

## Η ΝΕΑ ΓΕΝΙΑ ΤΩΝ ΟΠΤΙΚΩΝ ΟΡΓΑΝΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΟΣΕΙΔΩΝ: ΤΡΕΧΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΑΙ ΤΑ ΠΡΩΤΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

*Δρακόπουλος Π.<sup>1</sup>, Νίττης Κ.<sup>2</sup>, Ζερβάκης Β.<sup>3</sup>, Πετυχάκης Γ.<sup>2</sup>, Μπάλλας Δ.<sup>2</sup>, Παγώνης Γ.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Τμήμα Οπτικής, ΤΕΙ Αθήνας, pdrak@teiath.gr

<sup>2</sup>Ινστιτούτο Ωκεανογραφίας, Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών

<sup>3</sup>Τμήμα Επιστήμης της Θάλασσας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

### Περίληψη

Το σύστημα πρόγνωσης ΠΟΣΕΙΔΩΝ για τις ελληνικές θάλασσες έχει εισέλθει στη δεύτερη φάση του. Στα πλαίσια αυτής της αναβάθμισης μια νέα γενιά οπτικών οργάνων έχει εγκατασταθεί στην πολυπαραμετρική πλατφόρμα Μ3Α στο Κρητικό Πέλαγος. Τα όργανα αυτά καταγράφουν (α) φαινόμενες οπτικές ιδιότητες – προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία σε επτά μήκη κύματος, αναδύομενη ακτινοβολία σε επτά μήκη κύματος, μονόμετρη ακτινοβολία PAR στα 25, 50, 75 και 100 μέτρα. (β) εγγενείς οπτικές ιδιότητες υπερφασματική κατακόρυφη κατανομή εξασθένησης και απορρόφησης δέσμης σε 80 μήκη κύματος με ανάλυση 4 nm, θολερότητα (οπισθοσκέδαση) στα προαναφερθέντα βάθη (γ) φθορισμό χλωροφύλλης-α σε τέσσερα βάθη. Σε αυτή την εργασία περιγράφονται αναλυτικά τα όργανα αυτά, αναπτύσσεται η διαδικασία της βαθμονόμησής τους και παρουσιάζονται τα πρώτα δεδομένα που καλύπτουν περίοδο πέντε μηνών.

**Λέξεις κλειδιά:** θαλάσσια οπτική, επιχειρησιακή ωκεανογραφία.

## THE NEW GENERATION OF OPTICAL INSTRUMENTS FOR THE POSEIDON SYSTEM: CURRENT STATUS AND FIRST RETRIEVALS

*Drakopoulos P.<sup>1</sup>, Nittis K.<sup>2</sup>, Zervakis V.<sup>3</sup>, Petyhakis G.<sup>2</sup>, Ballas D.<sup>2</sup>, Pagonis G.<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Department of Optics, TEI of Athens, pdrak@teiath.gr

<sup>2</sup> Institute of Oceanography, Hellenic Center for Marine Research

<sup>3</sup> Department of Marine Science, University of Aegean

### Abstract

The Poseidon monitoring and forecasting system for the Hellenic Seas has entered its second phase. During this stage, currently under implementation, among other improvements a new generation of optical instruments has been scheduled to be installed and some of them are already operational. These instruments monitor (a) apparent optical properties-AOPs: surface incident irradiance at seven wavelengths, water leaving radiance at seven wavelengths, broadband scalar irradiance (PAR) at four depths; (b) Inherent optical properties-IOPs: hyperspectral beam attenuation and absorption throughout the visible at 80 wavelengths with a 4nm resolution, turbidity (back scattering at 140deg) at four depths; (c) chlorophyll-a fluorescence at four depths. This paper describes in detail the instruments selected and installed and discusses calibration and bio-fouling issues. Furthermore it presents data observed during five months of operation in the Cretan Sea.

