

# ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΜΕΝΩΝ ΥΓΡΟΤΟΠΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΡΟΗΣ ΗΜΙ-ΠΙΛΟΤΙΚΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

**Χ.Α. Προχάσκα και Α.Ι. Ζουμπούλης**

Τομέας Χημικής Τεχνολογίας και Βιομηχανικής Χημείας, Εργαστήριο Γενικής και  
Ανόργανης Χημικής Τεχνολογίας, Τμήμα Χημείας, ΑΠΘ, 54124 Θεσσαλονίκη

Email: [prohaska@auth.gr](mailto:prohaska@auth.gr)

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται αποτελέσματα έρευνας που διενεργήθηκε σε κατασκευασμένους υγρότοπους ημι-πilotικής κλίμακας κατακόρυφης ροής με σκοπό την μελέτη της απόδοσης των συστημάτων αυτών στην απομάκρυνση συνηθισμένων ρύπων των αστικών υγρών αποβλήτων (COD, TN, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P), υπό την επίδραση διάφορων λειτουργικών παραμέτρων (είδος υποστρώματος, όγκου και συχνότητας φόρτισης) καθώς επίσης και υπό την επίδραση των (ιδιαιτέρων) ελληνικών κλιματολογικών συνθηκών, χρησιμοποιώντας για την φόρτισή τους προσομοιωμένο, μέσης επιβάρυνσης αστικό υγρό απόβλητο. Τα οκτώ συστήματα των υγροτόπων (ανά δύο πανομοιότυπα για λόγους ελέγχου της επαναληψιμότητας) μελετήθηκαν κατά την διάρκεια των εποχών ενός έτους και από τα αποτελέσματα της έρευνας προέκυψε πως οι υγρότοποι απομάκρυναν ικανοποιητικά το οργανικό φορτίο, με ποσοστό απομάκρυνσης (κατά μέσο όρο) μεταξύ 86-95%.

*Λέξεις Κλειδιά: υγρότοποι κατακόρυφης ροής, νιτρικά, φωσφορικά, δολομίτης.*

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατασκευή και λειτουργία των συμβατικών έργων επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων (βιολογικών καθαρισμών) μικρής κλίμακας είναι αρκετά δύσκολη, εξαιτίας του σχετικά υψηλού κόστους κατασκευής, λειτουργίας και διαχείρισης των έργων αυτών. Η τεχνολογία των φυσικών συστημάτων επεξεργασίας, κατηγορία των οποίων είναι και οι κατασκευασμένοι υγρότοποι κατακόρυφης ροής, αποτελεί μια εναλλακτική λύση που μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία για την επεξεργασία των αστικών υγρών αποβλήτων μικρών οικισμών (500–5.000 ι.π.), αλλά και επικουρικά, τόσο σε μονάδες μεσαίας (5.000–20.000 ι.π.), όσο και μεγάλης δυναμικότητας (>20.000 ι.π.), για την επεξεργασία της υπερβάλλουσας παροχής σε περιπτώσεις έντονων βροχοπτώσεων (Gearheart, 1992, Green and Upton, 1995, Griffin and Pamplin, 1998, Ayaz and Akca, 2001). Στα συστήματα αυτά, η επεξεργασία του υγρού αποβλήτου διενεργείται κυρίως με φυσικά μέσα και διεργασίες, όπως είναι οι φυσικές, χημικές, βιολογικές ή συνηθέστερα κατάλληλος συνδυασμό τους, που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα έδαφος-φυτό-απόβλητο.

