

Τα φασματικά χαρακτηριστικά της ρύπανσης των υδάτων της ενδοχώρας με έμφαση στα ποτάμια οικοσυστήματα

Μ. Τσακίρη - Στρατή, Α. Κουτρομπή και Γ. Δοξάνη

*Τμήμα Αγρονόμων & Τοπογράφων Μηχανικών,
Τομέας Κτηματολογίου, Φωτογραμμετρίας και Χαρτογραφίας, Α.Π.Θ.*

Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας παρουσιάζεται μια θεωρητική προσέγγιση για τη διερεύνηση της φασματικής απόκρισης της ρύπανσης των υδάτων της ενδοχώρας, εστιάζοντας ιδιαίτερα στα ποτάμια οικοσυστήματα. Οι μεγαλύτεροι ρυπαντές των υδάτων είναι τα αιωρούμενα σωματίδια (θολότητα), οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, τα θρεπτικά συστατικά, τα βαρέα μέταλλα, η διαλυμένη οργανική ουσία, τα φυτοφάρμακα, η χλωροφύλλη, η θερμότητα και τα πετρελαιοειδή. Οι περισσότεροι ρυπαντές δεν έχουν συγκεκριμένη φασματική υπογραφή, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να καταγραφούν από δορυφόρο, εκτός και αν έχουν κάποια ορατή επίπτωση, όπως είναι η υπέρμετρη αύξηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης και η θολότητα. Επηρεάζονται δε από διάφορους παράγοντες και μεταβάλλονται χωρικά και χρονικά. Η τηλεπισκόπηση και τα GIS προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις κλασικές μεθόδους εκτίμησης και καταγραφής της ρύπανσης των υδάτων.

1. Εισαγωγή

Με την αύξηση του πληθυσμού της γης και την αλόγιστη εκμετάλλευση των φυσικών πόρων, η διαχείριση των υδάτινων πόρων και η ποιότητα του νερού αποτελούν σήμερα δύο από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά προβλήματα. Περίπου 56,1 δισ. € θα διατεθούν το 2009 στην Ε.Ε. για την προστασία του περιβάλλοντος και τη διατήρηση των φυσικών πόρων. Ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην προστασία των υδάτινων αποθεμάτων και στον έλεγχο της ποιότητας του νερού. Στη χώρα μας 1,5 εκατ. € περίπου διατίθεται κάθε χρόνο μέσω του επιχειρησιακού προγράμματος για το περιβάλλον (ΕΠΠΕΡ) για τον έλεγχο της ποιότητας των υδάτων.

Και ενώ όλα τα ευρωπαϊκά και κρατικά προγράμματα εκτίμησης της ποιότητας των υδάτων, ως σήμερα, στηρίζονται στη λήψη επιτόπιων δειγμάτων και παρατηρήσεων, η ανάπτυξη της τεχνολογίας και των τεχνικών επεξεργασίας δορυφορικών εικόνων εισήγαγαν τις έννοιες της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και των GIS ως εργαλεία και μεθοδολογίες εκτίμησης και καταγραφής της ρύπανσης των υδάτινων επιφανειών. Οι παραδοσιακές μέθοδοι παρουσίαζαν προβλήματα στην εκτίμηση παραγόντων που δεν ήταν σαφώς προσδιορισίμοι, μη σημειακές εστίες ρύπανσης,

συνθηκών υποβάθμισης του φυσικού περιβάλλοντος και χαρακτηριστικών συσσωρευτικής δράσης μακροπρόθεσμα που συμβάλλουν στη ρύπανση (Whittier and Paulsen, 1992). Επειδή η ανθρώπινη υγεία και δραστηριότητα εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα των υδάτινων αποθεμάτων, η εκτίμηση της ρύπανσης των υδάτων είναι ίσως το σημαντικότερο πεδίο περιβαλλοντικής έρευνας (Wear et al., 1998). Η τηλεπισκόπηση και τα GIS προσφέρουν πολύτιμη βοήθεια στην παρακολούθηση των υδάτινων οικοσυστημάτων διαχρονικά.

2. Κυριότερες πηγές της ρύπανσης των ποταμών

Οι ποταμοί είναι δυναμικά συστήματα που αποτελούν μαζί με τους παραποτάμους τους ένα ενιαίο σύνολο. Μεταφέρουν οριζόντια, σταθερά και αποκλειστικά προς μία κατεύθυνση, σημαντικές ποσότητες υδάτων και διαλυμένων ουσιών, φυσικής ή ανθρωπογενούς προέλευσης (Μπέλλος, 2004). Η μετακινούμενη μάζα υπόκειται σε διαρκείς χημικές, βιολογικές και φυσικές αλλαγές, οι οποίες μπορούν να αλλάξουν δραματικά τα δεδομένα μιας περιοχής, εξαρτώνται δε από πλήθος παραγόντων, όπως είναι το κλίμα, η μορφολογία και το ανάγλυφο της κοίτης, η χρήση/κάλυψη γης της λεκάνης απορροής, οι συνθήκες της φυσικής βλάστησης, το ποσοστό δασοκάλυψης κ.λπ.

Η ισορροπία που έχει αποκατασταθεί με τους βιογαιοχημικούς κύκλους και στα ποτάμια οικοσυστήματα είναι δυνατόν να διαταραχθεί από την εισαγωγή ανεπιθύμητων στοιχείων (διάφορες μορφές ενέργειας ή διάφορες ουσίες). Οι μεγαλύτεροι ρυπαντές είναι τα αιωρούμενα σωματίδια (θολότητα), οι παθογόνοι μικροοργανισμοί, τα θρεπτικά συστατικά, τα βαρέα μέταλλα, η διαλυμένη οργανική ουσία, τα φυτοφάρμακα, η αύξηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης, η θερμότητα και τα πετρελαιοειδή. Η ανεξέλεγκτη εισαγωγή τέτοιων στοιχείων σε ένα οικοσύστημα συνήθως μειώνει τις ικανότητές του να αντιδρά ή να κινεί τους μηχανισμούς ανακύκλωσης, αναπαραγωγής και αυτοκαθαρισμού.

