

Interreg V- A Greece-Italy Programme 2014-2020 (<https://greece-italy.eu/>)



IR2MA Large Scale Irrigation Management Tools for Sustainable Water Management in Rural Areas and Protection of Receiving Aquatic Ecosystems

(Subsidy Contract No I1/2.3/27)

Τα αποστραγγιστικά δίκτυα ως παράγοντας απορρύπανσης των αγροτικών απορροών

Φεβ, 2020 | Τεχνική αναφορά στο πλαίσιο του παραδοτέου D2.1.3

Παρασκευή Μπέζα

Χημικός, MSc, PhD

Τμ. Γεωπονίας Πανεπιστημίου Ιωαννίνων

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Synopsis in English – Drainage ditches as systems to remove agricultural pollutants	3
Riassunto in Italiano - Le reti di drenaggio come un fattore di decontaminazione del deflusso agricolo	6
Τεχνική αναφορά	9
Ορολογία	9
Περίληψη	10
Εισαγωγή	13
Μορφολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των υδάτων αποστράγγισης	14
Βιοποικιλότητα	17
Υδρόβια Μακρόφυτα	19
Α. Μορφολογική και οικολογική ταξινόμηση	19
Β. Ρόλος των υδρόβιων μακρόφυτων στο οικοσύστημα	21
Γ. Ρόλος της υδρόβιας μακρόφυτων στην κατακράτηση των θρεπτικών	23
Καθαρισμός υδάτων	24
Α Κατακράτηση θρεπτικών	24
Άζωτο (N)	25
Φωσφόρος (P)	28
Β. Κατακράτηση φυτοφαρμάκων	30
Γ. Κατακράτηση ιζήματος	33
Συντήρηση γεωργικών αποστραγιστικών καναλιών	34
Μέθοδοι συντήρησης	34
Επιπτώσεις των πρακτικών συντήρησης στα μορφολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των καναλιών	35
Καινοτόμες πρακτικές συντήρησης	38
Συμπεράσματα	39
Βιβλιογραφία	41
Ξενόγλωσση βιβλιογραφία	41
Ελληνική βιβλιογραφία	46

Synopsis in English – Drainage ditches as systems to remove agricultural pollutants

Feb, 2020; Technical report D2.1.3.

Paraskevi Beza

In the agricultural community, drainage ditches have been viewed as conduits for removing water from production acreage. Drainage ditches as buffers between production acreage and downstream aquatic receiving systems, it is possible to increase the water quality of agricultural runoff following storm events. Therefore, ditches may serve as an alternative best management practice (BMP).

Ditches are unique engineered ecosystems with characteristics of streams and wetlands. The typical surface system consists of field drains, field ditches, a main collection ditch and an outlet. Drainage ditch consists of a permanent or temporary watercourse, bottom substrate and vegetated or bare ditch banks and a vegetated margin. The widths of the three parts vary from 20 cm wide conducting water during short periods of heavy rainfall and overgrown with grass to 10 m wide permanent with complex vegetation.

Ditch networks constitute ecological corridors that play a key role in the conservation of biodiversity in intensively cropped landscapes. The vegetation cover of ditches and margins provides efficient shelter for this biodiversity. This ecosystem service is optimal when ditches offer diversified microhabitats and sheltered corridors. This is generally achieved within highly vegetated ditches with a relatively permanent base flow and low velocity of the water flow. As for any stream, ditches are prone to recharge groundwater when the groundwater table is below the water level in the ditch. The small water volume leads to a strong influence of diurnal and seasonal changes in temperature and the dominant role of macrophytes in this system.

Native plants planted along the upland margins of storm water ponds, slow down the speed of the runoff, spreading it out and allowing for better ground infiltration. Other plants, that are shallow rooted and found growing along the littoral edge of ponds help stabilize and prevent erosion. Emergent and submersed plants provide habitat and oxygenate the water column. Collectively, these plants clean the water and allow sunlight to penetrate the water column. By keeping nutrient loads lower these wetland plants help prevent harmful algal blooms.

Aquatic macrophytes play a key role in ecological quality. Whilst the vegetation of mesotrophic drainage ditches in a mid-successional stage is characterized by a species-rich mosaic of submerged, emergent and floating plant species, a slight increase in nutrient load

induces the dominance of 'weedy' submerged plant species. Excessive growth of these species demands for an increased maintenance frequency to retain the drainage function of the ditch, which negatively influences the less tolerant plant species even further. Ongoing enrichment eventually leads to frequent filamentous and epiphytic algal or cyanobacteria blooms and dominance of Lemnaceae or *Azolla filiculoides*, resulting in decreased light penetration, hindering the development submerged vegetation. Submerged vegetation provides an essential habitat for wild life.

Aquatic macrophytes can stimulate denitrification. This is because the plants provide substrate for epiphytic biofilms of denitrifying bacteria but also because plants supply degradable organic matter that for the denitrification process. In addition, microgradients in redox potential found in plant beds may stimulate coupled nitrification-denitrification process. Taken together these mechanisms tend to lead to a high retention of nitrogen and phosphorus in macrophyte dominated fresh waters, compared to unvegetated water systems.

Vegetation generates friction and roughness, which decrease the flow velocity increases hydraulic time and enhance the sedimentation potential. Plant uptake can be a significant sink of nutrient in ditches. The plant uptake of nutrient is, however, subjected to strong seasonal variation because it is intimately related to vegetation growth. Moreover, previously assimilated nutrients may be released after plant senescence during the dormant season.

Ditches often have high concentrations of N and, compared with other water courses, tend to be N-saturated. Numerous processes and mechanisms are involved in N cycling dynamics and transport pathways in ditches including N mineralization, nitrification, and denitrification. and adsorption (mainly NH_4^+). Sorption processes may lead to some retention of inorganic P within ditches. The sorption of P mainly occurs onto ditch sediments. The iron-humic acid and aluminum-humic acid complexes play a key role in P sorption on ditch sediments. Particulate-bound nutrients especially phosphorus, may also be subtracted from the water column by sedimentation. Resuspension of sediments leads to transport to dissolved phase. Particulate fine particles carry adsorbed phosphorous are transported downstream.

Sorption is the main mechanism of pesticide retention. Several components of ditches, including soil, sediments, vegetation, and litter, can provide efficient sorption sites. The removal of pesticides generally increases with pesticide hydrophobicity. Biotic and abiotic degradation processes are also involved in pesticide retention within ditches, which has been observed in several studies. Ditches also serve as a conduit for sediment, even in low-relief

landscapes. Sediment is a significant water pollutant and it also carries particulate-bound nutrients and other contaminants.

To retain the drainage function of ditches, regular maintenance takes place, in the form of dredging and vegetation clearance, i.e., mowing, chemical weeding, or burning, are more frequently achieved a priori. Dredging leads to the complete or partial removal of accumulated sediments within the ditch bed and of the biota that are sheltered within this layer.

Dredging and burning modify ditch bed and sidewall sediment properties including texture and organic matter content. Dredging is most likely the most disturbing practice because it removes part of the sediments and the biota that are responsible for nutrient uptake and biotic pesticide degradation. Mowing appears as an interesting maintenance operation with limited adverse effects on biodiversity conservation or water purification. While chemical weeding degrades further water quality with the addition of new pollutant load and restoration of ditch vegetation after the chemical weeding is very slow.

Finally, the dredging, chemical weeding, or mowing of drainage ditches is likely to contribute to downstream water contamination. Several management practices are available for installation of artificial wetlands adjacent to ditches or restoration of their connection with natural floodplains which function which under conditions of large flow retain the pollution.

Optimal design of ditch management practices will require continued advances in the understanding of the ecological, chemical, and hydrological processes operating within ditches and their surrounding landscapes. Application of innovative methods to treat and remove pollutants from ditches may prove instrumental for the achievement of watershed management objectives. viewing drainage ditches as buffers between production acreage and downstream aquatic receiving systems, it is possible to increase the water quality of agricultural runoff following storm events. Therefore, ditches may serve as an alternative best management practice (BMP).

Riassunto in Italiano - Le reti di drenaggio come un fattore di decontaminazione del deflusso agricolo

[Feb, 2020; Technical report D2.1.3.]

Paraskevi Beza

In agricoltura, i canali di drenaggio servono come un mezzo per la rimozione di deflusso dalle colture. Agiscono come regolatori tra i terreni agricoli e i destinatari dell'acqua e come mezzo di purificazione dell'acqua dai carichi inquinanti che ne risultano.

I canali di drenaggio sono costruzioni artificiali che combinano le caratteristiche di acqua corrente e zone umide. Sulla superficie del terreno rurale si distinguono reti di canali di drenaggio che sono collegati con un fossato centrale e un'uscita per l'ambiente costiero. L'habitat sono caratterizzati dalle seguenti sezioni, da un flusso temporaneo o permanente, da un substrato del fondo, coperto di vegetazione o pendenze nudi e un margine vegetale. Le larghezze delle tre parti variano da 20cm che conducono l'acqua durante i periodi di forti piogge e ricoperto di erba fino a 10m di larghezza permanente con vegetazione complessa.

Le reti di drenaggio operano come corridoi ecologici con un ruolo chiave nel mantenimento della biodiversità in un paesaggio agricolo intensificato. Il servizio ecosistemico è ottimale perché forniscono microhabitat differenziati e corridoi protetti. Ciò è ottenuto dalla presenza di una fitta vegetazione con un flusso di base permanente e un flusso basso. Come con l'acqua corrente, i canali di drenaggio caricano l'acqua sotterranea. A causa del piccolo volume di acqua, si osservano fluttuazioni giornaliere e stagionali di parametri di temperatura e il contenuto di ossigeno solubile mentre le macrofite acquatiche predominano.

La vegetazione naturale che cresce nei margini rallenta il movimento degli effluenti agricoli, li fa diffondere e permette una migliore infiltrazione con il terreno. Altre piante si trovano sulle banche e contribuiscono a stabilizzare i pendii. Le piante acquatiche emergenti e sommerse creano un habitat e ossigenano l'acqua. Queste piante purificano l'acqua e permettono l'ingresso della radiazione solare nella colonna d'acquatica. Assimilando il carico di nutrienti prevengono lo sviluppo di fioriture pericolose di fitoplancton.

Le macrofite acquatiche sono indicatori della qualità ecologica dell'acqua. La vegetazione dell'acqua mesotrofiche dei canali di drenaggio in una fase media di successione degli ecosistemi è caratterizzata da un mosaico ricco in di specie sommerse, galleggianti e prominenti, mentre un leggero aumento di nutrienti porta a predominanza di erbacce che sono immerse in acqua. L'eccessiva crescita di queste specie richiede una purificazione del canale più frequente, che viene poi ripristinata più facilmente estendendo il loro ulteriore dominio nell'ecosistema acquatico ad altre specie meno resistenti. Un ulteriore arricchimento di nutrienti porta alla predominanza di Lemnaceae o Azolla filiculoides e fioriture di cianobatteriche che portano ad una riduzione dell'ingresso della radiazione solare impedendo lo sviluppo della vegetazione acquatica sommersa.

Alle radici delle piante acquatiche si alternano ambienti di diverso potenziale redox e di reazioni accoppiate di nitrificazione-denitrificazione. Tenendo conto dei suddetti meccanismi, la presenza di macrofite porta ad una maggiore ritenzione di N e P in relazione ai canali di drenaggio senza vegetazione.

La vegetazione provoca ostacoli e attrito nel movimento dell'acqua con conseguente riduzione della velocità, aumentando il tempo idraulico e il potenziale di sedimentazione. L'assimilazione dei nutrienti dalle piante è anche un meccanismo per depositare l'inquinamento. Tuttavia, questo meccanismo è soggetto a stagionalità ed è associato alla crescita della vegetazione. Durante la decomposizione della vegetazione vegetale con processi biologici, la materia organica viene convertita in nutrienti inorganici.

Le acque dei canali di drenaggio sono sature di azoto solubile rispetto ad altre categorie di acqua naturale. Il ciclo dell'azoto che avviene all'interno dei canali comprende molti processi biologici e processi di trasporto, come nitrificazione, denitrificazione e adsorbimento (principalmente NH_4^+).

L'adsorbimento è il meccanismo principale per la conservazione del fosforo inorganico dai sedimenti nei canali. I complessi di Fe e di Al con componenti chimici nel precipitato sono responsabili dell'assorbimento di P nel precipitato. Anche il materiale sospeso in particelle ha sostanze nutritive adsorbite. Il materiale sospeso in particelle che porta il fosforo adsorbito viene trasportato a valle.

L'adsorbimento e l'assorbimento sono i principali meccanismi di ritenzione di pesticidi dall'acqua di drenaggio a cui finiscono li attraverso il deflusso agricolo. Come solide dell'adsorbimento e dell'assorbimento per pesticidi sono considerati il suolo, i sedimenti, la vegetazione morta delle piante. La rimozione di pesticidi aumenta con l'idrofobicità della struttura chimica del pesticida. I processi di decomposizione biotici e abiotici che si svolgono in acqua sembrano svolgere un ruolo speciale. I canali di drenaggio fungono da portatori di sedimento, anche in paesaggi bassi. Il sedimento è considerato anche un inquinante che porta le forme adsorbite di sostanze nutritive e di altre sostanze inquinanti e influenza le torbidità dell'acqua.

Per mantenere l'alimentazione idraulica dei canali, la loro manutenzione dovrebbe avvenire a intervalli regolari con scavando e purificando della vegetazione. La pulizia della vegetazione può essere fatta con taglio, bruciando e con l'utilizzo di pesticidi chimici. Lo scavo porta la rimozione totale o parziale del sedimento e delle biocomunità che risiedono nel sedimento.

Lo scavo e la combustione modificano le proprietà del fondo e delle pendenze come la trama e il contenuto della materia organica. Lo scavo è la pratica che causa la maggior perturbazione dell'ecosistema del canale perché rimuove sedimenti e biocarburante che è responsabile per la ritenzione dei nutrienti e della decomposizione biologica dei pesticidi, mentre tagliare la vegetazione è una pratica interessante con le conseguenze meno negative per la biodiversità e l'inquinamento dell'acqua.

L'uso di sostanze chimiche per uccidere la vegetazione degrada ulteriormente la qualità dell'acqua aggiungendo nuovo carico inquinante a loro. Inoltre, il tasso di recupero della vegetazione vegetale dopo l'applicazione di sostanze chimiche è più lento.

In conclusione, lo scavo, le sostanze chimiche o il taglio della vegetazione probabilmente contribuiscono al trasferimento dell'inquinamento ai destinatari dell'acqua. Oltre ai modi di manutenzione all'interno del canale, i lavori di costruzione di zone umide artificiali che circondano i canali o progetti per la creazione di terrazze naturali a un livello inferiore dove in condizioni di flusso elevato si allagano e funzionano come zone di decontaminazione. La progettazione ottimale della manutenzione della rete di drenaggio richiede una profonda

conoscenza e comprensione dei processi ecologici, chimici e idrologici che avvengono al loro interno e dell'interazione con il paesaggio rurale che li circonda.

L'applicazione di metodi innovativi per il trattamento e la conservazione di sostanze inquinanti nell'acqua di drenaggio può rivelarsi di importanza strategica per la realizzazione di piani di gestione delle risorse idriche nel bacino idrografico, dove i canali fungono da regolatori tra le colture e le falde acquifere, migliorando la qualità del deflusso agricolo. Essi possono quindi essere visti come un'alternativa alla buona pratica di gestione (BMP, Best Management Practice) nel sistema agricolo.

Τεχνική αναφορά

Ορολογία

BOD: Biochemical Oxygen Demand, BOD

BMP: Best Management Practices, Πρακτικές καλύτερης διαχείρισης

CEC: cation exchange capacity, ικανότητα κατιανταλλαγής

DP: Dissolved Phosphorous, Διαλυτός Φωσφόρος

DT50: Degradation Time 50%, χρόνος ημίσειας ζωής.

ERPC index: Effective pesticide retention capacity index

HRT: Hydraulic Retention Time, Υδραυλικός χρόνος παραμονής

Kf: Freundlich coefficient, συντελεστής κατανομής της ισόθερμης Freundlich

PP: Particulate Phosphorous, Σωματιδιακός Φωσφόρος

PSMs: phosphorus sorbing materials, υλικά που απορροφούν φωσφόρο

TP: Total Phosphorous, Ολικός Φωσφόρος

IP: Inorganic Phosphorous, Ανόργανος Φώσφορος

OP: Organic Phosphorous, Οργανικός Φωσφόρος

POP: Particulate Organic Phosphorous, Σωματιδιακός Οργανικός Φωσφόρος.

R.I: Retention index, Δείκτης κατακράτησης

SRP: Soluble Reactive Phosphorous, Διαλυτός ενεργός Φωσφόρος

TN: Total Nitrogen, Ολικό Άζωτο

Περίληψη

Στη γεωργία οι τάφροι αποστράγγισης χρησιμεύουν ως μέσο συγκέντρωσης και απομάκρυνσης των απορροών από τις καλλιέργειες. Λειτουργούν ως ρυθμιστές μεταξύ της γεωργικής γης και των υδάτινων αποδεκτών, και ως μέσο καθαρισμού των υδάτων από το ρυπαντικά φορτία που καταλήγουν σε αυτές.

