

# Πολυφασματική Βαθυμετρία με Συνδυασμό Δεδομένων από Ηχοβόλιση και Εντοπισμό με το Σύστημα GPS

**Ε. ΖΗΔΡΟΥ**  
Διπλ. ATM Α.Π.Θ.

**Ζ. ΚΑΡΚΑΝΗ**  
Διπλ. ATM Α.Π.Θ.

**Μ. ΜΑΤΖΙΡΗ**  
Διπλ. ATM Α.Π.Θ.

**Μ. ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ**  
Αναπλ. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.

**Η. Ν. ΤΖΙΑΒΟΣ**  
Καθηγητής Α.Π.Θ.

**Μ. ΤΣΑΚΙΡΗ-ΣΤΡΑΤΗ**  
Επίκ. Καθηγήτρια Α.Π.Θ.

**Σ. ΧΑΤΖΗΓΑΚΗ**  
Διπλ. ATM Α.Π.Θ.

## Περίληψη

Στην εργασία αυτή διερευνήθηκε και εκτιμήθηκε η δυνατότητα μέτρησης του βάθους ρηχών θαλασσιών νερών με τη χρήση πολυφασματικών δεδομένων από εικόνες των δορυφόρων LANDSAT και SPOT, σε συνδυασμό με βαθυμετρικά δεδομένα προερχόμενα από ηχοβόλιση και GPS. Χρησιμοποιήθηκαν πολυφασματικές εικόνες της θαλάσσιας περιοχής του κόλπου της Νέας Μηχανιώνας του Νομού Θεσσαλονίκης. Για την ίδια περιοχή προηγήθηκε η αποτύπωση του θαλάσσιου πυθμένα με τη βοήθεια GPS για τον προσδιορισμό της οριζόντιας θέσης και ηχοβολισμού για τον προσδιορισμό του βάθους. Χρησιμοποιήθηκε πολυφασματικό βαθυμετρικό μοντέλο, οι βαθμονομήσεις του οποίου προέκυψαν από δεδομένα των δύο εικόνων και βασίστηκαν σε βαθυμετρικά σημεία του ηχοβολισμού. Ο έλεγχος των βαθμονομήσεων έγινε με πρόβλεψη βαθών σε θέσεις ηχοβολιστικών σημείων, τα οποία δεν μετείχαν σε αυτές. Τέλος, εκτιμήθηκε η αποτελεσματικότητα των εικόνων SPOT και LANDSAT σε βαθυμετρικές εφαρμογές.

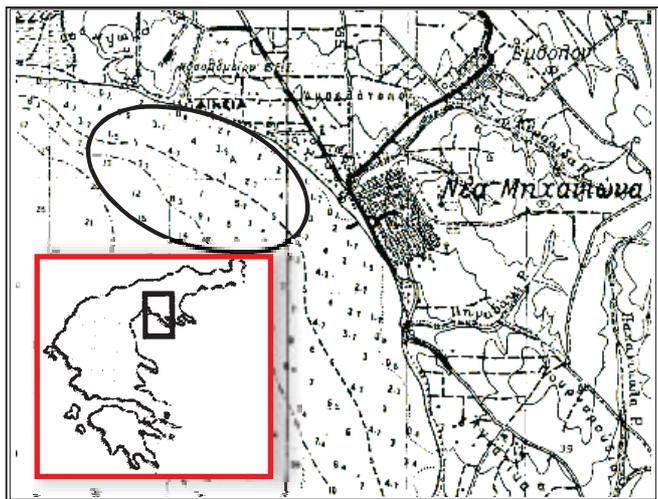
## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανάγκη για τη γρήγορη δημιουργία και την ενημέρωση ναυτικών χαρτών για περιοχές ρηχών υδάτων οδήγησε, από τα τέλη της δεκαετίας του 1960, ερευνητές του Ινστιτούτου Περιβαλλοντικών Μελετών του Michigan [βλ. 12, 13, 14, 15, 24, 25, 26, 29, 30] στην ανάπτυξη βαθυμετρικής θεωρίας με τηλεπισκόπηση. Η θεωρία αυτή βασίστηκε στις οπτικές ιδιότητες της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε σχέση με το βυθό και με το σώμα του νερού, το οποίο θεωρήθηκε διαυγές [βλ. και 3, 31]. Στις επόμενες δεκαετίες πολλοί ερευνητές εφήρμοσαν το θεωρητικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας τηλεπισκοπικά πολυφασματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές πολυφασματικές εικόνες MSS [2, 4], TM [4, 19, 20, 28, 29, 30] και SPOT [5] δορυφορικές παγχρωματικές εικόνες SPOT [5, 6, 7] και πολυφασματικά δεδομένα από αέρος [16, 27]. Τα βαθυμετρικά μοντέλα βαθμονομήθηκαν κυρίως με γνωστά σημεία που προήλθαν από

βαθυμετρικούς χάρτες [4, 5, 19, 20, 28] και με βάθη προερχόμενα από σύστημα Lidar [16].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το βαθυμετρικό μοντέλο του Lyzenga [16] και το ερευνητικό ενδιαφέρον επικεντρώθηκε στη βελτίωση της ακρίβειας προσδιορισμού των βαθών, που προκύπτουν από πολυφασματική βαθυμετρία. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού έγιναν οι παρακάτω διαδικασίες:

- Χρησιμοποιήθηκαν πολυφασματικά δεδομένα LANDSAT και SPOT, για να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα της κάθε εικόνας στη διαδικασία της πολυφασματικής βαθυμετρίας.
- Με σκοπό τον εντοπισμό του βαθμού επίδρασης των τεχνικών της επαναδειγματοληψίας και των τεχνικών της βελτίωσης στο τελικό αποτέλεσμα, η μεν επαναδειγματοληψία και των δύο εικόνων μετά την αναγωγή τους στο χαρτογραφικό σύστημα έγινε με δύο μεθόδους, εκείνη του πλησιέστερου γειτονικού σημείου και εκείνη της δικυβικής παρεμβολής, η δε βελτίωσή τους με τη χρήση χαμηλοπερατών χωρικών φίλτρων και χαμηλοπερατών φίλτρων Fourier.
- Δόθηκε ιδιαίτερη βαρύτητα στη βαθμονόμηση και τον έλεγχο του βαθυμετρικού μοντέλου. Και στις δύο αυτές διαδικασίες χρησιμοποιήθηκαν βαθυμετρικά σημεία, που προέκυψαν από ηχοβολιστική συσκευή σε συνδυασμό με GPS για τον προσδιορισμό της οριζοντιογραφικής θέσης τους. Έτσι, αποφεύχθηκε η χρήση βαθών από τους παλιούς, μικρής κλίμακας και άγνωστης ακρίβειας, υπάρχοντες βαθυμετρικούς χάρτες για τον ελλαδικό χώρο [βλ. 16, 17]. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μην υφίστανται πλέον δύο από τις πιο σημαντικές πηγές σφάλματος, που είναι η χρήση βαθυμετρικών σημείων άγνωστης αξιοπιστίας και το μεγάλο χρονικό διάστημα ανάμεσα στη συλ-



Σχήμα 1: Η περιοχή μελέτης στη Ν. Μηχανιώνα.  
Figure 1: The study area in N. Michanionas.

λογία των βαθυμετρικών σημείων του χάρτη και στη συλλογή των πολυφασματικών δεδομένων [βλ. 19, 20].

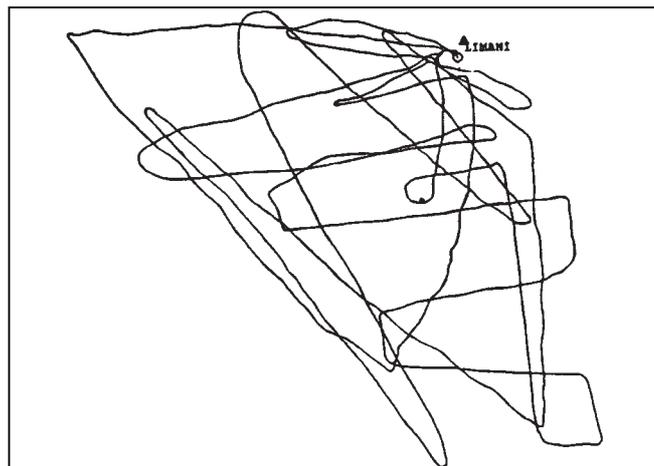
Η μελέτη αφορά στη θαλάσσια περιοχή της Νέας Μηχανιώνας του Νομού Θεσσαλονίκης (σχήμα 1), όπου ο βυθός είναι ομαλός, αμμώδης και το νερό διαυγές. Προηγήθηκε η αποτύπωση του θαλάσσιου πυθμένα με ηχοβόλιση και GPS για βάθη μέχρι 15 m. Οι μετρήσεις έγιναν τον Ιούλιο του 1997 [βλ. 37]. Συλλέχθηκαν συνολικά 719 μετρήσεις βαθών και οριζόντιας θέσης σε περίπου 5 ώρες μετρητικής διαδικασίας.