Η ρύπανση των ποταμών οφείλεται τόσο σε φυσικές διεργασίες, όσο και σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες (Κουϊμτζή κ.ά., 1998). Σε ότι αφορά τις φυσικές πηγές, π.χ. βιολογικές διαδικασίες, πυρκαγιές κ.ά., η ίδια η φύση έχει αναπτύξει διάφορους μηχανισμούς αυτοκαθαρισμού που εξισορροπούν τη ρύπανση. Αντίθετα η ρύπανση που προκαλείται από ανθρώπινες δραστηριότητες είναι επικίνδυνη, επειδή συνήθως συγκεντρώνεται σε περιορισμένους χώρους, όπου οι υψηλές συγκεντρώσεις ρύπων προκαλούν μη αναστρέψιμες καταστάσεις. Διακρίνεται στη βιομηχανική ρύπανση, τη γεωργική – κτηνοτροφική και τη ρύπανση από αστικά λύματα και μπορεί να χαρακτηριστεί ως σημειακή ή μη σημειακή. Οι σημειακές πηγές είναι αυτές που καταγράφονται ατομικά ή μεμονωμένα, όπως είναι π.χ. ένας αγωγός, ή ένα εργοστάσιο. Οι μη σημειακές πηγές παρουσιάζονται διάχυτες και σχετίζονται περισσότερο με την κίνηση του νερού και τη χρήση/κάλυψη γης (π.χ. γεωργική ρύπανση).

Η αλόγιστη χρήση χημικών λιπασμάτων, φυτοφαρμάκων και εντομοκτόνων στη γεωργία αποτελούν τους κύριους παράγοντες ρύπανσης γεωργικής προέλευσης, που μεταφέρεται στους ποταμούς κυρίως με την απόπλυση των εδαφών. Η χρήση τους στις γεωργικές καλλιέργειες τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί κατακόρυφα με τον εκσυγχρονισμό των παραγωγικών διαδικασιών, με αποτέλεσμα η ρύπανση των επιφανειακών νερών από τη γεωργία να αναγνωρίζεται παγκοσμίως ως ένα σημαντικό ποσοστό της ολικής ρύπανσης των φυσικών υδατοορεμάτων. Η γεωργική - κτηνοτροφική ρύπανση οφείλεται κυρίως στις αζωτούχες και φωσφορικές ενώσεις που προέρχονται από τα λιπάσματα, στις οργανικές ύλες της κόπρου, καθώς και στα διάφορα φυτοφάρμακα (Μπέλλος, 2004). Τα τελευταία 20 χρόνια στο επίκεντρο της προσοχής ήλθαν τα νιτρικά λιπάσματα τα οποία χρησιμοποιούνται σε μεγάλες ποσότητες παρά το γεγονός ότι η ετήσια πρόσληψή τους από τις καλλιέργειες φθάνει μόνο το 50 % (Μπέλλος, 2004). Από την άλλη πλευρά ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν και τα εντομοκτόνα εξαιτίας της μεγάλης τους ποικιλότητας, αλλά και της αυξημένης τοξικότητας.

Η υπερσυγκέντρωση φωσφόρου και νιτρικών αλάτων οδηγεί σε υπερτροφισμό των υδάτων. Εκτιμάται ότι το 45% της προέλευσης των φωσφορικών είναι τα οικιακά λύματα, το 45% οι γεωργικές δραστηριότητες και το υπόλοιπο τα βιομηχανικά απόβλητα (Morse et al. 1993). Η απόθεση αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων σε υδάτινους αποδέκτες συμβάλλει στη θερμική αλλοίωση των νερών, με δραματικές συνέπειες για το φυσικό οικοσύστημα, όπως είναι η μείωση της συγκέντρωσης του διαλυμένου οξυγόνου, η αύξηση της ταχύτητας των χημικών αντιδράσεων, η μεταβολή των βιολογικών λειτουργιών των υδροχαρών οργανισμών και των ψαριών, ο υπέρμετρος πολλαπλασιασμός των βακτηριδίων κ.λπ. (Κουϊμτζή κ.ά., 1998).

Επιπλέον τα αστικά και βιομηχανικά λύματα μπορούν να προκαλέσουν μεταβολή της ενεργού οξύτητας (pH) των υδάτων και την άνθιση του φαινομένου του ευτροφισμού με την εκρηκτική αύξηση των αλγών. Κατά την αποικοδόμηση των αστικών λυμάτων από τα βακτήρια, εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα και το νερό, απελευθερώνονται άζωτο και φωσφόρος με ανόργανη μορφή (Μπέλλος, 2004). Τα νιτρικά, φωσφορικά και άλλα ιόντα αποτελούν απαραίτητα θρεπτικά συστατικά για την ανάπτυξη των φυτών. Η ανακύκλωση της ύλης στη φύση, λειτουργεί μόνο όταν τα θρεπτικά άλατα απελευθερώνονται σε αδιάκοπη βάση. Η εισαγωγή τους όμως σε υπερβολικές ποσότητες δημιουργεί προβλήματα. Ο υπερτροφισμός επιφέρει μεταβολές, οι οποίες αφορούν αλλαγές στη σύνθεση και την αφθονία της μακροφυτικής βλάστησης και οδηγούν πολλές φορές στη μονοεπικράτηση ορισμένων ανθεκτικών ειδών. Αυτή η υπεραύξηση των μακρόφυτων δημιουργεί προβλήματα φράζοντας αρδευτικά κανάλια, τάφρους απορροής, φράγματα ή εμποδίζοντας σε λίμνες την κίνηση με βάρκες, την αλιεία ή άλλες δραστηριότητες. Από οικολογική άποψη η πυκνή υπερανάπτυξη των μακροφύτων εμποδίζει το φως να φτάσει στα βαθύτερα στρώματα, εμποδίζει την επαφή του νερού με την ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα τη δημιουργία κάτω από το νερό αναερόβιων συνθη-

κών, ενώ παράλληλα καταναλώνονται μεγάλες ποσότητες οξυγόνου (Κουϊμτζή κ.ά., 1998). Αυτό οδηγεί σε αναερόβιες αποικοδομητικές διαδικασίες, έκλυση τοξικών αερίων (μεθάνιο, υδρόθειο κ.ά.) και δημιουργία ανοξικών καταστάσεων. Σε μερικές περιπτώσεις τα φαινόμενα αυτά προκαλούν τελικά μαζικό θάνατο των ψαριών (Kohler and Labus 1983).