Οι τάφροι αποστράγγισης είναι τεχνητές κατασκευές που συνδυάζουν χαρακτηριστικά ρέοντων υδάτων και υγροτόπων. Στην επιφάνεια της αγροτικής γης διακρίνεται δίκτυο αποστραγγιστικών καναλιών, που συνδέονται μεταξύ τους, μια αποστραγγιστική συλλεκτήρια τάφρος και μία τελική έξοδο προς τον αποδέκτη. Ως ενδιαιτήματα χαρακτηρίζονται από τα εξής τμήματα, από μια προσωρινή ή μόνιμη ροή, το υπόστρωμα του πυθμένα, καλυμμένα με βλάστηση ή γυμνά πρανή και ενός φυτικού περιθωρίου. Τα πλάτη του ρέοντος τμήματος ποικίλλουν από 20 cm που άγει το νερό σε περιόδους έντονων βροχοπτώσεων καλυμμένο με γρασίδι μέχρι 10 m με σύνθετη βλάστηση

Το αποστραγγιστικό δίκτυο λειτουργούν ως οικολογικοί διάδρομοι με ρόλο κλειδί στη διατήρηση της βιοποικιλότητας σε ένα τοπίο εντατικοποιημένης γεωργίας. Η οικοσυστημική υπηρεσία είναι η βέλτιστη επειδή παρέχει διαφοροποιημένα μικρο-ενδιαιτήματα και προστατευμένους διάδρομους. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρουσία πυκνής βλάστησης με μια μόνιμη ροή βάσης και μικρή παροχή. Όπως συμβαίνει και με τα ρέοντα ύδατα, τα αποστραγγιστικά κανάλια φορτίζουν τα υπόγεια ύδατα. Εξαιτίας του μικρού όγκου νερού παρατηρούνται ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις των παραμέτρων της θερμοκρασίας και του περιεχόμενου διαλυτού οξυγόνου ενώ κυριαρχούν τα υδρόβια μακρόφυτα.

Η φυσική βλάστηση που αναπτύσσεται στα περιθώρια επιβραδύνει την κίνηση των γεωργικών απορροών, προκαλεί την διάχυση τους και επιτρέπει την καλύτερη διήθηση με το έδαφος. Άλλα φυτά που βρίσκονται στις όχθες και βοηθούν την σταθεροποίηση των πρανών. Αναδυόμενα και βυθισμένα υδρόβια φυτά δημιουργούν ένα ενδιαίτημα και οξυγονώνουν τα ύδατα. Τα φυτά αυτά καθαρίζουν το νερό και επιτρέπουν την είσοδο τη ηλιακής ακτινοβολίας στην υδάτινη στήλη. Αφομοιώνοντας το φορτίο των θρεπτικών αποτρέπουν την ανάπτυξη επικίνδυνων φυτοπλαγκτονικών ανθήσεων.

Τα υδρόβια μακρόφυτα αποτελούν δείκτες οικολογικής ποιότητας των υδάτων. Η βλάστηση των μεσότροφων υδάτων των αποστραγγιστικών καναλιών σε ένα μεσαίο στάδιο διαδοχής των οικοσυστημάτων χαρακτηρίζεται από ένα μωσαϊκό πλούσιο σε βυθισμένα , επιπλέοντα και εξέχοντα είδη, ενώ μια ελαφρά αύξηση των θρεπτικών οδηγεί στην επικράτηση των ζιζανίων που είναι βυθισμένα στο νερό. Υπερβολική ανάπτυξη αυτών των

ειδών των ζιζανίων απαιτεί καθαρισμό του καναλιού με μεγαλύτερη συχνότητα, τα οποία στη συνέχεια αποκαθίστανται πιο εύκολα επεκτείνοντας την περαιτέρω κυριαρχία τους στο υδάτινο οικοσύστημα έναντι άλλων ειδών λιγότερο ανθεκτικών. Περαιτέρω εμπλουτισμός σε θρεπτικά οδηγεί στην επικράτηση επιπλεόντων *Lemnaceae* or *Azolla filiculoides* και ανθήσεων κυανοβακτηρίων που οδηγούν σε μείωση της εισόδου της ηλιακής ακτινοβολίας παρεμποδίζοντας την ανάπτυξη της βυθισμένης υδρόβιας βλάστησης.

Στις ρίζες των υδρόβιων φυτών εναλλάσσονται περιβάλλοντα διαφορετικού οξειδοαναγωγικού δυναμικού και λαμβάνουν χώρα οι συζευγμένες αντιδράσεις νιτροποίησης-απονιτροποίησης. Λαμβάνοντας υπόψη τους προαναφερθέντες μηχανισμούς η παρουσία των μακροφύτων οδηγεί σε αυξημένη κατακράτηση του N και του P σε σχέση με αποστραγγιστικά κανάλια χωρίς βλάστηση.

Η βλάστηση προκαλεί εμπόδια και τριβή στην κίνηση του νερού, με αποτέλεσμα την ελάττωση της ταχύτητας του, την αύξηση του υδραυλικού χρόνου και του δυναμικού ιζηματογένεσης. Η αφομοίωση των θρεπτικών από τα φυτά είναι επίσης ένας μηχανισμός εναπόθεσης της ρύπανσης. Εν τούτοις αυτός ο μηχανισμός υπόκειται σε μια εποχιακότητα και συνδέεται με την ανάπτυξη της βλάστησης. Κατά την αποσύνθεση της φυτικής βλάστησης με βιολογικές διαδικασίες η οργανική ύλη μετατρέπεται σε ανόργανα θρεπτικά.

Τα νερά των αποστραγγιστικών καναλιών είναι κορεσμένα σε διαλυτό άζωτο συγκρινόμενα με άλλες κατηγορίες φυσικών υδάτων. Ο κύκλος του αζώτου που διαδραματίζεται εντός των καναλιών περιλαμβάνει πολλές βιολογικές διεργασίες και μεταφορές, όπως νιτροποίηση, απονιτροποίηση και προσρόφηση (κυρίως NH_4^+).

Η προσρόφηση είναι ο κύριος μηχανισμός κατακράτησης ανόργανου φωσφόρου από τα ιζήματα στα κανάλια. Τα σύμπλοκα του Fe και του Al με χουμικά συστατικά στο ίζημα είναι υπεύθυνα για την προσρόφηση του P στο ίζημα. Επίσης σωματιδιακό αιωρούμενο υλικό φέρει προσροφημένα θρεπτικά συστατικά. Η επαναιώρηση των ιζημάτων είναι ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς P στον υδάτινο ρου.

Η ρόφηση είναι ο κύριος μηχανισμός κατακράτησης φυτοφαρμάκων από τα νερά των καναλιών στα οποία καταλήγουν μέσω των γεωργικών απορροών. Ως στερεές επιφάνειες ρόφησης για τα φυτοφάρμακα θεωρούνται το έδαφος, τα ιζήματα, η βλάστηση και τα υπολείμματα της νεκρής φυτικής βλάστησης. Η απομάκρυνση των φυτοφαρμάκων αυξάνει με την υδροφοβικότητα του μορίου του φυτοφαρμάκου. Ιδιαίτερο ρόλο φαίνεται να παίζουν βιοτικές και αβιοτικές διαδικασίες αποδόμησης που διαδραματίζονται στα ύδατα. Τα αποστραγγιστικά κανάλια λειτουργούν ως μεταφορείς ιζήματος, ακόμα και σε τοπία με

χαμηλό ανάγλυφο. Το ίζημα θεωρείται ρύπος που επίσης φέρει προσροφημένες μορφές θρεπτικών και άλλων ρύπων και επηρεάζει τη θολότητα των υδάτων.

Για να διατηρηθεί η υδραυλική παροχή των καναλιών η συντήρησή τους πρέπει να λαμβάνει χώρα ανά τακτά χρονικά διαστήματα με εκσκαφή και καθαρισμό της βλάστησης. Ο καθαρισμός της βλάστησης μπορεί να γίνει με κοπή, καύση και χρήση χημικών φυτοκτόνων. Η εκσκαφή οδηγεί να γίνει με πλήρη ή τμηματική απομάκρυνση του ιζήματος αλλά και των βιοκοινωνιών που κατοικούν στο ίζημα.

Η εκσκαφή και η καύση τροποποιούν τις ιδιότητες του πυθμένα και των πρηνών όπως η υφή και το περιεχόμενο σε οργανική ύλη. Η εκσκαφή είναι η πρακτική που προκαλεί την μέγιστη διαταραχή στο οικοσύστημα του καναλιού επειδή απομακρύνει τα ιζήματα και τον βιόκοσμο που είναι υπεύθυνος για την κατακράτηση των θρεπτικών και την βιοτική αποικοδόμηση των φυτοφαρμάκων ενώ η κοπή της βλάστησης αποτελεί μια ενδιαφέρουσα πρακτική με τις λιγότερες αρνητικές συνέπειες για την βιοποικιλότητα και τον καθαρισμό του νερού.

Η χρήση χημικών για την εξόντωση της βλάστησης υποβαθμίζει περαιτέρω την ποιότητα των υδάτων προσθέτοντας νέο ρυπαντικό φορτίο αυτά. Επιπλέον ο ρυθμός αποκατάστασης της φυτικής βλάστησης μετά την εφαρμογή χημικών μέσων είναι ο περισσότερο αργός.

Συμπερασματικά, η εκσκαφή, τα χημικά ή η κοπή της φυτικής βλάστησης είναι πιθανόν να συνεισφέρουν στην μεταφορά της ρύπανση στους υδάτινους αποδέκτες. Πέρα από τους τρόπους συντήρησης εντός του καναλιού, γίνονται έργα κατασκευής τεχνητών υγροτόπων που περιβάλλουν τα κανάλια ή έργα δημιουργίας φυσικών αναβαθμίδων σε χαμηλότερο επίπεδο όπου σε συνθήκες μεγάλης ροής πλημμυρίζουν και λειτουργούν ως ζώνες απορρύπανσης. Ο βέλτιστος σχεδιασμός της συντήρησης του αποστραγγιστικού δικτύου απαιτεί βαθιά γνώση και κατανόηση των οικολογικών, χημικών και υδρολογικών διεργασιών που διαδραματίζονται εντός αυτών και η αλληλεπίδραση με το αγροτικό τοπίο που τα περιβάλλει.

Η εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων για την επεξεργασία και κατακράτηση των ρύπων στα κανάλια μπορεί να αποδειχτούν στρατηγικής σημασίας για την επίτευξη των σχεδίων διαχείρισης των υδάτων στη λεκάνη απορροής, όπου τα κανάλια λειτουργούν ως ρυθμιστές μεταξύ των καλλιεργειών και των υδάτινων αποδεκτών βελτιώνοντας την ποιότητα των γεωργικών απορροών. Επομένως δύνανται να θεωρηθούν ως μια εναλλακτική βέλτιστη πρακτική διαχείρισης (BMP, Best Management Practice) στο αγροοικοσύστημα.

Εισαγωγή

Η εντατικοποίηση της γεωργίας οδηγεί στην αύξηση της κατανάλωσης νερού για άρδευση, και στην αυξημένη χρήση αγροχημικών. Εν τούτοις οι δημιουργούμενες απορροές από γεωργικά εδάφη εγκυμονούν κινδύνους για την ποιότητα του νερού λόγω των προστιθέμενων φορτίων φυτοφαρμάκων των θρεπτικών λιπασμάτων, της αύξησης της αλατότητας και της μεταφοράς σωματιδιακού υλικού. Για αυτό οι γεωργικές απορροές έχουν συνδεθεί με την υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτινων αποδεκτών. Λαμβάνοντας υπόψη το παγκόσμιο ισοζύγιο, εκτιμήθηκε μια αύξηση 75% του αποθηκευμένου φωσφόρου σε εδαφικά και υδάτινα οικοσυστήματα συγκρινόμενα με το αποθηκευμένο αντίστοιχο ποσό στην προβιομηχανική εποχή. Προσομοιώσεις και μοντέλα που αναπτύχθηκαν σε επίπεδο λεκανών απορροής αποκάλυψαν ότι οι αγροτικές πηγές συνεισφέρουν κατά 75% στο ποσό του N και του P που μεταφέρεται εντός αυτών. Η μεταφορά του P παρουσιάζει μεγάλη διαφορά σε τοπική και περιφερειακή κλίμακα εξαιτίας της παγίδευσης του στο έδαφος. Η συσσώρευση των θρεπτικών μορφών του N και του P, αρχικά δεν επάγουν αρνητικές συνέπειες για τα οικοσυστήματα των επιφανειακών υδάτων. Όταν όμως η συγκέντρωση ξεπεράσει ένα κατώφλι (threshold) προκαλείται μια απότομη αλλαγή στο οικοσύστημα. Εισροές θρεπτικών από τις διάχυτες γεωργικές πηγές οδηγούν στην ανάπτυξη φαινομένων ευτροφισμού και τη σταδιακή υποβάθμιση των υδάτων (Alexander et al, 2008).

Οι στρατηγικές για την ελάττωση των αρνητικών συνεπειών της γεωργίας στο περιβάλλον περιλαμβάνουν την καλλίτερες πρακτικές γεωργίας και τις βιολογικές μορφές γεωργίας. Επιπρόσθετα με τις πρακτικές που εφαρμόζονται στο χωράφι έχουν αναπτυχθεί πρακτικές διαχείρισης στα όρια του αγροκτήματος όπως η δημιουργία και διατήρηση αναβαθμίδων, τάφροι αποστράγγισης και λωρίδες πρασίνου.

Στην Ελλάδα σε πολλές αγροτικές περιοχές (Θεσσαλία, Μακεδονία, Πελοπόννησο), έχουν δημιουργηθεί επιφανειακά αποστραγγιστικά δίκτυα τα οποία χρησιμοποιούνται για την στράγγιση των αγροτικών γαιών από τα νερά (Γεράκης και Τσιούρης, 2010). Στη συνέχεια, το νερό διοχετεύεται σε ποτάμια, για την άρδευση των καλλιεργειών, ή στη θάλασσα. Σε περιπτώσεις μάλιστα που υπάρχει μεγάλο πρόβλημα λειψυδρίας και η ποσότητα των υδάτων δεν επαρκεί για την άρδευση, γίνεται ανακύκλωση των υδάτων του αποστραγγιστικού δικτύου όπως στην περιοχή Χαλάστρα Θεσσαλονίκης (Χαλκιάς, 2008) καθώς και στην πεδιάδα της Άρτας (πηγή: Αθανασούλας Γεώργιος, στέλεχος ΤΟΕΒ Ζώνης Αράχθου, προσωπική επαφή).

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι η περιγραφή των φυσικοχημικών και βιολογικών διεργασιών που λαμβάνουν χώρα στα οικοσυστήματα αποστραγγιστικών δικτύων και η

περιγραφή του ρόλου τους στην βελτίωση της ποιότητας των επιφανειακών και υποεπιφανειακών απορροών από γεωργικές εκτάσεις και στην προστασία του υδάτινων πόρων. Τέλος αναφέρονται οι πρακτικές διαχείρισης αυτών των αγροσυστημάτων και η δυνατότητα που δίνεται να συμβάλλουν στην κατακράτηση των ρυπαντών.

Μορφολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των υδάτων αποστράγγισης

Τα αγροτικά κανάλια είναι ανθρώπινες επεμβάσεις στο τοπίο με γραμμικό σχήμα και χρησιμοποιούνται για να συλλέγουν επιφανειακές αλλά και υποεπιφανειακές ροές, με στόχο την αποφυγή πλημμυρών στο χωράφι που δεν ευνοούν την απόδοση της σοδειάς αλλά και την ελάττωση της αποψίλωσης των γεωργικών εδαφών. Στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες οι ζώνες αποστράγγισης αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό των γεωργικών εδαφών ενώ στην Αμερική και τον Καναδά αποτελούν το 25% της γεωργικής γης (Dollinger et al, 2015). Συχνά είναι μέρος ενός εκτεταμένου δικτύου μικρών αποστραγγιστικών καναλιών που συνδέονται με ευρύτερα αποστραγγιστικά δίκτυα που καταλήγουν σε αποστραγγιστικές τάφρους και σε μία έξοδο σε υδάτινους αποδέκτες.

Αρκετά χαρακτηριστικά τους είναι ιδιαίτερα καθιστώντας τα μοναδικά συγκρινόμενα με άλλα υδάτινα οικοσυστήματα. Αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι είναι ανθρωπογενείς κατασκευές με τεχνητό υδρολογικό καθεστώς με γραμμικό σχήμα, όπου η μικρή αναλογία πλάτους προς μήκος έχει ως αποτέλεσμα σημαντική ανταλλαγή ύλης και οργανισμών με το χερσαίο περιβάλλον. Τα αποστραγγιστικά δίκτυα λειτουργούν ως διάδρομος συγκέντρωσης ρύπων κυρίων θρεπτικών αλάτων του N και του P, ιζήματος, και φυτοφαρμάκων. Μέσω των καναλιών που διασχίζουν το αγροτικό πεδίο οι διάχυτες υδάτινες ροές συγκεντρώνονται σε μία κεντρική υδάτινη οδό. Αυτό δημιουργεί την έννοια της διαχείρισης των υδάτων των στραγγίσεων με σκοπό την προστασία της ποιότητας των κατάντη αποδεκτών. Η διατήρηση του δικτύου των αποστραγγιστικών καναλιών έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση των παρεχόμενων οικοσυστημικών υπηρεσιών.

