

# ΟΠΤΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΘΑΛΑΣΣΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Πάνος Δρακόπουλος  
Εργαστήριο Οπτικών Οργάνων, Τμήμα Οπτικής, Τ.Ε.Ι. Αθήνας

## Περίληψη

Η χρήση οπτικών οργάνων συμπεριλαμβάνεται στις ελάχιστες μη παρεμβατικές μεθόδους καταγραφής αιωρούμενου υλικού και βιολογικών ή χημικών παραμέτρων του θαλάσσιου νερού που συσχετίζονται με την ποιότητά του. Μετρούν τις εγγενείς και φαινόμενες οπτικές ιδιότητες του νερού αλλά και τον φθορισμό και παρέχουν ουσιαστικές πληροφορίες για επικίνδυνες ανθήσεις φυκών, διασπορά ρύπων και λυμάτων, συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων, πρωτογενή παραγωγή, θολερότητα. Τέτοια όργανα είναι τα διαδοσίμετρα, τα θολερόμετρα, τα φθορισίμετρα, και τα διαφόρων τύπων φασματοφωτόμετρα. Σε αυτή την εργασία ορίζονται τα μετρούμενα οπτικά μεγέθη και εξηγείται η σχέση τους με τη ποιότητα του θαλάσσιου νερού ενώ γίνεται μία ανασκόπηση της εξέλιξης της τεχνολογίας στα συγκεκριμένα οπτικά όργανα. Στη συνέχεια δίνεται η παρούσα κατάσταση στην Ελλάδα όσον αφορά τη χρήση αυτών των τεχνικών για την παρακολούθηση της ποιότητας του θαλάσσιου νερού. Τέλος παρουσιάζεται η ανάπτυξη μίας οπτικής διάταξης στο ΤΕΙ Αθήνας στα πλαίσια του προγράμματος ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ που καταγράφει την θολερότητα και συκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στο θαλάσσιο νερό.

## Εισαγωγή

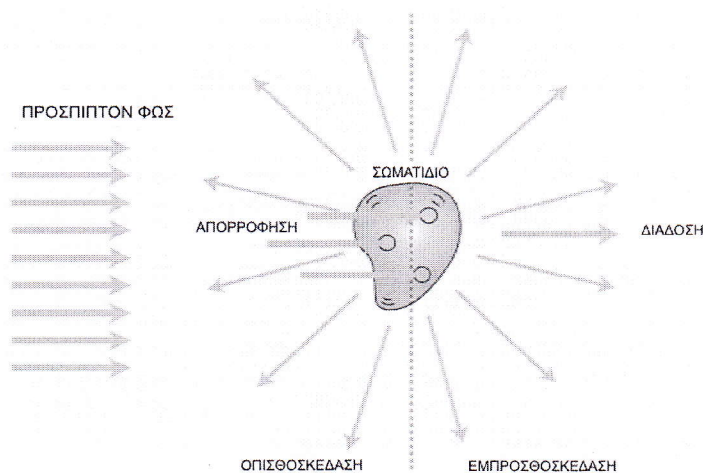
Ο συνεχής έλεγχος της ποιότητας του θαλάσσιου νερού στις παράκτιες περιοχές γίνεται ολοένα και πιο επιτακτικός. Εκτιμάται ότι πάνω από το 60% του πληθυσμού διαβιώνει και δραστηριοποιείται στην παράκτια ζώνη (από -200 m έως +200 m από τη μέση στάθμη της θάλασσας). Οι ωφέλειες που απορρέουν από τα παράκτια νερά περιλαμβάνουν μεταξύ των άλλων την αλιεία, τις ιχθυοκαλλιέργειες, τους φυσικούς πόρους, τη μεταφορά αγαθών και την αναψυχή. Τα ίδια όμως νερά συχνά επηρεάζονται δυσμενώς από ρύπους που προέρχονται από τις απορροές ποταμών, λύματα και επαναιώρηση αυτών, πετρελαιοκηλίδες, εισροές λιπασμάτων που προκαλούν ευτροφισμό και μερικές φορές ανοξικές συνθήκες, ανθήσεις επικινδύνων φυκών κλπ (Dickey T. 2004). Την τελευταία δεκαετία η παρακολούθηση πολλών παραμέτρων που αφορούν στην ποιότητα του θαλάσσιου νερού γίνεται με οπτικά όργανα (in-situ και 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 (Glenn S. et al. 2004).

Στην έρευνα για θέματα θαλάσσιας ρύπανσης χρησιμοποιούνται συχνά μετρητές σκέδασης, απορρόφησης ή απλά εξασθένησης κάποιας φωτεινής δέσμης καθώς και φθορισμού κατόπιν διέγερσης σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Η ανίχνευση των ρύπων περιλαμβάνει αναγνώριση των ουσιών από την φασματική τους απορρόφηση και εκπομπή. Οι οπτικές μέθοδοι για ανίχνευση σωματιδίων, βασίζονται στο γεγονός ότι ο συντελεστής εξασθένησης ή σκέδασης σε πολλές περιπτώσεις είναι ανάλογος της συκέντρωσης των σωματιδίων (εκφρασμένα ως μάζα ανά μονάδα όγκου). Όσον αφορά τις διαλυμένες χρωστικές, τα άλγη και τους υδρογονάνθρακες πετρελαίου, η

συγκέντρωσή τους είναι ανάλογη του συντελεστή απορρόφησης σε συγκεκριμένα μήκη κύματος ή και του βαθμού φθορισμού.