Τέλος, οι φυσικοί υδάτινοι αποδέκτες δέχονται μεγάλες ποσότητες στερεών, τα οποία προέρχονται από φυσικές διεργασίες (π.χ. αποσάθρωση του εδάφους), ή από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Τα αιωρούμενα σωματίδια αποτελούν τον πιο κοινό ρυπαντή των ποταμών αναφορικά με το βάρος και τον όγκο τους. Δημιουργούν διάφορα προβλήματα, όπως είναι η μείωση της διαπερατότητας του φωτός και ο περιορισμός της χρήσης του νερού, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις είναι φορείς τοξικών ουσιών που προσκολούνται σε αυτά κ.λπ. Σε αγροτικές περιοχές θεωρούνται δευτερογενής πηγή ρύπανσης, αφού ο φώσφορος, τα εντομοκτόνα και τα βαρέα μέταλλα προσκολούνται στα μόρια των εναιωρημάτων.

3. Η φασματική συμπεριφορά της ρύπανσης των ποτάμιων οικοσυστημάτων

Η ποιότητα του νερού αναφέρεται στις φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του νερού. Οι παραδοσιακές μέθοδοι εκτίμησης της ποιότητας του νερού με συλλογή δειγμάτων με επιτόπιες μετρήσεις, είναι χρονοβόρες διαδικασίες, δαπανηρές και μπορούν να εφαρμοστούν σε περιορισμένη έκταση μόνο (Ming-der Yang et al., 1999). Επιπλέον, η έρευνα της ποιότητας του νερού μέσω δειγματοληψίας συχνά δεν καταφέρνει να αποτυπώσει τις ετερογενείς και ανομοιομορφες υδάτινες περιοχές (Khorram et al. 1991, Liu et al. 2003). Η δορυφορική τηλεπισκόπηση ξεπερνά τους παραπάνω περιορισμούς και προσφέρει εναλλακτικούς τρόπους παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων διαχρονικά και σε διαφορετική χωρική κλίμακα.

Η καταγραφή των παραμέτρων μέτρησης της ποιότητας του νερού από δορυφορικά δεδομένα έγκειται στις φασματικές ιδιότητες της ανακλώμενης ακτινοβολίας (Hinton 1991, Stumpf 1992). Προκύπτει από την ποσότητα της προσπίπτουσας στο νερό ηλιακής ακτινοβολίας, αφού αφαιρεθεί η ποσότητα της ακτινοβολίας που απορροφάται από τα συστατικά του νερού ή διαθλάται μέσα σ' αυτό. Τελικά η ακτινοβολία που φθάνει στον καταγραφέα του δορυφόρου αποτελείται από δύο συνιστώσες: αυτή που ανακλάται από την υδάτινη επιφάνεια και αυτή που οφείλεται στη διάχυση λόγω της ατμόσφαιρας. Η επίδραση της δεύτερης θα πρέπει να αφαιρεθεί πριν από κάθε έρευνα. Τα δορυφορικά δεδομένα δηλαδή θα πρέπει προηγουμένως να έχουν υποστεί επεξεργασία με βάση επιτόπιες μετρήσεις και να έχουν διορθωθεί ραδιομετρικά ως προς τα σφάλματα που προκύπτουν από την επίδραση της ατμόσφαιρας. Σύμφωνα με τους Hadjimitsis and Clayton (2008), είναι απαραίτητη η ατμοσφαιρική διόρθωση των δορυφορικών δεδομένων για την έρευ-

να της ποιότητας του νερού, εφόσον βελτιώνεται σημαντικά η ανάκλαση της ακτινοβολίας από την υδάτινη επιφάνεια, με αποτέλεσμα την εξαγωγή συμπερασμάτων μεγάλης ακρίβειας.

Η ανακλώμενη ακτινοβολία από το νερό οφείλεται στην ανάκλαση του σώματος του νερού και των συστατικών του (Morel 1980, Sturm 1981) και είναι αυτή που τελικά χρησιμοποιείται για τη διερεύνηση των παραμέτρων εκτίμησης της ποιότητας του νερού. Επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες φωτισμού, το βάθος του ύδατος και την ανάκλαση του πυθμένα, αν πρόκειται για ρηχές περιοχές. Σύμφωνα με τους Muller, Décamps και Dobson (1993) περιβαλλοντικοί παράγοντες τοπικής εμβέλειας (π.χ. η επίδραση της κοίτης των ποταμών, η επίδραση του πυθμένα και του βάθους, ο άνεμος κ.ά.) και η μεταβλητότητα στο χρόνο και χώρο των παραμέτρων της ποιότητας του νερού μπορούν να επηρεάσουν δραστικά το σήμα των δορυφόρων και να επιδράσουν στην ερμηνεία των εικόνων. Επιπλέον, στις περιπτώσεις συνύπαρξης πολλών παραγόντων της ρύπανσης, δεν συμμετέχουν όλοι με το ίδιο ποσοστό στην ποσότητα της ανακλώμενης ακτινοβολίας (Bowers et al., 1998).