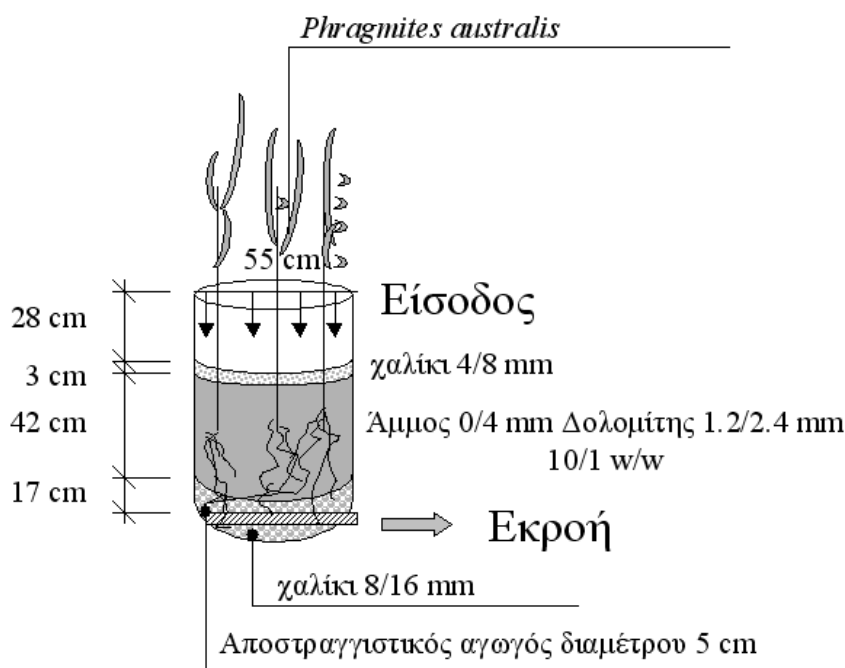
Το ενδιαφέρον για τον τύπο των κατασκευασμένων υγροτόπων κατακόρυφης ροής αναζωπυρώθηκε κατά την τελευταία δεκαετία λόγω της ικανότητάς τους να προκαλούν νιτροποίηση σε ικανοποιητικό βαθμό, αλλά και της μικρότερης έκτασης που απαιτείται για τη λειτουργία τους (1-2 m<sup>2</sup>/ι.π.) σε σύγκριση με τα αντίστοιχα συστήματα οριζόντιας ροής (6-7 m<sup>2</sup>/ι.π.) (Cooper *et al.* 1997, Morris and Herbert, 1997, Luederitz *et al.* 2001). Συστήματα κατασκευασμένων υγροτόπων κατακόρυφης ροής υπάρχουν και στην χώρα μας. Η μεγαλύτερη εγκατάσταση επεξεργασίας λυμάτων με τεχνητούς υγροτόπους κατακόρυφης ροής βρίσκεται στην Νέα Μάδυτο (νότια της λίμνης Βόλβης) στο νομό Θεσσαλονίκης και έχει σχεδιαστεί ώστε να εξυπηρετεί 3.500 κατοίκους. Σύστημα

κατασκευασμένων υγροτόπων κατακόρυφης ροής λειτουργεί επίσης στον οικισμό Σαρανταπόρου Λαρίσης, δυναμικότητας 1000 ι.π.

## 2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Για τους σκοπούς της έρευνας κατασκευάστηκαν οκτώ υγρότοποι σε δοχεία πολυαιθυλενίου. Οι οκτώ υγρότοποι ήταν ανά δύο πανομοιότυποι (A/B), για λόγους ελέγχου της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων. Οι διαστάσεις και η διαστρωμάτωση των υλικών στο εσωτερικό των υγροτόπων παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Στους 4 από τους 8 (δηλ. στους 2A/2B, 4A/4B) μετά το στρώμα του χαλικιού τοποθετήθηκε άμμος Αξιού (κύριο στρώμα διήθησης). Ενώ στους υπόλοιπους 4 (1A/1B, 3A/3B) τοποθετήθηκε μίγμα από άμμο και δολομίτη ( $\text{CaCO}_3$   $\text{MgCO}_3$ , διαμέτρου 1.2-4 mm) σε αναλογία 10:1 (w/w

Οι υγρότοποι τροφοδοτήθηκαν με συνθετικό υγρό απόβλητο για λόγους ευκολίας, υγιεινής και ασφάλειας. Η εφαρμογή του αποβλήτου γίνονταν επιφανειακά σε κάθε υγρότοπο, σε μία δόση (batch) μέσω ενός διάτρητου διασπορέα.