Ως ενδιαιτήματα χαρακτηρίζονται από τα εξής τμήματα, από μια προσωρινή ή μόνιμη ροή, το υπόστρωμα του πυθμένα, καλυμμένα με βλάστηση ή γυμνά πρανή και ενός φυτικού περιθωρίου. Τα πλάτη των τριών τμημάτων παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία: από πλάτος περίπου 20 cm που διοχετεύει νερό κατά τη διάρκεια βροχοπτώσεων με υπερβολική ανάπτυξη με πολυετή αγρωστώδη φυτά, σε κανάλια με πλάτος > 10 m, με σύνθετη βλάστηση με μόνιμη παροχή που προσομοιάζουν ποτάμιες οδούς και των οποίων ο ρόλος είναι κυρίως η παροχή νερού και λιγότερο ο καθαρισμός του νερού (Herzon and Helenius, 2008). Η έρευνα στο πεδίο έχει δείξει ότι τα μικρού πλάτους αποστραγγιστικά κανάλια έχουν μεγαλύτερη

δυνατότητα καθαρισμού του ύδατος από τα ρυπαντικά φορτία (Cooper et al, 2003). Οι συλλεκτήριες τάφροι είναι συνήθως μονίμως καλυπτόμενα από νερό ενώ η τάφρος συνήθως περιέχει νερό το χειμώνα. Η κλίση των πρηνών είναι γενικά $>30^\circ$ αλλά αυτό εξαρτάται από το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα και τον τύπο του εδάφους. Σε πολλές αγροτικές περιοχές, ένα καθορισμένο ύψος νερού διατηρείται, χαμηλό το χειμώνα, υψηλό το καλοκαίρι. Το χειμώνα η περίσσεια νερού βροχής και υπόγειου νερού απομακρύνεται ενώ το καλοκαίρι συμπληρώνεται το νερό με την είσοδο νερού ποταμού για να αντισταθμιστεί η έλλειψη. Η παροχή του νερού είναι μικρή για το περισσότερο διάστημα του έτους (ταχύτητα 0,5 cm/sec). Εν τούτοις παρατηρούνται και υψηλές παροχές όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις ισχυρών βροχοπτώσεων που αυξάνουν το νερό που αποστραγγίζεται (Verdonschot, 2012).

Λειτουργούν ως διάδρομοι βιοποικιλότητας που επιτρέπουν την επικοινωνία κατακερματισμένων οικοτόπων, συγκεκριμένα επιτρέπουν την μετακίνηση αμφιβίων, θηλαστικών ή εντόμων τα οποία διαφορετικά θα ήταν απομονωμένα και εγκλωβισμένα σε ένα τοπίο εχθρικό για αυτά όπως είναι εκείνο της εντατικοποιημένης γεωργικής γης (Herzon and Helenius 2008). Η βλάστηση στις παρόχθιες περιοχές παίζει σημαντικό ρόλο, καθώς προστατεύει την ακτή και την κοίτη, την ποιότητα του νερού, τα υδάτινα και άγρια οικοσυστήματα από τις πλημμύρες και διατηρεί τη φυσική ομορφιά (Lowrance et al, 1985). Στις φυσικές παρόχθιες ζώνες η βλάστηση που παρατηρείται συνήθως αποτελείται από χλόη, θάμνους, καλάμια, δέντρα και ανάμικτη βλάστηση.

Οι βιολογικές και φυσικές λειτουργίες που διαδραματίζονται σε συνθήκες χαμηλής παροχής προσομοιάζουν αυτές ενός υγροτόπου. Τα αγροτικά αποστραγγιστικά δίκτυα μπορεί να θεωρηθούν υγρότοποι καθώς κατέχουν κοινά χαρακτηριστικά όπως μια εφήμερη πλημμυρική κατάσταση, υγρό έδαφος κι υποχρεωτικά ή προαιρετικά υδροχαρή φυτά. Ενώ σε συνθήκες υψηλής ροής οι λειτουργίες τους προσομοιάζουν αυτές ενός λοτικού οικοσυστήματος. Η λειτουργία των υγροτόπων ευνοεί την κατακράτηση της μη σημειακής αγροτικής ρύπανσης και της αποφυγής μεταφοράς της στους υδάτινους αποδέκτες, με την εφαρμογή βέλτιστων πρακτικών διαχείρισης (Bouldin et al. 2004). Σε πεδινές περιοχές σε εύκρατα υγρά κλίματα θεωρούνται ως υγρότοποι. Τα αποστραγγιστικά κανάλια παρουσιάζουν επίσης ομοιότητες με μικρές λίμνες και ρέματα (Verdonschot et al. 2011). Επίσης διαφέρει η συνδεσιμότητα τους με άλλα αποστραγγιστικά κανάλια.

Ο υψηλός λόγος επιφάνειας πυθμένα / όγκο νερού ευνοεί τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στην διεπιφάνεια ύδατος και στερεού υλικού πυθμένα και είναι αυτές που καθορίζουν την φυσικοχημική σύσταση της υπερκείμενης υδάτινης στήλης, όπως για παράδειγμα την περιεκτικότητα σε θρεπτικά και διαλυτό οξυγόνο και την επικράτηση των

μακροφύτων στο σύστημα (Veeningen, 1982). Επιπλέον ο μικρός όγκος νερού οδηγεί σε μεγάλες ημερήσιες και εποχιακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Οι ημερήσιες διακυμάνσεις σε διαλυτό οξυγόνο συχνά είναι σημαντικές. Το καταναλισκόμενο οξυγόνο τη νύχτα είναι μεγαλύτερο από το παραγόμενο την ημέρα με την διαδικασία της φωτοσύνθεσης. Παρατηρούνται επαναλαμβανόμενα επεισόδια υποξίας στο δεύτερο μισό της νύχτας και τις πρωινές ώρες. Οι διακυμάνσεις των καιρικών συνθηκών (θερμοκρασία, η κάλυψη της επιφάνειας του ύδατος με πάγο, η ταχύτητα του ανέμου) επηρεάζουν την συγκέντρωση του διαλυτού οξυγόνου, δια μέσου της θερμοκρασίας της αναμειξιμότητας των νερών, αλλά βιολογικών διεργασιών όπως η φωτοσύνθεση και η αναπνοή μπορεί να δημιουργήσουν παρατεταμένα επεισόδια υποξίας των νερών. Επιπρόσθετα υπερβολική ανάπτυξη των επιπλέοντων φυτών όπως Lemnaceae, εμποδίζει τον είσοδο του οξυγόνου από την ατμόσφαιρα και τον ανεφοδιασμό στο αέριο της υδάτινης μάζας της υδάτινης στήλης σε οξυγόνο από την ατμόσφαιρα. Αυτό οδηγεί σε συνθήκες ανοξίας και εμποδίζει την επιβίωση των μακροασπόνδυλων και των ψαριών. Η κλιματική αλλαγή αναμένεται να οδηγήσει την επικράτηση των επιπλέοντων φυτών με συνέπεια την ελάττωση της βιοποικιλότητας στα κανάλια (Peeters et al, 2013). Επίσης λόγω της ξηρασίας το δίκτυο των αποστραγγιστικών καναλιών απειλείται με κατακερματισμό (Reitsema et al, 2018).

Το υδρολογικό καθεστώς κάθε λεκάνης απορροής επάγει εφήμερη ή μόνιμη ροή στα κανάλια προσδίδοντας υγρασία στο έδαφος. Ο πυθμένος σε πολλές περιπτώσεις καλύπτεται από παχύ στρώμα από παλαιό φυτικό υλικό “sargopelium». Πολλά κανάλια αποστραγγίσεως έχουν καθαρή πρωτογενή παραγωγικότητα υψηλότερη από αυτή των ρεμάτων λόγω της παρουσίας μακροφύτων και πλαγκτού με αυξημένο ευτροφισμό ιδιαίτερα όταν υπάρχει στασιμότητα του νερού. Το συσσωρευμένο οργανικό υλικό αν μεταφερθεί κατάντη έχει μεγάλη βιοχημική απαίτηση σε οξυγόνο (BOD, Biochemical Oxygen Demand). Συσώρευση οργανικού υλικού στους πυθμένες τα διαφοροποιεί σε σχέση με τα λοιπά οικοσυστήματα (Needehnan et al. 2007).

Τα κανάλια φορτίζουν το υπόγειο νερό όταν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι κάτωθεν του επιπέδου νερού του καναλιού. Όμως η διήθηση του νερού θεωρείται περιορισμένη σε σύγκριση με άλλες υδάτινες μάζες με μεγάλη επιφάνεια πυθμένα όπως είναι τα πλατύτερα ρέματα και ποτάμια. Ιδιαίτερα όμως μετά από ξηρές περιόδους και την ακολουθούμενη βροχόπτωση όπως στις Μεσογειακές λεκάνες απορροής όπου ο υδροφόρος ορίζοντας είναι χαμηλά η φόρτιση δια μέσου των αποστραγγιστικών καναλιών συνεισφέρει σημαντικά στην διατήρηση των αποθεμάτων του υπόγειου ύδατος και στην κάλυψη των αναγκών της

σοδειάς. Η φόρτιση ευνοείται με ένα μέγιστο ρυθμό διήθησης που επικρατεί όταν η ροή του νερού είναι ασήμαντη (Dolliger et al, 2015).

Τα ανοικτά κανάλια είναι επομένως μοναδικά οικοσυστήματα συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά υγροτόπων και λοτικών (ρέοντων) οικοσυστημάτων (Needelman et al. 2007). Το οικοσύστημα που περιλαμβάνει τον υδάτινο διάδρομο πυθμένα, τα πρηνή και τα φυτικά περιθώρια περιλαμβάνει μια ποικιλία ενδιαιτημάτων από υδατικά, σε υγροτοπικά και χερσαία.

Βιοποικιλότητα

Σήμερα στις πεδινές περιοχές όπου το περιβάλλον έχει μετασχηματιστεί δραστικά με την εντατικοποίηση της γεωργίας, το αποστραγγιστικό δίκτυο, οι φυτοφράκτες και οι λιβαδικές εκτάσεις αποτελούν τα σημαντικότερα καταφύγια για την άγρια ζωή. Την ίδια στιγμή η θέση τους στο γεωργικό τοπίο καθιστά τα αποστραγγιστικά κανάλια ιδιαίτερα ευάλωτα σε διαταραχές που οδηγούν την μετατροπή τους από συστήματα με πλούσια βιοποικιλότητα σε υπερτροφα σαπροβιωτικά συστήματα. Τα υπέρτροφα συστήματα κυριαρχούνται από είδη επιπλεόντων αλγών, κυανοβακτήρια, ελεύθερα επιπλέοντα μακροφύκη όπως Lemnaceae (Εικόνα 1). Μέχρι πρόσφατα η βιοποικιλότητα των ρέοντων υδάτινων μαζών αλλά και αυτή των στάσιμων νερών των λιμνών και ελών ήταν αντικείμενο έρευνας στην υδροβία βιολογία και η προσοχή της επιστημονικής κοινότητας ήταν κυρίως στραμμένη εκεί. Τα τελευταία χρόνια έχει αναγνωρισθεί η αξία των αποστραγγιστικών καναλιών ως «νησίδες βιοποικιλότητας» μέσα σε ένα αφιλόξενο αγροτικό τοπίο και η αξία της διατήρησής τους. Στην Ελλάδα, σύμφωνα με όσα γνωρίζουμε δεν έχει γίνει συστηματική καταγραφή της βιοποικιλότητας σε αποστραγγιστικά κανάλια και συσχέτιση τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους, αλλά και των μεταβολών που υφίσταται για αυτό και η βιβλιογραφία είναι περιορισμένη.

Πολλά από τα είδη που υπάρχουν στα κανάλια απαιτούν διαφορετικές συνθήκες όπως νερό, έδαφος, και βλάστηση ενώ πολλά επωφελοούνται από τα αποστραγγιστικά κανάλια μόνο για ένα στάδιο της ζωής τους. Στις αποστραγγιστικές τάφρους αναπτύσσεται βλάστηση των ελών ενώ στα πρηνή και τα αναχώματα αναπτύσσεται βλάστηση παρόμοια με την παρόχθια βλάστηση των ποταμών με αποτέλεσμα να μπορεί να ζήσει μια μεγάλη ποικιλία από ασπόνδυλα, ψάρια, αμφίβια, ερπετά, θηλαστικά και πτηνά. Αντίθετα στις υπενδεδυμένες με τσιμέντο αρδευτικές τάφρους με την ταχύτερη ροή αναπτύσσεται ελάχιστη βλάστηση και ζουν λιγότερα είδη ζώων. Η στρωμάτωση και η ποικιλία των ενδιαιτημάτων που αναπτύσσονται εξαρτάται από τα είδη και την πυκνότητα της φυτικής

κάλυψης, το βάθος του νερού και τις διακυμάνσεις της παροχής, την χημική σύσταση του νερού. Αυτά με την σειρά τους καθορίζονται από το μέγεθος και το είδος της τάφρου, την γειτνιάζουσες καλλιέργειες, τα φυσικά ενδιαιτήματα και τις πρακτικές συντήρησης που εφαρμόζονται (Arnold 1983; Herzon and Helenius 2008).

Στις αποστραγγιστικές τάφρους και στα αρδευτικά κανάλια, σχεδόν σε όλη την Ελλάδα απαντώνται καλαμώνες. Εξαιτίας του ευτροφισμού στις θέσεις αυτές που είναι πολύ μεγαλύτερος, συγκριτικά με άλλες, λόγω της συγκέντρωσης στο νερό θρεπτικών συστατικών από την έκλυση των καλλιεργειών παρατηρείται συνύπαρξη με μεγάλη αφθονία εφυδατικών υδρόβιων ειδών. Είδη που απαντώνται σε τέτοιους σταθμούς είναι: *Phragmites australis*, *Typha angustifolia*, *Stachys palustris*, *Scirpus lacustris*, *Sparganium erectum*, *Hydrocharis morsus-ranae*, *Nasturtium officinale*, *Mentha aquatica*, κ.ά. Από συνταξινομική άποψη η φυτοκοινωνία *Phragmitetum australis* εντάσσεται στην Κλάση *Phragmito-MagnoCaricetea*, την Τάξη *Phragmitetalia communis* και την Ένωση *Phragmition communis* (Γεράκης και Τσιούρης, 2010).

Παρατηρούνται σε περιορισμένες θέσεις της περιοχής μελέτης σε υπήνεμους σταθμούς, με παχύ στρώμα από παλαιό φυτικό υλικό “*sarropelium*”, φτωχές σε είδη κοινότητες που αναγνωρίζονται από την επικράτηση του είδους *Typha angustifolia*. Σύμφωνα με την HUTCHINSON (1975), τα είδη του γένους *Typha* είναι περισσότερο ευαίσθητα στον άνεμο και στον κυματισμό από ότι το *Phragmites australis* και αναπτύσσονται μόνο σε καλά προστατευμένες θέσεις στις όχθες και μέχρι βάθος 2 μέτρων. Δημιουργούν ομοιογενή τμήματα βλάστησης στα οποία επικρατούν, συνήθως μπροστά από τις συστάδες του *Phragmites* προς την πλευρά της λίμνης ή της τάφρου, καναλιού. Σε συνθέσεις της *Typhetum angustifoliae* το είδος *Phragmites australis* συμμετέχει κανονικά, συνήθως με μεγάλη σταθερότητα και πληθοκάλυψη.

Η ξήρανση των καναλιών αποκλείει την επιβίωση των ψαριών και επιτρέπει την εξάπλωση των βατράχων και τρίτωνων (Herzon and Helenius 2008). Τα δίκτυα των αποστραγγιστικών καναλιών λειτουργούν ως οδοί μετακίνησης πληθυσμών αμφιβίων και εντόμων. Υπάρχει συνεχής ανταλλαγή ύλης με την ξηρά. Η δημιουργία των κατάλληλων προϋποθέσεων εγκατάστασης υδρόβιας και παρυδάτιας βλάστησης (βλ. παραπάνω) δημιουργεί ταυτόχρονα και τα κατάλληλα ενδιαιτήματα για την υγροτοπική πανίδα. Η υπάρχουσα βλάστηση αποτελεί καταφύγιο βιοποικιλότητας προσφέροντας ένα σημαντικό ρόλο στη διάδοση των σπόρων. (Bellavance and Brisson 2010; Twisk et al. 2003; Verdonshot et al. 2011; Williams et al. 2004). Έντομα επικονιαστές υπάρχουν σε όλα τα αγροοικοσυστήματα. Η βλάστηση όμως των υγροτόπων προσφέρει στα έντομα αυτά τροφή

αλλά και προστασία από τους ψεκασμούς με γεωργικά φάρμακα, Η υγροτοπική βλάστηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους επικονιαστές καθ' όλη τη διάρκεια του βιολογικού τους κύκλου. Ιδιαίτερης σημασίας είναι οι υγρότοποι που βρίσκονται σε ξηρές και ημίξηρες περιοχές γιατί η υπόγεια στάθμη στα πλημμυρισμένα ή κορεσμένα σε νερό εδάφη παραμένει υψηλή για μεγάλο διάστημα μετά την ξήρανση των υγρότοπων.

Επίσης τα αποστραγγιστικά κανάλια, με την πάροδο των ετών, πέρα από τους λειτουργικούς τους σκοπούς προσφέρουν καταφύγιο σε ένα πλήθος ζώων και φυτών. Νεροχελώνες (*Mauremys caspica* και *Emys orbicularis*) νερόφιδα (*Natrix natrix persa* και *Natrix tessellata*) ζούνε σε αυτά τα κανάλια. Η βίδρα (*Lutra lutra*), που οι πληθυσμοί της έχουν μειωθεί σε όλη την Ευρώπη, απαντάται μάλλον συχνά στα αποστραγγιστικά κανάλια του Αμβρακικού. Στα χωράφια χαρακτηριστικά είδη πουλιών είναι οι κορυδαλλοί (*G. Cristata*), οι πελαργοί (*Ciconia ciconia*) και τα ορτύκια (*Coturnix coturnix*) τα τελευταία χρόνια έχουν μειωθεί σημαντικά. Το χειμώνα κοπάδια από καλιμάνια (*Vanellus vanellus*) παρατηρούνται στους αγρούς και στα πλημμυρισμένα χωράφια (Ζαννετίδη, 2006).

Τα κοινότερα είδη πουλιών στις τάφρους είναι οι νερόκοτες και οι ποταμίδες (*Acrocephalus spp*), απαντούν όμως επίσης αλκυόνες, ερωδιοί και άλλα είδη που ζουν στα γλυκά νερά και τα έλη. Η παρουσία των ειδών εξαρτάται από το μέγεθος της τάφρου, την ποιότητα του νερού (που επιβαρύνεται με γεωργικά φάρμακα και λιπάσματα), την πυκνότητα και το είδος της βλάστησης που έχει αναπτυχθεί αλλά και τον βαθμό όχλησης (Μπούσμπουρας, 1999).