Οι περισσότεροι ρυπαντές δεν έχουν συγκεκριμένη φασματική υπογραφή, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να καταγραφούν από δορυφόρο, εκτός και αν έχουν κάποια ορατή επίπτωση, όπως στο φυτοπλαγκτόν (Clark, 1993). Η καταγραφή των ρυπαντών από τα δορυφορικά συστήματα στις περισσότερες περιπτώσεις περιορίζεται στην εκτίμηση των ουσιών και των συνθηκών που επηρεάζουν τις οπτικές και θερμικές ιδιότητες της επιφάνειας των υδάτων. Τα αιωρούμενα σωματίδια, η χλωροφύλλη, η διαλυμένη οργανική ουσία, η θερμοκρασία και τα πετρελαιοειδή μπορούν να μεταβάλλουν τις φασματικές ιδιότητες της επιφάνειας του νερού που καταγράφεται από δορυφόρο. Η συγκέντρωση της χλωροφύλλης για παράδειγμα στο υδάτινο οικοσύστημα καταγράφεται στις δορυφορικές εικόνες ως αποτέλεσμα της βιομάζας του άλγους (Gitelson et al., 1996). Άλλα χαρακτηριστικά, όπως είναι τα βαρέα μέταλλα, τα θρεπτικά συστατικά, οι μικροοργανισμοί κ.λπ. δεν μπορούν να καταγραφούν απευθείας, αλλά ανιχνεύοντας δευτερογενείς ιδιότητες (π.χ. την ανάπτυξη της χλωροφύλλης), ως αποτέλεσμα των συστατικών αυτών.

3.1 Αιωρούμενα σωματίδια και θολότητα

Στο “ορατό μήκος κύματος” η ακτινοβολία επηρεάζεται βασικά από το χρώμα του νερού και τη θολότητά του. Το νερό αυξάνει την απορρόφηση του φωτός και μειώνει την ανακλώμενη ακτινοβολία που φθάνει στον καταγραφέα, ενώ η θολότητα προκαλεί τη διάχυση και την ανάκλαση του φωτός αντί για τη μετάδοση. Αν η θολότητα είναι ομοιογενής, τότε σχετίζεται γραμμικά με τη συγκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων (Foster et al., 1992). Τα σωματίδια που έχουν διαφορετικό μέγεθος, αλλά την ίδια συγκέντρωση μειώνουν τη θολότητα. Γι’ αυτό είναι δύσκολο να εκτιμηθεί η ποσότητα των αιωρούμενων σωματιδίων από τη θολότητα και αντίστροφα. Η θολότητα και οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων σωματιδίων

έχουν διερευνηθεί από δεδομένα MSS, δεδομένα Landsat TM, δεδομένα SPOT, IKONOS, ακόμα και έγχρωμες υπέρυθρες αεροφωτογραφίες (Liu et al., 2003).

Η ένταση της ανακλώμενης ακτινοβολίας δεν εξαρτάται μόνο από την ποιότητα του νερού, αλλά και από τα επίπεδα συγκεντρώσεων. Χαμηλής συκέντρωσης αιωρούμενα σωματίδια υπόκεινται στην απορροφητική ικανότητα του νερού, ενώ αντίθετα υψηλές συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων αποτελούν το σημαντικότερο παράγοντα ανάκλασης της ακτινοβολίας (Moore, 1980). Μια αύξηση στα αιωρούμενα σωματίδια οδηγεί σε αύξηση της συνολικά ανακλώμενης ακτινοβολίας στα μικρά μήκη κύματος (Harrington and Repic, 1995, Goodin et al., 1993). Οι περισσότερες έρευνες που έγιναν σε μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων (π.χ. 0 - 200 mg/l) εναιωρημάτων κατέγραψαν μια παραβολική σχέση μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων και της ανάκλασης της ακτινοβολίας (Ritchie et al., 1976, 1990, Curran and Novo, 1988), επειδή η ποσότητα της ανακλώμενης ακτινοβολίας τείνει στο μέγιστο, όσο αυξάνει η συκέντρωση των αιωρούμενων σωματιδίων. Το σημείο μεγιστοποίησης της ανάκλασης εξαρτάται από το μήκος κύματος, όπου χαμηλότερα μήκη κύματος μεγιστοποιούν την ανάκλαση σε μικρότερες συγκεντρώσεις. Οι συγκεντρώσεις των διαλυμένων στερεών είναι χαμηλές σε ύδατα με ήρεμη επιφάνεια, ενώ αντίθετα αν επικρατούν συνθήκες ανατάραξης και στροβιλισμού, εφόσον πρόκειται για ύδατα μικρού βάθους, γίνεται επαναδιάλυση των ιζημάτων.

Όπως συμβαίνει για όλες τις παραμέτρους εκτίμησης της ποιότητας του νερού, τα ανιχνεύσιμα αιωρούμενα σωματίδια περιορίζονται στα στρώματα κοντά στην επιφάνεια (Ritchie and Schiebe, 1985). Γι' αυτό οι ανιχνεύσιμες ποσότητες τείνουν να παρουσιάζονται υψηλότερες από τα αποτελέσματα των μοντέλων, γιατί αυτά προκύπτουν από όλο το σώμα του νερού και όχι μόνο από την επιφάνεια (Jorgensen and Edelvang, 2000). Για τη σωστή εκτίμηση της συκέντρωσης των αιωρούμενων σωματιδίων στο σώμα του νερού θα πρέπει να γνωρίζουμε το προφίλ της κατανομής των σωματιδίων σε αντιπροσωπευτικές θέσεις ή να γίνουν εικασίες για την κάθετη κατανομή. Σε κάθε περίπτωση είναι απαραίτητη η χρήση της βαθυμετρίας (Gao and O' Leary, 1997).