### Έννοιες της θαλάσσιας οπτικής

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές ανασκοπήσεις των εννοιών της θαλάσσιας οπτικής (π.χ. Dickey T. et al. 2006). Εδώ παρατίθεται μία συνοπτική παρουσίαση των βασικότερων μεγεθών. Από λειτουργικής άποψης τα οπτικά όργανα κατατάσσονται σε αυτά που καταγράφουν τις εγγενείς οπτικές ιδιότητες του θαλάσσιου νερού (ανεξάρτητες της διαθέσιμης ακτινοβολίας στο περιβάλλον), αυτά που καταγράφουν τις φαινόμενες (εξαρτώνται από τη θέση του δείγματος) και τέλος σε αυτά που καταγράφουν το φθορισμό (π.χ. Jerlov N. 1976).



**Σχήμα 1: Διέλευση δέσμης φωτός μέσα από θαλάσσιο νερό και πιθανές διαδικασίες**

Εγγενείς οπτικές ιδιότητες: Αφορούν τις θεμελιώδεις οπτικές ιδιότητες του θαλάσσιου νερού και των διαλυμένων ή αιωρούμενων υλικών σε αυτό. Δεν εξαρτώνται από το φως του περιβάλλοντος. Τα φωτόνια στη διαδρομή τους μέσα στο θαλάσσιο νερό, είτε σκεδάζονται είτε απορροφούνται από τα μόρια και τα σωματίδια (Σχήμα 1). Η απορρόφηση αναφέρεται στη μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε χημική ή θερμική. Η σκέδαση στην αλλαγή πορείας του φωτός. Το αθροιστικό αποτέλεσμα αυτών των διεργασιών σε μία δέσμη είναι η εξασθένηση.

Η φωτεινή ροή  $\Phi$  της εξερχόμενης δέσμης συνδέεται με τη φωτεινή ροή  $\Phi_0$  της προσπίπτουσας με τη γνωστή σχέση

$$\Phi(z, \lambda) = \Phi_0(z, \lambda) \exp[-c(z, \lambda)d]$$

Όπου  $d$  είναι το πάχος του στρώματος διέλευσης, και  $c$  ο συντελεστής εξασθένησης. Μετράται ως συνάρτηση του μήκους κύματος και του βάθους με μονάδες  $1/m$ . Προφανώς ο συντελεστής απορρόφησης είναι το άθροισμα του συντελεστή απορρόφησης  $a(z, \lambda)$  και του συντελεστή σκέδασης  $b(z, \lambda)$ .

Οι εγγενείς οπτικές ιδιότητες του καθαρού θαλάσσιου νερού είναι πρακτικά σταθερές και μεταβάλλονται ελάχιστα με τη θερμοκρασία και την αλατότητα. Η μεγάλη μεταβλητότητα που παρατηρείται οφείλεται κυρίως στην παρουσία βιολογικών πληθυσμών και τα απορρίμματα τους. Στις παράκτιες περιοχές επιπλέον, σπουδαίο ρόλο παίζουν τα αιωρούμενα ιζήματα και τα διαλυμένα οργανικά μακρομόρια φυτικής βιο-αποδόμησης (gelbstoff). Συνεπώς οι πέντε παράγοντες που

συνεισφέρουν στις οπτικές ιδιότητες είναι το καθαρό νερό, η χλωροφύλλη και παρεμφερείς χρωστικές, το gelbstoff, τα αποσαθρώματα και τα αιωρούμενα υλικά (πλανκτονικά και ιζηματογενή). Επειδή η επίδραση του κάθε παράγοντα στις ιδιότητες είναι χαρακτηριστική αυτού, η καταγραφή των οπτικών ιδιοτήτων συγκεκριμένου δείγματος θαλάσσιου νερού, χαρακτηρισμός, παρέχει πληροφορίες (ποιοτικές και ποσοτικές) για την παρουσία ουσιών, αλγών και ρύπων. Πηγές σκέδασης είναι τα αιωρούμενα σωματίδια (οργανικής ή ανόργανης προέλευσης). Πηγές απορρόφησης είναι κυρίως το φυτοπλαγκτόν (σε μήκος κύματος ανάλογο με τη χρώση του είδους) και το gelbstoff.

Φαινόμενες οπτικές ιδιότητες: εξαρτώνται από τις εγγενείς οπτικές ιδιότητες του νερού αλλά και από την γωνιακή κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας. Μετρώνται in-situ και με τηλεπισκόπηση. Οι σημαντικότερες είναι:

Ένταση φωτεινής ακτινοβολίας (Radiance) -  $L(\theta, \Phi, \lambda)$ : Είναι το θεμελιώδες μέγεθος της ραδιομετρίας και εκφράζει την φωτεινή ροή σε δεδομένη θέση στο χώρο και διεύθυνση, ανά μονάδα στερεάς γωνίας και ανά μονάδα επιφανείας κάθετης στη διεύθυνση διάδοσης της φωτεινής ροής. Οι μονάδες μέτρησης είναι  $Wm^{-2}sr^{-1}$ .

