

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΗΧΟΒΟΛΙΣΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΒΥΘΟΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΟΝΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΔΕΣΜΗΣ

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
e-mail: piniotis@survey.ntua.gr

Περίληψη

Ο προσδιορισμός βάθους με χρήση ηχοβολισμού είναι η πιο διαδεδομένη τεχνική παγκοσμίως για την εκτέλεση βυθομετρήσεων. Η λειτουργία των ηχοβολιστικών συστημάτων (echo sounders) βασίζεται στη μέτρηση του χρονικού διαστήματος που μεσολαβεί μεταξύ εκπομπής και λήψης (εξ ανακλάσεως) ενός ηχητικού σήματος και στη λήψη της ανάκλασής του, καθώς και στην εκτίμηση της ταχύτητας του ήχου στο νερό.

Για τον ορθό προσδιορισμό του βάθους είναι απαραίτητο να γίνονται διορθώσεις στις σχετικές μετρήσεις, κυρίως λόγω σφαλμάτων που οφείλονται σε εσφαλμένη εκτίμηση της ταχύτητας του ήχου εξαιτίας μεταβολών στη θερμοκρασία, πίεση και αλατότητα του νερού, καθώς και σε ενδογενή σφάλματα που αφορούν στη λειτουργία του ηχοβολιστικού συστήματος.

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται μια συστηματική καταγραφή των διαδικασιών και προδιαγραφών που αφορούν στη βαθμονόμηση ηχοβολιστικών συστημάτων μονής κατακόρυφης δέσμης. Επιπρόσθετα, εφαρμόζεται η μέθοδος του «τεχνητού βυθού» (bar check calibration) για τη βαθμονόμηση ενός βυθομέτρου στις εγκαταστάσεις των Ναυπηγείων Σκαραμαγκά Α.Ε., με τη χρήση ειδικής διάταξης. Διερευνώνται οι συνθήκες εφαρμογής της μεθόδου και αξιολογούνται τα αποτελέσματά της.

Λέξεις-Κλειδιά: ηχοβολιστικό, βαθμονόμηση, βυθομέτρηση.

Abstract

Water depth estimation based on echo-sounding principles is the most widespread technique used in bathymetric / hydrographic surveying worldwide. The working principle of the method resides on the accurate / reliable measurement of the time interval that necessitates between the transmission of an echo-sound pulse and its reflected reception by the sensor; a procedure that heavily depends on the assessment of the transmission of echo-sound velocity in water.

In this process, in order to ensure successful depth estimation deems necessary to apply various corrections and reductions in the raw measurements due to a number of error sources found in the assessment of echo-sound velocity (ought to variations in water temperature, pressure and salinity), and errors relating to the operational (electromechanical) aspect of the echo-sounder units.

In this study, a detailed review of the specifications and operating procedures dealing with the calibration of single beam echo-sounders is attempted. Also, the “bar check” calibration method is applied for the calibration of a single beam echo-sounder in the graving docks of Hellenic Shipyards S.A. using a special designed apparatus. The field

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

work undertaken is presented and the results obtained from a number of tests are discussed and evaluated.

Keywords: echo sounder, calibration, hydrographic surveying.

1.Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας την τελευταία δεκαετία έχει επιφέρει ευεργετικά αποτελέσματα και στον τομέα των υδρογραφικών αποτυπώσεων. Έτσι, με χρήση ηχοβολιστικών συστημάτων μονής κατακόρυφης δέσμης έχει καταστεί εφικτός ο προσδιορισμός βαθών με ακρίβεια καλύτερη από 0.1m. Ωστόσο, για την επίτευξη ακριβειών τέτοιας τάξης είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη διορθώσεις που σχετίζονται με το περιβάλλον των μετρήσεων, αλλά και με εσωτερικά σφάλματα των οργάνων που χρησιμοποιούνται.

Η βασική σχέση υπολογισμού του βάθους με χρήση ηχοβολιστικού συστήματος είναι η (USACE 2002):

$$D = \frac{1}{2} \cdot v \cdot \Delta t + k + d \quad (1)$$

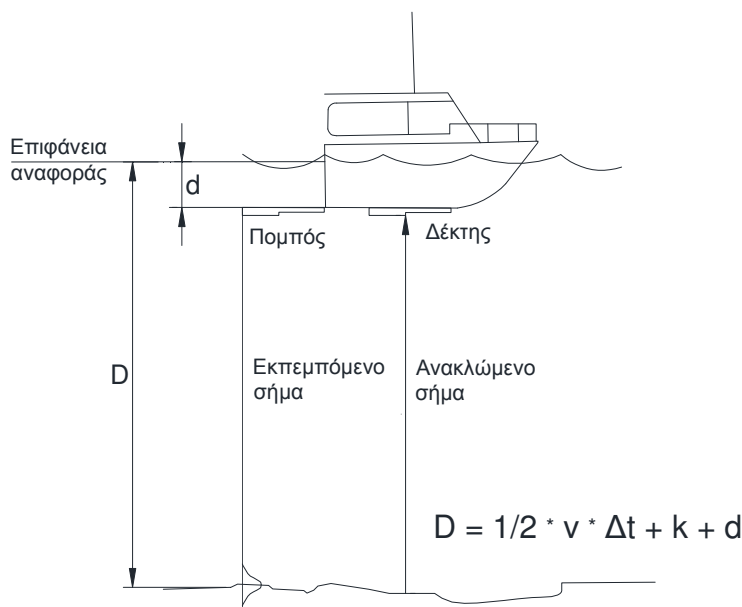
όπου, D : το βάθος από την επιφάνεια αναφοράς έως τον πυθμένα,

v : η μέση ταχύτητα του ήχου στη στήλη νερού διάδοσης του ηχητικού σήματος,

Δt : το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ εκπομπής και λήψης του ηχητικού σήματος,

k : ενδογενές σφάλμα που αφορά στη λειτουργία του ηχοβολιστικού συστήματος,

d : η κατακόρυφη απόσταση του προβολέα του ηχοβολιστικού από την επιφάνεια αναφοράς (σχήμα 1).