Η ηχοβολιστική βαθυμετρία έγινε με τη χρήση ηχοβολιστικής συσκευής, τύπου CODEN CVS106 και ένα ζεύγος δεκτών του δορυφορικού συστήματος GPS. Χρησιμοποιήθηκαν ένα ζεύγος δεκτών δύο συχνοτήτων της Leica/Wild System 300 και η κινηματική σχετική μέθοδος μέτρησης. Σύμφωνα με αυτήν, ο ένας δέκτης (κύριος) παρέμεινε στη στεριά κεντρωμένος σε σταθερό (γνωστό) σημείο και ο δεύτερος τοποθετήθηκε στο σκάφος. Η διαδικασία μέτρησης [βλ. και 1, 22] περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο. Η εσωτερική ακρίβεια προσδιορισμού των βαθών έφτασε τα 10 cm. Η οριζοντιογραφική θέση προσδιορίστηκε με την κινηματική μέθοδο και με ακρίβεια της τάξης των  $1-2 \text{ cm} \pm 2 \text{ ppm}$  [17, 34]. Η προσδιοριζόμενη θέση αναφέρεται στο σύστημα συντεταγμένων UTM.

Η εικόνα LANDSAT, που χρησιμοποιήθηκε, είχε ημερομηνία λήψης την 4η Οκτωβρίου 1986 και η SPOT την 4η Απριλίου 1993.

Για την ολοκλήρωση της μελέτης χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά πακέτα:

- Imagine/ERDAS για την επεξεργασία των εικόνων.
- Minitab για τη βαθμονόμηση και επαλήθευση του βαθυμετρικού μοντέλου.



Σχήμα 2: Η πορεία που διέγραψε το σκάφος. Διακρίνονται οι ηχοβολιστικές γραμμές.

Figure 2: The boat's route. The echo sounding lines are depicted.

- Surfer για τη δημιουργία διαγραμμάτων ισοβαθών.
- Ski (Leica/Wild) για την επεξεργασία των δορυφορικών στοιχείων του GPS.

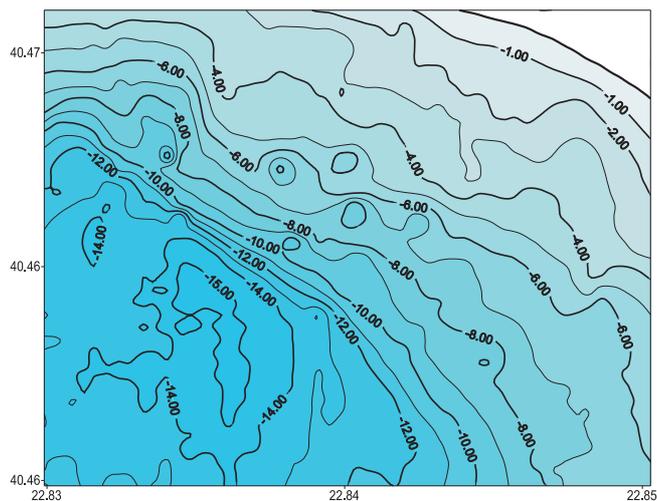
## 2. ΗΧΟΒΟΛΙΣΤΙΚΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ

Η διαδικασία των μετρήσεων ξεκινά με τον προγραμματισμό των δεκτών GPS, η δε ακρίβεια των αποτελεσμάτων εξαρτάται άμεσα τόσο από το πλήθος των δορυφόρων, που βρίσκονται πάνω από τον ορίζοντα, όσο και από τον ιδανικό γεωμετρικό σχηματισμό τους στον ουρανό. Μετά από μελέτη τους επιλέχθηκε η κατάλληλη χρονική περίοδος των μετρήσεων. Στη συγκεκριμένη εργασία ο ένας δέκτης προγραμματίστηκε να μετρά ακολουθώντας τη στατική μέθοδο με ρυθμό καταγραφής των σημάτων τα 5'. Ο δεύτερος δέκτης προγραμματίστηκε να μετρά με την κινηματική μέθοδο, ακολουθώντας τον ίδιο ρυθμό καταγραφής.

Στο σχήμα 2 φαίνονται οι ηχοβολιστικές γραμμές, οι οποίες υλοποιούν την πορεία που ακολούθησε το σκάφος.

Σε κάθε θέση, η ένδειξη της οθόνης της ηχοβολιστικής συσκευής καταχωρίστηκε ταυτόχρονα με την εποχή της μέτρησης, δηλαδή το χρονικό διάστημα της μέτρησης του GPS.

Ο ρυθμός καταγραφής των μετρήσεων έφτασε τις 150 σε διάστημα μίας ώρας. Ο αριθμός των μετρήσεων ανά ώρα εξαρτάται ουσιαστικά από την ομαλή ή όχι πορεία του σκάφους, τη μορφολογία του πυθμένα και την ικανότητα του συνεργείου μετρήσεων. Ένα επίσης πρόβλημα, τυχαίου όμως χαρακτήρα, είναι οι καιρικές συνθήκες. Η ορθή λειτουργία της ηχοβολιστικής συσκευής είναι εφικτή μόνο σε καταστάσεις νηνεμίας. Οι διαταράξεις από τους κυματισμούς καθιστούν αδύνατη τη μετρητική διαδικασία, ή, όταν αυτή είναι εφικτή, τα αποτελέσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι καιρικές συνθήκες ήταν πολύ καλές.



Σχήμα 3: Διάγραμμα ισοβαθών από μετρήσεις ηχοβολιστικής συσκευής και GPS.

Figure 3: Depth contours according to measurements from the echo sounder and the GPS.

Στις παραμέτρους εισαγωγής προβλημάτων κατά τη διάρκεια των μετρήσεων πρέπει να συμπεριληφθεί και η πορεία του σκάφους. Από τη συγκεκριμένη εφαρμογή παρατηρήθηκε ότι ομαλή πορεία του σκάφους με μικρή και σταθερή ταχύτητα (5 km/h) βελτιστοποιεί τη μετρητική διαδικασία. Βέβαια, η μικρή ταχύτητα αυξάνει σημαντικά το χρόνο των μετρήσεων. Τέλος, ακόμη ένα σημαντικό πρόβλημα κατά τις μετρήσεις είναι η περίπτωση να χαθεί το σήμα από τους δορυφόρους, οπότε πρέπει να επαναληφθεί η διαδικασία της εκκίνησης.

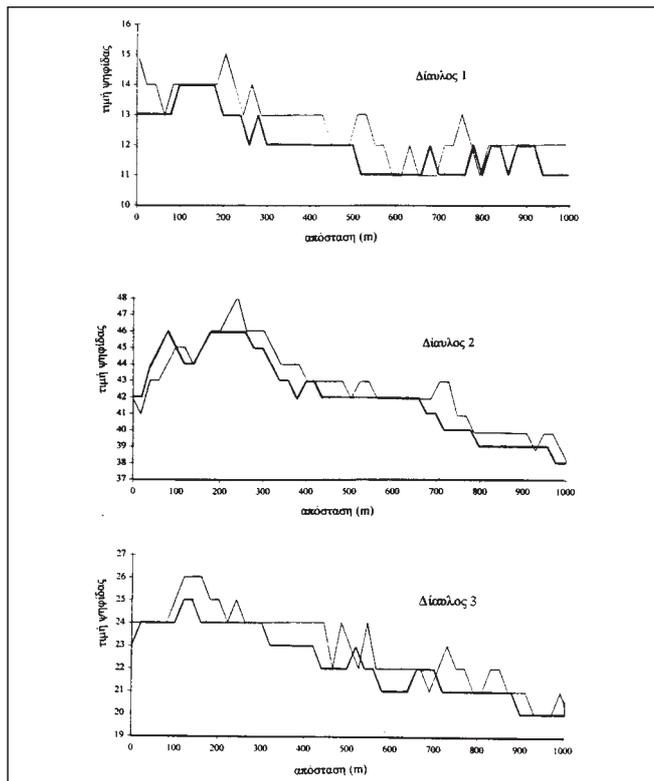
Στο σχήμα 3 φαίνονται οι ισοβαθείς, όπως προέκυψαν από την ηχοβολιστική βαθυμετρία.