Το άλλο μέγεθος που αναφέρεται σε ακτινοβολία που προσπίπτει σε επιφάνεια (συνήθως οριζόντια στη θαλάσσια οπτική) είναι η ένταση προσπίπτουσας φωτεινής ακτινοβολίας (Irradiance) -  $E(\lambda)$ : Είναι η φωτεινή ροή ολοκληρωμένη στη διεύθυνση ανά μονάδα επιφανείας  $Wm^{-2}$ . Η ολοκλήρωση του  $L$  σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης  $\theta$ , είναι σταθμισμένη με το συνημίτονο της ( $L \cos\theta$ ). Όταν η ολοκλήρωση αφορά ακτινοβολία που προσπίπτει στο πάνω μέρος της επιφάνειας αναφερόμαστε σε ένταση καταδύομενης προσπίπτουσας δέσμης φωτός ενώ όταν προσπίπτει στο κάτω μέρος της επιφάνειας σε ένταση αναδύομενης προσπίπτουσας δέσμης. Η στάθμιση με το συνημίτονο υπεισέρχεται λόγω του διαφορετικού αποτελέσματος που έχει η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας στις περισσότερες διεργασίες. Όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι αδιάφορη, π.χ. φωτόνια για φωτοσύνθεση, η ολοκλήρωση δεν σταθμίζεται με το συνημίτονο και το απορρέον μέγεθος είναι η μονόμετρη ένταση (scalar irradiance) δηλαδή μονόμετρη φωτεινή ροή ανά μονάδα επιφανείας. Όταν η ολοκλήρωση αφορά όλες τις στερεές γωνίες ( $4\pi$ ) και η ολοκλήρωση γίνεται στο ορατό (400 – 700 nm) το μέγεθος που προκύπτει είναι η διαθέσιμη ακτινοβολία για φωτοσύνθεση – PAR.

Ένα σημαντικό μέγεθος που απορρέει από τους παραπάνω ορισμούς είναι η ανακλαστικότητα τηλεπισκόπησης:  $R_{rs} = L_w(\lambda) / E_d(\lambda)$ , δηλαδή ο λόγος της αναδύομενης έντασης ακτινοβολίας προς την καταδύομενη ένταση ακτινοβολίας στην επιφάνεια της θάλασσας. Είναι το μέγεθος που καταγράφεται από δορυφόρους χρώματος της θάλασσας.

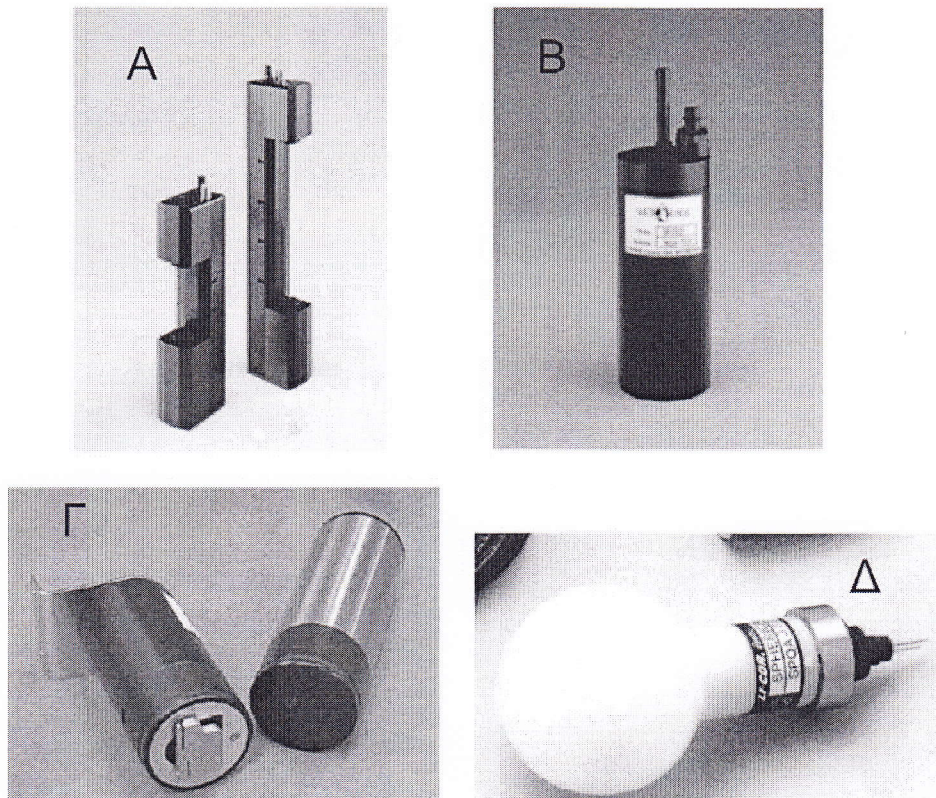
Τέλος ένα άλλο μέγεθος που καταγράφεται, συναφές με τα διαύγεια του νερού είναι ο συντελεστής διάχυτης εξασθένησης:  $K_{u,d}(z, \lambda) = -d / dz [\ln E_{u,d}(z, \lambda)]$ . Αντιπροσωπεύει τον ρυθμό εξασθένησης με το βάθος της αναδύομενης, καταδύομενης και μονόμετρης έντασης ακτινοβολίας προσπίπτουσας σε οριζόντια επιφάνεια.