Σχήμα 1. Προσδιορισμός βάθους από ηχοβολιστικό σύστημα (Πηγή: USACE 2002)

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Από τις μεταβλητές που συμμετέχουν στη σχέση (1), η ταχύτητα διάδοσης του ήχου (v) μέσα στο νερό αποτελεί το βασικότερο παράγοντα εισαγωγής σφαλμάτων στον ορθό προσδιορισμό του βάθους. Η διαφορά στην ταχύτητα διάδοσης του ήχου εντός ζεστού φρέσκου νερού και κρύου θαλασσινού νερού είναι της τάξης των $\pm 30\text{m/sec}$, η οποία μεταφράζεται σε μεταβολή $\pm 2\%$ στο μετρούμενο βάθος. Έτσι, για ένα βάθος 10m το σφάλμα είναι της τάξης των 20cm (OHMEX Instrumentation 2009). Η τιμή της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο θαλασσινό νερό κυμαίνεται μεταξύ 1387m/sec και 1529m/sec (Alcan et al 2006), και εξαρτάται από:

- τη θερμοκρασία,
- την πίεση,
- την αλατότητα της στήλης νερού διάδοσης του ηχητικού σήματος.

Από τις τρεις αυτές παραμέτρους, η θερμοκρασία είναι καθοριστική, επειδή η τιμή της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό είναι πιο ευαίσθητη στις μεταβολές της. Μεταβολή της θερμοκρασίας κατά ένα βαθμό Κελσίου (1°C) επιφέρει μεταβολή 4.5m/sec στην ταχύτητα διάδοσης του ήχου, ενώ, σε αντιδιαστολή, παρατηρείται μεταβολή της ταχύτητας κατά 1.6m/s και 1.3m/s για αντίστοιχη μεταβολή της πίεσης 10atm και 1‰ της αλατότητας (IHO 2010).

Η θερμοκρασία, η πίεση και η αλατότητα μεταβάλλονται ανάλογα με τη θέση του ηχοβολισμού αλλά και τη χρονική στιγμή της ημέρας κατά την οποία λαμβάνει χώρα η εργασία. Πιο συγκεκριμένα, η θερμοκρασία μεταβάλλεται σημαντικά ιδίως κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας, η πίεση μεταβάλλεται με γνωστό τρόπο συναρτήσει του βάθους, ενώ η αλατότητα δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές, παρά μόνον σε περιπτώσεις παράκτιων περιοχών κοντά σε εκβολές ποταμών (Δουκάκης 1999). Θα πρέπει επίσης να αναφερθεί ότι η ταχύτητα του ήχου μέσα στο νερό είναι δυνατόν να επηρεαστεί από την ύπαρξη σωματιδίων όπως π.χ. ιζημάτων, παρουσία πλαγκτόν κ.α..

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, προκύπτει ότι για τον ορθό προσδιορισμό του βάθους είναι απαραίτητο να γίνονται διορθώσεις στις μετρήσεις των ηχοβολιστικών συστημάτων, κυρίως λόγω των σφαλμάτων που οφείλονται στη εσφαλμένη εκτίμηση της ταχύτητας του ήχου, αλλά και λόγω των συστηματικών σφαλμάτων των αισθητήρων (ποσότητα k στη σχέση (1)) που οφείλονται σε καθυστέρηση του ανακλώμενου σήματος λόγω ηλεκτρομηχανικών ατελειών του συστήματος παρατήρησης. Οι σχετικές διορθώσεις είναι δυνατό να προσδιοριστούν μέσα από διαδικασίες βαθμονόμησης των ηχοβολιστικών συστημάτων. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι μέθοδοι βαθμονόμησης ηχοβολιστικών συστημάτων μονής κατακόρυφης δέσμης.

2. Διεθνείς και εθνικές προδιαγραφές και πρότυπα

Ο Διεθνής Υδρογραφικός Οργανισμός (International Hydrographic Organization - IHO), μεταξύ άλλων έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση, αξιολόγηση και διάδοση αξιόπιστων και αποτελεσματικών τεχνικών βυθομετρικών/υδρογραφικών αποτυπώσεων. Ο IHO έχει εκδόσει και ανανεώνει συνεχώς το «Εγχειρίδιο Υδρογραφίας» (Manual on Hydrography), (IHO 2005) το οποίο αποτελεί ένα επαγγελματικό οδηγό για όσους δραστηριοποιούνται στο πεδίο των υδρογραφικών αποτυπώσεων. Στο υπόψη εγχειρίδιο γίνεται ειδική μνεία στη βαθμονόμηση ηχοβολιστικών συστημάτων μονής κατακόρυφης δέσμης, η οποία αναφέρεται ως «εργασία, η οποία συνίσταται στη ρύθμιση του ηχοβολιστικού, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ορθή μέτρηση του βάθους» και επιπρόσθετα αναλύονται οι μέθοδοι με

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

τις οποίες επιτυγχάνεται. Οι περισσότεροι υδρογραφικοί οργανισμοί κρατών-μελών του ΙΗΟ έχουν συμπεριλάβει τη βαθμονόμηση ηχοβολιστικών συστημάτων στις προδιαγραφές που έχουν θεσπίσει για τη διενέργεια υδρογραφικών αποτυπώσεων. Πιο συγκεκριμένα, το Σώμα Μηχανικού των ενόπλων δυνάμεων των ΗΠΑ (United States Army Corps of Engineers-USACE) έχει εκδόσει εγχειρίδιο (USACE 2002) για υδρογραφικές αποτυπώσεις, στο οποίο αναλύονται οι διαδικασίες βαθμονόμησης βυθομέτρων μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης. Στο εγχειρίδιο αυτό τονίζεται ότι «η βαθμονόμηση ηχοβολιστικών συστημάτων είναι απολύτως κρίσιμη και επιβεβλημένη για τη διατήρηση του ελέγχου ποιότητας των μετρήσεων βάθους».

