

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΔΙΑΔΟΣΗ ΗΧΗΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΦΩΤΕΙΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΝ ΩΚΕΑΝΟ

### 5.1. Συμπεριφορά Ήχου στη Θάλασσα

Ο ήχος είναι μορφή μηχανικής ενέργειας και αποτελεί το πλέον εύκολο τρόπο μεταφοράς μίας πληροφορίας σε μεγάλη απόσταση στην θάλασσα. Ο ήχος χρησιμοποιείται ευρέως από τον άνθρωπο για να προσδιοριστούν οι ιδιότητες του ωκεάνιου πυθμένα, να μετρηθεί το βάθος του ωκεανού, να αποτυπωθούν οι εσωτερικές δομές που υπάρχουν στο εσωτερικό του πυθμένα (στρώματα, ρήγματα) καθώς και να μετρηθούν φυσικές παράμετροι, όπως τα ρεύματα και η θερμοκρασία. Πολλά επιστημονικά όργανα, όπως οι ηχοβολιστές (echosounders), τα SONARS (vertical and side scan) και οι ακουστικοί τομογράφοι (acoustic tomographers) χρησιμοποιούν τις ιδιότητες του ήχου εκπέμποντας και λαμβάνοντας ηχητικά σήματα τα οποία διαδίδονται στο νερό των ωκεανών. Τις ιδιότητες του ήχου στην θάλασσα εκμεταλλεύονται πολλά θαλάσσια θηλαστικά, όπως φάλαινες και δελφίνια για να επικοινωνήσουν, να κινηθούν στο νερό προς μια καθορισμένη κατεύθυνση και να βρουν την τροφή τους.

Η κύρια ιδιότητα του ήχου είναι η ταχύτητα διάδοσής του. Η ταχύτητα του ήχου στο νερό δίνεται από την εξίσωση:

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5.1)$$

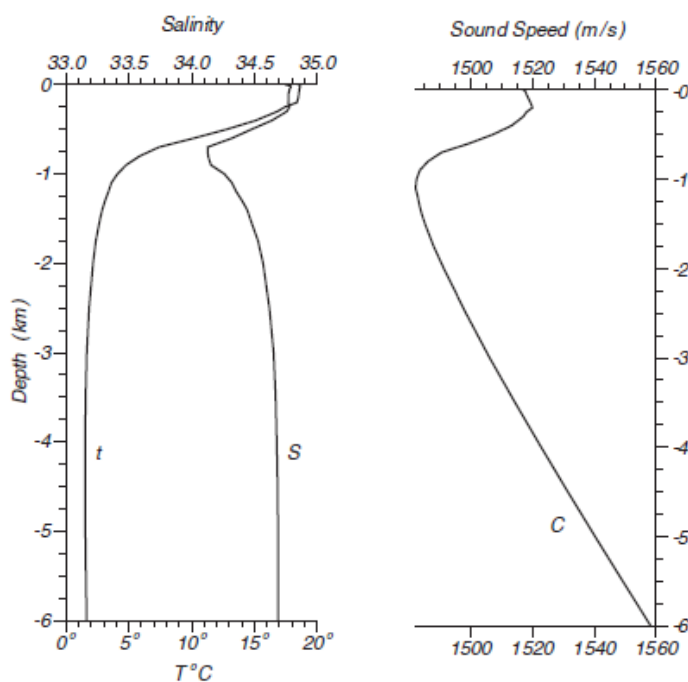
όπου  $E$  η αδιαβατική συμπίεστικότητα του νερού, η οποία είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, της αλατότητας και της πίεσης, δηλ. της πυκνότητας (Wilson, 1960) και  $\rho$  η πυκνότητα του θαλασσινού νερού. Αναλυτικότερα, η ταχύτητα του ήχου δίνεται ως συνάρτηση της θερμοκρασίας ( $T$ ), της αλατότητας ( $S$ ) και της πίεσης ( $p$ ) ως εξής:

$$C = 1449 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.0003T^3(1.39 - 0.012T)(S - 35) + 0.017p \quad (5.2)$$

Με βάση την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η ταχύτητα ήχου στα ρηχά νερά εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία του νερού. Σε νερά μεγάλου βάθους ο κύριος παράγοντας που ρυθμίζει την ταχύτητα του ήχου είναι η πίεση. Η ταχύτητα του ήχου  $C(T=0, S=34,85)$  είναι

1445 m/sec και αυξάνει κατά περίπου 4 m/sec για αύξηση ενός βαθμού θερμοκρασίας, κατά 1,5 m/sec για κάθε μία μονάδα αύξηση της αλατότητας και κατά 18 m/sec για αύξηση 1000 μ βάθους. Άρα η επίδραση της αλατότητας στην μεταβολή της ταχύτητας του ήχου στο νερό είναι γενικά πολύ μικρή.

