



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Μ.Π.Σ :ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΔΙΑ)

ΤΜΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

Σύγχρονες τεχνολογίες επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αστικών και βιομηχανικών αποβλήτων, με έμφαση στη χρήση τους για την άρδευση καλλιεργειών στην Ελλάδα

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ Α: ΜΙΧΑΛΗΣ ΚΟΡΝΑΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ Β: ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΠΑΠΑΪΩΑΝΝΟΥ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ

ΓΙΩΡΓΟΣ ΑΛΕΞΑΚΗΣ

A.M:142373

e-mail:std142373@ac.eap.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται να πραγματοποιηθεί μία ανασκόπηση των τεχνολογιών που αφορούν την επαναχρησιμοποίηση του νερού που προέρχεται από την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού θεωρείται ως μία από τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές προκλήσεις του 21ου αιώνα, αφού οι υδάτινοι πόροι καλής ποιότητας τείνουν να περιορίζονται, λόγω και της κλιματικής αλλαγής και της πληθυσμιακής αύξησης. Βασικοί προβληματισμοί αναφορικά με την επαναχρησιμοποίηση του νερού αποτελούν η εγκατάσταση αξιόπιστων συστημάτων επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, ώστε να επιτευχθούν οι αυστηρές απαιτήσεις που αφορούν την ποιότητα του επαναχρησιμοποιούμενου νερού, η προστασία της δημόσιας υγείας και η επίτευξη της αποδοχής από το κοινό. Στην παρούσα εργασία περιγράφηκε ένα πλήθος τεχνολογιών, οι περισσότερες από τις οποίες εμπίπτουν στις διεργασίες προχωρημένης επεξεργασίας των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων. Συστήματα διήθησης και τεχνολογίες μεμβρανών, διεργασίες προχωρημένης οξειδωσης, συμπεριλαμβανομένης της οζόνωσης, της ακτινοβολίας UV και της καινοτόμου τεχνολογίας Electro-Fenton, βρίσκονται σε διαφορετικό βαθμό τεχνολογικής ωριμότητας. Πρωτοπόροι της επαναχρησιμοποίησης νερού αποτελούν οι ΗΠΑ και το Ισραήλ, ενώ, σε επίπεδο ΕΕ, πρωτοπόρο δράση αναπτύσσει η Ισπανία, με την Ελλάδα να υστερεί σε σημαντικό βαθμό στην υλοποίηση των υπό εξέταση συστημάτων. Παρά τα έργα που δρομολογούνται στην προσπάθεια βέλτιστης αξιοποίησης των υδάτινων πόρων, δεν έχουν επιτευχθεί έως τώρα ικανοποιητικά επίπεδα αναβάθμισης των συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και, ως εκ τούτου, ανάκτησης του νερού.

Λέξεις-κλειδιά: Επαναχρησιμοποίηση νερού, υγρά απόβλητα, κυκλική οικονομία, υδάτινοι πόροι

ABSTRACT

In the current Thesis a review is carried out of the technologies of water reuse derived from wastewater treatment. Water reuse is regarded as one of the greatest environmental challenges of the 21st century, as good quality water resources tend to be limited, due to both climate change and population growth. Key concerns regarding water reuse are the installation of reliable wastewater treatment systems, in order to achieve the strict requirements regarding the quality of reused water, the protection of public health and the achievement of public acceptance. A number of technologies were described, most of which fall under the advanced treatment processes of wastewater treatment plants. Filtration systems and membrane technologies, advanced oxidation processes including ozonation, UV radiation and the innovative Electro-Fenton technology are at varying degrees of technological maturity. Pioneers in water reuse include the USA and Israel, and, at the EU level, mainly Spain, with Greece significantly lagging behind in the implementation of the water reuse systems. Despite the projects launched in an effort to make the best use of water resources, satisfactory levels of upgrading of liquid waste treatment systems, and, therefore, of water recovery, have not yet been achieved.

Keywords: Waterreuse, wastewater, circular economy, water resources

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

| | |
|--|----|
| 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 7 |
| 2. ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ – ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ..... | 11 |
| 2.1. Κυκλική οικονομία | 11 |
| 2.2. Βιωσιμότητα της διαχείρισης των υγρών αποβλήτων | 13 |
| 3. ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ | 17 |
| 3.1. Σχετική νομοθεσία | 17 |
| 3.2. Άρδευση | 24 |
| 3.3. Παραγωγική διαδικασία | 29 |
| 3.5. Άλλες χρήσεις | 31 |
| 4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ..... | 34 |
| 4.1. Τεχνολογίες επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων..... | 34 |
| 4.1.1. Γενικές παρατηρήσεις | 34 |
| 4.1.2. Διήθηση..... | 35 |
| 4.1.3. Τεχνολογίες μεμβρανών..... | 38 |
| 4.1.4. Ηλεκτροδιάλυση | 41 |
| 4.1.5. Προσρόφηση..... | 43 |
| 4.1.6. Απογύμνωση – απόσταξη..... | 44 |
| 4.1.7. Τεχνολογίες ανταλλαγής ιόντων | 45 |
| 4.1.8. Διεργασίες προχωρημένης οξειδωσης | 46 |
| 4.1.9. Τεχνολογίες απολύμανσης..... | 52 |
| 4.1.10. Εναλλακτικές τεχνολογίες προχωρημένης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων..... | 53 |
| 4.2. Διεθνές επίπεδο | 56 |