Η υπηρεσία διαχείρισης ωκεανών και ατμόσφαιρας των ΗΠΑ (National Oceanic and Atmospheric Administration-NOAA) και ειδικότερα η υπηρεσία ωκεανών (National Ocean Service-NOS) εξέδωσε (NOAA 2011), τον Απρίλιο του 2011, τις προδιαγραφές και τα παραδοτέα (NOS Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables) που διέπουν τις υδρογραφικές αποτυπώσεις που διεκπεραιώνουν οι ως άνω υπηρεσίες, καθώς και οι συμβαλλόμενοι με αυτές οργανισμοί. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές του NOS, θα πρέπει να γίνονται περιοδικά «έλεγχοι αξιοπιστίας» των μετρήσεών τους. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην εκτίμηση της ταχύτητας του ήχου στο νερό και στη συχνότητα με την οποία θα πρέπει να ελέγχεται.

Ο διεθνής οργανισμός ASTM International, παλαιότερα γνωστός ως ASTM (American Society for Testing and Materials), είναι παγκοσμίως καταξιωμένος για την ανάπτυξη διεθνών προτύπων εθελοντικής ομοφωνίας (ASTM 2011). Τα πρότυπα αυτά προκύπτουν από διαδικασίες κοινής επαγγελματικής πρακτικής. Στο πρότυπο D6318-2003 του ASTM International (όπως ανανεώθηκε το 2008), όπου αναλύονται οι συνθήκες και οι διαδικασίες βαθμονόμησης ενός βυθομέτρου με τη μέθοδο του μετρητή ταχυτήτων και τη μέθοδο του «τεχνητού βυθού», η βαθμονόμηση των ηχοβολιστικών συστημάτων κρίνεται αναγκαία για τον έλεγχο της ποιότητας των μετρήσεων βάθους. Την τελευταία μέθοδο έχει καθιερώσει το Βρετανικό Υδρογραφικό Γραφείο (United Kingdom Hydrographic Office) ως μέθοδο ακριβούς βαθμονόμησης των ηχοβολιστικών μονής κατακόρυφης δέσμης για βάθη έως 40m, όπως αναλύεται στο εγχειρίδιο υδρογραφικών αποτυπώσεων (Admiralty Manual of Hydrographic Surveying, Volume II) που έχει εκδώσει από το 1969. Επίσης, η κυβερνητική υπηρεσία LINZ (Land Information New Zealand), με το εθνικό πρότυπο HYSPEC για τις υδρογραφικές αποτυπώσεις στη Νέα Ζηλανδία, συνιστά την ακριβή βαθμονόμηση των ηχοβολιστικών συστημάτων πριν τη χρήση τους, με τη μέθοδο του «τεχνητού βυθού». Αν η εφαρμογή της μεθόδου είναι αδύνατη τότε προτείνονται εναλλακτικές μέθοδοι.

Τέλος, η Υδρογραφική Υπηρεσία του Πολεμικού Ναυτικού, δεν έχει συστήσει κανονισμούς διενέργειας βυθομετρικών αποτυπώσεων, αλλά ακολουθεί τις οδηγίες του ΙΗΟ.

3. Μέθοδοι βαθμονόμησης ηχοβολιστικών συστημάτων μονής κατακόρυφης δέσμης

Οι πλέον διαδεδομένες μέθοδοι βαθμονόμησης που εφαρμόζονται σήμερα σε εργασίες βυθομετρήσεων ηχοβολιστικών συστημάτων μονής κατακόρυφης δέσμης είναι οι ακόλουθες:

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

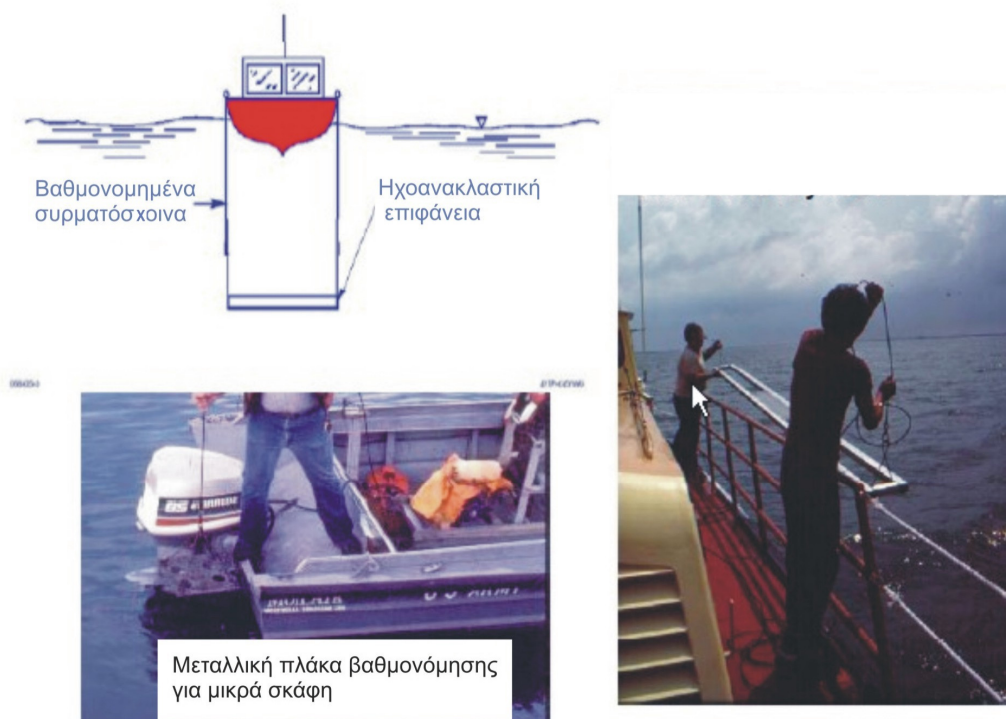
4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