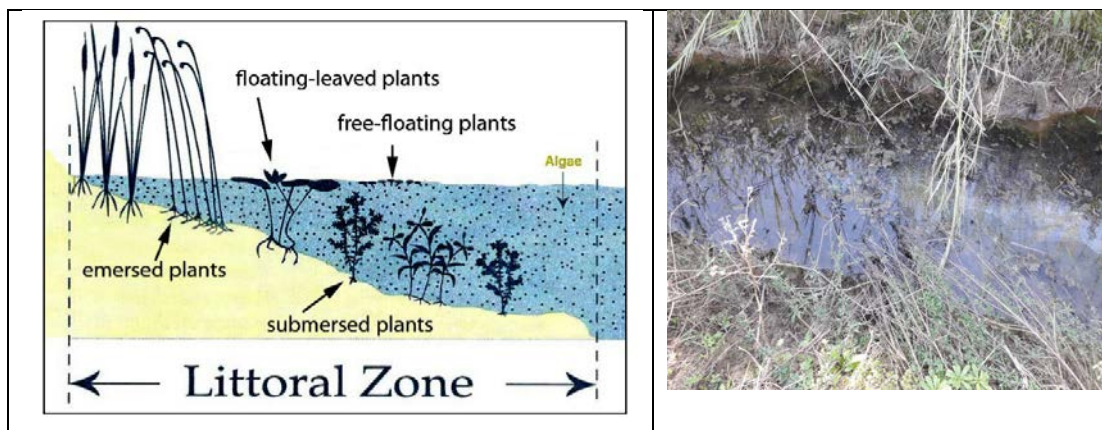
Υδρόβια Μακρόφυτα

Α. Μορφολογική και οικολογική ταξινόμηση

Ο όρος υδρόβιο μακρόφυτο, αναφέρεται γενικότερα σε μακροσκοπικές μορφές της υδρόβιας βλάστησης και περιλαμβάνει μακροφύκη, λίγα είδη βρύων και πτερίδων προσαρμοσμένα στο υδάτινο περιβάλλον όπως επίσης και αγγειόσπερμα (Παπαστεργιάδου, 1990). Τα φυτά που αναπτύσσονται σε επαφή με το νερό διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες. Ως **υφυδατικά** (hyphydates) χαρακτηρίζονται εκείνα που ζουν μόνιμα κάτω από το νερό. Ως **εφυδατικά** (ephhydates) εκείνα που έχουν βλαστητικά μέρη πλέοντα στην επιφάνεια του νερού και ως **υπερυδατικά** (hyperhydates) εκείνα που αναπτύσσονται μέσα στο νερό και έχουν αναδυόμενα βλαστητικά μέρη στον αέρα (Εικόνα 1).

Συστήματα ταξινόμησης κατά καιρούς αναπτύχθηκαν πολλά. Μια απλή ταξινόμηση γίνεται με βάση την προσκόλληση τους στο υπόστρωμα και αποδείχθηκε χρήσιμη σε

μορφολογικές, οικολογικές και φυσιολογικές μελέτες (Παπαστεργιάδου 1990). Έτσι με βάση αυτό το κριτήριο έχουμε τις παρακάτω κατηγορίες.



Εικόνα 1 : Απεικόνιση της ζώνωσης της μακροφυτικής βλάστησης στην παραλιακή ζώνη των υδάτινων συστημάτων. Όπου “emersed plants” είναι η ελοφυτική βλάστηση. Τα “floating-leaved plants”, “free-floating plants” και “submersed plants” αποτελούν υποκατηγορίες της ομάδας των υδροφύτων. (Πηγή: Minnesota Department of Natural Resources webpage <http://www.dnr.state.mn.us/shorelandmgmt/apg/whereregrow.html>).

1 Υδρόβια μακρόφυτα προσκολλημένα στο υπόστρωμα Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλα τα ριζωμένα στο υπόστρωμα υδρόβια μακρόφυτα και διακρίνονται στις παρακάτω ομάδες

α. Εξέχοντα της υδάτινης επιφάνειας (emerged macrophytes) Τα είδη της κατηγορίας αυτής απαντώνται σε εδάφη κορεσμένα ή πλημμυρισμένα. Περιλαμβάνει:

- Βρυοειδή (*Sphagnum*, *Scorpidium*, *Calliergonella*)
- Πλευστόφυτα (*Eichornia*, *Pistia*)
- Ελόφυτα (*Phragmites*, *Typha*, *Sagittaria*, *Sparganium*) καλάμια, ψαθιά, βούρλα
- Φανερόφυτα (*Salix*, *Alnus*, *Taxodium*) Θάμνοι, Ιτιές

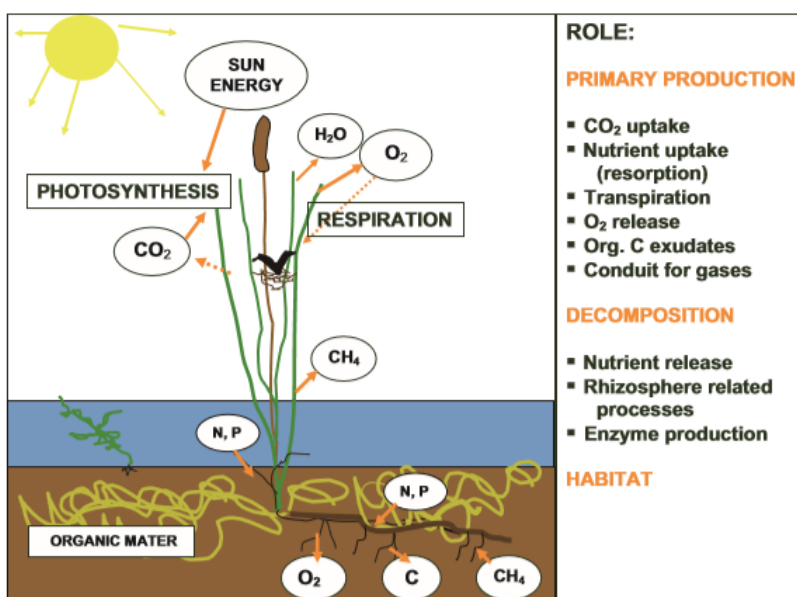
β. Μακρόφυτα με επιπλέοντα στο νερό φύλλα (floating leaved macrophytes) Αυτά είναι κυρίως αγγειόσπερμα προσκολλημένα στον πυθμένα τα οποία συνήθως αναπτύσσονται σε βάθη ύδατος 0.5-3(4) m Τα επιπλέοντα φύλλα βρίσκονται συνήθως σε μακρείς ευλύγιστους μίσχους όπως π.χ στα είδη των γενών *Nymphaea* και *Nuphar* ή σε κοντούς μίσχους μακρών βλαστών όπως π.χ το *Potamogeton natans*

γ. Μακρόφυτα βυθισμένα (submerged macrophytes) Αυτά περιλαμβάνουν μερικά πτεριδόφυτα π.χ *Isoetes* πολυάριθμα βρύα και χαρόφυτα (π.χ *Chara*, *Nitella*, *Nitellopsis*) και πολλά αγγειόσπερμα (π.χ είδη των γενών *Potamogeton*, *Myriophyllum*, *Vallisneria* κλπ). Τα βυθισμένα μακρόφυτα συναντώνται σε όλα τα βάθη της εύφωτης ζώνης αλλά τα αγγειόσπερμα φτάνουν μέχρι περίπου 10 m βάθος (1 Atm υδροστατική πίεση) και αφθονούν συνήθως σε βάθη μικρότερα των 10 m

2 Ελευθέρα πλέοντα μακρόφυτα Είναι μια ποικιλόμορφη ομάδα υδρόβιων μακρόφυτων που δεν είναι ριζωμένα στο υπόστρωμα και ζουν μη προσκολλημένα μέσα ή πάνω στο νερό. Σε αυτή την κατηγορία κατατάσσονται Πλευστόφυλλα (*Lemna*, *Caratothylum*, *Utricularia*, *Salvinia*.)

B. Ρόλος των υδρόβιων μακρόφυτων στο οικοσύστημα

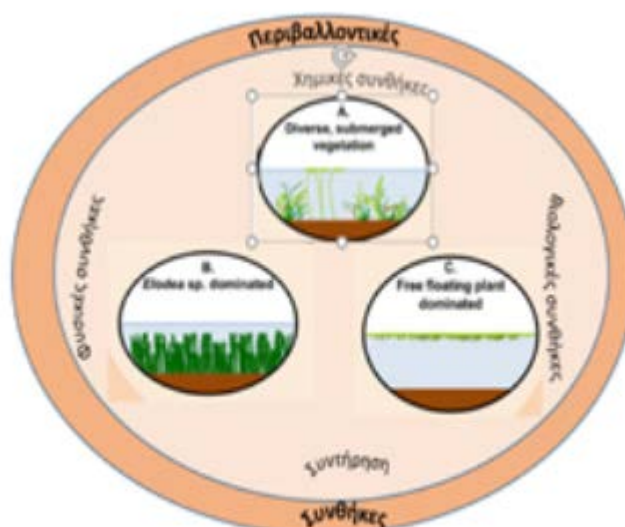
Τα υδρόβια φυτά χρησιμοποιούν την ηλιακή ενέργεια, CO₂, νερό και θρεπτικά για να παράγουν φυτική βιομάζα για το ανώτερο θρεπτικό επίπεδο των φυτοφάγων οργανισμών. Οι αποικοδομητές αποσυνθέτουν τα νεκρά φυτά και παράγουν οργανικό άνθρακα και θρεπτικά ανόργανα άλατα. Οι μίσχοι και τα φύλλα λειτουργούν ως αγωγοί αερίων εφοδιάζοντας με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας την ριζόσφαιρα και απελευθερώνοντας CH₄ (Εικόνα 2).



Εικόνα 2. Ο ρόλος των μακροφύτων στους υγροτόπους (Rejmánková, 2011).

Ο εμπλουτισμός με θρεπτικά ακολουθεί ένα προβλέψιμο μοντέλο. Τα αποστραγγιστικά κανάλια χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα παραγωγικά μεσο-εύτροφα συστήματα. Εξαιτίας του μικρού βάθους, της πυκνής φυτικής βλάστησης, και του εισερχόμενου φορτίου των θρεπτικών από την αγροτική γη οδηγούνται στη φυσική διαδοχή προς την χέρσο. Η φυσική διαδοχή των οικοσυστημάτων προς την χερσοποίηση διαταράσσεται από τις πλούσιες σε θρεπτικά γεωργικές εισροές διότι ενώ η μεσότροφη κατάσταση χαρακτηρίζεται από ένα μωσαϊκό πλούσιο σε είδη βυθισμένης, εξέχουσας και επιπλέουσας βλάστησης, μια μικρή αύξηση στα θρεπτικά οδηγεί στην επικράτηση βυθισμένων ειδών όπως *Elodea nuttallii* (Portielje & Roijackers, 1995). Η ανάπτυξη αυτών οδηγεί σε πιο συχνές εργασίες συντήρησης στις οποίες το είδος αυτό είναι πιο ανθεκτικά και

επανακάμπει ευκολότερα από άλλα είδη. Η απόκριση των φυτικών βιοκοινωνιών στις εργασίες συντήρησης που περιοδικά εφαρμόζονται εξαρτάται από το πως κάθε είδος αντιδρά σε αυτή τη διαταραχή. Είδη ανθεκτικά, όπως είναι τα ταχέως αναπτυσσόμενα είδη για παράδειγμα *Elodea nuttallii* and *Myriophyllum spicatum* L. οποία μπορεί να έχουν ωφέλεια καθώς παρουσιάζουν εύκολη αναγέννηση από τεμάχια φυτικού υλικού και τελικά είναι αυτά που επικρατούν στο σύστημα. Ο ευτροφισμός που αναπτύσσεται απαιτεί την εκ νέου απομάκρυνση της βλάστησης για να αποφευχθούν εμπόδια στην παροχή του ύδατος. Περαιτέρω ευτροφισμός του ύδατος οδηγεί στην επικράτηση προς την επικράτηση των ταχέως αναπτυσσόμενων βυθισμένων και των επιπλέοντων χωρίς ρίζωμα φυτών όπως *Lemnaceae* or *Azolla filiculoides* και στη δημιουργία ανθήσεων από κυανοβακτηρια και επιφυτικών αλγών. Αυτό εμποδίζει την δίοδο της ηλιακής ακτινοβολίας και την ελάττωση της ποικιλίας των ειδών των βυθισμένων μακρόφυτων (Van Zuidam, 2013).



Εικόνα 3: Σχηματική αναπαράσταση των τύπων βλάστησης που αναπτύσσονται σε διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως η συντήρηση, οι φυσικές, οι χημικές και οι βιολογικές συνθήκες (Van Zuidam, 2013).

Οι οικολογικές συνέπειες από την αύξηση του φορτίου των εισερχομένων θρεπτικών και την αλλαγή στην σύσταση της βιοκοινωνίας των φυτών είναι προφανείς. Η απώλεια της υποβρύχιας δομής των μακροφύτων έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της βιοποικιλότητας.

Η βλάστηση αποτελεί τη βάση του τροφικού πλέγματος, αφού μετατρέπει μέσω της φωτοσύνθεσης τις ανόργανες ουσίες σε οργανικές και προσφέρει τροφή και ενέργεια στους υπόλοιπους οργανισμούς. Προσφέρει επίσης χώρο για αναπαραγωγή, κατοικία και προστασία σε όλους τους ζωικούς οργανισμούς που βρίσκονται στους υγροτόπους.

Γ. Ρόλος της υδρόβιας μακρόφυτων στην κατακράτηση των θρεπτικών

Τα αποστραγγιστικά κανάλια, οι κοίτες πλημμυρών και οι αιγιαλίτιδες ζώνες των λιμνών μπορεί να φιλοξενούν άφθονη βλάστηση. Τα υδρόβια μακρόφυτα μπορεί να χρησιμοποιηθούν και ως δείκτες ευτροφισμού των υδάτων (Παπαστεργιάδου, 1990).

Όπως αναφέρθηκε ιδιαίτερα σημαντικός είναι ο ρόλος τους στην κατακράτηση των θρεπτικών και του ιζήματος. Διαφορετικοί μηχανισμοί κατακράτησης θρεπτικών αναπτύσσονται σε αυτά. Στα τρεχούμενα νερά η παροχή ελαττώνεται λόγω της τριβής που προκαλείται από την βλάστηση. Έρευνες πεδίου έχουν δείξει ελάττωση της παροχής 10-20 φορές σε σχέση με την παροχή δια μέσω αυλάκων χωρίς βλάστηση (De Klein 2008). Η ελαττωμένη παροχή συνεπάγεται αύξηση του υδραυλικού χρόνου παραμονής ευνοώντας τις αντιδράσεις κατακράτησης των θρεπτικών καθώς και σε ελάττωση της επαναιώρησης του ιζήματος.



Εικόνα 4: Αποστραγγιστικό κανάλι με φυτική βλάστηση (Van Zuidam, 2013).

Η πρόσληψη από τα φυτά ελαττώνει έστω προσωρινά τη συγκέντρωση των θρεπτικών στην διαλυτή φάση. Τέλος τα μακρόφυτα μπορεί να διεγείρουν την απονιτροποίηση. Αυτό συμβαίνει διότι παρέχουν υπόστρωμα για την ανάπτυξη του περιφυτικού βιουμενίου των απονιτροποιητικών βακτηρίων, αλλά και επειδή τα φυτά με την αποσύνθεση καταναλώνουν οξυγόνο (Eriksson & Weisner 1997; Schaller et al. 2004). Επιπρόσθετα οι μεταβολές του οξειδοαναγωγικού δυναμικού κοντά στις ρίζες των φυτών προκαλούν τις συζευγμένες αντιδράσεις νιτροποίησης-απονιτροποίησης (De Klein 2008). Λαμβάνοντας όλες τις διαδραματιζόμενες πορείες στα υδάτινα σώματα όπου επικρατούν τα μακρόφυτα ευνοείται η κατακράτηση των θρεπτικών σε σχέση με αυτά στα οποία απουσιάζει η βλάστηση (Εικόνα 4). Ελάττωση στο κλάσμα του σωματιδιακού φωσφόρου και του ανόργανο μαζί με τα Ολικά αιωρούμενα στερεά (TSS, Total Suspended Solids) στο φορτίο των

ρύπων παρατηρήθηκε σε κανάλια με βλάστηση (Εικόνα 4). Ενώ το διαλυτό ανόργανο άζωτο ελαττώθηκε κατά 57% σε κανάλια με βλάστηση (Kröger et al. 2007a).

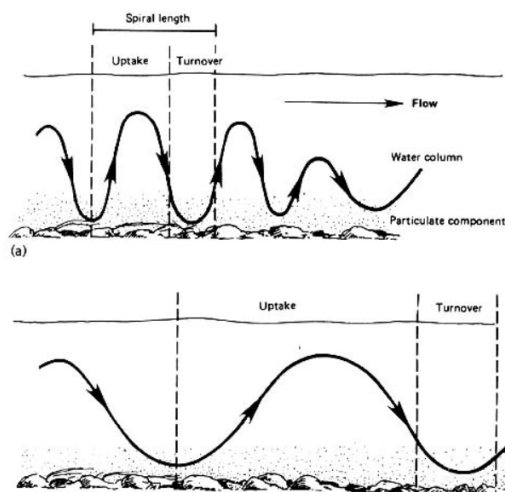
Καθαρισμός υδάτων

Οι πιο γνωστοί μηχανισμοί απορρύπανσης από τα νερά είναι διήθηση μέσω της φυτών στις όχθες και στον πυθμένα, προσρόφηση στα ιζήματα αλλά και μέσω της φωτοδιάσπασης των οργανικών ρυπαντών. Η βλάστηση επίσης ελαττώνει την ταχύτητα του νερού, ευνοώντας την κατακράτηση και αποικοδόμηση των ρυπαντών.