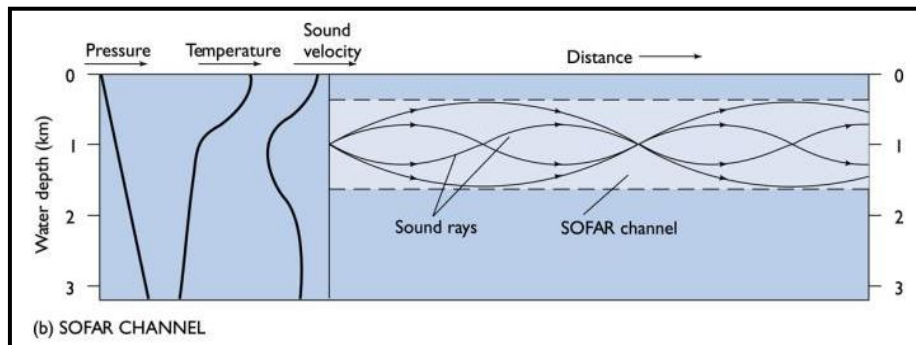
Συνέπεια των παραπάνω μεταβολών της ταχύτητας του ήχου με τις ιδιότητες του νερού και το βάθος είναι η παρατήρηση χαμηλότερων τιμών της ταχύτητας ήχου στα επιφανειακά νερά, μέχρι περίπου τα 1000 μ., στα υψηλά γεωγραφικά πλάτη. Το Σχήμα 5.1 δείχνει τη κατακόρυφη κατανομή της ταχύτητας ήχου για αντιπροσωπευτικά προφίλ θερμοκρασίας και αλατότητας.



Σχήμα 5.1. Προφίλ Θερμοκρασίας, αλατότητας και ταχύτητας διάδοσης του ήχου.

Παρατηρούμε ότι η κατανομή της ταχύτητας του ήχου επηρεάζεται περισσότερο από τη θερμοκρασία και σχεδόν καθόλου από την αλατότητα. Η παρουσία μίας ελάχιστης τιμής ταχύτητας ήχου σε βάθος περίπου 700 μ. (η οποία συνδέεται με το θερμοκλινές) δείχνει ότι τα ηχητικά κύματα παγιδεύονται στο επίπεδο αυτό δημιουργώντας έναν οριζόντιο άξονα διάδοσης ηχητικών κυμάτων που ονομάζεται SOFAR channel (SOund Fixing And Ranging). Πρόκειται για μία ζώνη εντός της οποίας περιοχές χαμηλής ταχύτητας ήχου περικλείονται από περιοχές με υψηλή ταχύτητα διάδοσης. Στις ζώνες αυτές η ηχητική

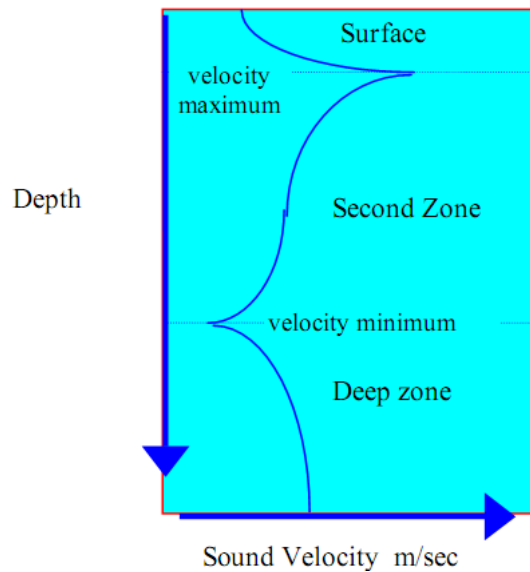
ενέργεια εγκλωβίζεται και είναι εφικτή η κίνησή της για εκατοντάδες χιλιόμετρα (ιδιαίτερα τα κύματα χαμηλών συχνοτήτων).



Σχήμα 5.2. SOFAR κανάλι διάδοσης ηχητικών σημάτων στην θάλασσα.