Φθορισμός: Πολλές ουσίες όταν απορροφήσουν ακτινοβολία σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος επανεκπέμπουν μέρος αυτής σε άλλο μεγαλύτερο χαρακτηριστικό μήκος. Στη θάλασσα πηγές φθορισμού είναι οργανικής προέλευσης, όπως το φυτοπλαγκτόν, οι πετρελαϊκοί ρύποι και τα αστικά λύματα.

#### Τεχνολογίες οπτικών οργάνων

Τα πλέον διαδομένα όργανα μέτρησης εξασθένησης είναι τα διαδοσίμετρα ή τρανσμισόμετρα (Σχήμα 2Α). Η αρχή βασίζεται στη μέτρηση εξασθένησης παράλληλης δέσμης συνήθως στα 660 nm όπου η απορρόφηση είναι ελάχιστη και το σήμα είναι κυρίως ανάλογο της σκέδασης και κατά συνέπεια της

συγκέντρωσης του σκεδαστή. Οι καταγραφείς της απορρόφησης βασίζονται στην ίδια αρχή και επιπλέον υπάρχει ανακλαστικό κάτοπτρο κατά μήκος του οπτικού δρόμου ώστε η ακτινοβολία που σκεδάζεται επανέρχεται στην αρχική πορεία της δέσμης. Οι καταγραφείς σκέδασης γνωστοί και ως θολερόμετρα (Σχήμα 2Γ) εκπέμπουν ένα κώνο φωτός στο δείγμα και καταγράφεται η ακτινοβολία που οπισθοσκεδάζεται. Τα πιο απλά (και περισσότερα) από τα παραπάνω όργανα μετρούν σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, την τελευταία όμως πενταετία έχουν εμφανιστεί στην αγορά όργανα με υπερφασματικές δυνατότητες (ανα 5 νανόμετρα) στο ορατό μέρος του φάσματος με αποτέλεσμα την ευκολότερη και γρηγορότερη ερμηνεία των μετρήσεων.



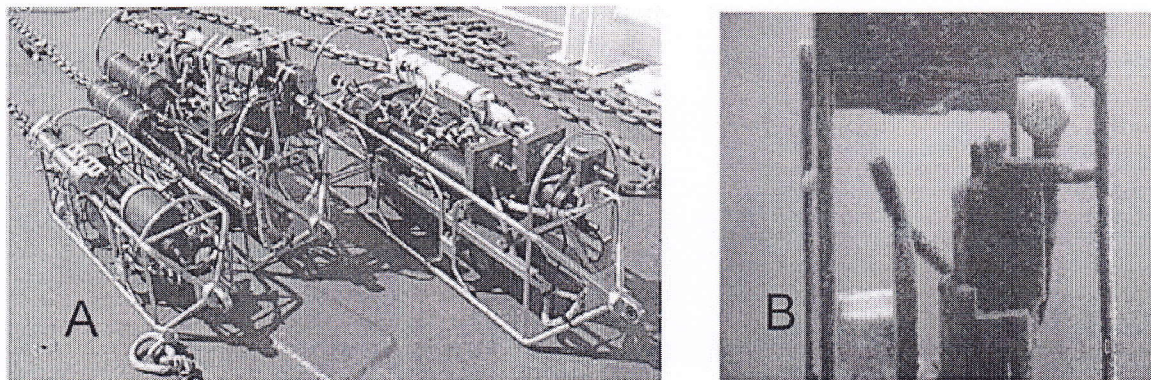
**Σχήμα 2: Τυπικά θαλάσσια οπτικά όργανα: (Α) διαδοσίμετρο, (Β) φθορισίμετρο, (Γ) θολερόμετρο, (Δ) αισθητήρας PAR**

Τυπικά όργανα μέτρησης φθορισμού και συνεπώς ανίχνευσης και ποσοτικοποίησης της φθορίζουσας ουσίας είναι τα φθορισίμετρα (Σχήμα 2B). Οι φθορίζουσες ουσίες που εμπεριέχονται στο θαλάσσιο νερό διεγείρονται με ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος (συνήθως μπλε) και φθορίζουν σε κάποιο άλλο μεγαλύτερο μήκος (συνήθως κόκκινο). Το μήκος κύματος της φθορίζουσας ακτινοβολίας είναι χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης οργανικής ουσίας. Η τεχνολογία καταγραφής φθορισμού της χλωροφύλλης είναι αρκετά ανεπτυγμένη, όμως για ρύπους όπως οι υδρογονάνθρακες είναι ακόμα σε εξέλιξη. Ο φυσικό φθορισμός της χλωροφύλλης στα 683 nm που προέρχεται από την φυσική διέγερση του φυτοπλανκτού από τον ήλιο μετριέται από δορυφόρους καταγραφής του χρώματος της θάλασσας (π.χ. ο δορυφόρος MODIS AQUA της NASA).

Για την μέτρηση φαινομένων οπτικών παραμέτρων, χρησιμοποιούνται τα φασματοφωτόμετρα σε διάφορα μήκη κύματος. Οι αισθητήρες ανάλογα με τη γεωμετρία τους μετρούν την ένταση σε μία συγκεκριμένη διεύθυνση ή την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και έχουν επίπεδη φωτοευαίσθητη επιφάνεια. Όταν καταγράφεται ταυτόχρονα όλο το ορατό φάσμα και η γεωμετρία της επιφάνειας είναι σφαιρική, δηλαδή η μετρούμενη ένταση είναι ανεξάρτητη της γωνίας πρόσπτωσης,

τότε σύμφωνα με τα προλεχθέντα η μέτρηση αντιπροσωπεύει τη διαθέσιμη ακτινοβολία για φωτοσύνθεση – PAR (Σχήμα 2Δ).

Σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται συνεχής καταγραφή, δηλαδή παρακολούθηση των διαφόρων μεγεθών συνήθως σε πραγματικό χρόνο. Τα οπτικά όργανα ποντίζονται σε συστοιχίες (Σχήμα 3Α) και σε διάφορα βάθη και οι μετρήσεις καταλήγουν στο χρήστη με τηλεμετρικές μεθόδους.



**Σχήμα 3: (Α) Συστοιχία οπτικών οργάνων έτοιμη για πόντιση. (Β) Βιοαπόθεση σε αισθητήρα PAR μετά από 20 μέρες πόντισης στον Σαρωνικό**

Η συντήρηση και βαθμονόμηση των οπτικών αισθητήρων είναι επίσης πολύπλοκη διαδικασία κυρίως λόγω του ότι είναι ευάλωτοι στην βιοαπόθεση (Σχήμα 3B). Η διατήρηση λειτουργικών οπτικών αισθητήρων σε παράκτια νερά για χρονικά διαστήματα της τάξης μηνών αποτελεί πρόκληση από μόνη της (Drakopoulos P. et al 2004). Οι σύγχρονες τεχνικές αφορούν χάλκινες σωληνώσεις και παρουσία φωτοφρακτών ώστε η έκθεση του αισθητήρα στο περιβάλλον να περιορίζεται μόνο κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Τέλος αξίζει να αναφερθεί ότι έχει επιτευχθεί σημαντική ανάπτυξη αλγορίθμων μεταφοράς ακτινοβολίας, τα λεγόμενα βιο-οπτικά μοντέλα, που είναι κατάλληλα για την αυτοματοποιημένη ερμηνεία των μετρήσεων. Ο τελικός στόχος είναι η επιχειρησιακή χρηστικότητα τους (Dickey T. 2004).

#### Ελληνική εμπειρία

Στις ελληνικές θάλασσες η καταγραφή με χρήση οπτικών οργάνων των μεγεθών που σχετίζονται με την ποιότητα του θαλάσσιου νερού γίνεται κυρίως από το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών και δευτερευόντως από άλλα ερευνητικά ινστιτούτα και οργανισμούς (π.χ. ΙΝΑΛΕ, ΥΥΠΙΝ) καθώς και από πανεπιστημιακά εργαστήρια. Στην Κύπρο στο χώρο αυτό δραστηριοποιείται το Τμήμα Αλιείας και Θαλασσίων Ερευνών και το πανεπιστήμιο Κύπρου με το Ωκεανογραφικό Κέντρο και τον Τομέα Θαλασσίου Περιβάλλοντος ([www.moa.gov.cy](http://www.moa.gov.cy))

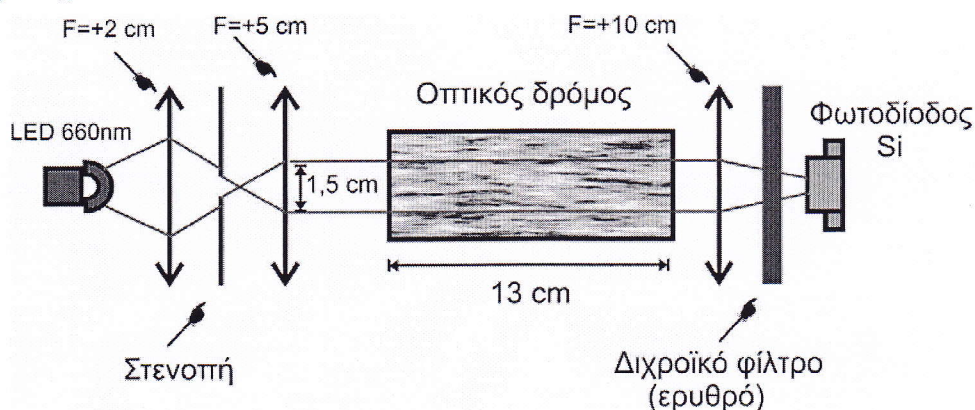
Σε επιχειρησιακό επίπεδο, η καταγραφή των οπτικών παραμέτρων του θαλάσσιου νερού έχει ξεκινήσει από το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσίων Ερευνών ([www.hcmr.gr](http://www.hcmr.gr)), στα πλαίσια των προγνωστικών συστημάτων Μ3Α (MFS-PP) και Ποσειδών. Στην πολυπαραμετρική πλατφόρμα παρατήρησης Μ3Α, τα οπτικά όργανα που έχουν εγκατασταθεί στην παρούσα φάση είναι τέσσερις αισθητήρες PAR, τέσσερα φθορισόμετρα (διέγερση στα nm 455 και καταγραφή φθορισμού στα 685 nm), και τέσσερα διαδοσίμετρα στα 660 nm (Drakopoulos P. et al. 2003). Στα πλαίσια της δεύτερης