3.1 Μέθοδος «τεχνητού βυθού» (bar check calibration)

Η μέθοδος του τεχνητού βυθού είναι η πλέον διαδεδομένη, εύκολα υλοποιήσιμη και οικονομική μέθοδος βαθμονόμησης ηχοβολιστικών συστημάτων. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή τοποθετείται ακριβώς κάτω από τον προβολέα του ηχοβολιστικού συστήματος μια ηχοανακλαστική επιφάνεια (συνήθως ορθογώνια μεταλλική πλάκα) με τη βοήθεια συρματόσχοινου ή αλυσίδας που είναι βαθμονομημένη (Εικόνα 1). Επιφάνειες που χρησιμοποιούνται σε βάθη μεγαλύτερα των 10m θα πρέπει να έχουν διαστάσεις τουλάχιστον 0.23x0.23m και το βάρος τους θα πρέπει να έχει επιλεχθεί ανάλογα με τα ρεύματα που εμφανίζονται στην περιοχή των υδρογραφικών αποτυπώσεων (ASTM International 2008).



Εικόνα 1. Μέθοδος του «τεχνητού βυθού» (πηγή:USACE 2002)

Η ηχοανακλαστική επιφάνεια βυθίζεται από την επιφάνεια του νερού με συγκεκριμένο βήμα και ενώ κάθε φορά καταγράφεται το αντίστοιχο βάθος όπως υπολογίζεται από το ηχοβολιστικό σύστημα.

Αν D_c είναι το γνωστό βάθος από τη βαθμονομημένη αλυσίδα και D_e το βάθος που υπολογίζεται από το ηχοβολιστικό σύστημα με χρήση μιας μέσης τιμής ταχύτητας του ήχου στο νερό (συνήθως 1500m/sec), οι παρατηρούμενες διαφορές αντιπροσωπεύουν τις διορθώσεις που πρέπει να εφαρμοστούν σε όλα τα μετρημένα από το ηχοβολιστικό σύστημα βάθη (USACE 2002). Με τη μέθοδο του «τεχνητού βυθού» επιτυγχάνεται η διόρθωση των μετρήσεων βάρους λόγω:

- σφαλμάτων στην εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό,
- εσωτερικών συστηματικών σφαλμάτων των ηχοβολιστικών,
- σφαλμάτων στην κατακόρυφη απόσταση του προβολέα των ηχοβολιστικών συσκευών από την επιφάνεια αναφοράς.

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

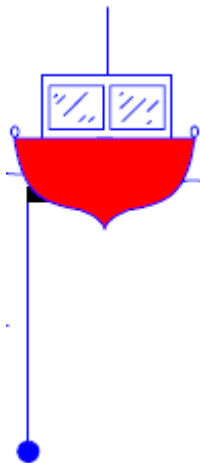
Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου επικρατούν ρεύματα και ακραίες καιρικές συνθήκες, καθώς η μεταλλική επιφάνεια παρασύρεται από αυτά και έτσι δεν μπορεί να τοποθετηθεί κατακόρυφα κάτω από το ηχοβολιστικό σύστημα. Η μέθοδος του «τεχνητού βυθού» συστήνεται για βάθη έως 40m. Μία παραλλαγή της μεθόδου του «τεχνητού βυθού» είναι εκείνη κατά την οποία αντί μεταλλικής πλάκας χρησιμοποιείται μία σφαίρα (toss ball) η οποία αναρτάται από αλυσίδα ή συρματόσχοινο από το εσωτερικό του σκάφους και καταλήγει στο κέντρο της (σχήμα 2).



Σχήμα 2. Παραλλαγή της μεθόδου του «τεχνητού βυθού» (toss ball check) (πηγή:USACE 2002)

3.1.1 Μεθοδολογίες διόρθωσης των μετρήσεων βάθους σε πραγματικό χρόνο

Η διόρθωση των μετρήσεων μπορεί να γίνει είτε σε πραγματικό χρόνο είτε εκ των υστέρων. Για τη διόρθωση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούνται δύο μεθοδολογίες (USACE 2002). Κατά την πρώτη μεθοδολογία, οι μετρήσεις καθίστανται ορθές, όταν μετά από διαδοχικές μεταβολές της τιμής της κατακόρυφης απόστασης του προβολέα του ηχοβολιστικού από την επιφάνεια αναφοράς και της τιμής της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό (στο πρόγραμμα ελέγχου του ηχοβολιστικού), το μετρημένο βάθος ισούται με το αντίστοιχο γνωστό.

Κατά τη δεύτερη μεθοδολογία, η ηχοανακλαστική επιφάνεια βυθίζεται κοντά στο μέγιστο βάθος της εφαρμογής και στο πρόγραμμα ελέγχου του ηχοβολιστικού μεταβάλλεται διαδοχικά μόνο η τιμή της ταχύτητας του ήχου στο νερό, ώσπου το καταγεγραμμένο βάθος από το ηχοβολιστικό σύστημα να ισούται με το γνωστό βάθος. Στη συνέχεια, η ηχοανακλαστική επιφάνεια ανυψώνεται προς την επιφάνεια με γνωστό βήμα και καταγράφονται οι αντίστοιχες μετρήσεις. Η τεχνική αυτή ελαχιστοποιεί τα σφάλματα μόνο κοντά στο μέγιστο βάθος της εφαρμογής. Τα εναπομείναντα σφάλματα για μικρότερα βάθη θα πρέπει να διορθωθούν μετά από επεξεργασία των μετρήσεων.

Για περιπτώσεις εφαρμογών σε πραγματικό χρόνο οι προηγούμενες διαδικασίες εφαρμόζονται μόνο κατά τον αρχικό έλεγχο, ο οποίος λαμβάνει χώρα στην αρχή κάθε ημέρας εργασίας.