| | |
|----------------------|----|
| 4.3. Ελλάδα..... | 60 |
| 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ..... | 64 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 66 |

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

| | |
|---|----|
| Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων που είναι δυνατόν να διατίθεται στη θαλάσσια περιοχή Κερατσινίου Πειραιώς | 14 |
| Πίνακας 3.1. Όρια περιορισμένης άρδευσης και βιομηχανικής χρήσης (νερού ψύξης μίας χρήσης) ως προς βασικές παραμέτρους, ελάχιστη επεξεργασία και συχνότητα δειγματοληψιών των επαναχρησιμοποιημένων αποβλήτων | 19 |
| Πίνακας 3.2. Όρια περιορισμένης άρδευσης και βιομηχανικής χρήσης (νερού ψύξης μίας χρήσης) ως προς τις συγκεντρώσεις των μετάλλων | 19 |
| Πίνακας 3.3. Εύρος παραμέτρων που επιδρούν στην αποτελεσματικότητα της άρδευσης με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα | 21 |
| Πίνακας 3.4. Κατηγορίες ποιότητας ανακτημένου νερού, επιτρεπόμενες γεωργικές χρήσεις και μέθοδοι άρδευσης | 23 |
| Πίνακας 3.5. Απαιτήσεις ποιότητας ανακτημένου νερού για άρδευση. | 24 |
| Πίνακας 3.6. Χαρακτηριστικά μεθόδων άρδευσης με χρήση επεξεργασμένων λυμάτων | 27 |
| Πίνακας 3.7. Ποσοστά ανάκτησης και ποσότητες υγρών αποβλήτων από τα Ελληνικά Πετρέλαια (στοιχεία 2018)..... | 30 |

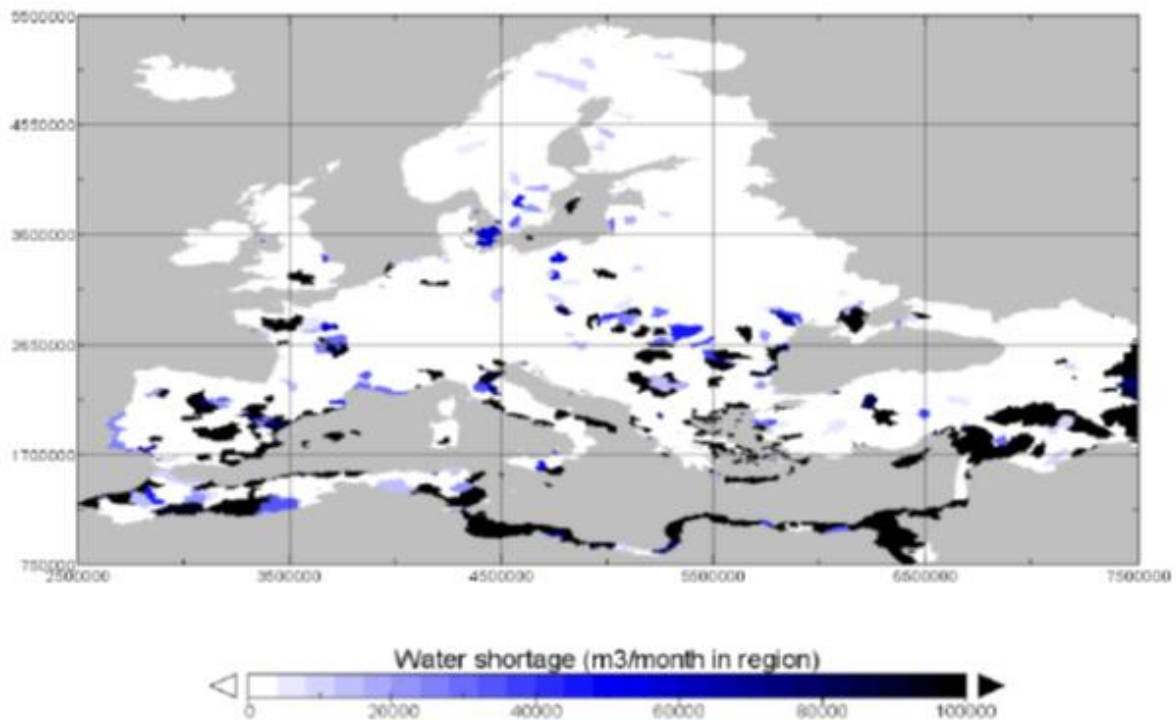
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1.1. Βαθμός έλλειψης νερού στην Ευρώπη, 1990-2014..... | 8 |
| Σχήμα 2.1. Σχηματική περιγραφή του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας | 12 |
| Σχήμα 2.2. Αποτύπωμα άνθρακα για διάφορα συστήματα διαχείρισης υγρών αποβλήτων..... | 15 |
| Σχήμα 2.3. Στάδια κύκλου ζωής που ερευνώνται κατά τη διενέργεια μίας LCA..... | 16 |