Τα αιωρούμενα σωματίδια αυξάνουν την ανάκλαση των επιφανειακών υδάτων στην ορατή και κοντινή υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Τα μικρά μήκη κύματος της ακτινοβολίας στις μπλε και πράσινες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για την ανίχνευση των διαλυμένων συστατικών στο νερό, εξαιτίας της μεγαλύτερης διεισδυτικής ικανότητας στο νερό από τα μεγαλύτερα μήκη κύματος. Το βάθος της διείσδυσης εξαρτάται από την καθαρότητα του νερού. Αν η ακτινοβολία απορροφάται εξολοκλήρου κοντά στην επιφάνεια, τα φαινόμενα που είναι ανιχνεύσιμα μέσω της τηλεπισκόπησης περιορίζονται στην επιφάνεια του νερού.

Οι συντελεστές συσχέτισης μεταξύ των αιωρούμενων σωματιδίων και των δορυφορικών δεδομένων κορυφώνονται στον πράσινο/κόκκινο δίαυλο (Novo et al., 1991). Άλλες έρευνες επισημαίνουν πως το καλύτερο μήκος κύματος για τη διάκριση των αιωρούμενων σωματιδίων είναι 550 – 650 nm (Novo et al., 1989). Οι

Ma and Dai (2005) χρησιμοποίησαν φασματόμετρο για την καταγραφή της φασματικής υπογραφής των αιωρούμενων σωματιδίων σε δορυφορικές εικόνες Landsat. Οι δίαυλοι που εμφάνισαν τη μεγαλύτερη συσχέτιση με τα αιωρούμενα σωματίδια είχαν μήκος κύματος στο εύρος 350 έως 415 nm, 772 έως 889 nm, και 893 έως 909 nm. Τέλος οι Ritchie et al. (1976) χρησιμοποιώντας επιτόπιες παρατηρήσεις συμπέραναν πως τα αιωρούμενα σωματίδια καταγράφονται καλύτερα σε μήκη κύματος 700 – 800 nm, ενώ οι Curran and Novo (1988) κατέληξαν πως η βέλτιστη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για την καταγραφή των αιωρούμενων σωματιδίων εξαρτάται από τη συγκέντρωσή τους.

Γενικά όμως, δεν παρουσιάζεται υψηλή η συσχέτιση της ρύπανσης με τα μήκη κύματος στις μπλε περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ως αποτέλεσμα δεν υπάρχει επαρκής διαχωρισμός των συστατικών της ρύπανσης σ' αυτή την περιοχή του φάσματος, εξαιτίας της υψηλής απορρόφησης του φωτός από το φυτοπλαγκτόν και από τα εναιωρήματα (Kirk, 1983). Η υψηλότερη συσχέτιση παρουσιάζεται μεταξύ 550 – 720 nm, περιοχή όπου είναι περιορισμένη η ατμοσφαιρική διάχυση σε σύγκριση με την μπλε περιοχή του φάσματος. Σύμφωνα με τους Malthus et al. (1995), σε θολά ύδατα όπου κυριαρχούν οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων μη οργανικών σωματιδίων, η ανάκλαση της ακτινοβολίας κορυφώνεται σε ένα ευρύ φάσμα από 550 – 700 nm. Πέρα από τα 720 nm ο διαχωρισμός εμφανίζεται χαμηλότερος, εξαιτίας της απορρόφησης της ακτινοβολίας από το νερό στο κοντινό υπέρυθρο.

Άλλες έρευνες εστιάζουν σε μεγαλύτερα μήκη κύματος, τα θερμικά. Εξαιτίας της διάχυσης της ακτινοβολίας από τα αιωρούμενα σωματίδια, η οποία διαφορετικά θα απορροφούνταν από το καθαρό νερό, θολά ύδατα παρουσιάζουν μικρότερη θερμοκρασία από γειτονικά τους καθαρά ύδατα (Schiebe et al., 1976). Γι' αυτό κάποιοι ερευνητές χρησιμοποιούν δεδομένα Landsat για την εκτίμηση της επιφανειακής θερμοκρασίας των υδάτων της ενδοχώρας (Ritchie et al., 1990).

3.2. Συγκέντρωση της χλωροφύλλης

Πολλές έρευνες αποδεικνύουν τη δυνατότητα εκτίμησης και καταγραφής της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης από δορυφορικά δεδομένα σε ύδατα της ενδοχώρας (Ammenberget al. 2001, Flink et al. 2001, George & Malthus 2001, Hoogenboom et al. 1998, Ostlund et al. 2001, Thiemann & Kaufmann 2000, Tyler et al. 2006). Το φυτοπλαγκτόν αποτελείται από χλωροφύλλη α, b και c, από τις οποίες μόνο η α καταγράφεται από τα δορυφορικά συστήματα. Ο φυσικός φθορισμός της χλωροφύλλης-α εξαιτίας του ηλίου αποτελεί θετικό παράγοντα για το φυτοπλαγκτόν, ακόμα και στα ύδατα με περιεχόμενα αιωρούμενα σωματίδια (Fischer and Kronfeld, 1990). Πάντως το σήμα εξασθενίζει κατά 30% αν το φυτοπλαγκτόν βρίσκεται 2μ. κάτω από την επιφάνεια αντί να προσεγγίζει την επιφάνεια (Fisher and Kronfeld, 1990).