3.1.2 Μεθοδολογία εκ των υστέρων διόρθωσης των μετρήσεων βάθους

Για τη διόρθωση των μετρήσεων μετά από επεξεργασία χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση (USACE 2002):

$$D_c = \left(\frac{\text{bar}_i - \text{bar}_{i+1}}{\text{rec}_i - \text{rec}_{i+1}} \right) \cdot (D_0 - \text{rec}_i) + \text{bar}_i \quad (2)$$

όπου,

D_c : το διορθωμένο βάθος,

bar_i : το γνωστό βάθος στο σημείο i ,

bar_{i+1} : το γνωστό βάθος στο σημείο $i+1$,

rec_i : το καταγεγραμμένο από το ηχοβολιστικό σύστημα βάθος στο σημείο i ,

rec_{i+1} : το καταγεγραμμένο από το ηχοβολιστικό σύστημα βάθος στο σημείο $i+1$,

D_0 : το προς διόρθωση βάθος,

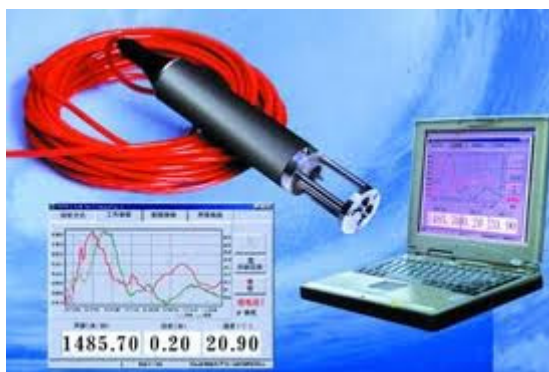
$i, i+1$: δύο διαδοχικά σημεία βαθμονόμησης, με $\text{rec}_i \geq D_0 \leq \text{rec}_{i+1}$.

Με τον τρόπο αυτό ένα καταγεγραμμένο βάθος από το ηχοβολιστικό σύστημα διορθώνεται χρησιμοποιώντας τις πλησιέστερες σε αυτό τιμές βαθμονόμησης.

Η σχέση (2) είναι δυνατό να εφαρμοστεί και σε πραγματικό χρόνο στις πρωτογενείς μετρήσεις ενός ηχοβολιστικού συστήματος, αν χρησιμοποιηθεί ένα αυτοματοποιημένο σύστημα συλλογής δεδομένων.

3.2 Μέθοδος βαθμονόμησης με μετρητή ταχύτητας του ήχου στο νερό (velocity probe calibration)

Κατά τη μέθοδο αυτή η ταχύτητα του ήχου στο νερό προσδιορίζεται άμεσα σε διάφορα βάθη με τη βοήθεια ειδικής συσκευής - μετρητή ταχύτητας ήχου στο νερό (velocity probe ή sound velocity profiler). Ο μετρητής ταχύτητας του ήχου αποτελείται από μια υπολογιστική μονάδα που τοποθετείται στο σκάφος, από ένα βαθμονομημένο ανά 1m καλώδιο και από τη μετρητική διάταξη που βρίσκεται στο άκρο του καλωδίου (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Μετρητής ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό (πηγή: <http://hytrade.en.made-in-china.com>)

Η μετρητική διάταξη αποτελείται από ένα αισθητήρα πίεσης, για τη μέτρηση του βάθους, και από ένα ηχητικό πομπό και μια ανακλαστική επιφάνεια, τα οποία βρίσκονται σε Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

συγκεκριμένη και γνωστή απόσταση (d) μεταξύ τους. Η ταχύτητα του ήχου υπολογίζεται από τη βασική σχέση $c = 2 \cdot \frac{d}{\Delta t}$, με Δt το χρόνο διάδοσης του ηχητικού σήματος. Η μέθοδος αυτή δίνει ως αποτέλεσμα, είτε παρέχει απευθείας τη μέση τιμή της ταχύτητας του ήχου στο νερό είτε τις τιμές της ταχύτητας διάδοσης του ήχου για συγκεκριμένα διαστήματα βάθους. Συνεπώς, με την εφαρμογή της μεθόδου προσδιορίζονται και διορθώνονται τα σφάλματα που οφείλονται μόνο στη λανθασμένη εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι για μετρήσεις ακριβείας ο μετρητής ταχύτητας πρέπει να βαθμονομείται αρχικά και περιοδικά με τη βοήθεια της μεθόδου του «τεχνητού βυθού» (ASTM International 2008).

3.3 Μέθοδος βαθμονόμησης με μετρητή θερμοκρασίας, πίεσης και αλατότητας (CTD probe)

Κατά τη μέθοδο αυτή, προσδιορίζονται οι τιμές της θερμοκρασίας, πίεσης και αλατότητας σε διάφορα γνωστά διαστήματα βάθους με τη βοήθεια ειδικής συσκευής (CTD probe). Η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό προσδιορίζεται έμμεσα, με την χρήση των προηγούμενων μεταβλητών μέσω κατάλληλων (ανάλογα με το βάθος) εμπειρικών τύπων. Οι πλέον διαδεδομένοι είναι οι εμπειρικοί τύποι των Wilson (1960), Del Grosso (1974), Medwin (1975), Chen and Millero (1977) και Mackenzie (1981) (Δουκάκης 1999, Alcan et al 2006). Με την εφαρμογή αυτής της τεχνικής προσδιορίζονται και διορθώνονται τα σφάλματα που οφείλονται μόνο στην εσφαλμένη εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό.

