύβου είναι μεταξύ 55 και 60 dB/te 1 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}$. Οι τιμές αυτές είναι σημαντικά υψηλότερες από τα τυπικά επίπεδα θορύβου για ανοιχτή θάλασσα και κατάσταση θάλασσας 2 (~40 dB te 1 $\mu\text{Pa}/\text{Hz}$ στα 10kHz).

Ο αυξημένος θόρυβος πιθανόν οφείλεται στη γεινίαση με το λιμάνι του Ηρακλείου αλλά και στη μορφολογία της περιοχής.



Σχήμα 1.2. Θόρυβος περιβάλλοντος μεταξύ Ηρακλείου και νήσου Ντίας.

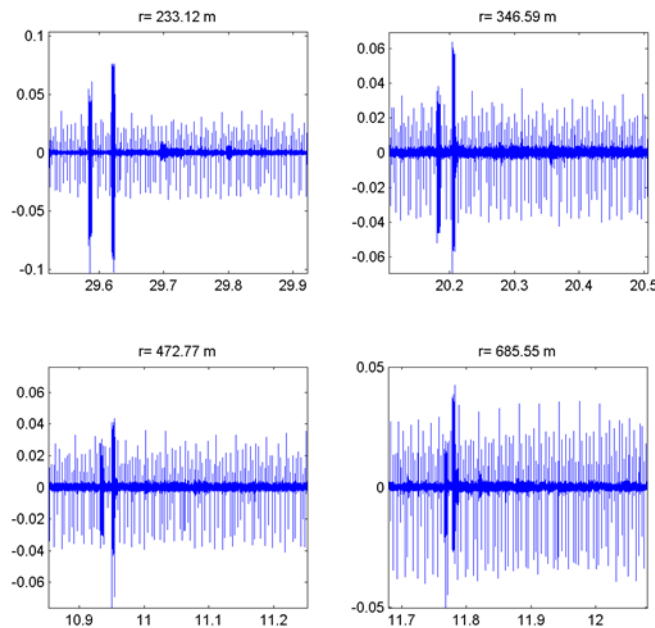
Στη μέση της απόστασης μεταξύ Ηρακλείου και νήσου Ντίας έγινε πόντιση μιας ηχητικής πηγής σε βάθος 73 m με τη βοήθεια πλωτήρα. Η συγκεκριμένη πηγή εκπέμπει παλμικά σήματα κάθε 5 δευτερόλεπτα με κεντρική συχνότητα 11 kHz και διάρκεια 5 χιλιοστά του δευτερολέπτου. Για τον έλεγχο της οριζόντιας θέσης της πηγής τοποθετήθηκε δέκτης GPS επάνω στον πλωτήρα. Για τον έλεγχο του βάθους της πηγής τοποθετήθηκε αυτοκαταγραφικό βάθους (TDR) στο σχοινί πόντισης σε μικρή απόσταση από την πηγή. Από το σκάφος ποντίστηκε υδρόφωνο με καλώδιο μήκους περίπου 90 m. Για τον έλεγχο του βάθους του υδροφώνου τοποθετήθηκε αυτοκαταγραφικό βάθους (TDR) στο καλώδιο σε μικρή απόσταση από το υδρόφωνο ενώ χρησιμοποιήθηκε δέκτης GPS για τον έλεγχο της οριζόντιας θέσης του σκάφους. Από το συνδυασμό των δεδομένων των δύο δεκτών GPS προκύπτει η απόσταση μεταξύ πλωτήρα και σκάφους (μεταξύ πηγής και υδροφώνου).



Σχήμα 1.3. Αριστερά: Διαδρομή σκάφους-υδροφώνου (λευκή γραμμή) και πλωτήρα-πηγής (κόκκινη γραμμή) κατά την διάρκεια των μετρήσεων διάδοσης. Δεξιά: Βάθος του υδροφώνου (μαύρη γραμμή) και απόσταση πηγής-δέκτη (κόκκινη γραμμή) συναρτήσει του χρόνου.

Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η περιοχή της μέτρησης. Το σημείο A είναι το σημείο πόντισης της πηγής και το σημείο B είναι το σημείο ανέλκυσης. Είναι εμφανής η μετατόπιση προς τα ανατολικά λόγω ρευμάτων (ταχύτητα μετατόπισης περίπου 0.6 κόμβοι). Ο χρόνος από την πόντιση μέχρι την ανέλκυση ήταν περίπου 1 ώρα. Στη διάρκεια αυτή το σκάφος απομακρύνθηκε από την πηγή σε απόσταση μέχρι και 2626 μέτρα. Κατά την διάρκεια της απομάκρυνσης έγιναν στάσεις διάρκειας περίπου 5 λεπτών η κάθε μία. Στο δεξιό μέρος του Σχήματος 1.3 παρουσιάζεται το βάθος του υδροφώνου συνάρτηση του χρόνου και συγχρόνως η απόσταση πλωτήρα-σκάφους όπως προέκυψε από το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού (GPS). Οι σταθμοί διακρίνονται από τη βύθιση του υδροφώνου ενώ η κίνηση του σκάφους από την ανάδυση του υδροφώνου.

Η καταγραφή του σήματος της πηγής έγινε με συχνότητα δειγματοληψίας 100 kHz. Το Σχήμα 1.4 παρουσιάζει τις ακουστικές καταγραφές (χρονοσειρές) σε 4 σταθμούς. Οι συγκεκριμένες λήψεις είναι προς το τέλος του κάθε σταθμού που το καλώδιο του υδροφώνου είναι σχεδόν κατακόρυφο και το υδρόφωνο βρίσκεται στο μέγιστο βάθος (91 m). Η απόσταση μεταξύ πλωτήρα και σκάφους που αντιστοιχεί σε κάθε σταθμό φαίνεται στην κορυφή της κάθε καταγραφής. Ο οριζόντιος άξονας μετράει χρόνο σε δευτερόλεπτα και το εμφανιζόμενο παράθυρο χρόνου είναι ίδιου μήκους και στις 4 καταγραφές.



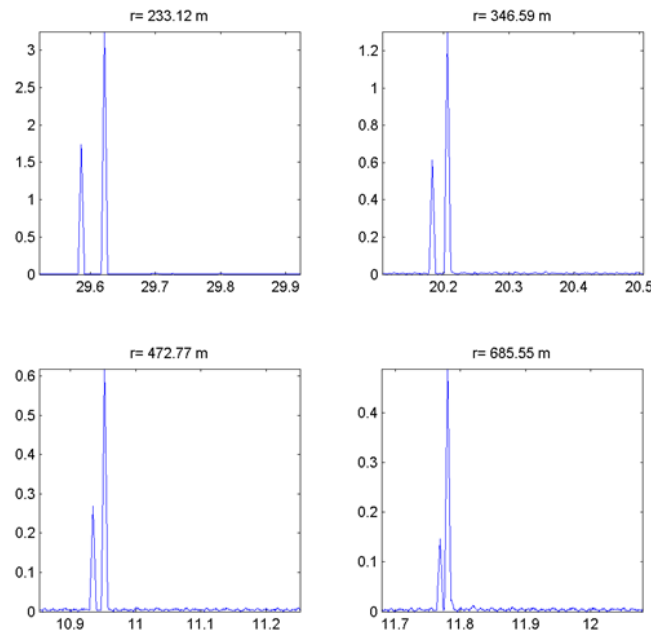
Σχήμα 1.4. Ακουστικές καταγραφές (χρονοσειρές) σε 4 σταθμούς.

Η πρώτη άφιξη της κάθε καταγραφής είναι η απ' ευθείας άφιξη ενώ η δεύτερη είναι η ανάκλαση από την επιφάνεια της θάλασσας. Καθώς η απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη μεγαλώνει, η χρονική απόσταση ανάμεσα στην απευθείας και την ανακλώμενη άφιξη μικραίνει. Ο βασικός λόγος είναι ότι η διαφορά στο μήκος των αντίστοιχων ακτίνων είναι όλο και πιο μικρό. Με δεδομένο ότι η πηγή που

χρησιμοποιήθηκε ήταν παντοκατευθυντική η διαφορά στην ένταση μεταξύ της απ' ευθείας και της ανακλώμενης άφιξης αποδίδεται στις συνθήκες διάδοσης. Από το Σχήμα 1.4 παρατηρούμε ότι οι καταγραφές γίνονται σε περιβάλλον θορύβου, η παρουσία του οποίου δυσχεραίνει την ανίχνευση των ακουστικών εκπομπών ιδιαίτερα σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την πηγή. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί με τη χρήση του ενεργειακού φίλτρου [2]

$$E(\tau) = \int_{t=0}^T s^2(t + \tau) dt$$

όπου $s(t)$ είναι το καταγραφόμενο σήμα (ακουστική χρονοσειρά) και T είναι η διάρκεια του εκπεμπόμενου παλμού (5msec). Το αποτέλεσμα εφαρμογής του ενεργειακού φίλτρου στις χρονοσειρές του Σχήματος 1.4 φαίνεται στο Σχήμα 1.5.