**Keywords:** marine optics, operational oceanography.

### 1. Εισαγωγή

Την τελευταία δεκαετία η παρακολούθηση πολλών παραμέτρων που αφορούν στην ποιότητα του θαλάσσιου νερού γίνεται με οπτικά όργανα (είτε in-situ, είτε με τηλεπισκόπηση). Τα οπτικά όργανα καταγράφουν το φως και τη διάδοσή του μέσα στο θαλάσσιο νερό ή την ανάδυσή του από την επιφάνεια της θάλασσας. Επιπλέον μπορούν να προσδιορίσουν τις βιολογικές επιδράσεις στις οπτικές ιδιότητες του νερού και το αντίστροφο. Σε επιχειρησιακό επίπεδο η καταγραφή των οπτικών παραμέτρων του θαλάσσιου νερού έχει ξεκινήσει από το Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών στα πλαίσια του προγνωστικού συστήματος Ποσειδών (Δρακόπουλος, 2006). Στη δεύτερη φάση του έχει γίνει σημαντική προσπάθεια αναβάθμισης των οπτικών συστημάτων στην πολυπαραμετρι-

κή πλατφόρμα παρατήρησης του Κρητικού Πελάγους (M3A). Τα όργανα αυτά καθώς και τα πρώτα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία.

Από λειτουργικής άποψης τα οπτικά όργανα κατατάσσονται σε αυτά που καταγράφουν τις εγγενείς οπτικές ιδιότητες του θαλάσσιου νερού (EOI) και αυτά που καταγράφουν τις φαινόμενες (ΦΟΙ). Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές ανασκοπήσεις των εννοιών της θαλάσσιας οπτικής (Dickey T. *et al.*, 2006). Οι EOI (απορρόφηση, σκέδαση, φθορισμός) αφορούν τις θεμελιώδεις οπτικές ιδιότητες του θαλάσσιου νερού και των διαλυμένων ή αιωρούμενων υλικών σε αυτό και δεν εξαρτώνται από το φως του περιβάλλοντος. Η απορρόφηση συσχετίζεται με τη μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε χημική ή θερμική, ενώ η σκέδαση στην αλλαγή πορείας του φωτός και το αθροιστικό αποτέλεσμα αυτών των διεργασιών σε μία δέσμη είναι η εξασθένηση. Η μεγάλη μεταβλητότητα που παρατηρείται στις EOI οφείλεται κυρίως στην παρουσία βιολογικών πληθυσμών και τα απορρίμματά τους, ενώ στις παράκτιες περιοχές σπουδαίο ρόλο παίζουν και τα αιωρούμενα ιζήματα και τα διαλυμένα οργανικά μακρομόρια φυτικής βιο-αποδόμησης (gelbstoff). Πολλές ουσίες όταν απορροφήσουν ακτινοβολία σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος επανεκπέμπουν (φθορίζουν) μέρος αυτής σε άλλο μεγαλύτερο χαρακτηριστικό μήκος. Στη θάλασσα πηγές φθορισμού είναι οργανικής προέλευσης, όπως το φυτοπλαγκτόν, οι πετρελαϊκοί ρύποι και τα αστικά λύματα. Η καταγραφή των EOI συγκεκριμένου δείγματος θαλάσσιου νερού παρέχει πληροφορίες (ποιοτικές και ποσοτικές) για την παρουσία ουσιών, αλγών και ρύπων.