Γενικά, το προφίλ ταχύτητας διάδοσης του ήχου στον ωκεανό μας επιτρέπει να χωρίσουμε την υδάτινη στήλη σε τρεις επιμέρους ζώνες (Σχήμα 5.2):

1. Ζώνη 1, από την επιφάνεια έως 150 μ βάθος: Είναι μια καλά αναμεμειγμένη ζώνη ως προς τη θερμοκρασία και την αλατότητα στην οποία η ταχύτητα του ήχου αυξάνει ελαφρά με το βάθος λόγω πίεσης,
2. Ζώνη 2, καλύπτει τα βάθη από 150 – 1.500 μ βάθος: Είναι μια περιοχή όπου η ταχύτητα του ήχου μειώνεται λόγω της απότομης μείωσης T & S.
3. Ζώνη 3, καλύπτει το στρώμα από τα 1.500 μ βάθος έως το πυθμένα: Επικρατεί σταδιακή αύξηση της ταχύτητας του ήχου λόγω της αυξημένης πίεσης, καθώς T & S είναι σχεδόν σταθερά.



Σχήμα 5.3. Κατακόρυφη κατανομή ταχύτητας ήχου στον ωκεανό.

Στους ωκεανούς ο ήχος οφείλεται στη θραύση κυμάτων, στη κίνηση ρευμάτων, στη βροχόπτωση, στη τριβή πυθμένα και στους οργανισμούς. Ο ήχος αυτός δεν γίνεται αντιληπτός στην ατμόσφαιρα λόγω του **υψηλού δείκτη διάθλασης**  $C_w/C_a = 4.5$ .

## 5.2. Προσδιορισμός Βάθους με την χρήση ηχοβολιστικού βυθομέτρου

Οι ηχοβολιστές είναι συσκευές που αντιλαμβάνονται τη βαθυμετρία του πυθμένα μέσω της εκπομπής ηχητικών κυμάτων από το σκάφος που βρίσκεται στην επιφάνεια της θάλασσας και μετρώντας το χρόνο που απαιτείται για να επιστρέψουν τα κύματα αυτά. Αν η ταχύτητα διάδοσης του ήχου είναι γνωστή, και ο χρόνος επαναφοράς μετρηθεί, τότε η απόσταση από το σκάφος ως το πυθμένα γίνεται επίσης γνωστή. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε αρχικά από το Γερμανικό ωκεανογραφικό σκάφος *Meteor* το 1920. Το βάθος της θάλασσας υπολογίζεται από την σχέση:

$$d = \frac{1}{2} C \times \Delta t \quad (5.3)$$

Όπου  $C = 1449,22$  m/s και  $\Delta t$  η χρονική διάρκεια που ταξιδεύει το ηχητικό σήμα από την εκπομπή του έως την λήψη του.

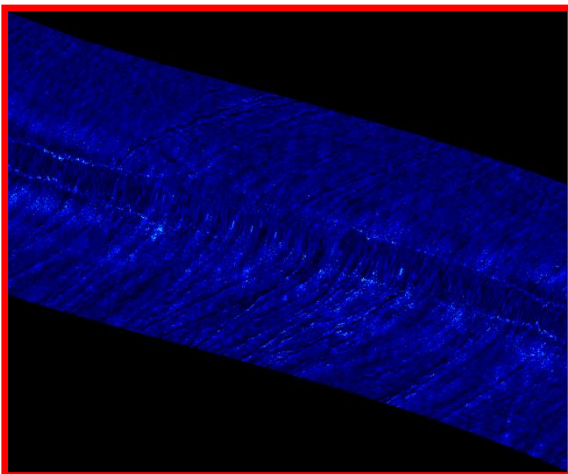
## 5.3. Προσδιορισμός Ιδιοτήτων Πυθμένα με την χρήση ηχοβολιστικού πλευρικής σάρωσης

Ο ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης (side scan sonar) είναι ένα επιστημονικό όργανο που καταγράφει την τρισδιάστατη βαθυμετρία του πυθμένα. Σε συνδυασμό με την λήψη