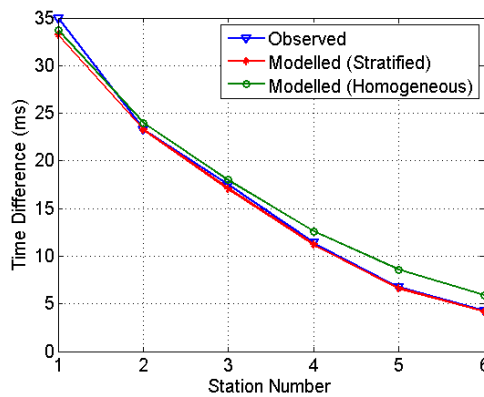
Σχήμα 1.5. Ενεργειακές χρονοσειρές: Αποτέλεσμα της εφαρμογής του ενεργειακού φίλτρου στις χρονοσειρές του Σχήματος 4.

Από τις ακουστικές καταγραφές υπολογίστηκε η διαφορά των χρόνων άφιξης ανάμεσα στις απευθείας και τις ανακλώμενες αφίξεις και αυτή η διαφορά συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα μοντελοποίησης με χρήση θεωρίας ακτίνων [3] που λαμβάνει υπ' όψιν το προφίλ ταχύτητας διάδοσης του ήχου την απόσταση και τα βάθη πηγής και δέκτη. Η σύγκριση μεταξύ μέτρησης και μοντελοποίησης φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Εκτός από τη θεωρία ακτίνων που λαμβάνει υπ' όψιν το προφίλ ταχύτητας και την αντίστοιχη στρωμάτωση (stratification), υπολογίστηκε εναλλακτικά η διαφορά των χρόνων άφιξης υποθέτοντας ομογενές (homogeneous) μέσο. Οι προβλεπόμενες διαφορές χρόνων είναι πολύ κοντά στις μετρημένες, με τα αποτελέσματα του απλοποιημένου υπολογισμού (ομογενές μέσο) να παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες διαφορές, ειδικά στις μεγάλες αποστάσεις. Σημειώνεται ότι η

επίπτωση των σφαλμάτων στην εκτίμηση της απόστασης μεταξύ πηγής και δέκτη στην πρόβλεψη των χρόνων άφιξης είναι μεγαλύτερη στις μικρές αποστάσεις.

2. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια των προκαταρκτικών μετρήσεων μετρήθηκε η εξάρτηση της ταχύτητας του ήχου από προς βάθος καθώς και τα επίπεδα θορύβου περιβάλλοντος στην περιοχή του κόλπου του Ηρακλείου και κατεγράφησαν ακουστικές λήψεις σε διάφορες αποστάσεις από την παλμική ακουστική πηγή. Σε όλες τις λήψεις διακρίνονται σαφώς οι απευθείας και ανακλώμενες στην επιφάνεια αφίξεις. Μοντελοποιήθηκαν οι διαφορές χρόνων μεταξύ απευθείας και ανακλώμενων αφίξεων χρησιμοποιώντας θεωρία ακτίνων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τη μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης του ήχου με το βάθος και την καμπύλωση των ακτίνων που αυτή επάγει. Εναλλακτικά έγινε μοντελοποίηση των χρόνων υποθέτοντας ευθύγραμμη διάδοση. Στην πρώτη περίπτωση (ευθύγραμμη διάδοση) υπάρχουν αποκλίσεις που μεγαλώνουν καθώς το υδρόφωνο απομακρύνεται από την πηγή.



Σταθμός	Απόσταση (m)
1	233
2	346
3	472
4	685
5	1011
6	1477

Σχήμα 1.6. Μετρημένες και προβλεπόμενες διαφορές χρόνων άφιξης.

3. Αναφορές

- [1] E.K. Skarsoulis and M. Kalogerakis «Ray-theoretic localization of an impulsive source in a stratified ocean using two hydrophones» J. Acoust. Soc. Am. **118**, pp. 2934-2943(2005).
- [2] W.S.Burdic *Underwater Acoustic System Analysis* Prentice-Hall, New Jersey (1984).
- [3] L. Brekhovskikh and Y. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, Springer Verlag, New York (1982).