Α Κατακράτηση θρεπτικών

Η κατακράτηση θρεπτικών καταγράφεται μεταξύ 3-92%. Οι διεργασίες κατακράτησης είναι η προσρόφηση, ο μετασχηματισμός, η πρόσληψη από τα φυτά και η καταβύθιση στερεών αιωρούμενων σωματιδίων του εδάφους στα οποία προσροφώνται θρεπτικά, κυρίως φώσφορος. Η ένταση των διεργασιών αυτών καθορίζει την επάρκεια της κατακράτησης των θρεπτικών. Σε μικρούς όγκους ύδατος με μικρή παροχή, καθαρή ιζηματογένεση θα επικρατήσει και όταν αυτή ακολουθείται από εναπόθεση επιπρόσθετου υλικού οδηγεί στην μόνιμη απομάκρυνση των θρεπτικών από την κινούμενη διαλυτή φάση. Αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές όταν εφαρμοσθεί εκσκαφή η οποία απομακρύνει το στερεό υλικό από το κανάλι (Brenner et al. 2006).

Τα θρεπτικά άλατα καταναλώνονται και ανακυκλώνονται με γρήγορους ρυθμούς και κινούνται προς μία κατεύθυνση στα ρέοντα νερά. Οι διαλυμένες ουσίες οι οποίες κινούνται προς την κατεύθυνση του κινούμενου ύδατος, μπορεί να δεσμευθούν ή να αφομοιωθούν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και αργότερα να ελευθερωθούν για επιπλέον αποικοδόμηση. Αποτελούν συστατικά που ανακυκλώνονται μεταξύ βιοτικών και αβιοτικών παραμέτρων του υδάτινου οικοσυστήματος και μεταφέρονται προς την κατεύθυνση του ρεύματος με μία ελικοειδή διαδικασία που μοιάζει με σπείρα (spiral) και ονομάζεται nutrient spiraling (Neumann and Bredeweg, 2004).



Εικόνα 5: Ελικοειδής μεταφορά θρεπτικών μεταξύ σωματιδιακού οργανικού υλικού και υδάτινης στήλης σε ρέοντα ύδατα. Πρόσληψη και απελευθέρωση λαμβάνουν χώρα διαδοχικά κατά την μεταφορά τους στους παρακείμενους υδάτινους αποδεκτές, (α) μικρό βήμα έλικας (β) μεγάλο βήμα έλικας. Μικρο βήμα έλικας σημαίνει μεγάλη κατακράτηση. (Neumann, 2004).

Αν και κινήσεις των θρεπτικών αντίθετα προς την κατεύθυνση του ρέοντος ύδατος μπορεί να απαντηθούν στο κέντρο των δινών, στη μετανάστευση των ψαριών, η τελική τους ροή είναι προς την κατεύθυνση του ρέματος.

Άζωτο (N)

Το άζωτο εισέρχεται στους υγροτόπους με τις οργανικές και τις ανόργανες μορφές του, με αναλογία που εξαρτάται από τις πηγές εισροής. Οι οργανικές μορφές είναι διαλυμένες και αιωρούμενες, ενώ οι ανόργανες ($\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ και $\text{NO}_2^-\text{-N}$) είναι διαλυμένες στο νερό ή προσροφημένες στα στερεά των ιζημάτων ($\text{NH}_4^+\text{-N}$). Το αιωρούμενο κλάσμα απομακρύνεται με την καθίζηση και την ενσωμάτωση, ενώ οι διαλυμένες μορφές απομακρύνονται με τις διάφορες βιοχημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν στο νερό. Οι ταχύτητες των διαδικασιών αυτών επηρεάζονται από τα φυσικοχημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά των φυτών και μικροοργανισμών.

Για να περιγραφεί το ισοζύγιο του αζώτου στους κατακλυζόμενους υγρότοπους πρέπει να καθοριστούν οι διαδικασίες μεταφοράς και μετασχηματισμών των μορφών του αζώτου στο έδαφος και το υπερκείμενο νερό κατάκλυσης. Σε μια απλουστευμένη σχηματική αναπαράσταση του συστήματος (Εικόνα 6) διακρίνονται δύο ζώνες

α) η ζώνη του εδάφους και η ζώνη του υπερκείμενου νερού. Στη ζώνη του εδάφους κυριαρχούν οι διαδικασίες της μεταφοράς των ανόργανων μορφών του αζώτου (αμμωνιακή και νιτρική) με το κινούμενο νερό, οι μετασχηματισμοί των μορφών του αζώτου, στους οποίους περιλαμβάνονται η ανοργανοποίηση του οργανικού αζώτου, η νιτροποίηση του

αμμωνιακού αζώτου, η απονιτροποίηση του νιτρικού αζώτου, η ακινητοποίηση των ανόργανων μορφών, η πρόσληψη των ανόργανων μορφών από το ριζικό σύστημα των φυτών.

β) η ζώνη του κατακλυζόμενου νερού κυριαρχούν οι διαδικασίες της εισροής με το ανόργανο άζωτο του νερό απορροής, η εκροή τους με το νερό της επιφανειακής απορροής από κατάντη, η διήθηση και μεταφορά αζώτου στο έδαφος και οι μετασχηματισμοί των μορφών του αζώτου, στους οποίους περιλαμβάνονται η νιτροποίηση του αμμωνιακού αζώτου, η απονιτροποίηση του νιτρικού αζώτου και η αεριοποίηση της αμμωνίας (Αντωνόπουλος, 2019).

Μια σειρά διαδικασίες μπορούν να μεταφέρουν τις ενώσεις του N από ένα σημείο του υδροτόπου σε ένα άλλο. Σ' αυτές περιλαμβάνονται: 1) η καθίζηση ή επαναιώρηση, 2) η διήθηση των διαλυμένων μορφών, 3) η απόθεση υπολειμμάτων φυτών, 4) η πρόσληψη από τα φυτά, 5) η αεριοποίηση της NH_3 , 6) η προσρόφηση του διαλυτού N από το υπόστρωμα, 7) απελευθέρωση σπόρων, και 8) η μετακίνηση οργανισμών (Εικόνα 6).

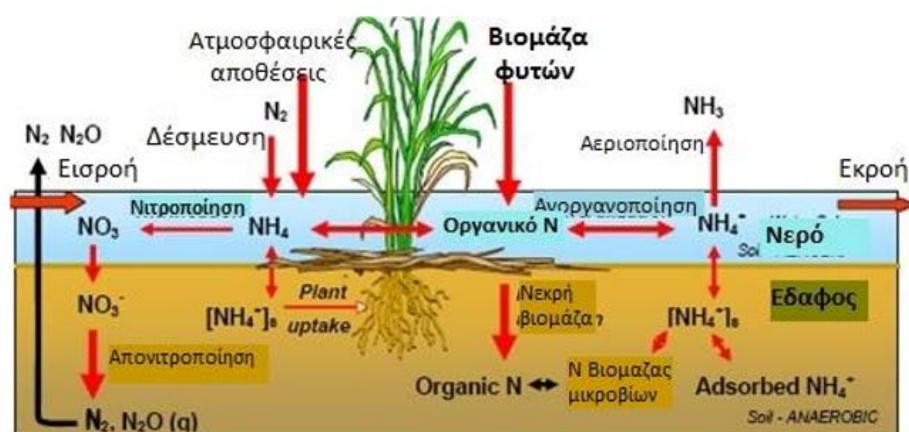
Ανοργανοποίηση οργανικού αζώτου. Είναι βιολογική διαδικασία μετασχηματισμού του οργανικού αζώτου σε ανόργανο αμμωνιακό άζωτο που συμβαίνει κατά την αποικοδόμηση της οργανικής ουσίας (Gambrell and Patrick, 1978). Η ανοργανοποίηση συμβαίνει υπό αναερόβιες και αερόβιες συνθήκες, αλλά αυτή είναι βραδύτερη όταν οι συνθήκες είναι αναερόβιες λόγω της μείωσης της αποδοτικότητας των ετερότροφων βακτηρίων σ' αυτό το περιβάλλον (Reddy and Patrick, 1984).

Αφομοίωση από τα φυτά. Το άζωτο αφομοιώνεται από τα φυτά και μετατρέπεται βιολογικά από ανόργανο σε οργανικό άζωτο. Οι μορφές που είναι βιολογικά αφομοιώσιμες από τα φυτά είναι η αμμωνιακή και η νιτρική (NH_4^+-N και NO_3^--N). Τα NH_4^+ είναι η προτιμητέα μορφή για την αφομοίωση από τα φυτά και βακτήρια. Η αφομοίωση είναι ένα φαινόμενο που συμβαίνει κατά την άνοιξη και το καλοκαίρι, όταν τα φυτά αναπτύσσονται, και μειώνεται ή αναστέλλεται κατά τους χειμερινούς μήνες.

Προσρόφηση. Είναι μια διαδικασία δέσμευσης των ιόντων αμμωνίας από τα στερεά του εδάφους ή αιωρούμενα στο νερό. Τα προσροφημένα ιόντα NH_4^+ είναι χαλαρά συνδεδεμένα με το υπόστρωμα και μπορούν να απελευθερωθούν όταν αλλάξουν οι χημικές συνθήκες. Οι πιο πολλές μορφές N είναι πολύ διαλυτές και δεν δεσμεύονται από τα ιζήματα και άλλου είδους στερεά. Η μείωση των συγκεντρώσεων των N-NO_3^- στα νερά των αρδευτικών καναλιών είναι αποτέλεσμα κυρίως βιολογικών διεργασιών, ενώ η μείωση των συγκεντρώσεων N-NH_4^+ οφείλεται κυρίως σε φυσικοχημικές διαδικασίες. (Smith and Pappas 2007). Οι μορφές των ενώσεων του αζώτου N-NO_3^- , N-NH_4^+ , και N-NO_2^- είναι

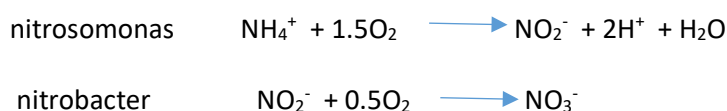
διαλυτές στα νερά και υφίστανται περίπλοκες και αλληλομετατροπές όπως απονιτροποίηση, νιτροποίηση και αφομοίωση από τα φυτά. Η λειτουργία των αρδευτικών καναλιών ως ενδιαίτημα μικροβιακής και φυτικής χλωρίδας επηρεάζει θετικά την κατακράτηση των θρεπτικών (Kröger et al. 2007a).

Εξαέρωση αμμωνίας. Η μη ιονισμένη μορφή της NH_3 είναι σχετικά πτητική και μπορεί να απομακρυνθεί με τη διαδικασία της μεταφοράς μάζας από την επιφάνεια του νερού προς την ατμόσφαιρα (Kadlec and Knight, 1996; Αντωνόπουλος, 2010). Ο ρυθμός της διαφυγής της αμμωνίας από το νερό προς την ατμόσφαιρα εξαρτάται από ορισμένους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως το pH, τη θερμοκρασία, το τυρβώδες της επιφάνειας και την ταχύτητα του ανέμου πάνω από την επιφάνεια του νερού. Οι απώλειες NH_3 είναι ασήμαντες στους υγροτόπους, εκτός από τις περιπτώσεις που η συγκέντρωση του $\text{NH}_3\text{-N}$ είναι υψηλή (20 mg L^{-1}) και το pH μεγαλύτερο από 8 (Kadlec and Knight, 1996).



Εικόνα 6: Διαδικασίες μετασχηματισμού και μεταφοράς μάζας του αζώτου στις φάσεις του νερού και του εδάφους των υγροτόπων (Αντωνόπουλος Β., 2019).

Νιτροποίηση. Η νιτροποίηση αφορά τη μετατροπή του αμμωνιακού αζώτου σε νιτρικό και συμβαίνει υπό αερόβιες συνθήκες. Είναι μία διαδικασία βιολογικής οξείδωσης σε δύο στάδια, που πραγματοποιείται από βακτήρια. Στο πρώτο στάδιο, η αμμωνία οξειδώνεται από τα νιτροποιητικά βακτήρια, nitrosomonas, δημιουργώντας νιτρώδη (NO_2^-), τα οποία στη συνέχεια οξειδώνονται από άλλα βακτήρια, τα nitrobacter, παράγοντας νιτρικά (NO_3^-). Οι χημικές αντιδράσεις της νιτροποίησης έχουν ως



Απονιτροποίηση. Η απονιτροποίηση αφορά τη διαδικασία μετατροπής του νιτρικού αζώτου σε αέριες μορφές του αζώτου (NxO) και συμβαίνει υπό αναερόβιες συνθήκες. Είναι η βιολογική αναγωγή του νιτρικού αζώτου σε αέρια του N, όπως το N_2 , NO, NO_2 και N_2O . Υπό αναερόβιες συνθήκες και την παρουσία διαθέσιμου υποστρώματος ως πηγή άνθρακα, οι απονιτροποιητικοί οργανισμοί, όπως bacillus, micrococcus, alcaligenes, and spirillum μπορεί να χρησιμοποιούν το NO_3^- ως δέκτη ηλεκτρονίων.

Ακινητοποίηση. Κατά την ακινητοποίηση οι μικροοργανισμοί του εδάφους αφομοιώνουν τις ανόργανες μορφές αζώτου και τις μετατρέπουν σε οργανικές ουσίες. Η ακινητοποίηση συμβαίνει στο έδαφος όταν ο άνθρακας στο έδαφος είναι ιδιαίτερα μεγάλος σε σχέση με το άζωτο.

Φωσφόρος (P)

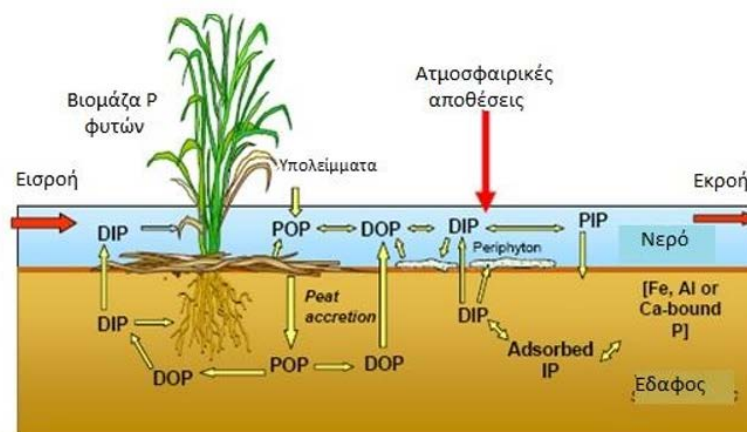
Με την απόπλυση του εδάφους, ο φωσφόρος μπορεί να μεταφερθεί στους αποδέκτες προσροφημένος σε σωματίδια του εδάφους και σωματιδιακή οργανική ύλη (POP, PIP) αλλά και σε διαλυτή μορφή (DIP Διαλυτός Ανόργανος φωσφόρος, DOP, Διαλυτός Οργανικός Φωσφόρος). Ο κύκλος του φωσφόρου (Εικόνα 7) είναι πιο απλός καθώς περιλαμβάνει λιγότερες διαδικασίες από αυτόν του αζώτου. Μία άλλη αιτία είναι ότι δεν σχηματίζει στο φυσικό περιβάλλον αέριες ενώσεις, γεγονός που του στερεί την δυνατότητα της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Ο P δεν είναι ιδιαίτερα ευκίνητος στο έδαφος και δεν διαλύεται, αλλά μεταφέρεται με τα φυτά και τη μεταφορά εδαφικών σωματιδίων (Novotny and Olem, 1994).

Η σχετικά μικρή βιοδιαθεσιμότητά του αποδίδεται (Mitsch and Gosselink, 1993): α) στη γρήγορη ιζηματοποίηση σε αδιάλυτες μορφές με τα ιόντα σιδήρου, ασβεστίου, αργιλίου κάτω από αερόβιες συνθήκες, β) στην χημική προσρόφηση των φωσφορικών από την άργιλο, τον οργανικό χούμο και άλλα ανόργανα στοιχεία και γ) στη μικρή ενσωμάτωση στην βιομάζα των ζώντων οργανισμών των υγροτόπων.

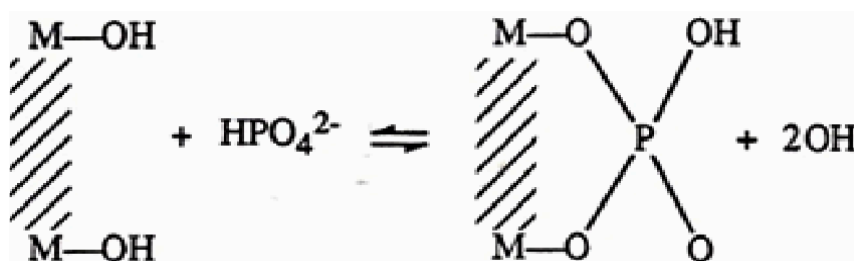
Ο βαθμός στον οποίο το έδαφος προσροφά το P, διαφέρει ανάλογα με τη σύσταση των εδαφών. Τείνει να είναι υψηλή σε εδάφη με υψηλά ποσοστά σωματιδίων μικρού μεγέθους (άρα μεγάλης ειδικής επιφάνειας), όπως ο πηλός. Η κοπριά (ή το διάλυμα πηλού) που προστίθενται στο έδαφος έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε φώσφορο καθώς και σε κολλοειδή σωματίδια, πάνω στα οποία ο φώσφορος προσροφάται. Η προσρόφηση στα ακίνητα εδαφικά συστατικά αλλά και στα μεταφερόμενα αιωρούμενα λεπτόκοκκα υλικά, η

ευκολία σχηματισμού αδιάλυτων φωσφορικών ενώσεων, παρεμποδίζει την πρόσληψη τους από τα φυτά.