δειγμάτων πυθμένα, ο ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης έχει την δυνατότητα να αποτυπώσει τις διαφορές στην δομή και την υφή του υλικού πυθμένα, εξαιτίας της διαφορετικής ανακλασιμότητας των επιφανειών τους. Χρησιμοποιείται σε υδρογραφικές έρευνες για την ακριβή αποτύπωση του πυθμένα, στην μελέτη κατάστασης των υποθαλάσσιων αγωγών και καλωδίων, καθώς και στην εύρεση εμποδίων που εμφανίζονται πάνω στον πυθμένα. Στο Σχήμα 5.4 παρουσιάζεται ο ηχοβολιστής πλευρικής σάρωσης του Εργαστηρίου Οικολογικής Μηχανικής και Τεχνολογίας καθώς και διάφορες καταγραφές που έγιναν με αυτόν στο Θρακικό Πέλαγος (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.4. Ο Ηχοβολιστής Πλευρικής Σάρωσης του Εργαστηρίου. Ο ήχος εκπέμπεται και λαμβάνεται από τα μαύρα πτερύγια στο πίσω μέρος της τορπίλης.



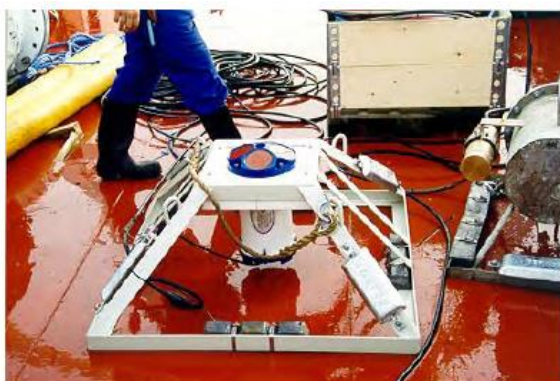
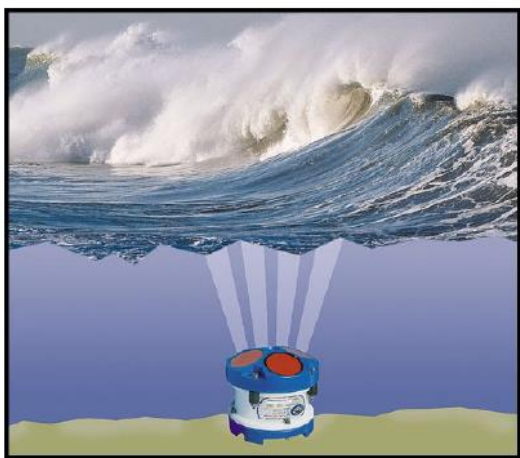
Σχήμα 5.5. Καταγραφή από side scan sonar (αριστερά) από μεσόκοκκη άμμο και δείγμα ιζήματος από την περιοχή έτοιμο για κοκκομετρική ανάλυση (δεξιά).

#### 5.4. Προσδιορισμός Ταχυτήτων Ροής με την χρήση ηχοβολιστικού ADCP

Το Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) είναι ένα ηχοβολιστικό σύστημα που χρησιμοποιεί την ταχύτητα διάδοσης του ήχου και την μεταβολή της συχνότητάς του όταν ανακλαστεί σε κινούμενες επιφάνειες για να προσδιορίσει την ταχύτητα ροής σε διάφορα βάθη. Το όργανο βασίζεται στην λειτουργία του στην αρχή ότι η συνισταμένη ταχύτητα ενός ακουστικού σήματος είναι το διανυσματικό άθροισμα της ταχύτητας του νερού και της ταχύτητας του ήχου. Όταν το όργανο εκπέμπει ηχητικό σήμα υψηλής συχνότητας (75 – 1200 kHz) από τον πυθμένα ή την επιφάνεια της θάλασσας, τότε το ηχητικό σήμα ανακλάται στο νέφος των κινούμενων σωματιδίων που αιωρούνται στο νερό. Κατά την επιστροφή του σήματος στο όργανο και την λήψη του σήματος, η συχνότητα του ήχου είναι διαφορετική από την συχνότητα εκπομπής. Η μεταβολή της συχνότητας οφείλεται στο γνωστό φαινόμενο Doppler, από το οποίο είναι δυνατός ο υπολογισμός της ταχύτητας κίνησης του νερού στα διάφορα βάθη.

$$V_k = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta f_k}{f} \right) C}{\cos \theta_k} \quad (5.4)$$

Όπου  $V_k$  η ταχύτητα κίνησης στις τρεις διαστάσεις (u, v, w) στο στρώμα νερού k,  $\Delta f_k$  είναι η μεταβολή της συχνότητας εκπομπής λόγω φαινομένου Doppler και ανάκλασης ήχου στο στρώμα νερού k (Hz), f είναι η συχνότητα εκπομπής ήχου του οργάνου (KHz), C είναι η ταχύτητα του ήχου (m/s), και  $\theta_k$  είναι η γωνία μεταξύ ανύσματος ταχύτητας και ανύσματος ταχύτητας ήχου στο στρώμα νερού k.