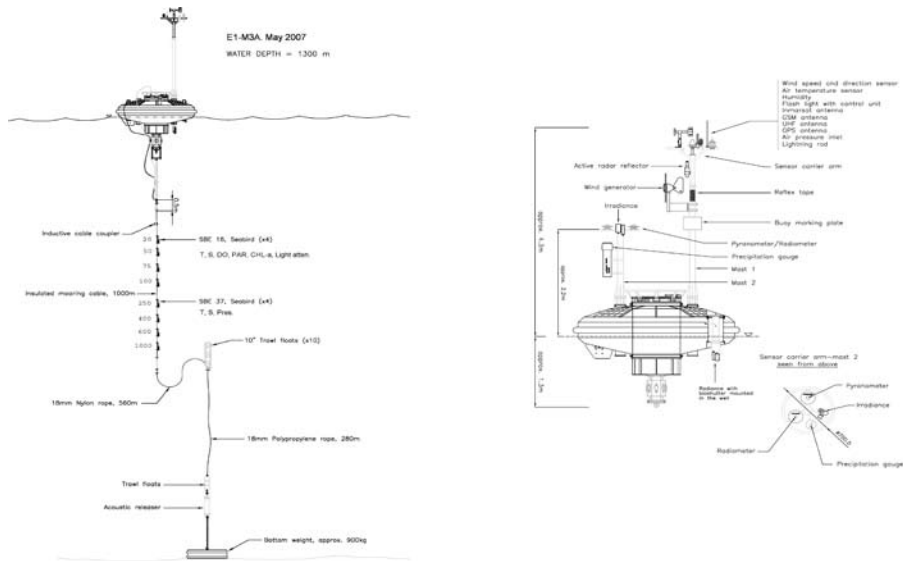
Οι φαινόμενες οπτικές ιδιότητες (ΦΟΙ) εξαρτώνται από τις εγγενείς οπτικές ιδιότητες του νερού αλλά και από την γωνιακή κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας, μετρώντας δε *in-situ* και με τηλεπισκόπηση. Η θεμελιώδης ΦΟΙ είναι η ένταση ακτινοβολίας (Radiance) και εκφράζει την ροή ακτινοβολίας σε δεδομένη θέση στο χώρο και διεύθυνση, ανά μονάδα στερεάς γωνίας και ανά μονάδα επιφανείας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης της φωτεινής ροής. Άλλο μέγεθος που αναφέρεται σε ακτινοβολία που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια είναι η ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας (Irradiance) ολοκληρωμένη στη διεύθυνση (αναδυόμενη & καταδυόμενη). Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι αδιάφορη, π.χ. φωτόνια για φωτοσύνθεση, η ολοκλήρωση δεν σταθμίζεται με το συννημίτονο και το απορρέον μέγεθος είναι η μονόμετρη ένταση (scalar irradiance). Η μονόμετρη ένταση προσπίπτουσα από κάθε διεύθυνση στο σύνολο του ορατού ( 400 – 700 nm) είναι η διαθέσιμη ακτινοβολία για φωτοσύνθεση – PAR. Ένα σημαντικό μέγεθος που απορρέει από τους παραπάνω ορισμούς είναι η ανακλαστικότητα τηλεπισκόπησης: δηλαδή ο λόγος της αναδυόμενης έντασης ακτινοβολίας (ζενίθ) προς την καταδυόμενη ένταση ακτινοβολίας στην επιφάνεια της θάλασσας. Είναι το μέγεθος που καταγράφεται από τους δορυφόρους ανίχνευσης του χρώματος της θάλασσας. Σε πρώτη προσέγγιση ο λόγος της ανακλαστικότητας στα 490 nm προς αυτήν στα 555 nm είναι ανάλογη του λογάριθμου της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης.

## 2. Υλικά και Μέθοδοι

### 2.1 ΤΑ ΟΡΓΑΝΑ

Στην πολυπαραμετρική πλατφόρμα παρατήρησης M3A (Εικ. 1) τα οπτικά όργανα που έχουν εγκατασταθεί στην παρούσα φάση είναι:

- Ραδιόμετρο (OCR-507 irradiance): Μετράει την ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε 7 μήκη κύματος (συμβατά με τους δορυφόρους SEAWIFS και MODIS 412, 443, 490, 555, 665, 683, 705 nm ). Έχει τοποθετηθεί στα 2,2 μέτρα από την επιφάνεια της θάλασσας και διαθέτει κλείστρο προστασίας βιοαπόθεσης.
- Ραδιόμετρο (OCR-507 radiance): Μετράει την ένταση της αναβλύζουσας ακτινοβολίας από συ-



Εικ.1: (α) Η συστοιχία οργάνων στον Μ3Α (β) Λεπτομέρεια τοποθέτησης οπτικών οργάνων στον πλωτήρα.

γκεκριμένη διεύθυνση στα προαναφερθέντα 7 μήκη κύματος. Έχει τοποθετηθεί στα 40 cm κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας και διαθέτει κλείστρο προστασίας βιοαπόθεσης.

- Φωτόμετρα PAR (LI-193SA): Μετρούν την μονόμετρη ροή φωτονίων ανά μονάδα επιφανείας ολοκληρωμένη σε στερεά γωνία  $4\pi$  sr από 400 έως 700 nm. Έχουν εγκατασταθεί σε βάθος 25, 50, 75 και 100 μέτρα.
- Θολερόμετρα/Φθορισίμετρα (FLNTU): Καταγράφουν την οπισθοσκέδαση στα 700 nm ανάλογη της θολερότητας (μονάδα NTU) καθώς και τον φθορισμό στα 685 nm που εμφανίζεται με την διέγερση της χλωροφύλλης-α στα 470 nm (μονάδες συγκέντρωσης). Έχουν εγκατασταθεί σε βάθος 25, 50, 75 και 100 μέτρα και διαθέτουν κλείστρο προστασίας βιοαπόθεσης. Τα φωτόμετρα και τα θολερόμετρα-φθορισίμετρα είναι συνδεδεμένα σε κεντρικές μονάδες CTD SBE-16 της Seabird στα αντίστοιχα βάθη.
- Υπερφασματικός καταγραφέας απορρόφησης και εξασθένησης (AC-S): Προορίζεται για επικουρική χρήση με πόντιση κατά τη διάρκεια πλοών συντήρησης (καταγραφή φασμάτων απορρόφησης και εξασθένησης στη ζώνη 430-750 nm με ανάλυση 4 nm).