Η καταγραφή της χλωροφύλλης στα ύδατα απαιτεί τη χρήση διαύλων μικρού εύρους (Harrington and Repic, 1995) Π.χ. η χαρτογράφηση της χλωροφύλλης-α απαιτεί ραδιομετρικά δεδομένα με φασματική ανάλυση μεγαλύτερη από 1nm (Gitelson et al., 1993). Η χλωροφύλλη απορροφά την ακτινοβολία στα 450 και 670nm. Η μεγαλύτερη απορρόφηση σύμφωνα με τους Hunter et al. (2008) είναι δυνατή στα 433nm (μπλε) και στα 686nm (κόκκινο). Υψηλότερη συγκέντρωση χλωροφύλλης μειώνει την ανάκλαση στον μπλε δίαυλο, αλλά αυξάνει στον πράσινο δίαυλο. Με αύξηση της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης η κορύφωση της ανακλώμενης ακτινοβολίας μεταβάλλεται από τα 680 στα 715nm, ενώ η ποσότητα της ανακλώμενης ακτινοβολίας αυξάνει σημαντικά (Gitelson, 1992). Σύμφωνα με τους Hunter et al. (2008) είναι δυνατή η παρακολούθηση από δορυφορικές εικόνες των διαφορετικών ειδών φυτοπλαγκτού (taxa) και η διαφοροποίησή τους διαχρονικά, εξαιτίας της διαφορετικότητας των χρωματικών ομάδων του φυτοπλαγκτού (π.χ. καφέ, πράσινο, μπλε-πράσινο, κόκκινο άλγος). Οι Dekker et al. (1995) χρησιμοποίησαν υπερφασματικά δεδομένα για την εκτίμηση του πράσινου και μπλε-πράσινου άλγους, μέσω αλγορίθμων, ενώ οι Bazzani and Cecchi (1995) χρησιμοποίησαν φθορίζουσα φασματομετρία για την εκτίμηση των φασματικών χαρακτηριστικών 10 διαφορετικών ειδών άλγους.

Για την εκτίμηση της χλωροφύλλης έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα δορυφορικά συστήματα, μεταξύ των οποίων οι εικόνες Landsat MSS και TM. Αν και έχει παρατηρηθεί υψηλή συσχέτιση μεταξύ της χλωροφύλλης-α και των δεδομένων MSS (Shimoda et al., 1986), οι εικόνες TM προτιμώνται στις περισσότερες περιπτώσεις και συγκεκριμένα ο δίαυλος TM1 (Lopez-Gracia and Caselles 1987, Gracia and Caselles 1990) και ο δίαυλος TM2 (Lathrop and Lillesand, 1986). Επιπλέον ο λόγος (TM1-TM3)/TM2 χρησιμοποιείται ως δείκτης των συγκεντρώσεων της χλωροφύλλης (Mayo et al., 1995). Για την ακρίβεια η αναλογία διαύλων και οι γραμμικοί αλγόριθμοι παρουσιάζουν υψηλότερη συσχέτιση με τη χλωροφύλλη-α (Dierberg and Carriker, 1994).

Χαμηλές συγκεντρώσεις χλωροφύλλης στο εύρος 3–7 mg/l καταγράφηκαν από εικόνες Landsat TM στο φασματικό εύρος από 400 έως 750 nm (Mayo et al., 1995). Αξιοπίστα αποτελέσματα και χάρτες μεγάλης ακρίβειας έχουν παραχθεί και από δορυφορικά δεδομένα υψηλής χωρικής ανάλυσης (Millie et al., 1992). Τα καλύτερα αποτελέσματα για την περιεχόμενη χλωροφύλλη-α εξάχθηκαν από γραμμικές φασματικές συναρτήσεις (Thiemann and Kaufmann, 2000).

Οι Tyler et al. (2006) επεσήμαναν στο διάγραμμα προσομοίωσης της φασματικής απόκρισης, ότι παρουσιάστηκαν κορυφές στα 420 nm για το καθαρό νερό, στα 645 nm για τα αιωρούμενα σωματίδια και στα 575 nm και 700 nm για το φυτοπλαγκτόν. Παρόμοια φασματικά χαρακτηριστικά βρέθηκαν και σε άλλες έρευνες (Lodhi et al. 1997, Gitelson et al. 1999, Kobayashi et al. 2000). Οι Ma and Dai (2005) χρησιμοποιώντας φασματόμετρο για την καταγραφή της φασματικής υπογραφής της χλωροφύλλης σε δορυφορικές εικόνες Landsat κατέληξαν πως οι δίαυλοι όπου εμφανίστηκε η μέγιστη περιεχόμενη χλωροφύλλη είχαν μήκος κύματος

κοντά στα 550 nm (540 έως 557 nm), κοντά στα 706 nm (711 ως 721 nm) και κοντά στα 682 nm (666 έως 693 nm).

Η δυνατότητα λήψης διαχρονικών εικόνων από συστήματα τηλεπισκόπησης χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα της συσχέτισης των αιωρούμενων σωματιδίων και της συγκέντρωσης της χλωροφύλλης (Fielder and Laurs 1990, Walker 1996). Σύμφωνα με τους Ritchie et al. (1994) παρόλο που είναι εφικτή η καταγραφή της χλωροφύλλης από δορυφόρο, έρευνες δείχνουν πως τα δορυφορικά δεδομένα ευρέους φάσματος δεν επιτρέπουν το διαχωρισμό της χλωροφύλλης από τα αιωρούμενα σωματίδια.

4. Συμπεράσματα

Συμπερασματικά, η ποιότητα του νερού που καταγράφεται στην επιφάνεια των υδάτινων σωμάτων επηρεάζεται από ένα πλήθος παραγόντων, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει σημαντική χωρική και χρονική διαφοροποίηση. Η τηλεπισκόπηση και τα GIS ξεπερνούν τους περιορισμούς που προκύπτουν από τις κλασσικές μεθόδους εκτίμησης της ποιότητας του νερού με δειγματοληψίες και προσφέρουν εναλλακτικούς τρόπους παρακολούθησης της ποιότητας των υδάτων διαχρονικά και σε διαφορετική χωρική κλίμακα. Η επιλογή του κατάλληλου δορυφορικού συστήματος και της μεθοδολογίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως είναι η φύση της έρευνας, το κόστος, η περιοχή και η εποχή μελέτης. Σε κάθε περίπτωση πάντως ο συνδυασμός μεθόδων τηλεπισκόπησης με δεδομένα πεδίου κρίνεται ως ο πιο ενδεδειγμένος για την εξαγωγή πιο ασφαλών αποτελεσμάτων εκτίμησης και καταγραφής της ρύπανσης των υδάτων της ενδοχώρας.