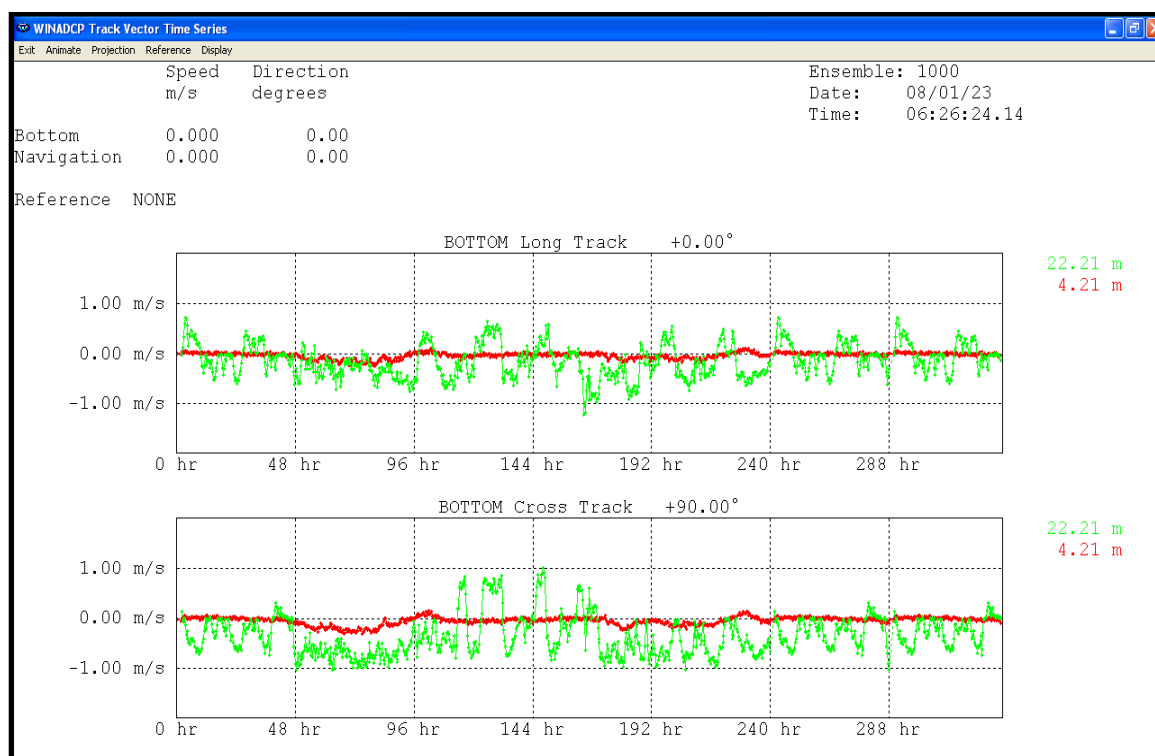


Σχήμα 5.6. Το ηχοβολιστικό σύστημα ADCP και ο τρόπος μέτρησης ρευμάτων όταν είναι ποντισμένο στον βυθό της θάλασσας σε μία συγκεκριμένη θέση.



Κατά την έναρξη της δειγματοληψίας, ο χρήστης επικοινωνεί με το όργανο και καθορίζει το βάθος νερού και το πάχος κάθε στοιχειώδους στρώματος  $k$  εντός του οποίου θα μετρηθεί η ταχύτητα ροής με βάση το φαινόμενο Doppler. Το σύστημα του Σχήματος 5.6 είναι το ADCP Sentinel της εταιρείας TRDI το οποίο εκπέμπει ήχο σε συχνότητα 300 KHz και περιλαμβάνει:

- α) έναν κατευθυντικό κυματογράφο (Wave Array), δηλ. καταγραφέα των κυματικών χαρακτηριστικών, όπως σημαντικό ύψος κύματος ( $H_s$ ), κυματική περίοδος ( $T$ ) και διεύθυνση διάδοσης κυμάτων ( $\phi$ ),
- β) κατευθυντικό ρευματογράφο για ολόκληρη την υδάτινη στήλη (directional current-meter), δηλ. καταγραφέα τρισδιάστατων ρευμάτων σε επιμέρους στρώματα που καλύπτουν την υδάτινη στήλη,
- γ) παλιρροιογράφο (tide gauge), δηλ. καταγραφέα της μεταβολής της επιφανειακής στάθμης της θάλασσας, και
- δ) αισθητήρα μέτρησης θερμοκρασίας νερού πυθμένα.