Εικόνα 7: Διαδικασίες μετασχηματισμού και μεταφοράς μάζας του φωσφόρου στις ζώνες του νερού και του εδάφους των υγροτόπων όπου IP ανόργανος φώσφορος, DIP διαλυμένος ανόργανος φώσφορος, DOP διαλυμένος οργανικός και POP αιωρούμενος φώσφορος (Αντωνόπουλος Β., 2019).

Οι διαδικασίες προσρόφησης και εκρόφησης φωσφορικών επηρεάζονται από αλλαγές στο δυναμικό οξειδοαναγωγής. Σε οξειδωτικά περιβάλλοντα τα φωσφορικά συγκρατούνται στη στερεά φάση μέσω ενός Fe(III)-PO_4^{3-} συμπλόκου.



Εικόνα 8: Προσρόφηση φωσφορικών μέσω αδιάλυτων υδροξειδίων (Δασενάκης, Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα).

Όταν οι συνθήκες γίνουν αναγωγικές, ο τρισθενής σίδηρος ανάγεται σε διαλυτό δισθενή, με αποτέλεσμα τη διάσπαση του συμπλόκου και την απελευθέρωση των φωσφορικών. Τα σύμπλοκα του Fe^{+3} και του Al^{+3} με χουμικά συστατικά δημιουργούν θέσεις προσρόφησης στην επιφάνεια τους χαμηλής και υψηλής ενέργειας αντίστοιχα. Επομένως η κατακράτηση του φωσφόρου στα υλικά του πυθμένα αλλά και η διαδικασία εκρόφησης εξαρτώνται από την αναλογία υδροξειδίων του σιδήρου και του αργιλίου στο έδαφος.

Αυτό οδηγεί στην ιδέα της μετακίνησης των μορφών του φωσφόρου με την κατεύθυνση του ρέματος με μια ελικοειδή κίνηση (spiralizing) καθώς κάθε μόριο φωσφόρου συμμετέχει σε ένα κύκλο πρόσληψης από τις υδρόβιες φυτοκοινωνίες ή προσρόφησης στο υλικό του πυθμένα, μετασχηματίζεται από διαλυτή σε σωματιδιακή μορφή και στη συνέχεια απελευθερώνεται με επαναιώρηση στην υδάτινη στήλη. Το μοντέλο της ελικοειδούς

μεταφοράς σε συνδυασμό με την τροφοδότηση με ποσότητες φωσφόρου χρησιμοποιείται για την διερεύνηση της κατακράτησης του P στα αποστραγγιστικά κανάλια. Το μήκος της έλικας μπορεί να ποικίλλει μεταξύ 1 και 1000m, και είναι συνάρτηση της καθεστώτος ροής, της εποχής, της γεωλογίας των πετρωμάτων, και των χαρακτηριστικών των ιζημάτων. Με παρόμοιο τρόπο οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ του υπόγειου νερού και του νερού των αποστραγγιστικών καναλιών στην υπορροϊκή (hyporheic) ζώνη μπορεί να προκαλέσει αύξηση ή ελάττωση στη συγκέντρωση του φωσφόρου ανάλογα με την ανάβλυση στον πυθμένα του καναλιού ή στην διήθηση του ρέματος πλούσιου σε P δια μέσω αυτού.

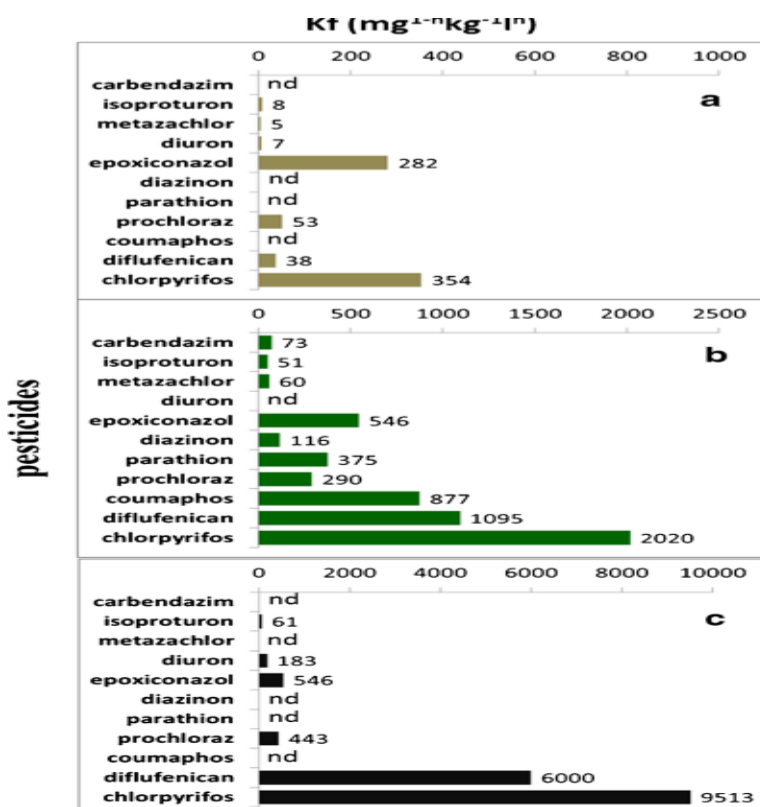
Η συγκράτηση του φωσφόρου στους υγρότοπους ρυθμίζεται από τις φυσικές (ιζηματοποίηση και απελευθέρωση), χημικές (καθίζηση και θρόμβωση), και βιολογικές διαδικασίες (πρόσληψη και απελευθέρωση από τα φυτά, το περίφυτο και τους μικροοργανισμούς).

B. Κατακράτηση φυτοφαρμάκων

Τα αποστραγγιστικά κανάλια και ιδιαίτερα αυτά που καλύπτονται από πυκνή φυτική βλάστηση διαθέτουν συμφυείς μηχανισμούς απομάκρυνσης των φυτοφαρμάκων. Η ελάττωση του ρυπαντικού φορτίου, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, κυμαίνεται μεταξύ 3-99% και εξαρτάται από την χημική δομή του μορίου του φυτοφαρμάκου αλλά και από τα χαρακτηριστικά των καναλιών. Κατά κύριο λόγο ελαττώνεται το ρυπαντικό φορτίο των πιο υδρόφοβων φυτοφαρμάκων, ενώ τα λιγότερο υδρόφοβα κατακρατώνται σε μικρότερο βαθμό.

Ο κύριος μηχανισμός απομάκρυνσης αυτών είναι μέσω της ρόφησης στην στερεά φάση. Με αυτό τον τρόπο ελαττώνεται η μεταφορά των αγροχημικών στην παράκτια ζώνη αλλά και η μεταφορά μέσω της διήθησης στα υπόγεια ύδατα. Ως στερεά φάση ρόφησης θεωρούνται τα ιζήματα των αυλάκων, η υγροτοπική βλάστηση και η αποσυντιθέμενη φυτική ύλη. Ο καταμερισμός μεταξύ του ύδατος και του υποστρώματος και η επάρκεια προσρόφησης των φυτοφαρμάκων σε καθένα από τα διαφορετικά υποστρώματα ορίζεται με τον συντελεστή K_f (Sorption Coefficient) αυτών. Η οργανική ύλη, ιδιαίτερα η χουμοποιημένη παρέχει θέσεις ισχυρής προσρόφησης για τα φυτοφάρμακα και σε αυτούς τους ισχυρούς δεσμούς που αναπτύσσονται στην διεπιφάνεια υδάτινης και στερεάς φάσης οφείλονται οι υψηλές τιμές των συντελεστών K_f (Freundlich coefficient, συντελεστής κατανομής της ισόθερμης Freundlich), των φυτοφαρμάκων έναντι της χουμοποιημένης οργανικής ύλης.

Ενδεικτικά στην Εικόνα 9 αναφέρονται οι συντελεστές προσρόφησης για ξεχωριστά υποστρώματα σε μια κατάταξη από τα περισσότερο υδρόφοβα στα πιο πολικά φυτοφάρμακα.



Εικόνα 9: Μέσοι συντελεστές κατανομής ισόθερμης προσρόφησης Freundlich που δείχνουν την συγγένεια των μελετώμενων φυτοφαρμάκων με τα ιζήματα (καφέ χρωματισμός), με την βλάστηση (πράσινος χρωματισμός), και με την αποσυντιθέμενη φυτική βλάστηση (μαύρος χρωματισμός), nd δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα. Τα μελετώμενα φυτοφάρμακα κατατάσσονται από την κορυφή ως την βάση κατά αυξανόμενη υδροφοβικότητα (Dollinger et al, 2015).

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία ποιοτικά η κατακράτηση των υδρόφοβων φυτοφαρμάκων έναντι των θέσεων προσρόφησης περιγράφεται με την ακόλουθη εξίσωση (Margoum et al, 2003):

$$IR \text{ (Retention Index, Συντελεστής κατακράτησης)} = aS + bLV + cDV,$$

Όπου S, LV και DV είναι τα ποσοστά κάλυψης της έκτασης σε ιζήματα, Φυτική βλάστηση και Αποσυντιθέμενη φυτική βλάστηση αντίστοιχα, ενώ οι διαστατοί συντελεστές a, b και c παίρνουν τις τιμές 1, 2 και 40 αντίστοιχα. Ο βαθμός προσρόφησης για τα τρία υποστρώματα ποικίλλει ανάμεσα στα φυτοφάρμακα και αυτό εκφράζεται με τον συντελεστή κατανομής Kf (Εικόνα 9). Ενώ η προσρόφηση των πολικών και πολώσιμων φυτοφαρμάκων εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως το pH, το περιεχόμενο σε αργιλικών ορυκτά στο ίζημα και την κατιοανταλλακτική ικανότητα (CEC, cation exchange capacity) του εδαφικού υλικού των πετρωμάτων. Επιπλέον ο χημικός χρόνος της αντίδρασης προσρόφησης δηλαδή ο χρόνος που παραμένει σε επαφή με το ίζημα το μόριο του φυτοφαρμάκου είναι καθοριστικός για την περάτωση της προσρόφησης.

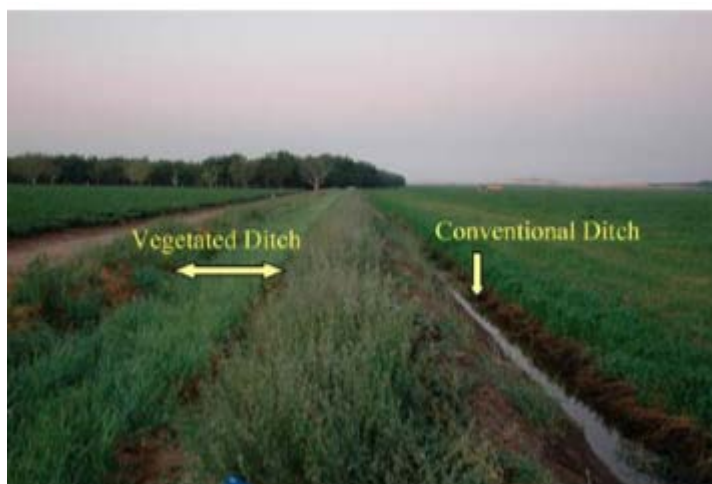
Η καταβύθιση του αιωρούμενου υλικού το οποίο φέρει προσροφημένο επάνω του το μόριο του φυτοφαρμάκου είναι ένας ακόμη μηχανισμός κατακράτησης μέσα στο περιβάλλον του καναλιού. Ο μηχανισμός της καταβύθισης καθορίζεται από το ύψος του νερού, την μορφολογία του αποστραγγιστικού καναλιού και την φυτική βλάστηση.

Η πρόσληψη από τα φυτά συνεισφέρει στην απομάκρυνση του φορτίου των διαλυτών φυτοφαρμάκων. Υψηλές συγκεντρώσεις φυτοφαρμάκων όπως linuron, pyrethrin, chlorpyrifos, ή carbaryl έχουν ανιχνευθεί στα φυτά των αποστραγγιστικών καναλιών. Εν τούτοις δεν υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ του προσλαμβανόμενου ή του προσροφούμενου ποσού των φυτοφαρμάκων (Branger et al, 2009).

Η απομάκρυνση οργανικών συστατικών από τα φυτά όπως αλογονωμένα οργανικά παράγωγα περιλαμβάνει φυσικές διαδικασίες (προσρόφηση, απορρόφηση, κατανομή) αλλά και χημικές διαδικασίες όπως σχηματισμό συμπλόκων και χημικές αντιδράσεις με συστατικά των μεμβρανών και της λιποφιλικής επιδερμίδας των φύλλων του φυτού. Μελέτες αποκάλυψαν κινητική ψευδοπρώτης τάξεως για την απομάκρυνση των οργανικών ρυπαντών από τα υδρόβια φυτά.

Η έκθεση των υδρόβιων φυτών σε οργανικούς ρυπαντές οδηγεί σε πρόσληψη και συσσώρευση που ακολουθείται από μετασχηματισμό ή αποικοδομηση που μπορεί να είναι οξειδωτική ή αναγωγική οδηγώντας σε σχηματισμό μεταβολιτών. Οι μεταβολίτες αφομοιώνονται μέσω ομοιοπολικού δεσμού με το φυτό. Μελέτες με είδη του υδροχαρούς γένους *Elodea* αποκάλυψε την αναγωγή του DDT (1,1,1-τριχλωρο-2,2-δισ-χλωροφαινυλ) αιθάνιο) σε ανάλογα του DDD (dichlorodiphenyldichloroethane 1,1 διχλωρο 2,2 δισ-χλωροδιφαινυλ) αιθάνιο), δέσμευση σε πολικά τμήματα του φυτού και άλλα άγνωστα προϊόντα (Dihl et al, 2009).

Η συγκέντρωση του ζιζανιοκτόνου Chlorpyrifos σε δείγματα επιφανειακών απορροών από νερά άρδευσης κυμάνθηκαν από 0.22 μg/l σε ένα μέγιστο των 1.67 μg/l. Η μέση ελάττωση της συγκέντρωσης στο τέλος του αποστραγγιστικού καναλιού που καλύπτεται από βλάστηση ήταν 38% ενώ σε ένα συμβατικό αύλακα 1% (Εικόνα 5).



Εικόνα 5: Σύγκριση των συγκεντρώσεων Chlorpyrifos σε κανάλι πλήρως καλυμμένο με βλάστηση και σε ένα ασυμβατικό. (Gill et al, 2007)

Ένας άλλος μηχανισμός που συντελείται στο μελετώμενο οικοσύστημα είναι η βιοτική και αβιοτική αποικοδόμηση των φυτοφαρμάκων το πλήρες δυναμικό του δεν έχει μελετηθεί πλήρως. Οι χρόνοι ημίσειας ζωής των φυτοφαρμάκων στα αποστραγγιστικά κανάλια ήταν μικρότεροι από τους αντίστοιχους στα νερά και στο ίζημα (ANSENS, 2014)

Συμπερασματικά, η κατακράτηση των φυτοφαρμάκων μεγιστοποιείται όταν συντελούνται οι διαδικασίες προσρόφησης, καταβύθισης, αποικοδόμησης, και πρόσληψης από τα φυτά. Τα αποστραγγιστικά κανάλια με πυκνή βλάστηση, με σωματίδια εδάφους μικρού μεγέθους και αποσυντιθέμενης βλάστηση εμφανίζουν και την μεγαλύτερη μείωση του φορτίου των φυτοφαρμάκων.

Γ. Κατακράτηση ιζήματος

Το ίζημα είναι ρύπος και επίσης μεταφέρει θρεπτικά και άλλους ρύπους προσροφημένους στην στερεά φάση. Το ίζημα μεταφέρεται από τους αγρούς με επιφανειακές απορροές και με υπόγειο ύδωρ.

Κάποια αποστραγγιστικά κανάλια λειτουργούν ως παγίδα ιζήματος. Ιδιαίτερα η κατακρήμνιση ευνοείται για κανάλια με μικρή κλίση και μεγάλο μήκος καθώς και με μεγάλο ποσοστό κάλυψης σε φυτά. Τα φυτά προκαλούν τριβή στη ροή του νερού, ελαττώνουν την ταχύτητα ροής και αυξάνουν τον χρόνο παραμονής του φέροντος την αιωρούμενη ύλη ύδατος εντός του καναλιού με αποτέλεσμα να ευνοείται η κατακρήμνιση. Επίσης δρουν συμπληρωματικά ως διηθητές της αιωρούμενης ύλης (Lecce et al, 2006). Η λάσπη μπορεί αν μεταφερθεί στα ύδατα των ποταμών να επικαθήσει πάνω στους χάλικες του πυθμένα όπου χρησιμοποιούνται ως περιοχές ωτοκίας ψαριών, να επηρεάσουν την υδρόβια βλάστηση και τα έντομα.

Τα υλικά της άμμου και τα μεσαίου μεγέθους αργιλικά ορυκτά (>40–60-μm diameter), χαρακτηρίζονται από μεγάλες ταχύτητες καταβύθισης σε σχέση με τα χαμηλής πυκνότητας αργιλικά ορυκτά. Τα μικρού μεγέθους αργιλικά δέχονται μικρή δύναμη βαρύτητας και στις συνήθεις ταχύτητες ροής αιωρούνται στην υδάτινη στήλη και μεταφέρονται κατάντη.