Βιβλιογραφία

- Ammenberg P., Flink P., Lindell T., Pierson D., & Strömbeck N., 2002. *Bio-optical modeling combined with remote sensing to assess water quality*. International Journal of Remote Sensing, 23(8), 1621–1638.
- Bazzani M. and Cecchi G., 1995. *Algae and mucillagine monitoring by fluorescence lidar experiments in field*. EARSeL Advances in Remote Sensing v. 3, pp. 90-101.
- Bowers D.G., Boudjelas S. and Harker G.E.L., 1998. *The distribution of fine suspended sediments in the surface waters of the Irish Sea and its relation to tidal stirring*. International Journal of Remote Sensing 19, 2789–805.
- Clark C.D., 1993. Satellite remote sensing of marine pollution. International journal of remote sensing 14: 2985-3004.
- Curran P.J. and Novo E.M.M., 1988. *The relationship between suspended sediment concentration and remotely sensed spectral radiance: a review*. Journal of Coastal Research 4, 351–68.
- Dierberg E.E and Carriker N.E., 1994. *Field testing two instruments for remotely sensing water quality in the Tennessee Valley*. Environmental science and technology 28, 16 – 25.

- Fieldler P.C. and Laurs R.M., 1990. *Variability of the Columbia River plume observed in visible and infrared satellite imagery*. International Journal of Remote Sensing 11, 999–1010.
- Fischer J. and Kronfeld U., 1990. *Sun-stimulates chlorophyll fluorescence1: influence of oceanic properties*. International journal of remote sensing 11(12), 2125 – 47.
- Flink P., Lindell T. and Ostlund C., 2001. *Statistical analysis of hyperspectral data from two Swedish lakes*. The science of the total environment, 268, 155 – 169.
- Gao J. and O’Leary S.M., 1997b. Estimation of suspended solids from aerial photographs in a GIS. International Journal of Remote Sensing 18, 2073–85.
- George D.G. and Malthus T.J., 2001. *Using a compact airborne spectrographic imager to monitor phytoplankton biomass in a series of lakes in north Wales*. The Science of the total Environment, 268, 215 – 226.
- Gitelson A., Garbuzov G, Szilagyi F., Mittenzwey K.H., Karnieli A. and Kaiser A., 1993. *Quantitative remote sensing methods for real time monitoring of inland waters quality*. International journal of remote sensing 14, 1269-95.
- Gitelson A.A. et al., 1996. *Reflectance spectra of polluted marine waters in Haifa Bay, Southeastern Mediterranean: Features and applications for remote estimation of chlorophyll concentration*. Israel Journal of earth sciences, vol. 45.
- Gitelson A., Schalles J., Rundquist D., Schiebe F. and Yacobi Y., 1999. Comparative reflectance properties of algal cultures with manipulated densities. Journal of Applied Phycology 11: 345–354.
- Goodin D., Han L., Franser R., Rundquist D., Stebbins W. and Schalles J., 1993. Analysis of suspended solids in water using remotely sensed high resolution derivative spectra. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 59: 505–510.
- Gracia M.J.L. and Caselles V., 1990. *A multitemporal study of chlorophyll-a concentration in the Albufera lagoon of Valencia, Spain, using Thematic Mapper data*. International journal of remote sensing 11, 301 – 11.
- Hadjimitsis D.G. and Clayton C., 2008. *Assessment of temporal variations of water quality in inland water bodies using atmospheric corrected satellite remotely sensed image data*. Environmental monitoring and assessment, 124(1-3), 157-166.
- Harrington J. and Repic R.L., 1995. *Hyperspectral and video remote sensing of Oklahoma lakes*. Papers and Proceedings of Applied Geography Conferences, State University of New York at Binghamton 18, 79–85.
- Hinton J.C., 1991. *Application of eigenvector analysis to remote sensing of coastal water quality*. International Journal of Remote Sensing 12, 1441–60.
- Hoogenboom H.J., Dekker A.G. and De Haan J.F., 1998. *Retrieval of chlorophyll and suspended matter from imaging spectrometry data by matrix inversion*. Canadian journal of remote sensing, 24(2), 144 – 152.
- Hunter et al., 2008. *Spectral discrimination of phytoplankton colour groups: The effect of suspended particulate matter and sensor spectral resolution*. Remote sensing of environment 112 (2008) 1527-1544.
- Jorgensen P.V. and Edolvang K., 2000. *CASI data utilized for mapping suspended matter concentrations in sediment plumes and verification of 2-D hydrodynamic modelling*. International Journal of Remote Sensing 21, 2247–58.
- Kirk J.T.O., 1983. *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge, UK: Cambridge University press.