### 3. ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΒΑΘΥΜΕΤΡΙΑ

#### 3.1. Προετοιμασία των εικόνων

Οι πολυφασματικές εικόνες SPOT και LANDSAT ανήχθησαν μέσω αφινικού μετασχηματισμού [ βλ. 21, 33] στο σύστημα UTM, το οποίο ήταν και το σύστημα των οριζοντιογραφικών θέσεων των ηχοβολιστικών σημείων. Για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην §1, η επαναδειγματοληψία έγινε με τη μέθοδο παρεμβολής του πλησιέστερου γειτονικού σημείου και με τη μέθοδο της δικυβικής παρεμβολής [βλ. 33]. Ακολούθησε η μείωση του υπάρχοντος θορύβου στις ανηγμένες εικόνες με την εφαρμογή των ιδίων φίλτρων τόσο στο αποτέλεσμα της μεθόδου του πλησιέστερου σημείου όσο και της δικυβικής παρεμβολής.

Όλοι οι δίαυλοι της πολυφασματικής εικόνας SPOT παρουσίαζαν θόρυβο με τη μορφή “αλατοπίπερου” (salt and pepper) [βλ. 9, 10, 32]. Για τη μείωση του θορύβου κρίθηκε αποτελεσματική η χρήση του χωρικού χαμηλοπερατού φίλτρου 3x3 [ βλ. 9, 32] (σχήμα 4).



Σχήμα 4: Τομή των διαύλων 1, 2 και 3 της εικόνας SPOT πριν (λεπτή γραμμή) και μετά (έντονη γραμμή) την εφαρμογή του χωρικού χαμηλοπερατού φίλτρου 7X7.

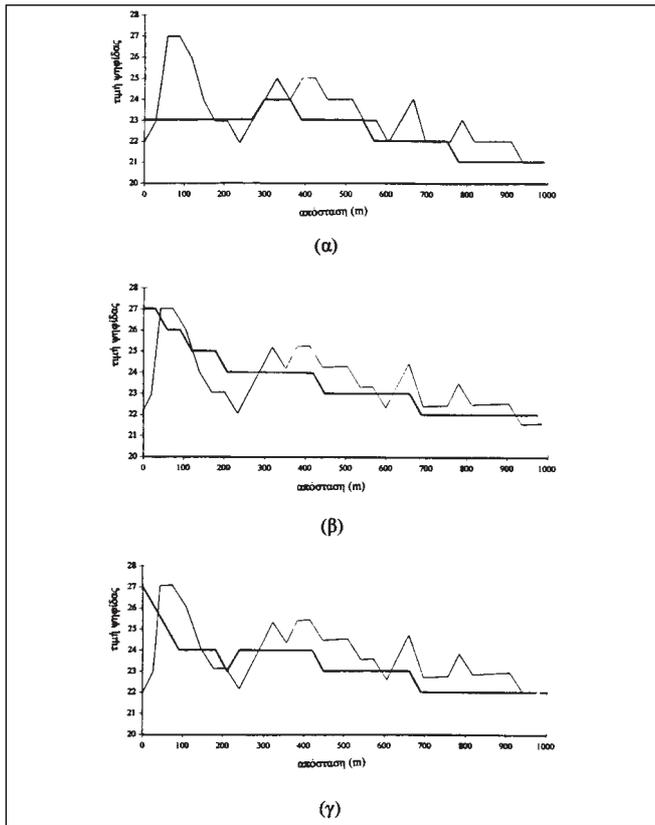
Figure 4: Profiles from bands 1, 2 and 3 of the SPOT image before (thin line) and after (thick line) the application of the spatial low pass filter 7X7.

Ο δίαυλος 1 της πολυφασματικής εικόνας LANDSAT παρουσίαζε θόρυβο μορφής “αλατοπίπερου”, ενώ οι 2 και 3 σημαντικό περιοδικό θόρυβο με τη μορφή έντονης λωριδοποίησης (stripping) [ βλ. 9, 10, 32]. Για τη μείωση του θορύβου εφαρμόστηκε το χαμηλοπερατό χωρικό φίλτρο 7x7, το οποίο για τις μικρές περιοχές των βαθυμετρικών εφαρμογών φαίνεται να είναι αποτελεσματικό τόσο για τον περιοδικό όσο και για τον μη περιοδικό θόρυβο [βλ. 9, 11, 18, 19, 32] (σχήμα 5). Επίσης, για την αντιμετώπιση της περιοδικότητας του θορύβου δοκιμάστηκαν δύο αντιπροσωπευτικά φίλτρα Fourier, και συγκεκριμένα το φίλτρο Butterworth και το φίλτρο Hanning [ 9]. Τα μεγέθη των ακτίνων των φίλτρων προέκυψαν με βάση τη μορφή των φασμάτων του διδιάστατου μετασχηματισμού Fourier των διαύλων [8] (σχήμα 5).

#### 3.2. Πολυφασματικό βαθυμετρικό μοντέλο

Το βάθος του νερού z μπορεί να γραφεί ως ο γραμμικός συνδυασμός των  $X_i$  όλων των χρησιμοποιούμενων διαύλων της εικόνας ως εξής [19, 20, 28]:

$$z = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i X_i \quad \text{με } i = 1, n \quad (3.1)$$



Σχήμα 5: Τομή του διαύλου 2 της εικόνας LANDSAT πριν (λεπτή γραμμή) και μετά (έντονη γραμμή) την εφαρμογή του χωρικού χαμηλοπερατού φίλτρου 7X7 (α), του φίλτρου Butterworth (β) και του φίλτρου Hanning (γ).

Figure 5: A profile from band 2 of the LANDSAT image before (thin line) and after (thick line) the application of the 7X7 lowpass filter (a), the Butterworth filter (b) and the Hanning filter (c).

Το  $X_i$  δίνεται από τη σχέση:

$$X_i = \ln(L_i - L_{w(i)}) = \ln(L_{0(i)}) + \ln(L_{b(i)}) - k_i f z \quad (3.2)$$

όπου:

- $i$ : ένας διάυλος.
- $L_i$ : η ακτινοβολία για ένα διάυλο  $i$ , η οποία καταγράφεται από έναν πολυφασματικό δέκτη.
- $L_{w(i)}$ : είναι η ακτινοβολία πάνω από τα βαθιά νερά στο διάυλο  $i$ .
- $L_{0(i)}$ : είναι μία συνάρτηση της ηλιακής ακτινοβολίας και ισούται με 1 [3].
- $L_{b(i)}$ : είναι η ακτινοβολία βυθού στο διάυλο  $i$ .
- $k_i$ : είναι ο συντελεστής εξασθένησης στο διάυλο  $i$ .
- $f$ : είναι ο συντελεστής που περιγράφει το μήκος της διαδρομής της ακτινοβολίας μέσα στο νερό και συνήθως δίνεται ίσος με 2 [3].
- $z$ : είναι το βάθος του νερού.

Η σχέση (3.1) εκφράζει τη γραμμική παλινδρόμηση [βλ. 36] μεταξύ των βαθών  $z$  και των μεταβλητών  $X_i$ . Ο σταθε-

ρός συντελεστής  $a_0$  είναι συνάρτηση των συντελεστών εξασθένησης  $k_i$  και οι συντελεστές  $a_i$  είναι συναρτήσεις των  $k_i$ , των  $L_{0(i)}$  και των ακτινοβολιών βυθού  $L_{b(i)}$  [19, 20].