**Σχήμα 1.** Διαστάσεις και διαστρωμάτωση των κατασκευασμένων υγροτόπων κατακόρυφης ροής.

Οι υγρότοποι εξετάστηκαν κατά τη διάρκεια των εποχών ενός πλήρους έτους και υπό την επίδραση 4 διαφορετικών συνδυασμών υδραυλικής φόρτισης (δηλ. διαφορετικού όγκου εφαρμοζόμενου υγρού αποβλήτου, 20 και 40 L) και συχνότητας φόρτισης (δηλ. συχνότητα εφαρμογής του υγρού αποβλήτου, 2 και 3 φορές/εβδομάδα) (Πίνακας 1) με βάση έναν split-plot πειραματικό σχεδιασμό.

**Πίνακας 1.** Λειτουργικές συνθήκες των κατασκευασμένων υγροτόπων κατακόρυφης ροής. Φόρτιση ( $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{εβδομάδα}$ )

Είδος κύριου υποστρώματος	Υγρότοπος	Φθινόπωρο	Χειμώνας	Άνοιξη	Καλοκαίρι
Άμμος	1A/1B	0.33	0.16	0.25	0.5
	3A/3B	0.5	0.25	0.16	0.33
Μίγμα άμμου-δολομίτη 10/1 w/w	2A/2B	0.16	0.5	0.33	0.25
	4A/4B	0.25	0.33	0.5	0.16

### 3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

#### 3.1. Φυσικοχημικές μεταβολές

Μεταξύ των επαναληπτικών υγροτόπων παρουσιάζονται μικρές μόνον διαφοροποιήσεις στις τιμές των φυσικοχημικών παραμέτρων, εξαιτίας της διαφορετικής ανάπτυξη του ριζικού συστήματος που διαφοροποιεί και τον τρόπο ροής του υγρού αποβλήτου από το εδαφικό σώμα των υγροτόπων. Για τον λόγο αυτό στα Σχήματα 2 έως 5 παρουσιάζονται αποτελέσματα που αφορούν σε έναν από τους δύο επαναληπτικούς υγροτόπους. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται η μεταβολή της συγκέντρωσης (κατά Μ.Ο) του COD, του TN, του NO<sub>3</sub>-N και των PO<sub>4</sub>-P στην έξοδο των υγροτόπων με κύριο υπόστρωμα άμμο και με κύριο υπόστρωμα μίγμα άμμου και δολομίτη, σε συνάρτηση με την εποχή λειτουργίας.

Οι υγροτόποι απομάκρυναν ικανοποιητικά το οργανικό φορτίο, όπως αυτό εκφράζεται με τη μείωση της συγκέντρωσης του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD). Το ποσοστό απομάκρυνσης του COD (κατά μέσο όρο) κυμάνθηκε μεταξύ 86-95%.

Η μεταβολή του περιεχόμενου αζώτου γίνεται με τη διεργασία της νιτροποίησης. Το μεγαλύτερο ποσοστό του αζώτου μετατρέπεται σε NO<sub>3</sub>-N. Η μείωση του ολικού αζώτου ήταν μικρή της τάξεως του 10-23% (κατά μέσο όρο) και οφείλεται κυρίως στην πρόσληψη του από τα φυτά, στην (μικρή) προσρόφηση στο υπόστρωμα των υγροτόπων, καθώς και σε μερική (μικρής έκτασης) εξαέρωση της περιεχόμενης στο εφαρμοζόμενο αρχικό υγρό απόβλητο αμμωνίας.

Η απομάκρυνση των P-PO<sub>4</sub>, ενώ αρχικά ήταν ιδιαίτερα υψηλή 80-97% κατά μέσο όρο την πρώτη περίοδο λειτουργίας (φθινόπωρο), ελαττώθηκε βαθμιαία και στην τελευταία περίοδο λειτουργίας κυμάνθηκε (κατά μέσο όρο) μεταξύ 35-51% εξαιτίας του κορεσμού του υποστρώματος, με αποτέλεσμα ο συνολική εκατοστιαία απομάκρυνση να κυμαίνεται μεταξύ 48-61%.