- Kobayashi H., Ohta S., Murao N., Tachibana H. and Yamagata S., 2000. *Radiative transfer model for satellite remote sensing of ocean colors in coastal zone*. Journal of Global Environment Engineering 6, 13_31.
- Kohler A. and Labus B. C., 1983. *Eutrophication processes and pollution of fresh water ecosystems including waste heat*. Encyclopedia of plant physiology New series vol . 12 D. Physiological plant Ecology IV: 413-464.
- Κουϊμτζή Θ., Φυτιάνου Κ. και Σαμαρά-Κωνσταντίνου Κ., 1998. Χημεία περιβάλλοντος. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.
- Lathrop R.G., Jr. and Lillesand T.M., 1986. *Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Green Bay in central Lake Michigan*. Photogrammetric engineering and remote sensing 52, 671 – 80.
- Liu Y., Islam M.A., and Gao J., 2003. *Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing*. Progress in Physical Geography 27, 1(2003) pp. 24-43.
- Lodhi M., Rundquist D., Han L. and Kuzila M., 1997. *The potential for remote sensing of loess soils suspended in surface waters*. Journal of the American Water Resources Association 33: 111–117.
- Lopez-Garcia M.J. and Caselles V., 1987. *Use of Thematic Mapper data to assess water quality in Albufera Lagoon of Valencia (Spain)*. In advances in digital image processing. Proceedings 13th annual conference of the remote sensing society, Nottingham: Remote sensing society, 510 – 19.
- Ma R. and Dai J., 2005. *Investigation of chlorophyll-a and total suspended matter concentrations using Landsat ETM and field spectral measurements in Taihu Lake, China*. International journal of remote sensing. Vol. 26, no. 13, 2779 – 2787.
- Malthus T.J. and Dekker A.G. , 1995. *First derivative indices for the remote sensing of inland water quality using high spectral resolution reflectance*. Environment International, vol. 21, No 2, pp. 221 – 232, 1995.
- Mayo M., Gitelson A., Yacobi Y.Z and Ben Avraham Z., 1995. *Chlorophyll distribution in Lake Kinneret determined from Landsat Thematic Mapper data*. International journal of remote sensing 16, 175 – 82.
- Millie D.F., Baker M.C., Tucker C.S., Vinyard B.T. and Dionigi C.P., 1992. *High resolution airborne remote sensing of bloom forming phytoplankton*. Journal of Phycology 28, 281–90.
- Moore G.K., 1980. *Satellite remote sensing of water turbidity*. Hydrological Sciences Bulletin 25, 407–21.
- Morel, A.Y., 1980. *In-water and remote measurement of ocean colour*. Boundary Layer Meteorology 18, 177–201.
- Morse GK, Lester JN, Perry R. *The economic and environmental impact of phosphorus removal from wastewater in the European Community*. London: Selper Publications; 1993.
- Μπέλλος Δ.Χ., 2004. *Συγκέντρωση θρεπτικών στοιχείων – βαρέων μετάλλων και ραδιοκαϊσίου στο νερό – ίζημα και υδρόβια φυτά του ποταμού Πηνειού*. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Βιολογίας, Α.Π.Θ.
- Muller E., Décamps H., and Dobson M.K., 1993. *Contribution of space remote sensing to river studies*. Freshwater Biology (1993), 29, 301-312.
- Novo E., Hansom J. and Curran P., 1989. *The effect of viewing geometry and wavelength on the relationship between reflectance and suspended sediment concentration*. Inter-

- national Journal of Remote Sensing 10:1357–1372.
- Novo E.M.M., Steffen C.A. and Braga Z.E., 1991. *Results of a laboratory experiment relating spectral reflectance to total suspended solids*. Remote Sensing of Environment 36, 67–72.
- Ostlund C., Flink P., Strombeck N., Pierson D. and Lindell T., 2001. *Mapping of the water quality of Lake Erkan, Sweden, from imaging spectrometry and Landsat Thematic Mapper*. Science of the total environment, 268(1-3), 139 – 154.
- Ritchie J. C., Cooper C. M. and Schiebe F. R., 1990. *The relationship of MSS and TM digital data with suspended sediments, chlorophyll, and temperature in Moon Lake, Mississippi*. Remote Sensing of Environment, 33, pp. 137-148.
- Ritchie J.C. and Schiebe F.R., 1985. *Monitoring suspended sediments with remote sensing techniques*. In Hydrologic Applications of Space Technology. Proceedings Workshop, Cocoa Beach, FL, 1985. IAHS Publication, 160, 233–43.
- Ritchie J.C., Schiebe F.R., Cooper C.M., and Harrington J.A., Jr., 1994. *Chlorophyll measurements in the presence of suspended sediment using broad band spectral sensors aboard satellites*. Journal of Freshwater Ecology v. 9, pp. 197-206.
- Ritchie J.C., Schiebe F.R., and McHenry J.R., 1976. *Remote sensing of suspended sediment in surface water*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing v. 42, pp. 1539-1545.
- Shimoda H., Etaya M., Sakata T., Goda L. and Stelczer K., 1986. *Water quality monitoring of Lake Balaton using Landsat MSS data. In remote sensing of resources development and environmental management*. Proceedings 7th ISPRS Commission VII symposium, Enschede, 1986, Rotterdam: Balkema, 2, 765 – 70.
- Stumpf R.P., 1992. *Remote sensing of water clarity and suspended sediment in coastal waters*. In Proceedings of SPIE, The International Society for Optical Engineering, Vol. 1930, Part 1, Bellingham, WA, USA, 293–305.
- Sturm B., 1981. *The atmospheric correction of remotely sensed data and the quantitative determination of suspended matter in marine water surface layers*. In Cracknell, A.P., editor, Remote sensing in meteorology, oceanography, and hydrology. Chichester: Ellis Horwood, 163–97.
- Thiemann S. and Kaufmann H., 2000. *Determination of Chlorophyll Content and Trophic State of Lakes Using Field Spectrometer and IRS-1C Satellite Data in the Mecklenburg Lake District, Germany*. Remote Sensing of Environment, 73, pp. 227-235.
- Tyler A.N., Svab E., Presing M. and Kovacs W.A., 2006. *Remote sensing of the water quality of shallow lakes: A mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterised by high-suspended sediment*. International journal of remote sensing, 27(8), 1521 – 1537.
- Walker N.D., 1996. *Satellite assessment of Mississippi River plume variability: causes and predictability*. Remote Sensing of Environment 58, 21–35.
- Wear D., Turner M. and Naiman R., 1998. *Land cover along an urban-rural gradient: implications for water quality*. Ecol. Appl. 8(3), 619–630.
- Whittier T. and Paulsen S., 1992. *The surface water component of the environmental monitoring and assessment program: an overview*. J. Aquat. Ecosyst. Health 2(1), 1–12.
- Yang M.D., Merry C.J. and Sykes R.M., 1999. *Integration of water quality modeling, remote sensing, and GIS*. Journal of the American Water Resources Association 35, 253–63.