### 3.3. Βαθμονομήσεις του βαθυμετρικού μοντέλου και επαλήθευσεις των βαθμονομήσεων

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι ορατοί διάυλοι 1, 2, 3 και στις δύο εικόνες [βλ. 19, 20, 28].

Η επιλογή των σημείων βαθμονόμησης έγινε έτσι, ώστε τα σημεία να καλύπτουν ομοιόμορφα όλη την περιοχή μελέτης και σε αποστάσεις μεγαλύτερες από τις χωρικές αναλύσεις των δορυφόρων SPOT και LANDSAT (20m και 30m αντίστοιχα). Χρησιμοποιήθηκαν 183 σημεία από τα 719 της ηχοβολιστικής σε μία μέση μεταξύ τους απόσταση περίπου 60 m. Για λόγους σύγκρισης, σε όλες τις βαθμονομήσεις του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια σημεία, των οποίων τα βάθη κυμαίνονταν από 1.9 ως 14.3 m (σχήμα 6).

Για όλα τα δεδομένα ως τιμή  $L_w(i)$  σε κάθε διάυλο χρησιμοποιήθηκε η τιμή έντασης του σημείου αποκοπής του ιστογράμματος του αντίστοιχου διαύλου στις χαμηλότερες τιμές [2, 19, 20] (βλ. πίνακα 1).

Τα δεδομένα και των δύο εικόνων, τα οποία προήλθαν από την εφαρμογή της μεθόδου επαναδειγματοληψίας του πλησιεστέρου σημείου, δεν είχαν σημαντική διαφορά από τα αντίστοιχα της δικυβικής και έτσι δεν χρησιμοποιήθηκαν στις βαθμονομήσεις [37].

Μετά από διαδοχικές παλινδρομήσεις και την απομάκρυνση των βαθυμετρικών σημείων, για τα οποία τα εκτιμηθέντα βάθη παρουσίαζαν μεγάλη διαφορά από τα αρχικά, προέκυψαν οι βαθμονομήσεις που φαίνονται στον πίνακα 1. Για κάθε περίπτωση δίνονται η τυπική απόκλιση της παλινδρόμησης  $s$ , η συσχέτιση  $r$  [βλ. 36] και το πλήθος  $N$  των σημείων βάσει των οποίων έγινε τελικά η κάθε βαθμονόμηση (πίνακας 1).

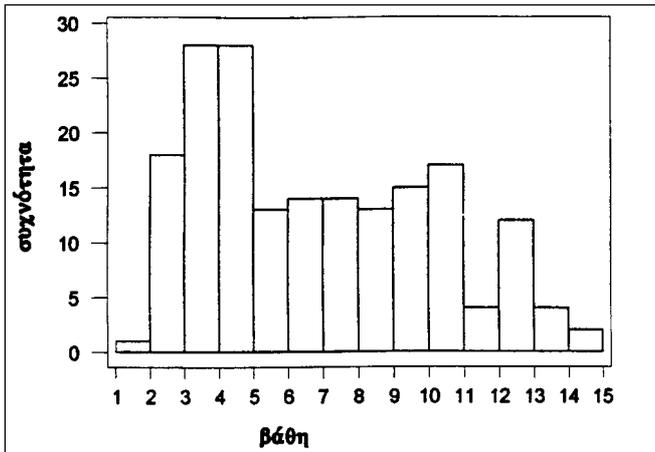
Για την επαλήθευση των βαθμονομήσεων χρησιμοποιήθηκαν 185 μετρήσεις της ηχοβολιστικής μεθόδου, που δεν συμμετείχαν στη διαδικασία της βαθμονόμησης. Τα 185 σημεία επελέγησαν έτσι, ώστε να κατανέμονται κανονικά σε όλη την περιοχή μελέτης. Στο σχήμα 7 φαίνεται ότι τα βάθη των σημείων αυτών κυμαίνονταν από 1 έως 14 m.

Στον πίνακα 2 δίνονται η μέση τιμή των απολύτων τιμών των διαφορών (μ.τ.δ.) μεταξύ του βάθους της ηχοβολιστικής και του προβλεπόμενου από το μοντέλο βάθους σε κάθε σημείο επαλήθευσης, η τυπική απόκλιση  $\sigma$  της μ.τ.δ. και το επί τοις εκατό ποσοστό των σημείων, των οποίων οι απόλυτες τιμές των διαφορών ήταν κάτω από ένα μέτρο. Στα σχήματα 8, 9, 10 και 11 φαίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η καλύτερη επαλήθευση γίνεται στα μικρά βάθη.

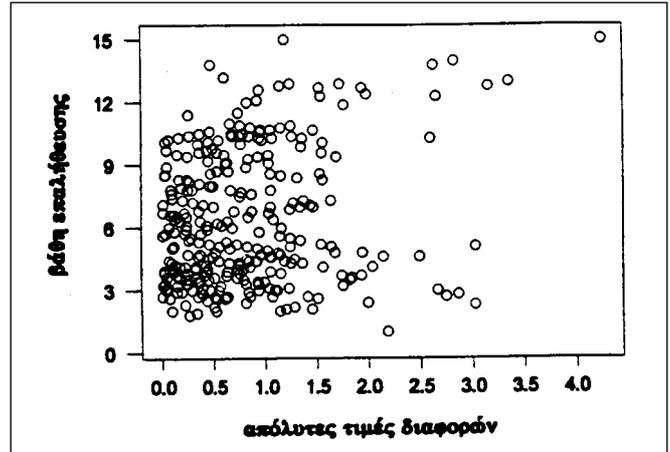
Στα σχήματα 12, 13, 14 και 15 δίνονται οι βαθυμετρικοί χάρτες της περιοχής μελέτης, οι οποίοι σχεδιάστηκαν με βά-

Πίνακας 1: Οι βαθμονομήσεις του μοντέλου και τα στατιστικά χαρακτηριστικά τους.  
 Table 1: The model's calibrations and their statistical characteristics.

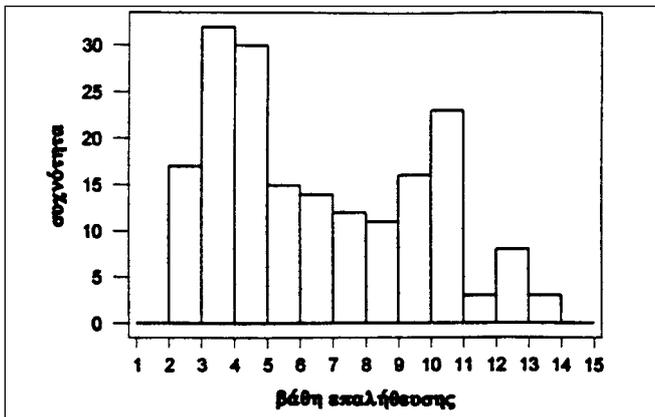
ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΙΣ		s (m)	r	N
M1:	χωρικό φίλτρο 3X3 SPOT $Z = 20.9 - 1.9 \ln(L_1 - 7) - 5.3 \ln(L_2 - 36) - 1.2 \ln(L_3 - 18)$	0.64	0.98	153
M2:	χωρικό φίλτρο 7X7 LANDSAT $Z = 17.6 - 1.5 \ln(L_1 - 70) - 7.1 \ln(L_2 - 19) - 1.2 \ln(L_3 - 15)$	1.10	0.94	143
M3:	φίλτρο Butterworth LANDSAT $Z = 13.5 - 0.6 \ln(L_1 - 71) - 5.8 \ln(L_2 - 20) + 0.3 \ln(L_3 - 16)$	0.82	0.95	152
M4:	φίλτρο Hanning LANDSAT $Z = 15.4 - 2.19 \ln(L_1 - 71) - 6.6 \ln(L_2 - 20) + 0.9 \ln(L_3 - 16)$	0.84	0.95	143



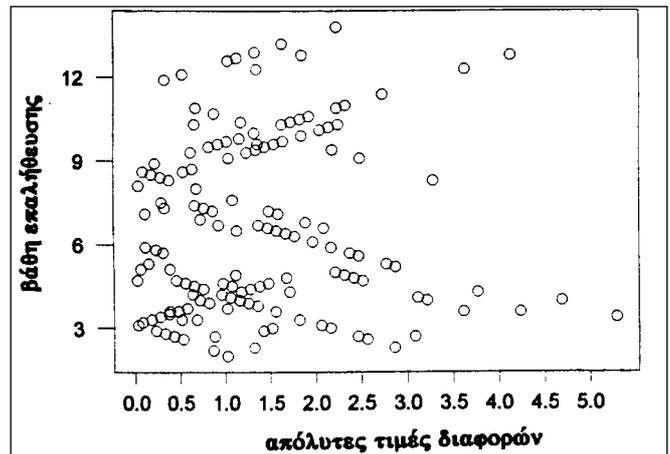
Σχήμα 6: Ιστόγραμμα συχνότητας των βαθών που χρησιμοποιήθηκαν στις βαθμονομήσεις του μοντέλου.  
 Figure 6: Frequency histogram of the depths used for the model's calibration.