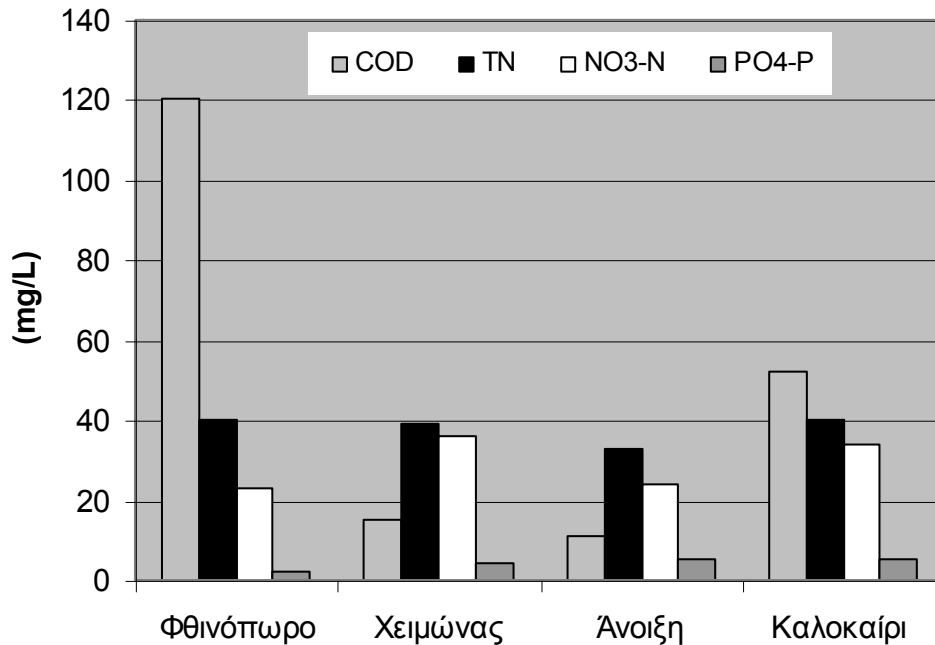
#### 3.2. Εδαφικές αναλύσεις

Οι εδαφικές αναλύσεις που έγιναν σε δείγματα εδάφους από τρία διαφορετικά βάθη του κύριου υποστρώματος, στο τέλος κάθε περιόδου λειτουργίας, με σκοπό τη διερεύνηση του τρόπου συσσώρευσης των φωσφορικών στο υπόστρωμα των υγροτόπων, έδειξαν ότι η απομάκρυνση των φωσφορικών οφείλεται κυρίως στην προσρόφηση τους σε οξείδια του ασβεστίου, καθώς και σε άμορφα ή και κρυσταλλικά οξείδια του σιδήρου (κυρίως) και του αργιλίου (Προχάσκα, 2005)

Η εξωτερική κατάσταση των υγροτόπων κατά το μεγαλύτερο μέρος της λειτουργίας τους ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητική, ενώ δεν παρατηρήθηκαν δυσάρεστες οσμές, που σχετίζονται με την (ενδεχόμενη) ανάπτυξη αναερόβιων συνθηκών λειτουργίας.

#### 3.3. Υδραυλική αγωγιμότητα

Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας των υγροτόπων κυμάνθηκαν μεταξύ  $1.5 \cdot 10^{-4}$ - $6 \cdot 10^{-4}$  m/s. Οι τιμές αυτές είναι μεταξύ των ορίων των εδαφών ταχείας υδατοδιαπερατότητας, ή μεγάλης υδραυλικής αγωγιμότητας ( $13.6 \cdot 10^{-5}$ - $13.6 \cdot 10^{-4}$  m/s). Παρατηρήθηκε ωστόσο βαθμιαία ελάττωση της υδραυλικής αγωγιμότητας με την αύξηση των περιόδων λειτουργίας. Ενώ, η διακοπή της τροφοδοσίας για μία και πλέον εβδομάδα, όπως συνέβη για παράδειγμα την τελευταία περίοδο λειτουργίας, επανέφερε την υδραυλική αγωγιμότητα των υγροτόπων περίπου στις αρχικές τιμές, δηλ. το σύστημα ανέκαμψε όσον αφορά τη συγκεκριμένη παράμετρο.