| | |
|--|----|
| Σχήμα 3.1. Παράμετροι του υδατικού ισοζυγίου | 29 |
| Σχήμα 3.2. Εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα με κατάκλιση | 31 |
| Σχήμα 3.3. Εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα με γεώτρηση | 32 |
| Σχήμα 4.1. Διήθηση χώρου με χρήση αμμόφιλτρου και τομή του συστήματος | 36 |
| Σχήμα 4.2. Φίλτροδίσκων | 38 |
| Σχήμα 4.3. Απλοποιημένο διάγραμμα ροής διεργασίας αντίστροφης ώσμωσης..... | 40 |
| Σχήμα 4.4. Αρχή λειτουργίας διάταξης ηλεκτροδιαπίδωσης..... | 42 |
| Σχήμα 4.5. Διάταξη προσρόφησης με GAC τριών στηλών εν σειρά..... | 44 |
| Σχήμα 4.6. Τυπική διάταξη ιονανταλλαγής για την απομάκρυνση αλάτων από το νερό..... | 46 |
| Σχήμα 4.7. Βασικές AOPs | 47 |
| Σχήμα 4.8. Τυπική διάταξη όζοντος – ακτινοβολίας UV για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων..... | 49 |
| Σχήμα 4.9. Κύριες αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο πλαίσιο αξιοποίησης της τεχνολογίας Electro-Fenton για την απομάκρυνση υδρογονανθράκων | 51 |
| Σχήμα 4.10. Δεξαμενή χλωρίωσης | 53 |
| Σχήμα 4.11. Ταξινόμηση τεχνητών υγροτόπων..... | 55 |
| Σχήμα 4.12. Διάγραμμα ροής του συστήματος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων της OrangeCounty της Καλιφόρνια..... | 57 |
| Σχήμα 4.13. Επεξεργασία της εκροής της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων Shafdan σε υδροφορέα | 58 |
| Σχήμα 4.14. Κεντρικό σύστημα επαναχρησιμοποίησης νερού στην Tianjin της Κίνας | 59 |

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ανεπαρκής υδροδότηση και η υποβάθμιση της ποιότητας του νερού σε ορισμένες περιοχές αντιπροσωπεύουν σήμερα σοβαρές προκλήσεις και ανησυχίες για πολλές κοινότητες, για βιομηχανίες, για τον πρωτογενή τομέα και το περιβάλλον διεθνώς. Στα συγκεκριμένα προβλήματα συνέβαλαν πολλοί παράγοντες, όπως η διαρκής πληθυσμιακή αύξηση, ιδίως στις αστικές περιοχές, η ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, η άνιση κατανομή των υδάτινων πόρων και οι συχνές ξηρασίες που μπορεί να προκαλούνται από ακραία καιρικά φαινόμενα και την κλιματική αλλαγή εν γένει (Chen et al., 2017). Στην περίπτωση της Ευρώπης, η λειψυδρία και οι περίοδοι ξηρασίας ασκούν εντεινόμενη πίεση σε αρκετά υδατικά διαμερίσματα της ηπείρου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1. Ειδικότερα, στις μεσογειακές περιοχές περίπου το 20% του πληθυσμού βιώνει συνθήκες μόνιμης έλλειψης νερού και το 53% αντίστοιχες συνθήκες κατά την περίοδο του καλοκαιριού, με την κλιματική αλλαγή να αυξάνει τις σχετικές πιέσεις και, επομένως, την ανάγκη για βέλτιστη διαχείριση των υδάτινων πόρων και τη διασφάλιση της καλής τους κατάστασης, σύμφωνα και με την ευρωπαϊκή Οδηγία Πλαίσιο για τα Ύδατα (WFD 2000/60) (Χριστοδούλου, 2017).



Σχήμα 1.1. Βαθμός έλλειψης νερού στην Ευρώπη, 1990-2014 (Χριστοδούλου, 2017).