Σχήμα 8: Επαλήθευση της βαθμονόμησης M1. Σχέση ηχοβολιστικών βαθών και αντίστοιχων απολύτων τιμών των διαφορών βάθους.  
 Figure 8: Testing of calibration M1. Relation between echo sounding depths and corresponding absolute values of depth differences.



Σχήμα 7: Ιστόγραμμα συχνότητας βαθών των 185 σημείων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην επαλήθευση των βαθμονομήσεων.  
 Figure 7: Frequency histogram of the depths used for the model's testing.



Σχήμα 9: Επαλήθευση της βαθμονόμησης M2. Σχέση ηχοβολιστικών βαθών και αντίστοιχων απολύτων τιμών των διαφορών βάθους.  
 Figure 9: Testing of calibration M2. Relation between echo sounding depths and corresponding absolute values of depth differences.

θη των σημείων επαλήθευσης, τα οποία προήλθαν από τα πολυφασματικά δεδομένα μέσω των βαθμονομήσεων M1, M2, M3 και M4.

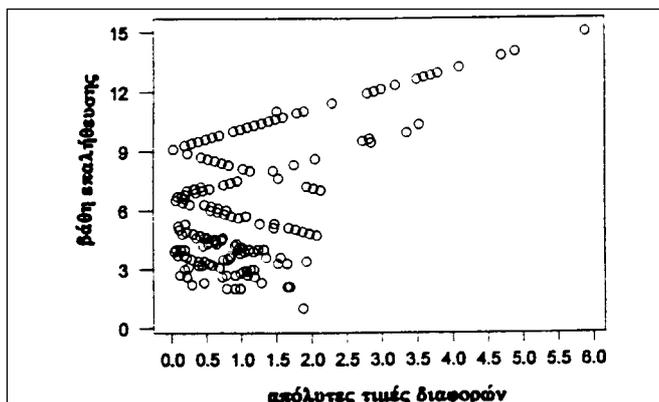
Από την παρατήρηση των βαθυμετρικών χαρτών των σχημάτων 14 και 15 φαίνεται ότι η εφαρμογή των φίλτρων Hanning και Butterworth ευνοεί τη βαθμονόμηση του μο-

ντέλου για βάθη μέχρι 9 m και αποκόπτει την πληροφορία για μεγαλύτερα βάθη. Με αφορμή την παρατήρηση αυτή, έγιναν νέες βαθμονομήσεις του μοντέλου με δεδομένα LANDSAT για βάθη μέχρι 9 m. Τα στατιστικά χαρακτηριστικά των βαθμονομήσεων και των επαληθεύσεών τους φαίνονται στον

Πίνακας 2: Στατιστικά χαρακτηριστικά επαλήθευσης των βαθμονομήσεων.

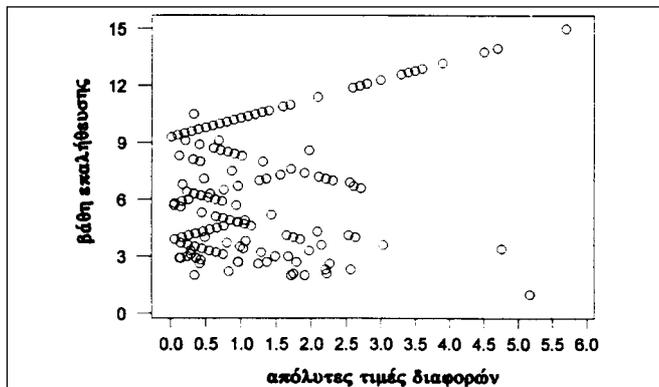
Table 2: The statistical characteristics of the calibration testing.

βαθμονομήσεις	μ.τ.δ. (m)	σ (m)	% (< 1m)
M1	0.76	0.65	72
M2	1.41	1.12	41
M3	1.12	1.05	58
M4	1.19	1.06	56



Σχήμα 10: Επαλήθευση της βαθμονόμησης M3. Σχέση ηχοβολιστικών βαθών και αντίστοιχων απολύτων τιμών των διαφορών βάθους.

Figure 10: Testing of calibration M3. Relation between echo sounding depths and corresponding absolute values of depth differences.



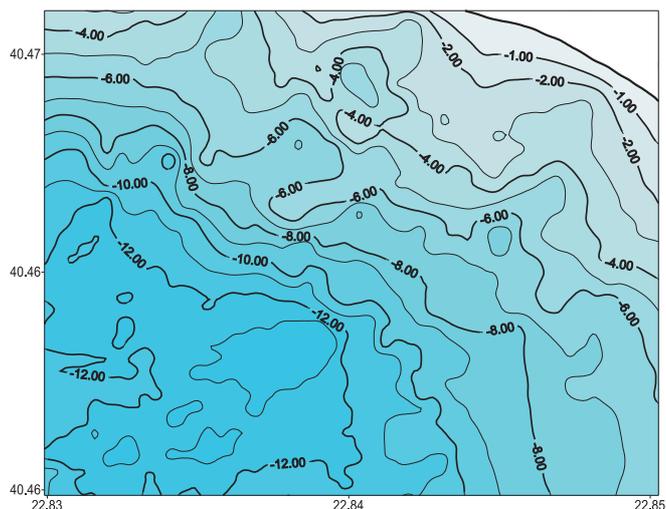
Σχήμα 11: Επαλήθευση της βαθμονόμησης M4. Σχέση ηχοβολιστικών βαθών και αντίστοιχων απολύτων τιμών των διαφορών βάθους.

Figure 11: Testing of calibration M4. Relation between echo sounding depths and corresponding absolute values of depth differences.

πίνακα 3. Είναι εμφανής η βελτίωση της απόδοσης του πολυφασματικού μοντέλου με δεδομένα LANDSAT στα μικρότερα βάθη.

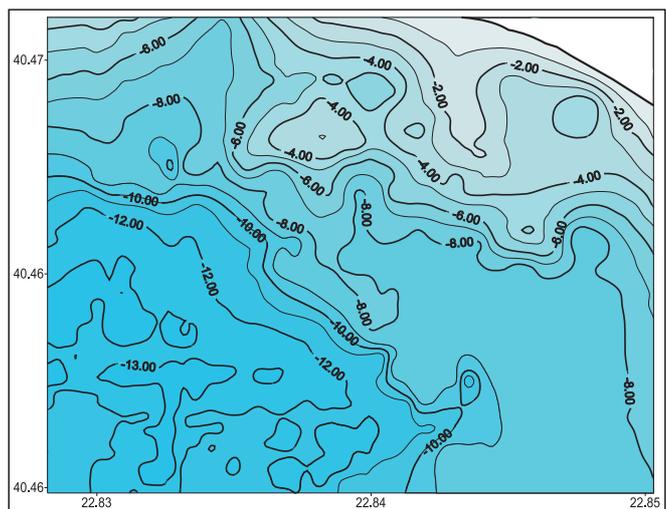
#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία η εφαρμογή της πολυφασματικής βαθυμετρίας έγινε σε βυθό ομαλό και σε καθαρά ρηχά νερά, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του βαθυμετρικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 12: Βαθυμετρικός χάρτης από τα βάθη της επαλήθευσης της βαθμονόμησης M1.

Figure 12: Bathymetric map compiled by testing depths from calibration M1.



Σχήμα 13: Βαθυμετρικός χάρτης από τα βάθη της επαλήθευσης της βαθμονόμησης M2.