## 2.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Από τη φύση τους τα οπτικά όργανα είναι ευαίσθητα στη βιοαπόθεση και τη γήρανση και η βαθμονόμησή τους σε τακτά χρονικά διαστήματα είναι επιβεβλημένη. Αν και τα λεπτομερή πρωτόκολλα βαθμονόμησης αυτών των οργάνων στα πλαίσια του Ποσειδώνα βρίσκονται σε εξέλιξη, παρακάτω παρατίθενται συνοπτικά οι αρχές και οι διαδικασίες που τα διέπουν:

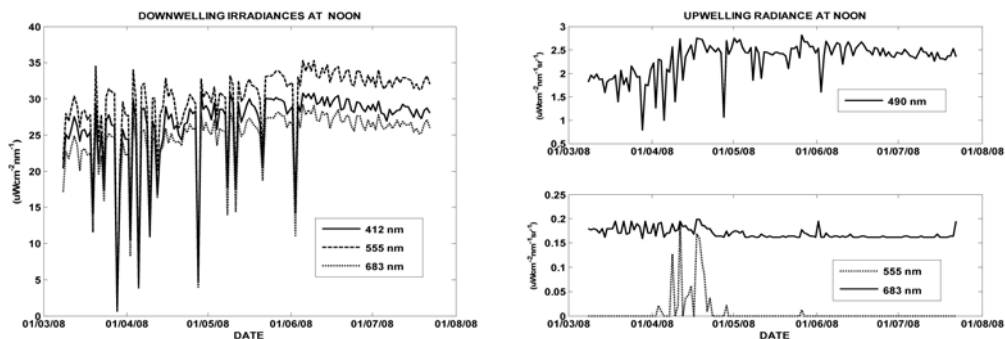
Για τα φωτόμετρα-ραδιόμετρα γίνεται χρήση φασματόμετρου της Ocean Optics (HR4000) με παράθυρο διάχυσης και απόκρισης συνημίτονου και με στάνταρ λυχνία βαθμονόμησης αλογόνου. Για τα OCR γίνεται ολοκλήρωση στο εύρος ζώνης κάθε αισθητήρα (10 nm) ενώ για τους αισθητήρες PAR γίνεται ολοκλήρωση από 400 έως 700 nm. Ειδικά για το OCR-507 radiance το παράθυρο διάχυσης αντικαθίσταται με σωλήνα τύπου Gershun αντίστοιχης γωνίας όρασης.

Για τον αισθητήρα χλωροφύλλης το SBE 16 τοποθετείται εντός της δεξαμενής βαθμονόμησης η οποία έχει γεμιστεί με επιφανειακό θαλασσινό νερό έτσι, ώστε η συγκέντρωση φυτοπλαγκτού να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Στη συνέχεια αφού το νερό της δεξαμενής ομογενοποιείται με τη χρήση του αναδευτήρα αρχίζει η λήψη μετρήσεων/δειγμάτων. Παράλληλα με την έναρξη των μετρήσεων από τον αισθητήρα, δείγμα νερού από την δεξαμενή (1 λίτρο) μεταφέρεται στο εργαστήριο χημείας για ανάλυση. Στη συνέχεια ακολουθώντας μια περίοδο μετρήσεων ~ 30 sec προσθέτονται 200ml υπερσυγκεντρωμένης καλλιέργειας φυτοπλαγκτού (*Chlorella*). Αφού ομογενοποιηθεί το σύστημα (9 min) ένα δεύτερο δείγμα παίρνεται για ανάλυση. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται έως ότου 1500 ml φυτοπλαγκτού προστεθούν στην δεξαμενή ενώ 7 δείγματα αναλύονται στο εργαστήριο. Αξίζει να ερευνηθεί η δυνατότητα εμπλουτισμού της δεξαμενής με θρεπτικά και όχι με μονοκαλλιέργεια φυτοπλαγκτού.