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει αναγνωρίσει την επαναχρησιμοποίηση νερού, συμπεριλαμβανομένου του νερού που ανακτάται από την επεξεργασία υγρών αποβλήτων, ως μέτρο σημαντικό που απαιτεί την προσοχή των κυβερνήσεων των κρατών – μελών, καθώς θεωρείται πως με συντονισμένες προσπάθειες πρέπει να αυξηθεί η αξιοπιστία των σχετικών διεργασιών και διαδικασιών και να ενισχυθούν οι δράσεις και τα έργα επαναχρησιμοποίησης. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Προτυποποίησης (International Standard Organisation, ISO) ως επαναχρησιμοποίηση νερού νοείται «η χρήση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων σε επωφελείς δράσεις», όπου ως υγρά απόβλητα θεωρούνται τα «λύματα που μπορεί να περιλαμβάνουν χρησιμοποιημένο νερό από οικιακές, εμπορικές ή βιομηχανικές δράσεις και μπορεί να περιλαμβάνουν και τα όμβρια ύδατα» (Χριστοδούλου, 2017). Η επαναχρησιμοποίηση του νερού από την επεξεργασία λυμάτων έχει αναδειχτεί, λοιπόν, εδώ και κάποιες δεκαετίες ως μία λύση που επιτυγχάνει αφενός τη διοχέτευση νερού σε ωφέλιμους σκοπούς και αφετέρου την αποτροπή της ρύπανσης των επιφανειακών και των υπόγειων υδάτων

(Metcalf&Eddy, 2003). Ειδικότερα, ως περιβαλλοντικά οφέλη της επαναχρησιμοποίησης νερού έχουν αναγνωρισθεί τα κάτωθι (Χριστοδούλου, 2017):

1. Η αύξηση της φυσικής και της τεχνητής ροής σε λίμνες και ρέματα.
2. Η αποκατάσταση υγροτόπων και η επαναφορά οικοσυστημάτων.
3. Ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων.
4. Η επίτευξη των περιβαλλοντικών στόχων που αφορούν τη βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων, συμπεριλαμβανομένης της διατήρησης των υδάτινων πόρων σε περιοχές που αντιμετωπίζουν έλλειψη νερού.
5. Η βελτίωση της ανθεκτικότητας των ευαίσθητων, ιδίως, περιοχών στην κλιματική αλλαγή και τις πληθυσμιακές αλλαγές.
6. Η προστασία των υδάτινων πόρων που χρησιμοποιούνται κυρίως για την υδροδότηση.
7. Η διασφάλιση υδάτινων πόρων με διεργασίες που γενικά εμφανίζουν χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με άλλες εναλλακτικές (π.χ. αφαλάτωση).
8. Η παροχή θρεπτικών ουσιών στις καλλιέργειες που αρδεύονται με επαναχρησιμοποιούμενο νερό.
9. Η προστασία των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων μέσω της αποτροπής της ρύπανσής τους.
10. Ο βελτιωμένος έλεγχος των περιβαλλοντικών κινδύνων που προέρχονται από την ανεξέλεγκτη χρήση επιφανειακών υδάτων από αγροτικούς πληθυσμούς.

Παρ' όλ' αυτά, για τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας της επαναχρησιμοποίησης του νερού, θα πρέπει να ελέγχεται σε μόνιμη βάση ότι η ποιότητα του νερού που επαναχρησιμοποιείται και οι σχετικές διεργασίες και διαδικασίες δεν αντίκεινται στην υφιστάμενη περιβαλλοντική νομοθεσία. Σε κάθε περίπτωση, η επαναχρησιμοποίηση του νερού προϋποθέτει τη διασφάλιση της ολοκληρωμένης και διαρκούς επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, από τα οποία αντλείται, ώστε να αποφεύγεται η ρύπανση και η μόλυνση των οικοσυστημάτων. Καθώς τα χημικά συστατικά των λυμάτων είναι αρκετά ετερογενή, απαιτείται η διενέργεια συνεχών ελέγχων και εκτιμήσεων περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Χριστοδούλου, 2017).

Από οικονομική σκοπιά, η επαναχρησιμοποίηση νερού εμφανίζει τα ακόλουθα οφέλη (Χριστοδούλου, 2017):

1. Προωθεί τις ορθές πρακτικές τιμολόγησης νερού και την οικονομία ζήτησης.
2. Προσδίδει αξία σε άγονες και ξηρές εκτάσεις.
3. Συνεπάγεται τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας.
4. Προωθεί καινοτόμες τεχνολογίες.

Ωστόσο, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν τυχόν οικονομικά μειονεκτήματα της επαναχρησιμοποίησης νερού, όπως τα εξής (Χριστοδούλου, χ.χ.):

1. Η εγκατάσταση συστημάτων που αποσκοπούν ειδικά στην επαναχρησιμοποίηση του νερού ενδέχεται να είναι επένδυση υψηλότερου κόστους από τις επενδύσεις συμβατικής χρήσης νερού (π.χ. άρδευσης).
2. Σε ορισμένες περιπτώσεις η επεξεργασία και η μεταφορά του επεξεργασμένου νερού ενδέχεται να είναι οικονομικά ασύμφορες.
3. Η επαναχρησιμοποίηση του νερού μπορεί να αποτελέσει φράγμα στο ενιαίο εμπόριο αγροτικών προϊόντων.

Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστούν στοιχεία που αφορούν τις τεχνολογίες μέσω της οποίας τα υγρά απόβλητα μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για διάφορους σκοπούς, με έμφαση στη χρήση τους για την άρδευση καλλιεργειών. Ιδιαίτερη μνεία θα γίνει και στις συνθήκες που επικρατούν στο συγκεκριμένο πεδίο στην ΕΕ και, ιδίως, στην Ελλάδα. Από τις τεχνολογίες που θα παρουσιαστούν εξαιρούνται οι συμβατικές τεχνολογίες πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας που, ούτως ή άλλως, περιλαμβάνονται στα τυπικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

2. ΚΥΚΛΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ – ΒΙΩΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

2.1. Κυκλική οικονομία

Κάθε προϊόν και κάθε παραγωγική διαδικασία έχει έναν κύκλο ζωής, αρχίζοντας με το σχεδιασμό/ανάπτυξη του προϊόντος ή της διαδικασίας, ο οποίος ακολουθείται από την διαχείριση των πόρων, την παραγωγή (παραγωγή υλικών, καθώς και την κατασκευή/παροχή του προϊόντος), την χρήση/κατανάλωση και τέλος, από το τελικό στάδιο του κύκλου ζωής της συλλογής, διαλογής, επαναχρησιμοποίησης, ανακύκλωσης και διάθεσης των αντίστοιχων παραγόμενων αποβλήτων. Το σύνολο των σταδίων της ζωής ενός προϊόντος προϋποθέτουν, για την υλοποίησή τους, κατανάλωση ενέργειας και συνεπάγονται αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (De Vries et al., 2012).

Όπως και οι διάφορες παραγωγικές διαδικασίες, έτσι και τα σύγχρονα συστήματα ολοκληρωμένης διαχείρισης των υγρών αποβλήτων, βιομηχανικών και αστικών, οφείλουν να υιοθετούν κατά προτεραιότητα μεθόδους επεξεργασίας που είναι σύμφωνες με το μοντέλο οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης που είναι γνωστό ως «κυκλική οικονομία» (“circular economy”) και το οποίο τείνει να καταστεί θεμελιώδες στοιχείο των κρατών – μελών της ΕΕ. Γενικά, βασικός στόχος του συγκεκριμένου μοντέλου (Σχήμα 2.1) είναι η παραγωγή προϊόντων και η παροχή υπηρεσιών με κατανάλωση λιγότερων πόρων (υλικών και ενεργειακών) και πόρων που είναι «φιλικότεροι» προς το περιβάλλον. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται την ανάγκη ελαχιστοποίησης ή και μηδενισμού των παραγόμενων αποβλήτων και της καταναλισκόμενης ενέργειας σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των προϊόντων και των υπηρεσιών. Κατά συνέπεια, η υιοθέτηση του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας προωθεί την αξιοποίηση αποβλήτων και δευτερογενών υλικών ως χρήσιμων υλικών και παραγωγικών πόρων, συνεπάγεται δε την ενίσχυση της αποδοτικότητας στη χρήση των πόρων, τον περιορισμό της εξάρτησης από μη ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους και κρίσιμες πρώτες ύλες, μείωση του κόστους και δημιουργία θέσεων εργασίας (Fragkos, 2022; ΥΠΕΝ, χ.χ.).



Σχήμα 2.1. Σχηματική περιγραφή του μοντέλου της κυκλικής οικονομίας (European Parliament, 2023).

Ειδικότερα, η κυκλική οικονομία στηρίζεται στην εφαρμογή των αρχών που είναι γνωστές ως “6R”: “Reduce, Reuse, Recycle, Recover, Redesign, Remanufacture” («μείωσε, επαναχρησιμοποίησε, ανακύκλωσε, ανάκτησε, επανασχεδίασε, ανακατασκεύασε»). Η μείωση εστιάζει κατ’ εξοχήν στα πρώτα στάδια του κύκλου ζωής του προϊόντος ή της παραγωγικής διαδικασίας και σχετίζεται με τη μείωση της χρήσης των πόρων στην προκατασκευή και την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, αλλά και με τη μείωση της παραγωγής αποβλήτων. Η επαναχρησιμοποίηση δε σχετίζεται με νέα χρήση των προϊόντων ή των συστατικών τους, μετά από τον πρώτο κύκλο ζωής τους, ώστε εκκινούν νέοι κύκλοι ζωής. Η ανακύκλωση περιλαμβάνει τις διαδικασίες που υπεισέρχονται στη μετατροπή υλικών, που σε διαφορετική περίπτωση θα θεωρούνταν ως απόβλητα, σε νέα προϊόντα. Ο επανασχεδιασμός οδηγεί στην παραγωγή αναβαθμισμένων προϊόντων που αξιοποιούν πόρους ανακτημένους από προηγούμενους κύκλους ζωής ή από την προηγούμενη γενιά προϊόντων, ενώ η ανακατασκευή αναφέρεται στην επανεπεξεργασία ήδη χρησιμοποιούμενου προϊόντων, ώστε αυτά να επαναφερθούν στην αρχική τους κατάσταση ή σε μια νέα μορφή πλήρως λειτουργική (Jawahir & Bradley, 2016).