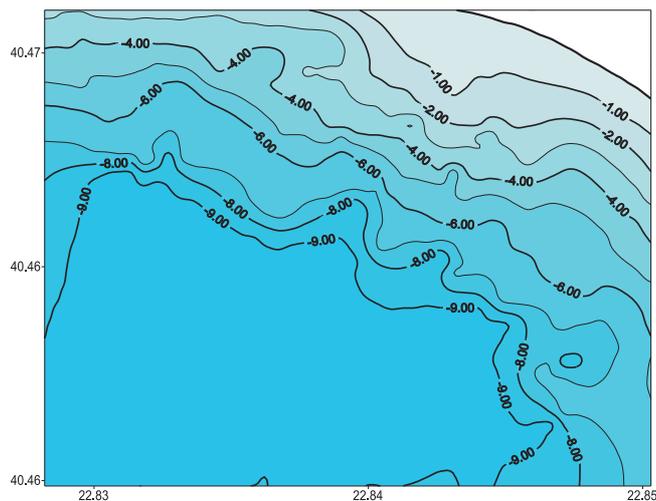
Figure 13: Bathymetric map compiled by testing depths from calibration M2.

Η βαθμονόμηση του μοντέλου στηρίχθηκε σε μετρηθέντα σημεία υψηλής οριζοντιογραφικής και βαθυμετρικής αξιοπιστίας, τα οποία προήλθαν από ηχοβόλιση του πυθμένα της περιοχής μελέτης.

Η μέθοδος επαναδειγματοληψίας των εικόνων φάνηκε να μην επηρεάζει την αποτελεσματικότητα καμιάς από τις βαθμονομήσεις που έγιναν με δεδομένα SPOT ή με δεδομένα LANDSAT.

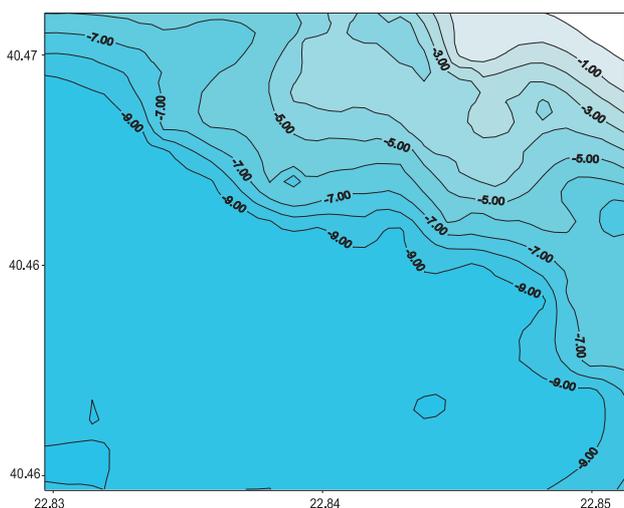
Κατά συνέπεια, οι πηγές σφαλμάτων στη βαθμονόμηση και στην πρόβλεψη βαθών μπορούν να είναι:

- Διαφορές κατά X ή και κατά Y, ανάμεσα στη θέση ενός βαθυμετρικού σημείου και της αντίστοιχης θέσης στην



Σχήμα 14: Βαθυμετρικός χάρτης από τα βάθη επαλήθευσης της βαθμονόμησης M3.

Figure 14: Bathymetric map compiled by testing depths from calibration M3.



Σχήμα 15: Βαθυμετρικός χάρτης από τα βάθη επαλήθευσης της βαθμονόμησης M4.

Figure 15: Bathymetric map compiled by testing depths from calibration M4.

ανηγμένη εικόνα. Οι διαφορές αυτές προκύπτουν λόγω της διακριτικής ικανότητας της εικόνας και μπορούν να είναι έως  $\pm 10$  m στη SPOT ή  $\pm 15$  m στη LANDSAT. Ωστόσο, οι επιδράσεις τους δεν αξιολογούνται ως ιδιαίτερα σημαντικές, επειδή ο βυθός της περιοχής μελέτης μεταβάλλεται ομαλά (βλ. σχήμα 3).

- Το είδος των χρησιμοποιηθέντων φίλτρων για τη μείωση του θορύβου, που φαίνεται να είναι και η σημαντικότερη πηγή σφάλματος.

Από τους πίνακες 1 και 2 είναι εμφανής η πολύ καλύτερη απόδοση των πολυφασματικών δεδομένων SPOT, η οποία προφανώς οφείλεται τόσο στο είδος του θορύβου (μόνον της

Πίνακας 3: Στατιστικά χαρακτηριστικά βαθμονομήσεων και των επαληθεύσεών τους, για δεδομένα LANDSAT και για βάθη μικρότερα ή ίσα των 9 m.

Table 3: Statistical characteristics of the model's calibration and testing, for depths less than or equal to 9 m, using LANDSAT data.

	s (m)	r	μ.τ.δ.	σ (m)	% (< 1 m)
M2	0.71	0.93	0.96	0.84	60
M3	0.68	0.92	0.73	0.57	77
M4	0.59	0.94	0.76	0.61	74

μορφής “αλατοπίπερου”), που εξαρχής είχαν τα δεδομένα, όσο και στην επιτυχή μείωσή του με τη χρήση του χωρικού φίλτρου 3X3.

Η ύπαρξη πολυπλοκότερου θορύβου (“αλατοπίπερο” και λωριδοποίηση) στα δεδομένα LANDSAT έκανε δυσκολότερη τη μείωσή του. Από την παρούσα εφαρμογή προκύπτει ότι δεν είναι δυνατόν να προταθεί άμεσα κάποιο φίλτρο (χωρικό ή Fourier), που να μειώνει το θόρυβο αποτελεσματικά για όλη την περιοχή.

Σύμφωνα με τους πίνακες 1 και 2 και τα σχήματα 9 έως και 11, προκύπτει ότι η βαθμονόμηση με δεδομένα LANDSAT και εφαρμογή του φίλτρου Butterworth έχει την καλύτερη απόδοση. Ωστόσο, η μελέτη των διαγραμμάτων των ισοβαθών αποκαλύπτει ότι η απόδοση της παραπάνω βαθμονόμησης αφορά σε βάθη μέχρι 9 m. Η βαθμονόμηση M2 μπορεί να είναι λιγότερο αποδοτική σε σχέση με τις άλλες δύο, όμως δίνει αποτελέσματα και για βάθη μεγαλύτερα των 9 m.

Σύμφωνα με τον πίνακα 3, για τα μικρά βάθη, οι βαθμονομήσεις M2, M3 και M4 δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα και μάλιστα συγκρίσιμα με εκείνα της M1. Έτσι, μόνον για την περιοχή βαθών μέχρι 9 m είναι δυνατόν να προταθεί ως καλύτερη βαθμονόμηση η M3 και επομένως ως αποτελεσματικότερο φίλτρο, το φίλτρο Butterworth.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Β. Ανδριτσάνο, αγρονόμο-τοπογράφο μηχανικό Α.Π.Θ., και τον διδάκτορα Χ. Πικριδά, αγρονόμο-τοπογράφο μηχανικό Α.Π.Θ., για την πολύτιμη βοήθειά τους κατά τη διάρκεια της συλλογής και της επεξεργασίας δεδομένων του GPS και της βαθυμετρίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Αδριτσάνος Β.Δ., Πικριδάς Χ., Ρωσικόπουλος Δ., Τζιαβός Η.Ν., Φωτίου Α., “Βυθομετρικές Αποτυπώσεις Θαλασσίων Κόλπων, Λιμνών και Ποταμών με Ηχοβολιστική Συσκευή και GPS”, Πρακτικά 4ου Συνεδρίου Χαρτογραφίας “Χαρτογραφία και Χάρτες στην Ανάδειξη και Προστασία του Περιβάλλοντος”, Καστοριά, 16-17 Οκτωβρίου 1997.
2. Benny H. A., Dawson J. G., “Satellite Imagery as an Aid to Bathymetric Charting in the Red Sea”, *The Cartographic Journal*, vol. 20, no 1, June 1983, pp. 5-16.