φάσης του προγνωστικού συστήματος Ποσειδών, Ποσειδών II έχουν προγραμματιστεί τα εξής όργανα για εγκατάσταση σε συγκεκριμένους πλωτήρες: Αισθητήρες PAR (400-700 nm), φθορισόμετρα (διέγερση στα 470 nm, καταγραφή φθορισμού στα 695 nm), διαδοσίμετρα, (στα 470 nm, 555 nm, 650 nm). Επίσης ραδιόμετρα καταγραφής έντασης αναδύομενης ακτινοβολίας – ( $W/m^2 /Sr$  στη ζώνη 400-865 nm, σε επτά κανάλια και με πεδίο όρασης δέκα μοιρών), και έντασης καταδύομενης προσπίπτουσας ακτινοβολίας ( $W/m^2$ , 400-865 nm, σε επτά κανάλια, με γωνιακή απόκριση συνημίτονου). Τέλος θα εγκατασταθούν και υπερσύγχρονα όργανα καταγραφής υπερ-φασματικής απορρόφησης και εξασθένησης (στη ζώνη 430-750 nm με μέτρηση κάθε 4 nm).

#### Ανάπτυξη διάταξης στο TEI Αθήνας

Τα υπάρχοντα οπτικά όργανα (προέλευσης εξωτερικού) χαρακτηρίζονται από σχετικά μεγάλο κόστος και η διάδοσή τους είναι περιορισμένη κυρίως σε εξειδικευμένους ερευνητικούς φορείς (Orwin J. And Smart C. 2005). Στα πλαίσια του προγράμματος Αρχιμήδης στο TEI της Αθήνας, εκπονείται ερευνητικό έργο με τίτλο «Ανάπτυξη διάταξης μέτρησης οπτικών παραμέτρων του θαλάσσιου νερού». Αφορά την ανάπτυξη ενός μετρητικού συστήματος της εξασθένησης και του φθορισμού σε μήκη κύματος που επιλέχθηκαν με γνώμονα το χαμηλό κόστος των υλικών (πηγών, φωτοδιόδων, ηλεκτρονικών) που απαιτούνται. Προφανώς η ελαχιστοποίηση του κόστους επηρεάζει και τον βαθμό ακριβείας και το εύρος των μετρήσεων, γεγονός όμως που είναι απόλυτα συμβατό με το μη ερευνητικό αλλά απλά ενδεικτικό - ελεγκτικό χαρακτήρα της διάταξης. Συμπερασματικά, η καινοτομία της διάταξης έγκειται στο ότι όταν σε επόμενη φάση παραχθεί μαζικά θα αποτελέσει ένα φτηνό εργαλείο στα χέρια ιδιωτών (μικρές μονάδες ιχθυοκαλλιέργειας, ξενοδοχεία) ή φορέων ( Δήμοι, Κοινότητες κλπ.) που θα μπορεί να προσαρμόζεται ανάλογα με τη χρήση στις περιβαλλοντικές συνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής επιτήρησης.

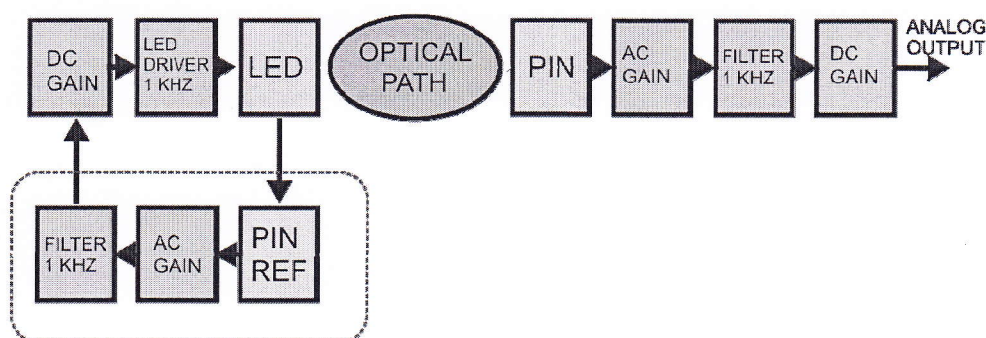
Εδώ θα παρουσιάσουμε την ανάπτυξη του διαδοσίμετρου που βρίσκεται σε προχωρημένη φάση. Η διάταξη αποτελείται από οπτικό και ηλεκτρονικό μέρος. Το οπτικό μέρος (Σχήμα 4) αποτελείται από τα εξής στοιχεία:



**Σχήμα 4: Οπτικό διάγραμμα της διάταξης**

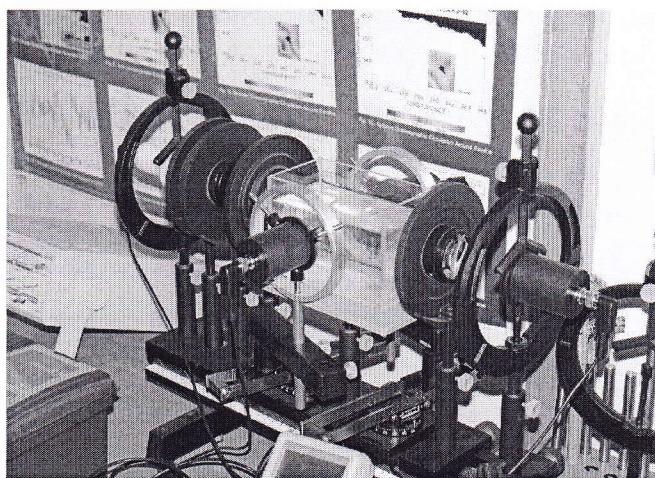
Η πηγή φωτός είναι ένα GaAlAs ultra-bright LED με δυνατότητα εκπομπής 3000 mcd στα 660 nm όπου η απορρόφηση του gelbstoff είναι αμελητέα. Ο κώνος φωτός που εκπέμπεται έχει γωνία  $20^\circ$  και εστιάζεται με έναν αμφίκυρτο  $f=+20$  mm σε μία στενοπή  $\sim 1$  mm διαμέτρου για γεωμετρική βελτίωση και στη συνέχεια σχηματίζεται μία παράλληλη δέσμη διαμέτρου 15 mm από ένα φακό  $f=+50$  mm. Η δέσμη διασχίζει έναν οπτικό δρόμο εξασθένησης μήκους 130 mm και επανεστιάζεται σε μία φωτοδίοδο πυριτίου με ενεργή επιφάνεια 1,75 mm προστατευμένη με ένα διχροϊκό κόκκινο φίλτρο ώστε να ελαχιστοποιηθεί η παράσιτη ακτινοβολία.

Το LED τροφοδοτείται με πηγή ρεύματος που εξασφαλίζει σταθερότητα της φωτεινής έντασης κατάλληλα διαμορφωμένο στο 1 KHz (Σχήμα 5). Επιπλέον προβλέπεται σύστημα ανατροφοδότησης ώστε να ισοσταθμίζονται πιθανές αυξομειώσεις στην ένταση της ακτινοβολίας λόγω μεταβολών στη θερμοκρασία περιβάλλοντος ή γήρανσης του ημιαγωγού. Η ανάστροφα πολωμένη φωτοδίοδος είναι συνδεδεμένη με τελεστικό ενισχυτή σε λειτουργία trans-impedance για γραμμική απόδοση. Στη συνέχεια το σήμα ενισχύεται περαιτέρω με ένα τελεστικό ακριβείας LinCMOS™ και φιλτράρεται με ένα μικρού εύρους δεύτερης τάξης και πολλαπλής ανάδρασης φίλτρο (1 KHz). Έτσι οι επιπτώσεις από μεταβολές της έντασης του περιβάλλοντος φωτός και κάθε τύπου υψηλής συχνότητας θορύβου απαλείφεται επαρκώς σε αυτό το στάδιο επιλεκτικής απολαβής. Η έξοδος αυτού του σήματος περνάει από ένα χαμηλής ισχύος και μεγάλης ακριβείας μετατροπέα πραγματικού rms σε συνεχές. Το τελικό στάδιο του αναλογικού κυκλώματος είναι υπεύθυνο για την ενίσχυση του συνεχούς σήματος σε όρια 0-5 V ώστε να οδηγηθεί σωστά το κύκλωμα ψηφιοποίησης. Η έξοδος του αναλογικού συστήματος παρέχει τάση που μεταβάλλεται γραμμικά με την ένταση της προσπίπτουσας διαμορφωμένης ακτινοβολίας στην φωτοδίοδο. Το ψηφιακό μέρος είναι υπεύθυνο για την ψηφιοποίηση των μετρήσεων και αποθήκευσή τους σε μνήμη flash. Χρησιμοποιεί ADC 12-bit. Όλα τα κυκλώματα τροφοδοτούνται από μία μόνο μπαταρία λόγω της εφαρμογής τεχνικής φανταστικής γείωσης.



Σχήμα 5: Ηλεκτρονικό διάγραμμα της διάταξης

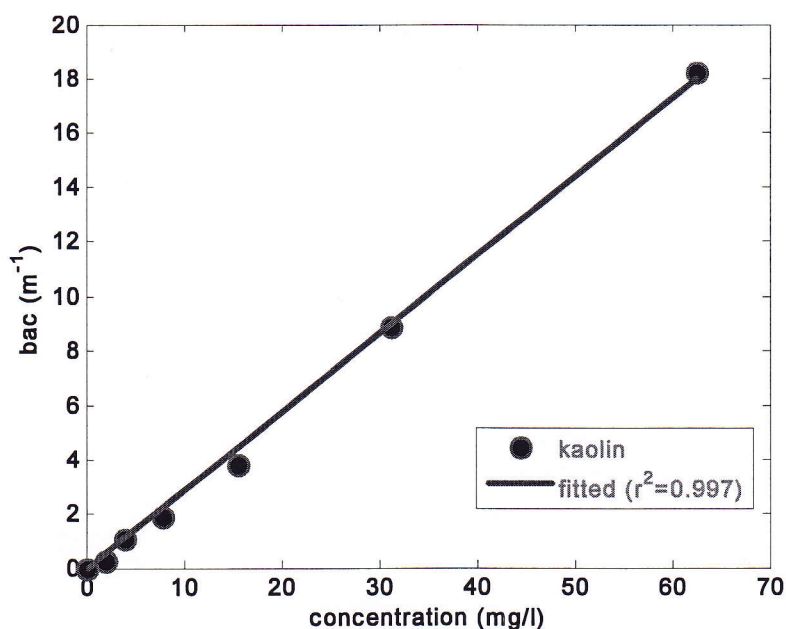
Η διάταξη στην πειραματική της φάση στο εργαστήριο, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6. Η γραμμικότητά της στην αρχή ελέγχθηκε με φίλτρο μεταβλητής οπτικής πυκνότητας στη θέση του οπτικού δρόμου και στη συνέχεια έγινε βαθμονόμηση με αιωρήματα μεταβλητής συγκέντρωσης.