2.2. Βιωσιμότητα της διαχείρισης των υγρών αποβλήτων

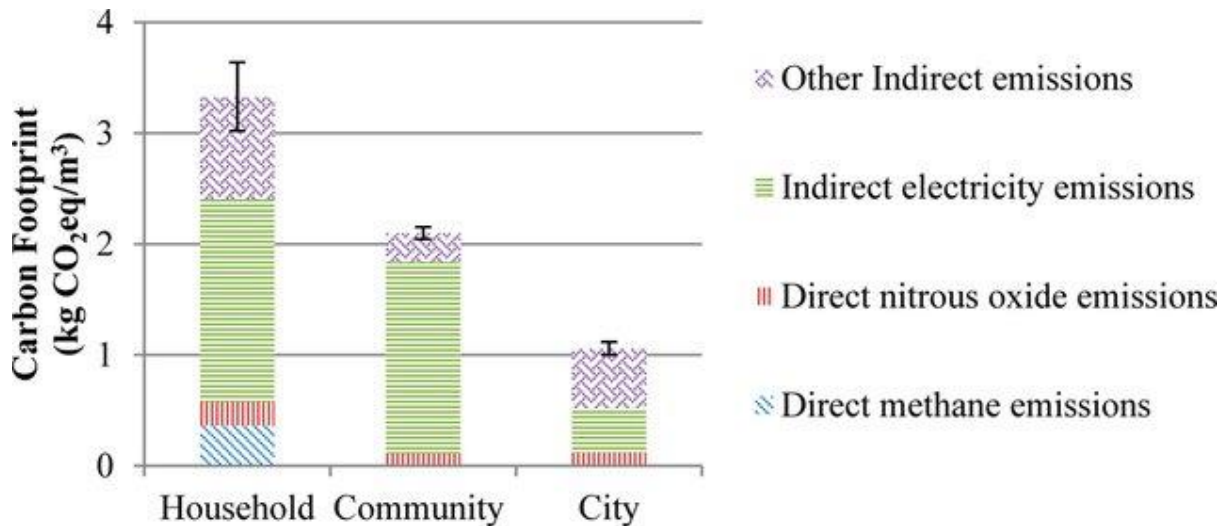
Οι σύγχρονες αντιλήψεις που διέπουν την κυκλική οικονομία, την αειφορία και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα αντιμετωπίζουν τα υγρά απόβλητα ως εναλλακτικούς ενεργειακούς και φυσικούς πόρους των οποίων η ορθολογική αξιοποίηση είναι δυνατόν να αποδώσει επιπρόσθετο ακαθάριστο εγχώριο προϊόν (ΑΕΠ), τόσο σε εθνικό όσο και σε περιφερειακό και σε τοπικό επίπεδο. Η θεώρηση των αποβλήτων ως υλικών χωρίς ουσιαστική χρησιμότητα, από τα οποία οφείλει απλά να απαλλαγεί ο παραγωγός τους ανήκει σε προηγούμενες δεκαετίες. Η επιλογή της στοιχειώδους επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, ιδίως όταν αυτή λαμβάνει χώρα κατά τρόπο πλημμελή και ανεξέλεγκτο, συνεπάγεται δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά και απώλεια χρήσιμων υλικών και ενέργειας. Η διεθνής εμπειρία έχει δείξει εδώ και πολλά χρόνια ότι η πλημμελής επεξεργασία των υγρών αποβλήτων οδηγεί σε ρύπανση και μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα (ρύπανση και μόλυνση των υπόγειων και επιφανειακών υδάτων), αλλά και του εδάφους (Brunner & Rechberger, 2015).