3. Campbell B.J., **Introduction to Remote Sensing**, The Guilford Press, New York, 1987, pp. 404-417.
4. Cracknell A. P., Ibrahim M., McManus J., "Use of Satellite and Aircraft Data for Bathymetry Studies", **Advances in Digital Image Processing, Proceedings of the Annual Conference of the Remote Sensing Society**, Nottingham, September 1987, pp. 391-402.
5. Cracknell A. P., Hayes L. W. B., **Introduction to Remote Sensing**. Taylor & Francis, London, 1993, pp. 70-74.
6. Cracknell A., Qusti N., "Study using the SPOT multispectral Data and Panchromatic Data on the Coastal Waters of Khawr al Bazam Area, United Arab Emirates", **Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Annual Conference of Remote Sensing Society**, University of Reading, 2-4 September, 1997, pp. 509-511.
7. Cracknell A., Qusti N., "Study Using the SPOT Multispectral Data on the Coastal Waters of Abu-Dhabi City, United Arab Emirates", **Proceedings of the 23<sup>rd</sup> Annual Conference of Remote Sensing Society**, University of Reading, 2-4 September, 1997b, pp. 512-514.
8. Erdas, **Erdas Field Guide** Version 8.1, 3d ed., Atlanta, 1994.
9. Gonzales R. C. and Wintz P., **"Digital Image Processing"**, 2<sup>nd</sup> ed., Addison-Wesley, 1987.
10. Jensen J.R., **Introductory Digital Image processing**, 2<sup>nd</sup> ed, Prentice Hall, 1996, pp. 165-174.
11. Helder L.D., Quirk B. K., Hood J. J., "A Technique for the Reduction of Banding in Landsat Thematic Mapper Images", **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. **58**, no 10, October 1992, pp. 1425-1431.
12. Lyzenga R. D., "Reflectance of a Flat Ocean in the Limit of Zero Water Depth", **Applied Optics**, vol. **17**, no 3, 1977, pp. 379-383.
13. Lyzenga R.D., "Passive Remote Sensing Techniques for Mapping Water Depth and Bottom Features", **Applied Optics**, vol. **17**, no 3, February 1978, pp. 379-383.
14. Lyzenga R.D., "Shallow Water Reflectance Modelling with Applications to Remote Sensing on Ocean Floor", **Proceedings of 13<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment**, Ann Arbor, Michigan, 1979, pp. 583-602.
15. Lyzenga R. D., "Remote Sensing of Bottom Reflectance and Water Attenuation Parameters in Shallow Water using Aircraft and Landsat Data", **Int. J. Remote Sensing**, vol. **2**, no 1, 1981, pp. 71-82.
16. Lyzenga R. D., "Shallow-Water Bathymetry using combined Lidar and Passive Multispectral Scanner Data", **Int. J. Remote Sensing**, vol. **6**, no 1, 1985, pp. 115-125.
17. Milne P.H., **Underwater Acoustic Positioning Systems**, Gulf Publishing Company, 1983.
18. Pan J. J., Chang Ch., "Destriping of Landsat Mss Images by Filtering Techniques", **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, vol. **58**, no 10, October 1992, pp. 1417-1423.
19. Παπαδοπούλου Μ. και Τσακίρη-Στρατή Μ., "Βαθυμετρία ρηχών θαλασσίων νερών με πολυφασματικά δεδομένα TM", 1997(α), **Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ**, Σειρά Ι, Ιαν.-Απρ. 1998, τ. **18**, τεύχ. 1, σελ. 87-98
20. Παπαδοπούλου Μ. και Τσακίρη-Στρατή Μ., "Πολυφασματική Βαθυμετρία σε θαλάσσια περιοχή της Ν. Κέρκυρας", 1997(β), στο : Αστεριάδης Γ., Κατσάμπαλος Κ., Κονταδάκης Μ., Μπαντέλας Α., Παπαδημητρίου Α. και Τζιαβός Η. (eds), **"Η Γη και το Σύμπαν"**, σελ. 505-516.
21. Παρασχάκης Ι., Παπαδοπούλου Μ., Πατιάς Π., **Αυτοματοποιημένη Χαρτογραφία**, εκδ. Ζήτη, 1990, pp. 81-84.
22. Πρέκας Φ.: **"Μετρήσεις βαθών με ηχοβολιστικές συσκευές και προσδιορισμός οριζόντιας θέσης με GPS"**, διπλωματική εργασία, Θεσσαλονίκη, 1997.
23. Philpot D. W., "Bathymetry Mapping with Passive Multispectral Imagery", **Applied Optics**, vol. **28**, no 8, 15 April 1989, pp. 1569-1578.
24. Polcyn F., Sattinger I.J., "Water Depth Determination Using Remote Sensing Techniques", **Proceedings of 6<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment**, Ann Arbor, Michigan, 1969, pp. 1017-1028.
25. Polcyn F., Lyzenga R.D., "Calculation of Water Depth from ERTS-MSS Data", **Proceedings on Significant Results Obtained from ERTS-1**, New Carrollton, Maryland, 1973, pp. 1269-1276.
26. Polcyn F.C., Lyzenga R.D., "Landsat Bathymetry Mapping by Multitemporal Processing", **Proceedings of 13<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment**, Ann Arbor, Michigan, 1979, pp. 1269-1276.
27. Roberts A.C., Anderson J. M., "Shallow Water Bathymetry Using Integrated Airborne Multi-spectral Remote Sensing", **Int. J. Remote Sensing**, vol. **20**, no 3, 1999, pp. 497-510.
28. Spitzer D. R., Dirks W. J., 1987, "Bottom Influence on the Reflectance of the Sea", **Int. J. Remote Sensing**, vol. **8**, no 3, 1987, pp. 279-290.
29. Tanis F.J., Hallada W.A., "Evaluation of Landsat Thematic Mapper Data for Shallow Water Bathymetry", **Proceedings of 18<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment**, Ann Arbor, Michigan, 1984, pp. 629-643.
30. Tanis F.J., Byrne H.J., "Optimization of Multispectral Sensors for Bathymetry Applications", **Proceedings of 19<sup>th</sup> International Symposium on Remote Sensing of Environment**, Ann Arbor, Michigan, 1985, pp. 865-874.
31. Τσακίρη-Στρατή Μ., **"Εφαρμογή των εικόνων TM Landsat στην Βαθυμετρία"**, Ημερίδα Χρηστών Erdas, Αθήνα, 26 Νοεμβρίου, 1996.
32. Τσακίρη - Στρατή Μ., **"Ραδιομετρική Βελτίωση, Χωρική Βελτίωση, Βελτιώσεις μέσω μετασχηματισμού Fourier"**, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, ΤΑΤΜ - ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 1998.
33. Τσακίρη-Στρατή Μ., **Τηλεπισκόπηση**, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, ΤΑΤΜ-ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 1998.
34. Τζιαβός Η., **Υδρογραφία και Φυσική Ωκεανογραφία**, Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, ΤΑΤΜ-ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη, 1996.
35. van Hengel W., Spitzer D., "Multi-temporal Water Depth Mapping by Means of Landsat TM", **Int. J. Remote Sensing**, vol. **12**, no 4, 1991, pp. 703-712.
36. Wonnacot T., Wonnacot R., **Introductory Statistics**, John Wiley & Sons, 5<sup>th</sup> edition, 1990, pp. 396-433.
37. Ζήδρου Ε., Καρκάνη Ζ., Ματζίρη Μ., Χατζηγγάκη Σ.: **Διπλωματική εργασία: "Βαθυμετρία Ρηχών Θαλάσσιων Υδάτων με χρήση Ηχοβολιστικής Συσκευής, GPS, και Τηλεπισκόπησης"**, Θεσσαλονίκη, Ιούλιος 1998.

#### **Ε. Ζήδρου,**

Διπλωματούχος αγρονόμος και τοπογράφος μηχανικός ΤΑΤΜ Α.Π.Θ.

#### **Ζ. Καρκάνη,**

Διπλωματούχος αγρονόμος και τοπογράφος μηχανικός ΤΑΤΜ Α.Π.Θ.

#### **Μ. Ματζίρη,**

Διπλωματούχος αγρονόμος και τοπογράφος μηχανικός ΤΑΤΜ Α.Π.Θ.

**Μ. Παπαδοπούλου,**

Αναπληρώτρια καθηγήτρια, Τομέας Κτηματολογίου, Φωτογραμμετρίας και Χαρτογραφίας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., 540 06 Θεσσαλονίκη, E-mail: marpap@vergina.eng.auth.gr.