3.4 Μέθοδος βαθμονόμησης με χρήση βαθυθερμογράφου (bathythermograph)

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, μετράται η θερμοκρασία ως συνάρτηση του βάθους, με τη χρήση ειδικής συσκευής, γνωστής ως βαθυθερμογράφος. Στη συνέχεια, η συσκευή μετατρέπει τις σχετικές μετρήσεις σε ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό, με την υπόθεση ότι οι μεταβολές της αλατότητας είναι γνωστές ή ανύπαρκτες (De Jong et al 2002). Εξαιτίας αυτού, τα αποτελέσματα του βαθυθερμογράφου είναι ακριβή σε μεγάλα βάθη, μακριά από ακτές. Με την εφαρμογή της μεθόδου προσδιορίζονται και διορθώνονται τα σφάλματα που οφείλονται μόνο στην εσφαλμένη εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό.

4. Συνθήκες εφαρμογής βαθμονόμησης

4.1 Τοποθεσία βαθμονόμησης

Η βαθμονόμηση ενός ηχοβολιστικού συστήματος θα πρέπει να λαμβάνει χώρα στο πεδίο των εργασιών ηχοβολισμού, έτσι ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές των παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να εκτελείται σε προστατευμένες από τον καιρό περιοχές. Σε περιπτώσεις ακραίων καιρικών συνθηκών μπορεί να χρησιμοποιηθεί μετρητής ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό για τη διενέργεια της βαθμονόμησης. Ωστόσο, όταν

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

απαιτείται αυξημένη ακρίβεια αυτό θα πρέπει να γίνεται σε συνδυασμό με τη μέθοδο του τεχνητού βυθού, σε προστατευμένες από τον καιρό περιοχές (USACE 2002).

4.2 Συχνότητα βαθμονόμησης

Ο Διεθνής Υδρογραφικός Οργανισμός (IHO), στο «Εγχειρίδιο Υδρογραφίας» (Manual on Hydrography) (IHO2005), συνιστά μία βαθμονόμηση κατά την έναρξη των εργασιών βυθομέτρησης. Σύμφωνα με τη USACE, η διαδικασία βαθμονόμησης θα πρέπει να γίνεται κατ'ελάχιστο δύο φορές στην περιοχή της εφαρμογής, πριν την έναρξη των εργασιών βυθομέτρησης και μετά το πέρας τους. Ωστόσο, σε περίπτωση ταχείας μεταβολής των συνθηκών που καθορίζουν την ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό συνίσταται η διενέργεια περισσότερων από δύο σειρές βαθμονόμησης. Επίσης, η κυβερνητική υπηρεσία LINZ (Land Information New Zealand), με το εθνικό πρότυπο HYSPEC για τις υδρογραφικές αποτυπώσεις στη Νέα Ζηλανδία, συνιστά τη διενέργεια δύο βαθμονομήσεων ημερησίως, πριν και με την ολοκλήρωση των εργασιών βυθομέτρησης. Το ASTM International (στο πρότυπο D6318-03) (ASTM International 2008) συνιστά τρεις βαθμονομήσεις καθημερινά (με την έναρξη, στο μέσον και στο τέλος της ημέρας βυθομετρήσεων) σε περιοχές αγνώστων συνθηκών αλατότητας και θερμοκρασίας, οι οποίες μπορούν να μειωθούν σε μία, πριν τη διενέργεια των βυθομετρήσεων, για περιοχές σταθερών συνθηκών.

Σε κάθε περίπτωση, εάν μεταφερθούν οι εργασίες βυθομετρήσεων σε νέα περιοχή, θα πρέπει να γίνεται εκ νέου βαθμονόμηση του εξοπλισμού.

4.3 Κατάσταση λειτουργίας οργάνου βαθμονόμησης

Ανεξάρτητα από τη μέθοδο βαθμονόμησης, ο σχετικός εξοπλισμός θα πρέπει να βρίσκεται σε λειτουργία για ικανό χρονικό διάστημα (τουλάχιστον 10min) πριν ξεκινήσουν οι μετρήσεις βαθμονόμησης (Land Information New Zealand 2008). Αυτό απαιτείται δεδομένου ότι τα πρώτα λεπτά λειτουργίας των οργάνων είναι πιθανόν να παρατηρηθούν αστάθειες στις μετρήσεις τους και κατά συνέπεια να υπολογιστούν εσφαλμένες διορθώσεις κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης.

5. Εφαρμογή της μεθόδου «τεχνητού βυθού» με χρήση ειδικής πρότυπης κατασκευής

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται η μέθοδος «τεχνητού βυθού» (bar check calibration) για τη βαθμονόμηση του βυθομέτρου SonarMite BT v3.0 της εταιρείας OHMEX. Ο υπόψη αισθητήρας αποτελείται από ένα πομποδέκτη ηχητικών παλμών και από μια υπολογιστική μονάδα, που συνδέονται μεταξύ τους ενσύρματα. Ο εξοπλισμός είναι βυθόμετρο μονής κατακόρυφης δέσμης ανοίγματος 8° - 10° , με συχνότητα λειτουργίας 235 kHz και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για προσδιορισμό βαθών έως 75m, επιτυγχάνοντας ακρίβεια προσδιορισμού βάθους $\pm 0.025m$ (RMS).

Πρέπει να σημειωθεί ότι στο εγχειρίδιο χρήσης του βυθομέτρου γίνεται ιδιαίτερη μνεία στη βαθμονόμησή του. Ειδικότερα, αναφέρεται ότι στο SonarMite BT v3.0 ως *a-priori* τιμή της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό συνίσταται η 1500m/sec. Η τιμή αυτή μπορεί να διαφέρει από την πραγματική, για λόγους που ήδη αναφέρθηκαν, οπότε, ο χρήστης θα πρέπει να εκτελέσει μετρήσεις ταχύτητας του ήχου στο νερό με ειδική

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

συσκευή ή να χρησιμοποιήσει το βυθόμετρο στατικά σε γνωστό βάθος πάνω από μία επίπεδη επιφάνεια και να συγκρίνει την μετρούμενη με την πραγματική τιμή του βάθους (OHMEX 2009).