Σχήμα 5.7. Καταγραφές ρευμάτων στην υδάτινη στήλη στο Στενό Κεραμωτής – Θάσου με το ηχοβολιστικό σύστημα ADCP.

Στο παραπάνω Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται ενδεικτικές καταγραφές ταχύτητας ροής με την χρήση του ηχοβολιστή ADCP. Ο οριζόντιος άξονας είναι ο χρόνος (σε ώρες) και ο κατακόρυφος η οριζόντια ταχύτητα κίνησης νερού κατά την διεύθυνση Ανατολή-Δύση (άνω διάγραμμα), και η οριζόντια ταχύτητα κίνησης νερού κατά την διεύθυνση Βορράς-Νότος. Οι πράσινες καμπύλες είναι οι καταγραφές στο επιφανειακό στρώμα ενώ οι κόκκινες οι καταγραφές στο στρώμα πυθμένα.

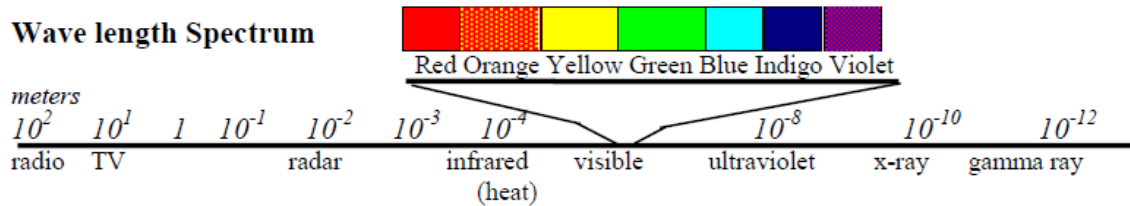
### 5.5. Συμπεριφορά φωτός στη θάλασσα

Το ορατό φως είναι ένα μικρό μόνο τμήμα της ακτινοβολίας που εκπέμπει ο Ήλιος (49% της συνολικής ακτινοβολίας). Το υπόλοιπο 9% εκπέμπεται στο υπεριώδες φάσμα ( $\lambda < 0,4 \mu\text{m}$ ) και το 42% εκπέμπεται στο υπέρυθρο φάσμα ( $\lambda > 0,8 \mu\text{m}$ ). Η Ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην ανώτερη ατμόσφαιρα φιλτράρεται από τα αιωρούμενα σωματίδια, τους υδρατμούς, τα σύννεφα και τα αέρια ανώτερης ατμόσφαιρα, κλπ., πριν φτάσει στην επιφάνεια της θάλασσας. Η ακτινοβολία κινείται με την μορφή κυμάτων και συνεπώς διαφοροποιείται με βάση το μήκος κύματος (δηλ. την οριζόντια απόσταση μεταξύ διαδοχικών κυμάτων). Συνεπώς, όταν αναφερόμαστε στο «ορατό φως» εννοούμε την ηλιακή ακτινοβολία η οποία κινείται με μήκη κύματος μεταξύ  $0,4 - 0,8 \mu\text{m}$ .

Η συμπεριφορά του ορατού φωτός ( $0,4 - 0,8 \mu\text{m}$ ) στο νερό διαφέρει σημαντικά από αυτή στον αέρα. Όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η διεισδυτικότητα της ακτινοβολίας στα υλικά και τόσο υψηλότερη είναι η μεταφερόμενη ενέργεια. Το αντίστροφο της διείσδυσης (penetration) είναι η απορρόφηση της ακτινοβολίας. Ο **συντελεστής απορρόφησης (absorption coefficient)** εκφράζει το μέτρο δυνατότητας απορρόφησης της ακτινοβολίας.