**Σχήμα 2.** Μεταβολή της συγκέντρωσης (κατά Μ.Ο) του COD, του TN, του NO<sub>3</sub>-N και των PO<sub>4</sub>-P στην έξοδο του υγρότοπου 1A με κύριο υπόστρωμα άμμο σε συνάρτηση με την εποχή λειτουργίας.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ελήφθησαν εφαρμόζοντας στους οκτώ υγρότοπους συνδυασμό τεσσάρων λειτουργικών παραμέτρων (είδος υποστρώματος, εποχή, όγκος εφαρμοζόμενου υγρού αποβλήτου και συχνότητα εφαρμογής υγρού αποβλήτου). Η στατιστική ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) που διενεργήθηκε για την εξέταση της σημαντικότητας της επίδρασης των λειτουργικών παραμέτρων καθώς και των αλληλεπιδράσεών τους στα αποτελέσματα απομάκρυνσης του COD, του NO<sub>3</sub>-N και των PO<sub>4</sub>-P έδειξε πως υπάρχει σημαντική επίδραση της εποχής ( $F_{3,13} = 4.92$ ,  $p=0.02$ ), του όγκου του υγρού αποβλήτου ( $F_{1,13}=60.84$ ,  $p<0.001$ ) και της αλληλεπίδρασης υποστρώματος\*όγκου\*συχνότητας ( $F_{1,13} = 6.93$ ,  $p = 0.03$ ) στα αποτελέσματα της συγκέντρωσης του COD στην έξοδο των υγροτόπων. Ότι υπάρχει σημαντική επίδραση της εποχής ( $F_{3,13} = 10.48$ ,  $p=0.0009$ ) και του εφαρμοζόμενου όγκου του υγρού αποβλήτου ( $F_{1,13} = 60.84$ ,  $p=0.008$ ) στα αποτελέσματα του NO<sub>3</sub>-N. Ότι υπάρχει σημαντική επίδραση της εποχής ( $F_{3,13} = 73.34$ ,  $p<0.001$ ), της συχνότητας εφαρμογής του υγρού αποβλήτου ( $F_{1,13}=18.30$ ,  $p=0.0009$ ), της αλληλεπίδρασης του εφαρμοζόμενου όγκου του υγρού αποβλήτου με τη συχνότητα ( $F_{1,13}=45.89$ ,  $p<0.001$ ), καθώς και της αλληλεπίδρασης του υποστρώματος με τη συχνότητα ( $F_{1,13}=56.05$ ,  $p<0.001$ ) στα αποτελέσματα, των PO<sub>4</sub>-P.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι υγρότοποι απομάκρυναν ικανοποιητικά το οργανικό φορτίο, όπως αυτό εκφράζεται με την ελάττωση της συγκέντρωσης του χημικά απαιτούμενου οξυγόνου (COD). Οι μέσοι όροι των τιμών της συγκέντρωσης του COD ήταν μικρότεροι από το όριο της οδηγίας 91/271/ΕΕ, που αφορά την ποιότητα των επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων (120 mg/L).

Αντιθέτως οι Μ.Ο. των τιμών της συγκέντρωσης του TN και των P-PO<sub>4</sub> ήταν μεγαλύτεροι από τα όρια των 15 και 2 mg/L αντίστοιχα, που προβλέπει η οδηγία 91/271/ΕΕ, για μονάδες όμως που εξυπηρετούν άνω των 10.000 κατοίκων. Ενώ τόσο η οδηγία όσο και οι υπουργικές αποφάσεις που την ενσωμάτωσαν στο εθνικό δίκαιο (ΚΥΑ 5673/400/97) δεν επιβάλλουν όρια εκροής για φώσφορο και άζωτο για εγκαταστάσεις που εξυπηρετούν λιγότερους από 10.000 κατοίκους, όπου και προτείνεται η εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου επεξεργασίας.

Η απόδοση των συστημάτων ως προς την απομάκρυνση του COD και των P-PO<sub>4</sub> ήταν μεγαλύτερη όταν αυτά δέχονταν τη μικρότερη από τις εφαρμοζόμενες φορτίσεις. Η μεγαλύτερη εκατοστιαία απομάκρυνση του COD στην έξοδο των υγροτόπων παρατηρήθηκε κατά το καλοκαίρι και αποδίδεται στην ανάπτυξη μεγαλύτερου αριθμού μικροβιακού πληθυσμού στο υπόστρωμα των υγροτόπων. Την ίδια περίοδο και για τους ίδιους λόγους παρατηρήθηκε και η μεγαλύτερη (κατά μέσο όρο) συγκέντρωση των NO<sub>3</sub>-N στην έξοδο των υγροτόπων.