Σχήμα 6: Η διάταξη σε πειραματική φάση στο εργαστήριο

Η συγκέντρωση αιωρούμενων σωματιδίων στις παράκτιες περιοχές της Ανατολικής Μεσογείου κυμαίνεται από ~ 100 mg/l στις εκβολές των ποταμών μέχρι 5-10 mg/l σε τυπικά παράκτια νερά.

Έτσι η βαθμονόμηση και ο έλεγχος των επιδόσεων του οργάνου έγινε με αιωρήματα καολίνη που είναι αποκλειστικά σκεδαστής (McKee D. 1997) σε συγκεντρώσεις από 125 mg/l έως 1 mg/l και σκέτο νερό. Η διαδικασία περιελάμβανε την παρασκευή ενός αρχικού αιωρήματος καολίνη στα 500 mg/l το οποίο διαδοχικά διαλύθηκε προσθέτοντας απιονισμένο νερό για να παραχθούν αρκετά δείγματα. Πριν από κάθε μέτρηση έντονη ανάδευση εξασφάλιζε το ότι τα σωματίδια παρέμεναν σε συνεχή αιώρηση. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στο Σχήμα 7. Για συγκεντρώσεις μέχρι 62 mg/l η απόκριση είναι εμφανώς γραμμική (συντελεστής συσχέτισης 0,997). Συγκριτική βαθμονόμηση με διαδοσίμετρα του εμπορίου είναι σε εξέλιξη.



Σχήμα 7: Συντελεστής εξασθένισης σε συνάρτηση της συγκέντρωσης του σκεδαστή.

#### Συμπεράσματα

Η ευστάθεια και ευαισθησία της αρχικής εργαστηριακής εκδοχής της διάταξης είναι ικανοποιητική για τυπικές μετρήσεις πεδίου. Η εμπορική αξία των υλικών που επιλέχθηκαν κυμαίνεται γύρω στα 100 ευρώ τιμή που είναι στα πλαίσια του αρχικού στόχου του προγράμματος. Σε εξέλιξη βρίσκονται και πειράματα για τη μέτρηση του φθορισμού της χλωροφύλλης. Η διέγερση επιτυγχάνεται με δύο ultra-bright LEDs τοποθετημένα σε γωνία 40 μοιρών σε σχέση με τη φωτοδίοδο τα οποία εκπέμπουν ένα κόκκινο φως 20 μοιρών στα 470 nm. Στο τελικό πρωτότυπο πεδίου η συσκευή θα είναι στεγανοποιημένη σε κύλινδρο από acetal μήκους 20 περίπου εκατοστών.

Η ευαισθητοποίηση της κοινής γνώμης σε θέματα προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος συνεχώς αυξάνεται. Είναι απόρροια της σημαντικότητας του θέματος δεδομένου του μεγάλου μήκους των ελληνικών ακτογραμμών και συνεπώς του μεγάλου ποσοστού του πληθυσμού που δραστηριοποιείται και διαμένει κοντά σε αυτές. Λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας, όλο και περισσότερα οπτικά όργανα θα χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της ποιότητας του θαλάσσιου νερού τόσο in situ όσο και με τηλεπισκόπηση. Στα πλαίσια αυτά η συγκεκριμένη έρευνα συμβάλει στη διαθεσιμότητα φτηνών και προσιτών τέτοιων οργάνων.



## Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή χρηματοδοτήθηκε κατά 75% από την Ε.Ε. και κατά 25% από το Ελληνικό Δημόσιο στα πλαίσια του προγράμματος ΕΠΕΑΕΚ Αρχιμήδης.

## Βιβλιογραφία

Dickey Tommy, (2004), Studies of coastal ocean dynamics and processes using emerging optical technologies, *Oceanography*, 17, 9-13.

Dickey, T, M. Lewis, and G. Chang, (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 Panos, George Petyhakis, Vasilis Valavanis, Kostas Nittis and George Triantafyllou, (2003). Optical variability associated with phytoplankton 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

Drakopoulos P., V. Zervakis, G. Thanos, K. Nittis, P. Renieris, G. Assimakopoulou & C. Tziavos, (2004), Preliminary experiments towards controlling biofouling effects on the M3A array's optical instruments" *Rapp. Comm. Int. Mer Medit.*, 37: 92.

Glenn S., Schofield O., Dickey T., Chant R., Kohut J., Barrier H., Bosch J., Bowers L., Creed E., Haldeman C., Hunter E., Kerfoot J., Mudgal C., Oliver M., Roarty H., Romana E., Crowley M., Barrick D., Jones C., (2004), The expanding Role of Ocean color and optics in the changing field of operational oceanography, *Oceanography*, 17, 86-95.

Jerlov, N.G., (1976), *Marine Optics*, 231 pp., Elsevier, New York.

McKee D., Cunningham A., Jones K., (1997), An integrated submersible fluorometer / nephelometer / transmissometer: design and testing at sea, *Optics and Laser Technology*, 29, 35-39.

Orwin J.G. Smart C.C., (2005), An inexpensive turbidimeter for monitoring suspended sediment, *Geomorphology*, 68, 3-15.