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση του βυθομέτρου SonarMite BT v3.0 με τη μέθοδο του «τεχνητού βυθού». Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε ειδική διάταξη (Εικόνα 3), η οποία αποτελείται από ένα σπονδυλωτό στυλεό από ανοξείδωτο ατσάλι, συνολικού μήκους 10m, στον οποίο προσαρτήθηκε κατάλληλα πλαστική βάση στήριξης του πομποδέκτη ηχητικών παλμών του βυθομέτρου, καθώς και μία μεταλλική πλάκα διαστάσεων 0.50m x 0.50m και πάχους 3mm. Η τελευταία παρέχει τη δυνατότητα κατακόρυφης μετατόπισης και στήριξής της κατά μήκος του στυλεού, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορεί να τοποθετείται σε γνωστές προκαθορισμένες αποστάσεις από τον πομποδέκτη ηχητικών παλμών του βυθομέτρου. Ως βήμα μετατόπισης της μεταλλικής επιφάνειας επιλέγεται το 1m, και ο ακριβής καθορισμός των θέσεων της επί του στυλεού, δηλαδή η βαθμονόμηση του στυλεού, επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ηλεκτρονικού αποστασιομέτρου (Leica Disto D8).

Το πλεονέκτημα της ειδικής διάταξης έγκειται στο ότι οι συνθήκες βαθμονόμησης καθίστανται απόλυτα ελεγχόμενες, δεδομένου ότι σε κάθε περίπτωση ο πομποδέκτης του βυθομέτρου και η μεταλλική επιφάνεια βρίσκονται στον ίδιο άξονα, σε γνωστή απόσταση, ακρίβειας καλύτερης από $\pm 5\text{mm}$. Συνεπώς, με τη χρήση της αποφεύγονται τα σφάλματα που υπεισέρχονται στις μετρήσεις, κατά την εφαρμογή της κλασσικής μεθόδου του «τεχνητού βυθού», λόγω ανεπιθύμητης μεταβολής της απόστασης βυθομέτρου-ηχοανακλαστικής επιφάνειας, που οφείλεται σε μετακινήσεις του προσωπικού εκτέλεσης της βαθμονόμησης, εντός του σκάφους που χρησιμοποιείται.



Εικόνα 3. Ειδική διάταξη βαθμονόμησης (αριστερά) και χρήση της κατά την εφαρμογή της μεθόδου του «τεχνητού βυθού» (δεξιά)

Η μέθοδος του «τεχνητού βυθού» με χρήση της ειδικής διάταξης εφαρμόστηκε εντός υπαίθριας δεξαμενής συντήρησης πλοίων, βάθους 10m, στις εγκαταστάσεις των

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Ναυπηγείων Σκαρμαγκά Α.Ε.. Για την υλοποίησή της εργάστηκαν δύο άτομα, τα οποία επέβαιναν σε ξύλινη βάρκα. Για τον ευκολότερο χειρισμό της, η ειδική διάταξη αναρτήθηκε σε γερανό που χρησιμοποιείται σε διαδικασίες επισκευής πλοίων.

Για τη βαθμονόμηση του βυθομέτρου έγιναν δύο σειρές μετρήσεων. Στην πρώτη σειρά η μεταλλική πλάκα τοποθετήθηκε σε βάθη από 1m έως 7m, με βήμα αύξησης 1m, οπότε, για κάθε τιμή βάθους συλλέχθηκαν αρκετές (>50) μετρήσεις. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα 1^{ης} σειράς μετρήσεων βαθμονόμησης

Ορθό βάθος (m)	Μετρημένο βάθος (Μ.Ο. μετρήσεων) (m)	Τυπικό σφάλμα (mm)	Ορθό-Μετρημένο Βάθος (m)
1	1.02	0	-0.02
2	2.01	± 1	-0.01
3	3.01	0	-0.01
4	4.02	0	-0.02
5	5.02	± 1	-0.02
6	6.03	± 1	-0.03
7	7.02	0	-0.02

Από τη στήλη των τυπικών σφαλμάτων των μετρήσεων, προκύπτει ότι το βυθόμετρο που βαθμονομήθηκε παρέχει υψηλή επαναληπτικότητα. Όσον αφορά την ορθότητα των μετρήσεων, από τη στήλη των διαφορών ορθού και μετρημένου βάθους, παρατηρείται ένα σταθερό σφάλμα της τάξης των 2 ± 1 cm. Το σφάλμα αυτό εκτιμάται πως οφείλεται στο εσωτερικό σφάλμα του αισθητήρα, δηλαδή στις εντός του ηχοβολιστικού συστήματος μηχανικές ή ηλεκτρικές καθυστερήσεις του ανακλώμενου από τη μεταλλική πλάκα ηχητικού σήματος και όχι σε μεταβολή της ταχύτητας του ήχου στο νερό, καθώς ένα τέτοιο φαινόμενο θα είχε ως αποτέλεσμα αυξανόμενες τιμές διαφορών μεταξύ γνωστών και μετρημένων βαθών με την αύξηση του βάθους (USACE 2002). Συνεπώς, για βάθη έως 7m, υπό τις επικρατούσες συνθήκες στην υδάτινη στήλη, προκύπτει ότι κατά τη συλλογή των μετρήσεων, δεν μεταβλήθηκε η ταχύτητα διάδοσης του ήχου στο νερό.