Η στατιστική ανάλυση έδειξε ότι το είδος του υποστρώματος δεν βρέθηκε να έχει συνολικά σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα απομάκρυνσης και των τριών ρύπων (COD, NO<sub>3</sub>-N και PO<sub>4</sub>-P). Ωστόσο, η μεγαλύτερη εκατοστιαία απομάκρυνση του COD και των P-PO<sub>4</sub> στην περίπτωση των υγροτόπων με υπόστρωμα μίγμα άμμου και δολομίτη, καθώς και το γεγονός ότι η 10/1 κατά βάρος αναλογία άμμου-δολομίτη που επιλέχθηκε να εξεταστεί δεν μετέβαλλε την τιμή του pH στην έξοδο των υγροτόπων προς ισχυρά αλκαλικές τιμές και δεν έδειξε να επηρεάζει αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών, υποδεικνύουν πως η αύξηση της ποσότητας του δολομίτη στο υπόστρωμα των υγροτόπων μπορεί να εξεταστεί περαιτέρω. Βέβαια επισημαίνεται πως τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν έρευνα που διενεργήθηκε σε κατασκευασμένους υγροτόπους ημι-πιλοτικής κλίμακας, χρησιμοποιώντας μόνο συνθετικό υγρό απόβλητο και για τον λόγο αυτό η διεξαγωγή πειραμάτων με πραγματικό υγρό απόβλητο είναι απαραίτητη για την ασφαλή μεταφορά της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε πλήρη κλίμακα.

### **Ευχαριστίες**

Η παρούσα εργασία έγινε στα πλαίσια του Ερευνητικού Προγράμματος με τίτλο Κατάλληλες Τεχνολογίες διαχειριστικής αντιμετώπισης λειτουργικών προβλημάτων σε βιολογικούς καθαρισμούς» που χρηματοδοτήθηκε από την ΓΓΕΤ και την εταιρία «Θεμελιοδομή Α.Ε.» στο γενικότερο πλαίσιο του Προγράμματος ΠΕΝΕΔ, 2001.

### **5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- ΚΥΑ 5673/400/97 (ΦΕΚ 192/Β/14-3-97) *Μέτρα και όροι για την επεξεργασία αστικών λυμάτων.*
- Προχάσκα Χ., 2005. *Μελέτη της επεξεργασίας αστικών υγρών αποβλήτων με χρήση φυσικών συστημάτων.* Διδακτορική Διατριβή. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Χημείας, Εργ. Γενικής και Ανόργανης Χημικής Τεχνολογίας.
- Ayaza S. C. A. and Akca L., 2001. Treatment of wastewater by natural systems, *Environ. Int.*, 26: 189 - 195.
- Cooper P., Smith M. and Maynard H., 1997. The design and performance of a nitrifying vertical-flow reed bed treatment system. *Water Sci. Technol.*, 35: 215-221.
- Gearheart R., 1992. Use of constructed wetlands to treat domestic and wastewater, City of Arcata, California. *Water Sci. Technol.*, 26: 1625-1637.
- Green M. B. and Upton J., 1995. Constructed reed beds: Appropriate technology for small communities. *Water Sci. Technol.*, 32: 339-348.
- Griffin P. and Pamplin C., 1998. The advantages of a constructed reed bed based strategy for small sewage treatment works. *Water Sci. Technol.*, 38: 143-150.
- Morris M. and Herbert R., 1997. The design and performance of a vertical flow reed bed for the treatment of high ammonia, low suspended solids organic effluents. *Water Sci. Technol.*, 35: 197-204.

- Luederitz V., Eckert E., Lange-Weber M., Lange A. and Gersberg R.M., 2001. Nutrient removal efficiency and resource economics of vertical flow and horizontal flow constructed wetlands. *Ecol. Eng.*, 18: 157-171.
- OECD, 1996. *Guideline for Testing of Chemicals Simulation Test – Aerobic Sewage Treatment, Technical Report*, Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris, France.