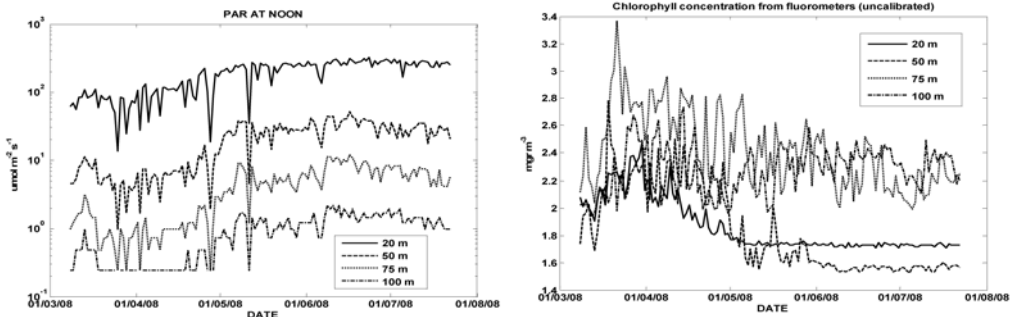
Για το θολερόμετρο γίνεται χρήση τριών αιωρημάτων μεταβλητής συγκέντρωσης σφαιριδίων πολυστερολίου (latex) διαμέτρου 1, 10, 30  $\mu\text{m}$ . με παρεμφερή δείκτη διάθλασης με τα θαλάσσια αιωρήματα. Τα τρία διαμετρήματα των σφαιριδίων διαλέχτηκαν έτσι ώστε να αντιστοιχούν σε τυπικές κατανομές μεγέθους αιωρημάτων στις ελληνικές θάλασσες (άργιλος, ψιλή και χονδρή ιλύς - Πούλος 2007, προσωπική επικοινωνία). Ξεκινώντας με την αρχική εργοστασιακή βαθμονόμηση σε NTU, οι μετέπειτα βαθμονομήσεις γίνονται για μεταβλητές συγκεντρώσεις των τριών αιωρημάτων διαφορετικής διαμέτρου (συγκεντρώσεις 0-125 mg/l). Η διαδικασία περιλαμβάνει την παρασκευή ενός αρχικού αιωρήματος κάθε σκεδαστή 500 mg/l το οποίο διαδοχικά διαλύεται προσθέτοντας απιονισμένο νερό για να παραχθούν αρκετά δείγματα. Πριν από κάθε μέτρηση, έντονη ανάδευση εξασφαλίζει το ότι τα σωματίδια παραμένουν σε συνεχή αιώρηση.

### 3. Αποτελέσματα

Τα πρώτα δεδομένα που αξιολογήθηκαν καλύπτουν την χρονική περίοδο Μάρτιος - Ιούλιος 2008 με συχνότητα συλλογής κάθε 3 ώρες. Αν και όλοι οι αισθητήρες κατέγραψαν δεδομένα χωρίς διακοπές, οι περισσότεροι παρουσίασαν προβλήματα βαθμονόμησης (μετρήσεις εμφανώς εκτός αποδεκτών ορίων). Επιπλέον η ευαισθησία σε μερικούς από αυτούς ήταν ανεπαρκής για τα διαυγή νερά του Κρητικού Πελάγους (τα κανάλια στα 555, 665, 683 nm στα ραδιόμετρα αναδύμενης ακτινοβολίας και τα θολερόμετρα). Δεδομένου ότι η διαδικασία της βαθμονόμησης είναι σε εξέλιξη δεν είναι δυνατή η ουσιαστική ανάλυση των δεδομένων στην παρούσα εργασία, μπορεί όμως να δοθεί μία πρώτη εκτίμηση του χρονικού συσχετισμού τους.



**Εικ. 2:** (α) Καταδύμενη ένταση ατμοσφαιρικής ακτινοβολίας σε τρία μήκη κύματος στις 12 GMT. (β) Αναδύμενη ένταση ηλιακής ακτινοβολίας σε τρία μήκη κύματος στις 12 GMT.



Εικ. 3: (α) PAR σε 4 βάθη στις 12 GMT. (β) Συγκέντρωση χλωροφύλλης σε 4 βάθη.