**Η. Ν. Τζιαβός,**

Καθηγητής, Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., 540 06 Θεσσαλονίκη, E-mail: tzianvos@eng.auth.gr.

**Μ. Τσακίρη-Στρατή,**

Επίκουρος καθηγήτρια, Τομέας Κτηματολογίου, Φωτογραμμετρίας και Χαρτογραφίας, Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., 540 06 Θεσσαλονίκη, E-mail: martsak@vergina.eng.auth.gr.

**Σ. Χατζηγάκη,**

Διπλωματούχος αγρονόμος και τοπογράφος μηχανικός ΤΑΤΜ Α.Π.Θ.

Extended summary

# Multispectral Bathymetry Supported by Sounding and GPS Data

**S. HATZIGAKI**

Rural & Surveying, Dipl. Eng.

**Z. KARKANI**

Rural & Surveying, Dipl. Eng.

**M. MATZIRI**

Rural & Surveying, Dipl. Eng.

**M.PAPADOPOULOU**

Acossiate Professor A.U.TH.

**M. TSAKIRI-STRATI**

Acossiate Professor A.U.TH.

**I. N. TZIAVOS**

Professor A.U.TH.

**E. ZIDROU**

Rural & Surveying, Dipl. Eng.

## Abstract

*In this paper the possibility of measuring depth in shallow sea area by using multispectral LANDSAT and SPOT data integrated with echo sounding and GPS data was investigated and evaluated. Multispectral images of the N. Michaniona bay area were used. For the same area the sea bottom was surveyed previously. GPS and echo sounder were used for the acquisition of the position and the depth of each surveying point. A multispectral bathymetry model was used and was calibrated using data from either LANDSAT or SPOT images. The calibrations were supported by known echo sounding points and were tested for depth prediction at known sounding positions not used in the calibration procedure. Finally, the effectiveness of the LANDSAT and SPOT images in multispectral bathymetry applications was evaluated.*

## 1. INTRODUCTION

The need for a fast and in bulk measuring of depths, as well as fast updating of navigational charts, has led many scientists since the late 60's to develop remote sensing techniques for bathymetry in shallow and clear sea waters [12, 13, 14, 15, 24, 25, 26, 29, 30]. Since then many researchers dealt with the subject and used the following remote sensed data: MSS multispectral images [2, 14], TM multispectral images [4, 19, 20, 28, 29, 30] multispectral and panchromatic SPOT images [5, 6, 7], and airborne multispectral data [16, 27]. The bathymetric model in use was calibrated using depth points from existing bathymetric maps [4, 5, 19, 20, 28] or depth points coming from a lidar system [16]. In this paper, the Lyzenga bathymetry model [16] was used and the aim was the improvement of the accuracy of depths, which are estimated through that model. For this purpose the following procedures took place:

- Both Landsat and Spot data were used in order their effectiveness in multispectral bathymetry to evaluate.

- The image resampling, as well as the image enhancement, were accomplished through several techniques in order to evaluate their impact on the images' effectiveness. The resampling was accomplished using the nearest neighbour and the bicubic interpolation techniques and the image enhancement using low pass spatial as well as Fourier filters.
- The bathymetry model was calibrated and tested using bathymetry points, which came from GPS and echo sounder. In this way, errors stemming from the use of old and unknown accuracy depths were eliminated.

The study area is the N. Michaniona bay of the Prefecture of Thessaloniki (fig. 1). In the study area the water is clear and the bottom is smooth and sandy. The sea bottom survey preceded the image analysis and took place in July 1997. A total of 719 depths with an accuracy of about 10 cm were acquired, as well as their horizontal coordinates with an accuracy of about 1-2 cm. The LANDSAT image was from October 1986 and the SPOT image from April 1993. For the completion of the study the software packages Imagine/ERDAS, Minitab, Surfer and Ski (Leica/Wild) were used.

## 2. ECHO SOUNDING BATHYMETRY

The procedure of the depth measurements begins with the GPS receivers programming. The accuracy of the GPS results depends directly on the number of satellites that are above the horizon and their geometrical formation. One GPS receiver was programmed to function according to the static method at a recording rate of 5'. The second receiver was programmed to function with the kinematic method at the same recording rate.

In figure 2, the sounding lines, that are also the boat's route, are depicted. In every chosen position of the route, the echo sounder user read the depth while the GPS receiver user read the corresponding echo of the measurement. The recording rate of the depth measurements was 150/h. This rate depends on the boat's speed, the bottom's morphology and the weather conditions. During this specific procedure the boat's speed was 5km/h and the weather conditions were very good.

In figure 3, the sounding depth contours are depicted.

### 3. MULTISPECTRAL BATHYMETRY

#### 3.1. The processing of the images

The multispectral SPOT and LANDSAT images were rectified through an affine transformation to the UTM coordinate system, which was also the coordinate system of the GPS measurements. In all SPOT bands, there was a non-significant amount of "salt and pepper" noise, which was reduced by using a spatial convolution low pass filter 3X3. In band 1 of the LANDSAT image there was a significant amount of "salt and pepper", while in bands 2 and 3 there was also strong banding. The low pass Fourier filters, Hanning and Butterworth, as well as the low pass spatial convolution filter 7X7, were tested for the most effective noise reduction (see fig. 4 and fig. 5)

#### 3.2. Multispectral Bathymetry

The water depth can be estimated by using the bathymetric model described by relation (3.1). This relation expresses the multiple regression [36] between the depth  $z$  and the variants  $X_i$  given by relation (3.2)

#### 3.3. Calibration and testing of the bathymetric model

In this paper, the model described by (3.1) was used for  $n=3$ . For the model's calibration a set of 183 of the 719 echo sounding points were used. The points covered the study area uniformly and were chosen so that distances between them were longer than the spatial resolution of the multispectral images. Since the data coming from the nearest neighbour resampling was almost identical to the data coming from the bicubic interpolation, only the latter were used for the calibration of the model. There were four different calibrations of the model, as follows:

- M1 from SPOT data filtered by the 3X3 spatial low pass filter.
- M2 from Landsat data filtered by the 7X7 low pass spatial filter.
- M3 from LANDSAT data filtered with a low pass Butterworth filter.
- M3 from LANDSAT data filtered with a low pass Hanning filter.

The statistical characteristics of the four models are depicted in table 1. The calibrations were tested by using a second set of 185 echo sounding depths at known positions (see figs 7, 8, 9, 10, 11). The statistical characteristics of the calibrations testing are depicted in table 2. In figures 12, 13, 14 and 15 the bathymetric naps coming from depths estimated from the four calibrations are depicted. In figures 14 and 15 it is clear that filters Hanning and Butterworth favour the model's calibration for depths up to only 9 m. For this reason, new calibrations of the model with LANDSAT data were accomplished for depths up to 9 m. The statistical characteristics of each calibration and its testing are depicted in table 3.

### 4. CONCLUSIONS

The model's calibration was supported by known points of high horizontal and depth accuracy. It was also observed that the resampling method does not affect the calibration's results. Due to the above, the remaining error sources can be:

- The difference between the position of an echo sounding point and the corresponding position on the image due to the image's spatial resolution. This source is not considered as a significant one, since the sea bottom changes smoothly (fig. 3)
- The ineffectiveness of the filters used for the noise reduction

The SPOT data seemed to be more appropriate for multispectral bathymetry applications than the LANDSAT data, because they had much less noise, which was significantly reduced. On the other hand the LANDSAT data filtered by the Butterworth low pass filter responded sufficiently for clear waters with depth up to 9 m.

---

**S. Hatzigaki,**

Rural and surveying, dipl. eng.

**Z. Karkani,**

Rural and surveying, dipl. eng.

**M. Matziri,**

Rural and surveying, dipl. eng.

**M. Papadopoulou,**

Associate professor, Department of Cadastre, Photogrammetry and Cartography, School of Rural and Surveying Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, E-mail: marpap@vergina.eng.auth.gr

**M. Tsakiri-Strati,**

Assistant professor, Department of Cadastre, Photogrammetry and Cartography, School of Rural and Surveying Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, E-mail: martsak@vergina.eng.auth.gr

**H. Tziavos,**

Professor, Department of Geodesy and Topography, School of Rural and Surveying Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, Greece, E-mail: tziavos@eng.auth.gr

**E. Zidrou,**

Rural and surveying, dipl. eng.