Οι συνθήκες που ευνοούν την ιζηματογένεση είναι η φυτική βλάστηση, το ύψος νερού, τα μορφολογικά χαρακτηριστικά όπως κλίση, πλάτος και μήκος του καναλιού. Το ίζημα μπορεί να υποστεί κύκλους καταβύθισης και επαναιώρησης μέσα στα κανάλια. Η βλάστηση και το συσσωρευμένο οργανικό υλικό περιορίζουν και σταθεροποιούν το ίζημα. Η εκσκαφή του αποστραγγιστικού καναλιού για λόφους διατήρησης απομακρύνουν υλικό πυθμένα με αποτέλεσμα το σύστημα του αποστραγγιστικού καναλιού να είναι ευάλωτο σε περαιτέρω απώλεια λάσπης. και το ίζημα μεταφέρεται ευκολότερα στην έξοδο της λεκάνης απορροής.

Μια πρακτική για να αποφευχθεί η μεταφορά υλικού λάσπης κατάντη είναι η επικοινωνία με κοίτη πλημμυρών (floodplain), δηλαδή μία έκταση εκατέρωθεν του καναλιού που δέχεται πλημμυρικά νερά από την υπερχειλίση του όταν η παροχή υπερβαίνει την διοχετευτική ικανότητά του (Powell et al. 2007a, 2007b).

Συντήρηση γεωργικών αποστραγγιστικών καναλιών

Μέθοδοι συντήρησης

Για να διατηρηθούν οι παρεχόμενες οικοσυστημικές υπηρεσίες απαιτείται συντήρηση σε τακτά χρονικά διαστήματα. Οι πιο συνήθεις πρακτικές διαχείρισης περιλαμβάνουν εκσκαφή του πυθμένα, απομάκρυνση της βλάστησης με κοπή με τα χέρια ή με μηχανικά μέσα. Οι τρόποι απομάκρυνσης της βλάστησης περιλαμβάνουν την κοπή, το κάψιμο ή την χρήση χημικών. Εκτιμάται ότι χωρίς συντήρηση χρειάζονται 7 με 10 χρόνια γ για την μετάβαση από μία εύτροφη αύλακα σε μια ελώδη έκταση (Verdonschot et al, 2012).

Ο μηχανικός εξοπλισμός και η μέθοδος καθαρισμού, η συχνότητα και η χρονική στιγμή που θα εφαρμοσθούν οι πρακτικές διατήρησης καθορίζουν την ένταση της διαταραχής που προκαλείται στο οικοσύστημα της τάφρου. Η συντήρηση είναι επίσης και ο λόγος που δεν υπάρχουν στις παρακείμενες όχθες δέντρα ή θάμνοι για να υπάρξει πρόσβαση σε αυτά από τα μηχανήματα.



Εικόνα 10 : Εργασίες καθαρισμού της βλάστησης Α. Με τα χέρια Β. Με μηχανικά μέσα (Zuidam, 2013) Γ. Εξσκαφή υλικού πυθμένα (Needelman et al, 2007).

Για την κατάλληλη εφαρμογή των πρακτικών διαχείρισης χρειάζεται να αποκτηθεί μια εις βάθος γνώση για τις οικολογικές χημικές και φυσικές διεργασίες που διαδραματίζονται στα κανάλια και στο γειτνιάζον περιβάλλον. Η εφαρμογή καινοτόμων πρακτικών για την απομάκρυνση του ρυπαντικού φορτίου δύνανται να είναι καθοριστικής σημασίας για την εκπλήρωση των διαχειριστικών σχεδίων για την αποκατάσταση της ποιότητας των υδάτων σε επίπεδο λεκάνης απορροής.

Επιπτώσεις των πρακτικών συντήρησης στα μορφολογικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά των καναλιών

Ο καθαρισμός της βλάστησης (εκρίζωση) αποκαθιστά τη ροή του ύδατος διευκολύνει την απομάκρυνση του από το χωράφι αποτρέπει την υπερχειλίση ασκώντας έλεγχο σε φαινόμενα πλημμυρών στους αγρούς και στη διάβρωση του εδάφους (Levanasseur 2012). Ενώ αντιθέτως η συνθήκη της υψηλής παροχής ελαττώνει τον υδραυλικό χρόνο παραμονής ελαττώνει την φόρτιση του υδροφόρου ορίζοντα ενώ δημιουργεί αυξημένη παροχή προς την έξοδο της λεκάνης απορροής.

Η εκσκαφή είναι πιθανόν η πρακτική που διαταράσσει το σύστημα σε μεγάλο βαθμό επειδή απομακρύνει μέρος του ιζήματος και του βιόκοσμου που είναι υπεύθυνο για την πρόσληψη των θρεπτικών και την βιοτική αποικοδόμηση των φυτοφαρμάκων. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται μια μεγαλύτερη κατακράτηση N-NO_3^- , N-NH_4^+ , και διαλυτού φωσφόρου (SR, soluble phosphorus) (Smith and Pappas, 2007) και φυτοφαρμάκων (Pappas and Smith, 2007) από το ίζημα πριν την εκσκαφή σε σχέση με την ικανότητα του πυθμένα μετά την εφαρμοζόμενη συντήρηση. Η εκσκαφή ελαττώνει τη ειδική επιφάνεια του στερεού υλικού του πυθμένα και απομακρύνει κάποιες βιοκοινωνίες που είναι υπεύθυνες για την κατακράτηση των θρεπτικών. Οι ερευνητές επίσης μέτρησαν μεγαλύτερο ποσοστό απελευθερούμενου φωσφόρου από πυθμένα αποστραγγιστικού καναλιού μετά την διαδικασία της εκσκαφής. Η εκσκαφή επανατοποθετεί το ίζημα από το κανάλι στον αγρό και δημιουργεί μια πηγή μεταφερόμενου ιζήματος με την επόμενη βροχόπτωση.

Τα ίδια φαινόμενα καταγράφονται για την κοπή της φυτικής βλάστησης όταν τα φυτικά υπολείμματα μεταφέρονται εκτός του συστήματος (Van Dijk et al. 2014). Στην περίπτωση όπου τα τεμάχια της βλάστησης παραμένουν στο κανάλι απαιτείται επιπλέον μελέτη. Τα φυτικά υπολείμματα αποτελούν επιπλέον θέσεις προσρόφησης. Ενώ οι επιπτώσεις από την καύση της βλάστησης στην κατακράτηση των ρυπαντών δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς. Τα υπολείμματα της καύσης αποτελούν θέσεις προσρόφησης για φυτοφάρμακα όπως diuron (Yang and Sheng 2003) και clomazone (Xu et al, 2008). Αν οι στάχτες παραμένουν για σημαντική περίοδο ενισχύεται η προσρόφηση και ελαττώνεται ο ρυθμός αποικοδόμησης των φυτοφαρμάκων. Η εφαρμογή φυτοκτόνων έχει ως αποτέλεσμα την ολοκληρωτική έλλειψη της βλάστησης καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου. Ως αποτέλεσμα τα πρηνή υφίστανται έντονη διάβρωση κατά την διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων του χειμώνα. Επιπλέον προστίθεται νέο ρυπαντικό φορτίο στα ύδατα των καναλιών αποστράγγισης. Η καύση της βλάστησης παράγει σωματίδια σε λεπτό διαμερισμό με μικρή συνεκτικότητα τα οποία κινητοποιούνται με την επόμενη βροχόπτωση και υποβαθμίζουν τα ύδατα των ποταμών με τη θολότητα.

Επίσης καταγράφονται και επιπτώσεις των πρακτικών συντήρησης στη λειτουργία αυτών των ιδιαίτερων οικοσυστημάτων. Η βλάστηση παρέχει τροφή, λειτουργεί ως καταφύγιο και δημιουργεί τύπους ενδιαιτημάτων για αυτό και ο καθαρισμός της επηρεάζει όλες τις βιοκοινωνίες που εξαρτώνται από αυτή (Herzon and Helenius 2008).

Ο βαθμός διαταραχής του συστήματος συντήρησης στο οικοσύστημα του καναλιού εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη πρακτική. Ο χημικός καθαρισμός της βλάστησης προκαλεί δραστική ελάττωση της κάλυψης με φυτά και διασκορπισμό αυτής καθ' όλη την διάρκεια του

χρόνου. Η εκσκαφή απομακρύνει την βενθική χλωρίδα και πανίδα της επιφάνειας του πυθμένα (Smith and Pappas 2007; Pappas and Smith 2007). Αντιθέτως η τμηματική εκσκαφή μπορεί να αποκαταστήσει το οικοσύστημα για την επιβίωση σπάνιων ειδών, καθώς ελαττώνει τον ευτροφισμό καθώς και τον περιορισμό λόγω της έλλειψης διαθεσιμότητας ηλιακού φωτός. Η διαδικασία της εκσκαφής λειτουργεί και ως μέσο διάδοσης της σποράς (Leng et al. 2011). Τέλος επειδή η καύση αυξάνει την γονιμότητα του εδάφους, θα μπορούσε να προωθήσει την ταχύτερη αποκατάσταση της βλάστησης. Συμπερασματικά, η εκσκαφή, τα φυτοκτονα ή η κοπή της βλάστησης εντείνουν την ρύπανση των υδάτινων αποδεκτών.



Εικόνα 11 : Αποστραγγιστικό κανάλι καθαρισμένο με χημικά από την πλευρά που γειτνιάζει στην καλλιέργεια, Βάλτος Ραγίου, Θεσπρωτία (προσωπική φωτογραφία).

Ο καλύτερος χρόνος για την διαχείριση εντός του καναλιού είναι αργά το καλοκαίρι όταν τα επίπεδα του νερού είναι χαμηλά και δεν συμπίπτει με την αναπαραγωγικής περιόδου των πουλιών. Συνιστάται η απομάκρυνση της βλάστησης να γίνεται κατά τμήματα με σκοπό την διατήρηση των ενδιαιτημάτων.

Για τη διαχείριση της βλάστησης στα πρανή συνιστάται η απομάκρυνση από την μια πλευρά ή στο μισό περίπου του ύψους ανά χρονιά έτσι ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα διάβρωσης και αποσταθεροποίησης του εδάφους. Ενώ προτείνεται η διατήρηση μια λωρίδας βλάστησης στη βάση ώστε να σταθεροποιηθεί το πρανές.

Παρόλα αυτά, οι συνηθισμένες πρακτικές διαχείρισης δεν είναι ικανές να ελαττώσουν το ρυπαντικό φορτίο σε επεισόδια πλημμυρών όπου θρεπτικά και φυτοφάρμακα είτε διαλυτά είτε προσροφημένα σε σωματίδια παρασύρονται από την υψηλή παροχή και μεταφέρονται στους υδάτινους αποδέκτες. Η συχνότητα και η ένταση αυτών των φαινομένων αναμένεται να ενταθεί με την κλιματική αλλαγή. Θα πρέπει να διενεργηθούν μελέτες για τη εναλλαγή πρακτικών διαχείρισης και τα αποτελέσματα αυτών, τον κατάλληλο

χρόνο εφαρμογής αλλά και για την περαιτέρω κατακράτηση των ρύπων και έργα διαμόρφωσης του χώρου στην άκρη του χωραφιού.

Καινοτόμες πρακτικές συντήρησης

Στην διαχείριση περιλαμβάνονται και πρακτικές με εγκαταστάσεις δίπλα στα αποστραγγιστικά κανάλια με σκοπό την ενίσχυση των παρεχόμενων οικοσυστημικών υπηρεσιών.

Πολλές πρακτικές διαχείρισης προσπαθούν να μιμηθούν ή να αποκαταστήσουν λειτουργίες υγροτόπων στα μελετώμενα τεχνητά αποστραγγιστικά κανάλια. Σημειώνεται ότι οι σύγχρονες πρακτικές διαχείρισης πέρα από την παρεχόμενη υπηρεσία της απομάκρυνσης του νερού από το χωράφι για την βελτίωση της σοδειάς αποσκοπούν και στον καθαρισμό των υδάτινων απορροών επιφανειακών ή υποεπιφανειακών που προέρχονται από τις καλλιέργειες και στην διατήρηση της βιοποικιλότητας.

Στοχεύουν στην λειτουργία μικρών υγροτόπων τοποθετημένων σε κρίσιμα σημεία στον αγρό κατά μήκος του δικτύου των αποστραγγιστικών καναλιών οι οποίοι αυξάνουν τον χρόνο παραμονής εντός της λεκάνης απορροής και λειτουργούν ως λεκάνες συγκράτησης της ρύπανσης.

Τα περισσότερα αποστραγγιστικά κανάλια δεν συνδέονται επαρκώς με την κοίτη πλημμυρών και κατά την διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων δεν γίνεται επαρκής συγκράτηση του ιζήματος. Οι ιδέες που επικρατούν και αναφέρονται σε θέματα μηχανικής στους αγρούς είναι η δημιουργία πλημμυρικής κοίτης και συνδεδεμένους υγροτόπους με τα κανάλια όπου αυξάνεται ο καθαρισμός του νερού και δημιουργούνται καταφύγια βιοποικιλότητας. Στην διεθνή βιβλιογραφία περιγράφονται έργα όπου το επίπεδο της πλημμυρικής κοίτης ταπεινώνεται και το αποστραγγιστικό κανάλι συνδέεται με αυτή (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Αποστραγγιστικό κανάλι δύο επιπέδων (αριστερά) και κανάλι με φυσική αναβαθμίδα (δεξιά) διαμορφώσεις που μιμούνται τις ποτάμιες διεργασίες, παρέχοντας μια πλημμυρική κοίτη για την διάχυση ενέργειας και ύλης σε συνθήκες υψηλής παροχής (Needelman et al, 2007).

Η εγκατάσταση ρύθμισης του επιπέδου του νερού στο αποστραγγιστικό κανάλι (Εικόνα 13) είναι μία κατασκευή που απαντάται στους αγρούς για την ρύθμιση του επιπέδου του νερού μέσα σε αυτόν με σκοπό την διατήρηση διαθέσιμου νερού για την σοδειά μέσα στο αγροτικό πεδίο ενώ παράλληλα μέσω της απονιτροποίησης και άλλων διεργασιών κατακράτησης ελαττώνει το ρυπαντικό φορτίο (Gilliam et al. 1979; Evans et al. 2007, Strock et al. 2007.)



Εικόνα 13: Εγκατάσταση ρύθμισης του επιπέδου του νερού όπου το νερό συγκρατείται κοντά στην γεωργική γη.

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τις ενώσεις του φωσφόρου έχει οδηγήσει στην εφαρμογή καινοτόμων πρακτικών όπως η βελτίωση των εδαφών του πυθμένα με την προσθήκη ροφητικού υλικού κατάλληλου για την δέσμευση του διαλυτού φωσφόρου από το έδαφος (PMSs, Phosphorous sorbing materials). Με τον όρο ρόφηση νοείται οι συνδυασμένες διεργασίες της προσρόφησης του P και η καταβύθιση αδιάλυτων ενώσεων αυτού. Στην βιβλιογραφία αναφέρονται μια σειρά αγρονομικών βελτιωτικών, υλικά διαχείρισης του ύδατος που χρησιμεύουν στην μετατροπή του διαλυτού φωσφόρου των αποστραγγιστικών καναλιών σε αδιάλυτες μορφές (Penn et al, 2007).

Τα PSM's απομακρύνουν τον φώσφορο χωρίς να υποβαθμίζουν την ποιότητα των νερών. Τα περισσότερα PSM's ταξινομούνται ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε δύο ομάδες: Ca/Mg και Al/Fe. Αυτά που βασίζονται στην περιεκτικότητα σε Ca^{+2} Mg^{+2} απομακρύνουν τον φωσφόρο με αργές αντιδράσεις καταβύθισης συγκρινόμενα με αυτά που απομακρύνουν τον φωσφόρο με προσρόφηση σε Al/Fe οξείδια και υδροξείδια.

Συμπεράσματα

Τα αποστραγγιστικά κανάλια είναι τεχνητά οικοσυστήματα με χαρακτηριστικά υγροτόπων και ρεμάτων. Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον τόσο στην Ελλάδα αλλά και παγκόσμια για τον περιορισμό της αγροτικής ρύπανσης που φθάνει στα επιφανειακά ύδατα

και στη συνέχεια σε παράκτιες ζώνες. Ενώ παράλληλα να διατηρείται και η υψηλή απόδοση της σοδειάς.

Ο κατάλληλος σχεδιασμός των πρακτικών συντήρησης του δικτύου των καναλιών προϋποθέτει τη γνώση των οικολογικών, χημικών και υδρολογικών διεργασιών που διαδραματίζονται σε αυτά και στο περιβάλλον αγροτικό τοπίο. Η εφαρμογή καινοτόμων πρακτικών για την επεξεργασία και την κατακράτηση των ρύπων μπορεί να αποδειχθεί στρατηγικής σημασίας για την επίτευξη της καλής κατάστασης των νερών σε επίπεδο λεκάνης απορροής

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

1. Alexander R. Smith R., Schwartz G., Boyer E., Nolan J., Brakebill J., (2008). Differences in phosphorous and nitrogen delivery to the Gulf of Mexico from the Mississippi river Basin. *Environmental Science and Technology* Volume 42, 822-830.
2. ANSES (2014) Agritox database. <http://www.agritox.anses.fr/>. Accessed 8 Jul 2014.
3. Arnold G.R, (1983). The influence of ditch and hedgerow structure, length of hedgerows and area of woodland and garden on bird numbers on farmland. *Journal of Applied Ecology* Volume 20, 731-50.
4. Bellavance, M.È. and Brisson J. (2010). Spatial dynamics and morphological plasticity of common reed (*Phragmites australis*) and cattails (*Typha* sp.) in freshwater marshes and roadside ditches. *Aquatic Botany* Volume 93, 129-134.
5. Branger F., Tournabize J., Carluer N., Kao C., Braud I., Vaulin M., (2009). A simplified modelling approach for pesticide transport in a tile-drained field: the PESTDRAIN model. *Agricultural Water Management*, Elsevier Masson, 96 (3), p. 415 - p. 428. hal-00547576.
6. Brenner M., Hodell D.A., et al, (2006). Mechanisms for Organic Matter and Phosphorus Burial in Sediments of a Shallow, Subtropical, Macrophyte-Dominated Lake. *Journal of Paleolimnology* Volume 35(1), 129-148.
7. Butler R. M., Myers, E. A., Walter J. N. & Husted, J. V., 1974: Nutrient Reduction in Wastewater by Grass Filtration. Paper No. 74-4024. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Michigan.
8. Cooper C., Moore M., Bennett E., Smith S., Farris J., (2003). Alternative environmental benefits of agricultural drainage ditches. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* Volume 281 1678-1682.
9. De Klein J. (2008). From Ditch to Delta Nutrient retention in running waters. PhD-thesis Wageningen University, Wageningen, ISBN: 978-90-8504-930-2
10. Dhir Bhupinder, Sharmila P. and Saradhi P. Pardha, (2009) 'Potential of Aquatic Macrophytes for Removing Contaminants from the Environment', *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39: 9, 754 — 781
11. Dollinger J., Dagès C., Bailly, J.S. Lagacherie P., Voltz M., (2015). Managing ditches for agroecological engineering of landscape. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 35 (3), pp.999-1020. 10.1007/s13593-015-0301-6. hal01306444.