Το φως απορροφάται σε πολύ μικρότερες αποστάσεις στο νερό παρά στην ατμόσφαιρα. Τμήμα της ενέργειας που εισέρχεται στη θάλασσα διαχέεται λόγω πρόσπτωσης του φωτός σε στερεά σωματίδια, μία συμπεριφορά που διαφέρει ανάλογα με το μήκος κύματος. Το Σχήμα 5.8 παρουσιάζει τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας και τα μήκη κύματος που αντιστοιχούν στο φάσμα ορατού φωτός.





Σχήμα 5.8. Μήκη κύματος Ηλιακής ακτινοβολίας και ορατού φωτός.

Για παράδειγμα, το μπλε χρώμα έχει σχετικά μικρό μήκος κύματος ( $10^{-8}$  μ), συνεπώς αντιστοιχεί σε ακτινοβολία με πολύ υψηλή διείδυση, άρα με χαμηλή απορρόφηση (συντελεστής απορρόφησης μπλε χρώματος 0,0072). Αντίθετα, το πράσινο και το κίτρινο χρώμα έχουν υψηλότερα μήκη κύματος ( $10^{-5}$  μ), οπότε η διειδυτικότητα τους είναι μικρότερη και η απορρόφησή τους υψηλότερη. Ο συντελεστής απορρόφησης του πράσινου χρώματος είναι 0,012 ενώ του κίτρινου χρώματος είναι 0,16.

Τα παραπάνω σημαίνουν ότι καθώς η Ηλιακή ακτινοβολία εισέρχεται στην υδάτινη στήλη, στα πρώτα 10 cm απορροφάται η υπέρυθρη ακτινοβολία και όλα τα μεγάλα μήκη κύματος. Στα πρώτα 10 μ απορροφάται το 80% της ακτινοβολίας, κυρίως η ακτινοβολία του κόκκινου και του κίτρινου χρώματος. Σε βάθος 140 μ απορροφάται το 99% της ακτινοβολίας και παραμένει να διειδύει μόνο η ακτινοβολία μπλε χρώματος. **Αυτός είναι ο λόγος που ο ωκεανός είναι μπλε χρώματος, δηλ. το χαμηλό μήκος κύματος της μπλε ακτινοβολίας που της προσδίδει υψηλή διειδυτικότητα και χαμηλή απορροφητικότητα έως και σε μεγάλα βάθη.**

Γενικά, η μείωση της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας με το βάθος εκφράζεται από τον εκθετικό νόμο:

$$I_z = I_0 \exp(-kz) \quad (5.5)$$

όπου  $I_0$  η ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της θάλασσας [ $\mu E m^{-2}s^{-1}$ ],  $I_z$  η ένταση σε βάθος  $z$  [ $\mu E m^{-2}s^{-1}$ ] και  $k$  ο συντελεστής κατακόρυφης διάχυσης (vertical attenuation coefficient,  $m^{-1}$ ) του νερού, ο οποίος εξαρτάται από την απορροφητική ικανότητα του νερού και λιγότερο από τη διασπορά των σωματιδίων.

Ο συντελεστής  $k$  εξαρτάται από την απορροφητική ικανότητα του νερού και το μήκος κύματος του εισερχόμενου φωτός. Ουσιαστικά, η τιμή του  $k$  εξαρτάται από την διαύγεια της υδάτινης στήλης, η οποία εκφράζεται από το βάθος του Secchi disc. Αν η υδάτινη στήλη

είναι διαυγής, χωρίς αιωρούμενα στερεά και υψηλή συγκέντρωση φυτοπλαγκτόν, τότε η τιμή του  $k = 0,02 \text{ m}^{-1}$ . Η τιμή αυτή δείχνει υψηλή απορρόφηση του φωτός στο φάσμα του μπλε χρώματος και αντιστοιχεί σε υψηλή τιμή του βάθους Secchi (Secchi Disk depth, SDD). Αντίθετα, αν η στήλη είναι τυρβώδης, με υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων στερεών ή/και φυτοπλαγκτόν τότε ο συντελεστής  $k = 0,2 - 2 \text{ m}^{-1}$ . Η τιμή αυτή δείχνει απορρόφηση του φωτός στο πράσινο (χλωροφύλλη) με κίτρινο (αιωρούμενο υλικό) χρώμα και αντιστοιχεί σε χαμηλή τιμή του SDD.

Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει την επίδραση του βάθους και του συντελεστή κατακόρυφης διάχυσης στην ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας.