Προκειμένου να αναδειχθεί η επίδραση της μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στον προσδιορισμό βάθους, πραγματοποιήθηκε δεύτερη σειρά μετρήσεων σε μεγαλύτερα βάθη (από 6m έως 9m), με βήμα αύξησης 1m και συλλέχθηκαν μετρήσεις βυθομέτρου (>50) για κάθε τιμή βάθους. Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν (βλ. Πίνακα 2), παρατηρείται ότι για βάθη 6m και 7m, η διαφορά μεταξύ ορθού και μετρημένου βάθους είναι σταθερή, της τάξης των 2cm, ενώ για τα βάθη 8m και 9m, η διαφορά αυτή αυξάνεται, με μεγαλύτερη εκείνη στα 9m. Η διαφορά αυτή των 2cm εκτιμάται ότι οφείλεται στο εσωτερικό σφάλμα του βυθομέτρου, ενώ οι αυξανόμενες διαφορές για τα βάθη των 8m και 9m οφείλονται στο συνδυασμό του εσωτερικού σφάλματος του βυθομέτρου και στο σφάλμα λόγω μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό, η οποία αυξάνεται με την αύξηση του βάθους.

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών

Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας

Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου

Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Πίνακας 2. Αποτελέσματα 2^{ης} σειράς μετρήσεων βαθμονόμησης

Ορθό βάθος (m)	Μετρημένο βάθος (Μ.Ο. μετρήσεων) (m)	Τυπικό σφάλμα (mm)	Ορθό-Μετρημένο Βάθος (m)
6	5.98	0	0.02
7	6.98	±2	0.02
8	7.96	0	0.04
9	8.95	0	0.05

6. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή έγινε μια προσπάθεια προσέγγισης του προβλήματος βαθμονόμησης βυθομέτρων (ηχοβολιστικών) που χρησιμοποιούνται σε βυθομετρικές/υδρογραφικές αποτυπώσεις. Αρχικά καταγράφηκαν οι ισχύουσες προδιαγραφές βαθμονόμησης βυθομέτρων. Από την καταγραφή αυτή διαπιστώνεται ότι:

- είναι απαραίτητη η βαθμονόμηση τέτοιων συστημάτων, ώστε να προσδιορίζονται με αξιοπιστία τα μετρούμενα μεγέθη,
- η βαθμονόμηση πρέπει να πραγματοποιείται τουλάχιστον δύο φορές ημερησίως, πριν την έναρξη και μετά το πέρας των εργασιών βυθομέτρησης,
- η πιο ακριβής μέθοδος βαθμονόμησης για βάθη έως 30m είναι αυτή του «τεχνητού βυθού»,

επίσης, από την εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι:

- η ειδική διάταξη που δημιουργήθηκε λειτούργησε αποτελεσματικά, στη βαθμονόμηση του συγκεκριμένου βυθομέτρου,
- το βυθόμετρο που βαθμονομήθηκε παρέχει υψηλή επαναληπτικότητα μετρήσεων, όπως προέκυψε από τις δύο σειρές μετρήσεων (πειράματα),
- Χρειάζεται να επεκταθεί η έρευνα και στον ανεξάρτητο προσδιορισμό άλλων παραμέτρων (π.χ. αλατότητα, κ.λπ.)
- Μια επόμενη σειρά μετρήσεων σε μεγαλύτερα βάθη είναι απαραίτητη για την επιβεβαίωση της πληρότητας της εφαρμοζόμενης μεθόδου.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν τη Διοίκηση των Ναυπηγείων Σκαραμαγκά Α.Ε. και ιδιαίτερα τους κ.Ιωακείμ Καταρτζή, Διευθυντή Συνεργείων Ναυπηγικής Παραγωγής, κ.Δημήτριο Μηλιώνη, Διευθυντή Παραγωγής Επισκευών Πολεμικών Πλοίων και κ.Θεόδωρο Ξενάκη, Αγρονόμο και Τοπογράφο Μηχανικό των Ναυπηγείων, για την παροχή του χώρου διεξαγωγής των μετρήσεων, εξοπλισμού υποδομής, καθώς και της βοήθειας για την ολοκλήρωση της εφαρμογής της παρούσας εργασίας.

Βιβλιογραφία

Δουκάκης Ε., Θαλάσσια Γεωδαισία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 1999, Αθήνα.

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012

Alkan Reha Metin, Kalkan Yunus, Aykut N. Onur, Sound Velocity Determination with Empirical Formulas & Bar Check, XXIII FIG Congress, October 8-13, 2006, Munich, Germany.

ASTM International, D6318- Practice for Calibrating a Fathometer Using a Bar Check Method, reapproved 2008, USA.

De Jong C.D., Lachapelle G., Skone S., Elema I.A., Hydrography, 2002, Delft University Press, Netherlands.

International Hydrographic Organization, IHO Standards for Hydrographic Surveys, Special Publication No 44, 5th Edition, February 2008, International Hydrographic Bureau, Monaco.

International Hydrographic Organization, Manual on Hydrography, Publication C-13", 1st Edition, May 2005, International Hydrographic Bureau, Monaco.

Land Information New Zealand, Customer Services, Contract Specifications for Hydrographic Surveys, Version 1.1, 8 Αυγούστου 2008, New Zealand.

Maritime Safety Authority of New Zealand, Guidelines of Good Practice for Hydrographic Surveys in New Zealand Ports & Harbours, 2004, New Zealand.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), U.S. Department of Commerce, NOS Hydrographic Surveys Specifications and Deliverables, April 2011, U.S. Department of Commerce.

OHMEX Instrumentation, SonarMite v3.0-Portable Bluetooth Echo Sounder Manual, 2009, UK.

United Kingdom Hydrographic Office, Extracts from the Mariner's Handbook, 9th edition, December 2009, UK.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), Department of the Army, Engineer Manuals-Hydrographic Surveying - Chapter 9.Single Beam Acoustic Depth Measurement Techniques, 2002, Washington DC.

Γ.Πηνιώτης, Γ.Πανταζής, Β.Γκίκας, Αθ.Μπίμης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο – Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
Βαθμονόμηση ηχοβολιστικού συστήματος βυθομέτρησης μονής κατακόρυφης ηχητικής δέσμης

4^ο Τακτικό Εθνικό Συνέδριο Μετρολογίας
Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου
Αθήνα, 3-4 Φεβρουαρίου 2012