12. Elsaesser D, Stang C, Bakanov N, Schulz R (2013). The Landau stream mesocosm facility: pesticide mitigation in vegetated flow-through streams. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. Volume 90, 640–645. doi:10.1007/s00128-013-0968-9.
13. Erikson P.G., and Weiner S.E.B., (1997). Nitrogen removal in a wastewater reservoir: the importance of denitrification of epiphytic biofilms on submersed vegetation. *Journal of Environmental Quality* Volume 26, 905-910.
14. Evans, R.O., K.L. Bass, M.R. Burchell, R.D. Hinson, R. Johnson, and M. Doxey. (2007). Management alternatives to enhance water quality and ecological function of channelized streams and drainage canals. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 62(4), 308-320.
15. Faust DR, Kröger R., Miranda LE, Rush SA (2016) Nitrate removal from agricultural drainage ditch sediments with amendments of organic carbon: potential for an innovative best management practice. *Water Air Soil Pollution* Volume 227(10), 1-11.
16. Faust D.R., Kroger R., Moore M.T., Rush S.A., (2018). Management Practices Used in Agricultural Drainage Ditches to Reduce Gulf of Mexico Hypoxia. *Bulletin Environmental Contamination and Toxicology* Volume 100, 32-40.
17. Gambrell, R.P.; Patrick, W.H., (1978). Chemical and microbiological properties of anaerobic soils and sediments. In: Hook, D.D.; Crawford, R.M.M., eds. *Plant life in anaerobic environments*. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science: 375–423.
18. Gill S. & Frank C. Spurlock F., Goh K., Ganapathy C. (2007). Vegetated ditches as a management practice in irrigated alfalfa. *Environmental Monitoring Assessment* Volume 144, 261–267 DOI 10.1007/s10661-007-9988-4.
19. Gilliam J.W, Skaggs R.W., and Weed B.S., (1979). Drainage control to diminish nitrate loss from agricultural fields. *Journal of Environmental Quality* Volume 8, 137-142.
20. Hutchinson G. E., (1975). *A treatise on limnology*, v.3. *Limnological Botany*. John Wiley & Sons, New York, London, Sydney, and Toronto.
21. Kadlec, R.H., (1999). Chemical, physical and biological cycles in treatment wetlands. *Water Science and Technology* Volume 40(3), 37-44.
22. Kadlec, R.H., Knight, R.L, 1996. *Treatment Wetlands*. CRC Press, LLC, Lewis Pubs, New York.
23. Kröger R, Holland MM, Moore MT, Cooper CM (2007a) Hydrological variability and agricultural drainage ditch inorganic nitrogen reduction capacity. *Journal of Environmental Quality* 36,1646–1652. doi:10.2134/jeq2006. 0506.

24. Kröger R., Holland M.M, Moore M.T, Cooper CM (2007b) Plant senescence: a mechanism for nutrient release in temperate agricultural wetlands. *Environmental Pollution* Volume 146, 114–119 doi:10.1016/j.envpol.2006. 06.005.
25. Lecce SA, Pease PP, Gares PA, Wang J (2006) Seasonal controls on sediment delivery in a small coastal plain watershed, North Carolina, USA. *Geomorphology* Volume 73:246–260. doi:10.1016/j. geomorph.2005.05.017.
26. Leng X., Musters C.J.M, de Snoo G.R (2011). Effects of mowing date on the opportunities of seed dispersal of ditch bank plant species under different management regimes. *Journal for Nature Conservation* Volume 19, 166–174. doi:10.1016/j.jnc.2010.11.003.
27. Levavasseur, F., Bailly, J.S., Lagacherie, P., Colin, F., Rabotin, M., (2012). Simulating the effects of spatial configurations of agricultural ditch drainage networks on surface runoff from agricultural catchments. *Hydrological Processes*. Volume 16 (22), 3393–3404, <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8422>.
28. Lowrance R., Leonard R. Sheridan J. (1985). Managing riparian ecosystems to control nonpoint pollution. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 40 (1), 87-91.
29. Margoum C., Laillet B., Dramais G. and Gouy V., (2003) Retention de produits phytosanitaires dans les fosses de connexion parcelle-cours d'eau. *Revue des Sciences de l'Eau* Volume 16, 389-405.
30. Mitsch W.J. and Gosselink J.G., 1993. *Wetlands*. Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
31. Moore T., Kroger R., Locke M.A., Cullum R., Steinriede R., Testa S., Lizotte R., Briant C., Cooper C, (2010). Nutrient mitigation capacity Mississippi Delta, USA drainage ditches. *Environmental Pollution* Volume 158, 175-184.
32. Neal C. and Heathwaite A.L. (2005). Nutrient mobility within river basins: A European perspective. *Journal of Hydrology* Volume 304, 477-490.
33. Needelman R.A., Kleinman P.J.A., Strock J.J and Allen A.L., (2007). Managing agricultural drainage ditches for water quality protection. An overview. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 62(4), 171-178.
34. Neumann M., Bredeweg B. (2004). A qualitative model of the nutrient spiraling in lotic ecosystems to support decision makers for river management. In J. de Kleer & K. D. Forbus (Eds.), *Proceedings of QR 2004, the 18th International Workshop on Qualitative Reasoning*, August 2–4. Evanston, IL: Northwestern University.

35. Novotny, V., Olem, H., 1994. Water quality: prevention, identification and management of diffuse pollution. Van Nostrand Reinhold. New York
36. Osborne L.L. et al, 1993. Riparian vegetated buffer strips in water quality restoration and stream management. *Freshwater Biology* Volume 29, 243-258. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1993.tb00761.x>.
37. Pappas, E.A., and D.R. Smith. (2007). Effects of dredging an agricultural drainage ditch on water colul1U1 herbicide concentration, as predicted by fluvarium techniques. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 62(4), 262-268.
38. Passeport E, Benoit P, Bergheaud V, Coquet Y, Tournebize J (2011a) Selected pesticides adsorption and desorption in substrates from artificial wetland and forest buffer. *Environmental Toxicology and Chemistry SETAC* 30, 1669–1676. doi:10.1002/etc.554.
39. Passeport E, Benoit P, Bergheaud V, Coquet Y, Tournebize J (2011b) Epoxiconazole degradation from artificial wetland and forest buffer substrates under flooded conditions. *Chemical Engineering Journal* Volume 173(3), 760–765.doi: 10.1016/j.cej.2011.08.044.
40. Peeters Edwin T. H. M, van Zuidam Jeroen P., van Zuidam Bastiaan G., Van Nes, Sarian Kosten Egbert H., Heuts Peter G. M., Roijackers Rudi M. M, Netten Jordie J. C., Scheffer Marten (2013). Changing weather conditions and floating plants in temperate drainage ditches. *Journal of Applied Ecology* Volume 50, 585–593.
41. Penn, C.J., R.B. Bryant, I'J.A. Kleinman, and A.L. Allen. (2007). Removing dissolved phosphorus from drainage ditch water with phosphorus sorbing materials. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 62(4), 269-276.
42. Portielje R. and Roijackers R.M.M. (1995). Primary succession of aquatic macrophytes in experimental ditches in relation to nutrient input. *Aquatic Botany* Volume 50(2), 127-140.
43. Powell, G.E., A.D. Ward, D.E. Mecklenburg, and A.D. Jayakaran, (2007a). Two-Stage Channel Systems: Part 1, A Practical Approach for Sizing Agricultural Ditches. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 62, 277-286.
44. Powell, G.E., A.D. Ward, D.E. Mecklenburg, J. Draper, and W. Word, (2007b). Two-Stage Channel Systems: Part 2, Case Studies. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 62, 286-296.
45. 45.Reddy K.R., Patrick W.H., (1984). Nitrogen transformations and loss in flooded soil and sediments. *CRC Critical Reviews in Environmental Control* Volume 13(4), 273-309.

<https://>

doi.org/10.1080/10643388409381709.

46. Reitsema R., Meire P., Schoelynck (2018). The future of freshwater macrophytes in a changing World: Dissolved Organic Carbon Quantity and Quality and its Interactions with Macrophytes. *Frontiers in Plant Science* Volume 9, Article 629.
47. Rejmankova E. (2011). The role of aquatic macrophytes in wetland ecosystem. *Journal of Ecology and Field Biology* Volume 34(4), 333-345.
48. Schaller J.L., Royer T.V., David M.B. & Tank J.L. (2004). Denitrification associated with plants and sediments in an agricultural stream. *Journal of the North American Benthological Society* Volume 23, 667–676.
49. Sharpley A.N, Krogstad T., Kleinman P.j.A., Haggard B., Shigaki F., Saporito L.S. (2007). Managing natural processes in drainage ditches for nonpoint source phosphorus control. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 62(4), 197-206.
50. Skaggs, R.W. and Gilliam, J.W. (1981). Effect of Drainage System-Design and Operation on Nitrate Transport. *Transactions of the ASAE* Volume 24(4), 929-934.
51. Smith D.R, Pappas E.A (2007). Effect of ditch dredging on the fate of nutrients in deep drainage ditches of the Midwestern United States. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 62, 252–261.
52. Strock J.S., Dell C.J., Schmidt J. (2007). Managing Natural Processes in Drainage Ditches for Nonpoint Source Nitrogen Control. *Journal of Soil and Water Conservation* Volume 62(4), 188-196.
53. Tang X, Zhu B, Katou H (2012). A review of rapid transport of pesticides from sloping farmland to surface waters: processes and mitigation strategies. *Journal of Environmental Sciences* 24, 351–361. doi:10.1016/S1001-0742(11) 60753-5.
54. Twisk W., Noordervliet M.A.W., ter Keurs W.J. (2003). The nature value of the ditch vegetation in peat areas in relation to farm management. *Aquatic Ecology* Volume 37(2), 191-209.
55. Van Zuidam J. (2013). Macrophytes in drainage ditches. Functioning and perspectives for recovery. Thesis Wageningen University, Wageningen, NL ISBN 978-94-6173-589-8Van
56. Van Dijk W.F.A., Van Ruijven J., Berendse F., de Snoo GR., (2014). The effectiveness of ditch banks as dispersal corridor for plants in agricultural landscapes depends on species' dispersal traits. *Biological Conservation* Volume 171, 91–98.

doi:10.1016/j.biocon.2014.01.

006.

57. Veeningen R., (1982). Temporal and spatial variations of dissolved oxygen concentrations in some Dutch polder ditches. *Hydrobiologia* Volume 95, 369-383.
58. Verdonschot R., Keizer-Vlek H., Verdonschot P., (2011) Biodiversity value of agricultural drainage ditches: a comparative analysis of the aquatic invertebrate fauna of ditches and small lakes. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* Volume 21, 715–727.
59. Verdonschot R., (2012). Drainage ditches, biodiversity hotspots for aquatic invertebrates. Defining and assessing the ecological status of a man –made ecosystem based on macroinvertebrates. Dissertation of WU staff at other university Radboud University Nijmegen. Promotor(en): Henk Siepel. Wageningen: Alterra ISBN 9789032703974 – 230
60. Xu C., Liu W., Cheng G.D., (2008). Burned rice straw reduces the availability of cloma zone to barnyardgrass. *Science of the Total Environment* Volume 392(2-3), 284-289. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.11.03>
61. Yang Y., Sheng G., (2003). Enhanced pesticide sorption by soils containing particulate matter from crop residue burns. *Environmental Science and Technology* Volume 37, 3635–3639. doi:10.1021/es034006a.
62. Zhang Z.Y, Kong L.L, Zhu L., Mwiya R.M., (2013). Effect of drainage ditch layout on nitrogen loss by runoff from an agricultural watershed. *Pedosphere* Volume 23(2), 256–264. doi:10.1016/S1002-0160(13)60014-4.

Ελληνική Βιβλιογραφία

1. Αντωνόπουλος Β.Ζ. (2010). Υδραυλική περιβάλλοντος και ποιότητα επιφανειακών υδάτων. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη, σελ. 505
2. Αντωνόπουλος Β.Ζ. (2019). Περιβαλλοντική υδρολογία λιμνών και υγροτόπων. Ελληνικά Ακαδημαϊκά Συγγράμματα και Βοηθήματα .
3. Γεράκης Π.Α. και Τσιούρης Σ.Ε. (2010). Υγρότοποι και Γεωργία. Λειτουργίες, Αξίες, Διατήρηση και Διαχείριση Υγροτόπων, Σχέσεις με Γεωργικά Οικοσυστήματα. Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία. Θεσσαλονίκη. 311 σελ. (κωδικός Εύδοξος: 2771)
4. Δασενάκης Μάνος. Χημική Ωκεανογραφία Ενότητα 1 Μικροθρεπτικά συστατικά https://opencourses.uoa.gr/modules/document/file.php/NOC83/Διδακτικό%20πακέτο/Παρουσιάσεις/PDF/XOK%202015_10_NUTRIENTS.pdf (πρόσβαση 19-12-2019).

5. Δημόπουλος, Π. και Ι. Μπαζός. 2012. Φυτοκοινωνιολογική έρευνα του υγροτοπικού συμπλέγματος του Οικολογικού Πάρκου Πάρνωννα και Υγροτόπου Μουστού και της ευρύτερης περιοχής του. Μουσείο Γουλανδρή Φυσικής Ιστορίας / Ελληνικό Κέντρο Βιοτόπων Υγροτόπων (ΕΚΒΥ). 79 σελ.
6. Ζαννετίδη Μαρία (2006). Προστασία και ανάπτυξη Αμβρακικού κόλπου. Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό ίδρυμα Ηπείρου, Σχολή Διοίκησης και Οικονομίας, Τμήμα Λογιστικής.
7. Λαλιώτη Αικατερίνη, (2011). Δημιουργία υγροτόπων και εγκατάσταση υδροχαρούς βλάστησης σε εκβολικά σημεία των κυριότερων χειμάρρων της Λίμνης Σμοκόβου. Μεταπτυχιακή εργασία. Εργαστήριο Ιχθυολογίας-Υδροβιολογίας, Τμήμα Γεωπονίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
8. Μαρδίρης Θ., Μ.Εdu., Υπεύθυνος Λειτουργίας ΚΠΕ Καστοριάς, εκπαιδευτικός κλάδου ΠΕ04.04, Μαγδαληνή Γρηγορίου, Μ.Sc., μέλος της παιδαγωγικής ομάδας του ΚΠΕ Καστοριάς, εκπαιδευτικός κλάδου ΠΕ04.04 Αθανάσιος Ευαγγέλου, μέλος της παιδαγωγικής ομάδας του ΚΠΕ Καστοριάς, εκπαιδευτικός κλάδου ΠΕ19 Προγράμματα ανοικτών Περιβαλλοντικών τάξεων «ΚΑΛΛΙΣΤΩ» ΠΕΡΙΟΧΕΣ ΜΕ ΙΔΙΑΙΤΕΡΗ ΒΙΟΠΟΙΚΙΛΟΤΗΤΑ (ΧΛΩΡΙΔΑ – ΠΑΝΙΔΑ).
9. Μπούσμπουρας Δ. (1999). Επιπτώσεις της Ρύθμισης Ροής των Υδάτων και των Έργων στους Ποταμούς και το Αποστραγγιστικό Δίκτυο. σελ 25-41 στο: Χατζηλάκου Δ. (επιμέλεια) 1999. Επιπτώσεις έργων και δραστηριοτήτων στα πουλιά και τους βιοτόπους τους. Διαχείριση βιοτόπων της ορνιθοπανίδας. Συνοπτικός οδηγός Αθήνα. Ελληνική Ορνιθολογική Εταιρεία, ΥΠΕΧΩΔΕ.
10. Παπαστεργιάδου Ε. (1990). Φυτοκοινωνιολογική και Οικολογική Μελέτη των Υδρόβιων Μακροφύτων (Υδρόφυτων), στη Βόρεια Ελλάδα. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Βιολογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
11. Πισσάκη Ελισάβετ και Τούντας Δημήτριος (2007). Υδρόβια Καλλωπιστικά Φυτά της Μεσογείου ΑΤΕΙ Μεσολογίου Τμήμα Θερμοκηπιακών Καλλιέργειών και Ανθοκομίας Σ.Τ.Ε.Γ. Πτυχιακή Εργασία.
12. Χαλκιάς Νικόλος (2008). Διαχείριση αποστραγγιστικών καναλιών ως τεχνολογία μείωσης αγρορρυπαντών. Διπλωματική εργασία, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πολυτεχνείο Κρήτης.