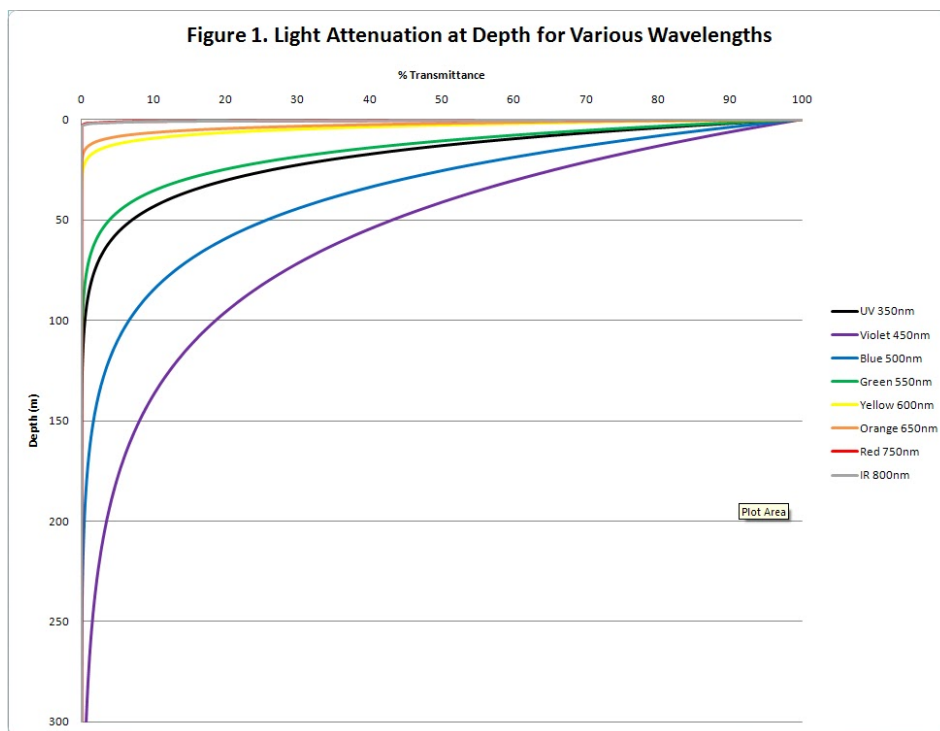
Πίνακας 5.1. Ενέργεια φωτός που διεισδύει σε δεδομένα βάθη σαν ποσοστό της επιφανειακής ενέργειας.

Βάθος ( $\mu$ )	Συντελεστής κατακόρυφης διάχυσης, $k$	Καθαρά νερά ωκεανού	Τυρβώδη νερά ωκεανού
	0,02	0,2	2
0	$I_0 = 100\%$	100%	100%
1	$I_z = 98$	82	14
2	96	67	2
10	82	14	0
50	37	0	0
100	14	0	0

Η υδάτινη στήλη για τιμή  $k = 0,02 \text{ m}^{-1}$  είναι αντιπροσωπευτική της δυνατότητας του μπλε φωτός να διασχίσει μεγαλύτερη απόσταση στο εσωτερικό ενός διαυγούς ωκεανού. Οι υδάτινες στήλες για τιμές  $k = 0,2 \text{ m}^{-1}$  και  $2 \text{ m}^{-1}$  είναι αντιπροσωπευτικές της δυνατότητας του μπλε φωτός να διασχίσει μία μικρή μόνο κατακόρυφη απόσταση σε λιγότερο διαυγή και περισσότερο τυρβώδη υδάτινη στήλη.

Ο συντελεστής  $k$  μεταβάλλεται σημαντικά με το μήκος κύματος. Για τα διαυγή νερά ο συντελεστής  $k$  αποκτά την ελάχιστη τιμή του σε μήκος κύματος περίπου 450 nm, με αποτέλεσμα το μπλε (500 nm) και το βιολετί (450 nm) φως να διεισδύει περισσότερο από τα μικρότερα (υπεριώδη, 350 nm) και μεγαλύτερα (υπέρυθρα, 750 nm) μήκη κύματος (Σχήμα 5.9).

Στα τυρβώδη νερά όλα τα μήκη κύματος διαχέονται περισσότερο από τα διαυγή, με την ακτινοβολία που αντιστοιχεί στο πράσινο και κίτρινο χρώμα να διεισδύει περισσότερο στη στήλη νερού.



Σχήμα 5.9. Διείσδυση φωτός στην υδάτινη στήλη σε σχέση με το μήκος κύματός του.