Οι άμεσες δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις αντιμετωπίστηκαν από την ελληνική νομοθεσία μόλις κατά τη δεκαετία του 1960. Ειδικότερα, σε ό,τι αφορά τη διαχείριση των υγρών βιομηχανικών αποβλήτων η Υγειονομική Διάταξη Ε1β/221 (ΦΕΚ 138/Β/24-12-1965) έθεσε το πρώτο κύριο πλαίσιο που αφορούσε την επεξεργασία και τη διάθεση των βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, καθώς σε αυτήν καθορίστηκαν οι αναγκαίες απαιτήσεις και ο τρόπος της αδειοδότησης της διάθεσης των εν λόγω αποβλήτων, αλλά και οι κυρώσεις σε περιπτώσεις μη συμμόρφωσης. Επιπλέον, προβλέπονταν σχετικές μέθοδοι ανάλυσης των αποβλήτων. Το 1980 με σχετική εγκύκλιο (Α5/4690/ΕΓΚ.62/26-4-80) καθορίστηκαν οι όροι χορήγησης άδειας διάθεσης βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, ο τρόπος ανανέωσης της προσωρινής άδειας διάθεσης, καθώς επίσης και τα στοιχεία που διέπουν τον έλεγχο της απόδοσης των εγκαταστάσεων επεξεργασίας τους. Από τη δεκαετία του 1970 έχουν καθοριστεί οριακές τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν την εκροή βιομηχανικών αποβλήτων στους διάφορους υδάτινους αποδέκτες ή/και στο τοπικό αποχετευτικό σύστημα. Ενδεικτικά, στον Πίνακα 2.1 δίνονται οι οριακές τιμές που αφορούν τη διάθεση αποβλήτων που παράγονται από τη βιομηχανική περιοχή της Αττικής στη θαλάσσια περιοχή Κερατσινίου Πειραιά, σύμφωνα με την ΥΑ 179182/656 (ΦΕΚ 582/2-7/1979).

Πίνακας 2.1. Χαρακτηριστικά των υγρών αποβλήτων που είναι δυνατόν να διατίθεται στη θαλάσσια περιοχή Κερατσινίου Πειραιώς (ΥΑ 179182/656 (ΦΕΚ 582/2-7/1979)).

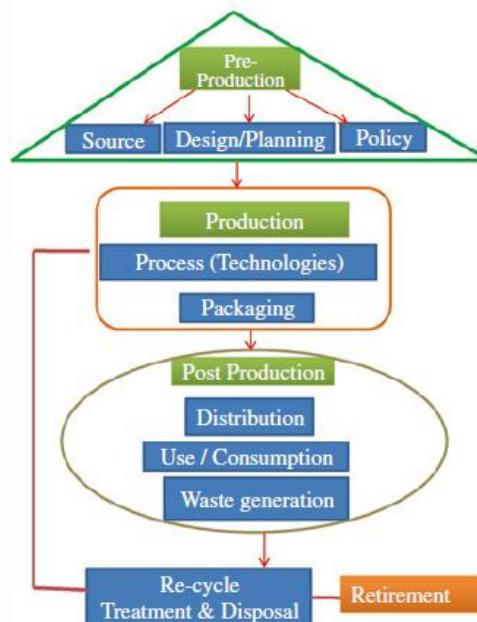
| Παράμετρος | Ανώτατες επιτρεπτές τιμές | | | |
|---------------------------------|---------------------------|----------------|----------------------|---------|
| | Επιφανειακά ύδατα | Θαλάσσια ύδατα | Αποχετευτικό σύστημα | Έδαφος |
| pH | 6.0-9.0 | 6.0-9.0 | 6.0-9.0 | 6.0-9.0 |
| Ολικά διαλαλημένα στερεά (mg/L) | 1,000 | 1,500 | 3,000 | 3,000 |
| COD (mg/L) | 120 | 150 | 1000 | 120 |
| BOD ₅ (mg/L) | 20 | 40 | 500 | 40 |
| Λίπη και έλαια (mg/L) | 5 | 5 | 40 | - |
| Φαινόλες (mg/L) | 0.5 | 0.5 | 5 | - |

Πέρα από τις περιβαλλοντικές συνέπειες που σχετίζονται με τη διάθεση των υγρών αποβλήτων σε αποδέκτες χωρίς να πληρούνται οι απαιτούμενες περιβαλλοντικές προδιαγραφές, τα συστήματα διαχείρισης υγρών αποβλήτων ενέχουν από μόνα τους περιβαλλοντικό αποτύπωμα το οποίο μεταφράζεται σε διάφορες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, από τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου (Σχήμα 2.2) έως τις εκπομπές οσμών. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορεί να είναι άμεσες, όπως οι οσμές που εκλύονται από τα συστήματα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων και έμμεσες, όπως οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων που οφείλονται στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και διαφοροποιούνται ανάλογα με το εκάστοτε ενεργειακό μείγμα ηλεκτροπαραγωγής.



Σχήμα 2.2. Αποτύπωμα άνθρακα για διάφορα συστήματα διαχείρισης υγρών αποβλήτων (Cornejoetal., 2016).