Στις Εικόνες 2 και 3, παρουσιάζονται τα ατεκμηρίωτα και αβαθμονόμητα δεδομένα. Η αρχική περίοδος καταγραφής αντιπροσωπεύει το χειμώνα και την αρχή της άνοιξης. Η συχνή νεφοκάλυψη καταγράφεται τόσο στην καταδύομενη ένταση ακτινοβολίας όσο και στην αναδύομενη αλλά και στο PAR. Η δομή μεταβλητότητας του PAR είναι συνδυασμός καταδύομενης και αναδύομενης ακτινοβολίας. Η έντονη κατακόρυφη μείξη είναι εμφανής στις συγκεντρώσεις της χλωροφύλλης όπου παρουσιάζεται ομογενοποιημένη. Με την έναρξη της άνοιξης το σήμα της αναδύομενης ακτινοβολίας στα 555 nm και της ανακλαστικότητάς της ενισχύεται και πιθανώς αυτό συσχετίζεται με άνθηση της άνοιξης. Το φαινόμενο καταγράφεται και στον φθορισμό της χλωροφύλλης (λόγω του φυσικού φωτισμού) στα 683 nm, όχι όμως τόσο έντονα στον φθορισμό λόγω των φθορισίμετρων. Προς το τέλος της άνοιξης και την αρχή του καλοκαιριού η στρωμάτωση της στήλης επανέρχεται και το μέγιστο της χλωροφύλλης περιορίζεται στα 75-100 m με αποτέλεσμα η ανακλαστικότητα του επιφανειακού στρώματος στα 555 nm να ελαχιστοποιείται. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα δεν παρατηρείται αξιόλογη βιοαπόθεση στους αισθητήρες.

#### 4. Συμπεράσματα

Αν και τα περισσότερα από αυτά τα όργανα βρίσκονται ακόμη στη φάση της δοκιμαστικής λειτουργίας και η διαδικασία της βαθμονόμησης είναι σε εξέλιξη, αναμένεται ότι στο εγγύς μέλλον οπτικά δεδομένα υψηλής ποιότητας θα είναι διαθέσιμα σε πραγματικό χρόνο. Κατά συνέπεια μία ποικιλία μελετών θα ευεργετηθούν όπως φαίνεται από ένα παράδειγμα που ακολουθεί. Από την κατακόρυφη κατανομή της μονόμετρης έντασης ακτινοβολίας στο ορατό στη περιοχή της πλατφόρμας, υπολογίστηκε ο μέσος συντελεστής διάχυσης ( $K_{\text{par}}$ ) και από αυτόν το οπτικό βάθος εξασθένησης εκτιμήθηκε στα 20 μέτρα (Drakopoulos *et al.*, 2003). Αυτό οριοθετεί το στρώμα από το οποίο το 86% της ανακλαστικότητας της τηλεπισκόπησης προέρχεται. Η σύγκριση όμως της *in situ* μέσης συγκέντρωσης χλωροφύλλης αυτού του στρώματος με τις συγκεντρώσεις των δεδομένων SeaWiFS έδειξε ότι οι τιμές τηλεπισκόπησης ήταν υψηλότερες κατά 37%. Συνεπώς, η καταγραφή των λόγων ανακλαστικότητας *in situ*, του φθορισμού στα 683 nm και η χρήση βαθμονομημένων *in vivo* φθορισίμετρων, θα δώσει καινούργιους συντελεστές για τις τοπικές εμπειρικές σχέσεις των δεδομένων τηλεπισκόπησης άρα και τεκμηριωμένα δεδομένα συγκέντρωσης χλωροφύλλης κατάλληλα για αφομοίωση σε περιφερειακά οικολογικά μοντέλα.

#### 5. Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Dickey, T., Lewis, M. & Chang, G., 2006. Optical Oceanography: Recent advances and future directions using global remote sensing and in situ observations, *Rev. Geophys.*, 44, RG1001, doi: 10.1029/2003RG000148
- Drakopoulos, P., Petyhakis, G., Valavanis, V., Nittis, K. & Triantafyllou, G., 2003. Optical variability associated with phyto-

plankton dynamics in the Cretan Sea during 2000 and 2001. In: “Building the European Capacity in Operational Oceanography”, Elsevier Oceanography Series No 69, Elsevier BV: 554-561.

Δρακόπουλος, Π., 2006. Τα οπτικά όργανα στη επιχειρησιακή ωκεανογραφία, Πρακτικά 8<sup>ου</sup> Πανελλ. Συμποσ. Ωκεανογρ. και Αλιείας, 621-623.