Για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εν λόγω συστημάτων που αφορούν τις δύο τελευταίες περιπτώσεις, ως μεθοδολογικό εργαλείο έχει χρησιμοποιηθεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες η ανάλυση κύκλου ζωής (Life Cycle Assessment, LCA). Με την εφαρμογή της LCA στο σύνολο ή σε επιμέρους στάδια μιας παραγωγικής διαδικασίας οι μηχανικοί ή/και ερευνητές είναι σε θέση όχι μόνον να εκτιμήσουν την ενεργειακή κατανάλωση που διέπει την εκάστοτε παραγωγική διαδικασία, αλλά και τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της διαδικασίας αυτής (Σχήμα 2.3) (Μαρούλης et al., 2012).



Σχήμα 2.3. Στάδια κύκλου ζωής που ερευνώνται κατά τη διενέργεια μίας LCA (Reddy et al., 2015).

Εφόσον, λοιπόν, επιδιώκεται η περιβαλλοντική βιωσιμότητα των σύγχρονων εγκαταστάσεων επεξεργασίας βιομηχανικών υγρών αποβλήτων, σύμφωνα με την οπτική εξέτασης του συνολικού κύκλου ζωής των διαδικασιών επεξεργασίας οφείλουν να επιδιώκονται τα ακόλουθα (Cornejo et al., 2016):

1. Ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης πρώτων υλών (π.χ. αντιδραστηρίων που χρησιμοποιούνται για διάφορες διεργασίες, όπως η κροκίδωση).
2. Ανάκτηση νερού και επαναχρησιμοποίηση του.
3. Ελαχιστοποίηση οσμών.
4. Ελαχιστοποίηση διαρροών υγρών αποβλήτων (π.χ. στο έδαφος).
5. Ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας, θερμικής και ηλεκτρικής.

Έπειτα, αν επιχειρηθεί η ένταξη των αρχών της κυκλικής οικονομίας στα συστήματα διαχείρισης υγρών αποβλήτων, τότε τα εν λόγω συστήματα οφείλουν να υιοθετούν τα εξής μέτρα:

1. Μέτρα επαναχρησιμοποίησης των υδατικών πόρων σε παραγωγικές διαδικασίες, της ίδιας της μονάδας, ή στην άρδευση.
2. Μέτρα ανάκτησης, δηλαδή επιστροφής των υδάτων στις λεκάνες απορροής, αφού αυτά υποστούν κατάλληλη επεξεργασία.
3. Μέτρα παραγωγής ενέργειας από την ενέργεια των υδάτων.

3. ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

3.1. Σχετική νομοθεσία

Υπό το πρίσμα της κυκλικής οικονομίας η επαναχρησιμοποίηση των βιομηχανικών και αστικών υγρών αποβλήτων δύναται να αποτελέσει εργαλείο ορθολογικής διαχείρισης των υδάτινων πόρων. Η λογική της επαναχρησιμοποίησης αποβλήτων που έχουν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία εμφανίζει εκ των πραγμάτων οφέλη που αφορούν τόσο την προστασία του περιβάλλοντος όσο και την οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη. Παρ' όλ' αυτά, η επαναχρησιμοποίηση αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη ολοκληρωμένου και ορθολογικού σχεδιασμού, που θα λαμβάνει υπόψιν τους περιορισμούς και κινδύνους. Το όφελος που αναμένεται από την επαναχρησιμοποίηση του νερού σχετίζεται άμεσα με το ζήτημα της διαθεσιμότητας των υδάτινων πόρων και, ως εκ τούτου, η σκοπιμότητα της όποιας επαναχρησιμοποίησης οφείλει να αξιολογείται συναρτήσει των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της εκάστοτε περιοχής (ΥΠΕΝ, χ.χ.).

Η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων υπόκειται σε περιορισμούς, οι οποίοι υπαγορεύονται από κινδύνους που δεν μπορούν να γίνουν αποδεκτοί στα σύγχρονα κράτη, ιδίως σε ό,τι αφορά την εξασφάλιση υψηλού επιπέδου δημόσιας υγείας, ποιότητας των οικοσυστημάτων και εν γένει περιβαλλοντικής ασφάλειας. Τα γενικά συμπεράσματα της διεθνούς βιβλιογραφίας δεν είναι ενθαρρυντικά για την άμεση επαναχρησιμοποίηση του νερού για ύδρευση, ενώ υπάρχουν ακόμη προβληματισμοί αναφορικά με τον εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων, των οποίων τα ύδατα προορίζονται για πόση. Σε κάθε περίπτωση, πολύ σοβαρότερες προοπτικές εμφανίζουν οι χρήσεις για άρδευση, αστική χρήση εξαιρουμένης της πόσης, δημιουργία ή εμπλουτισμό υδάτινων σωμάτων για αναψυχή και για παραγωγικές (π.χ. βιομηχανικές) δραστηριότητες.

Στην Ελλάδα το θεσμικό πλαίσιο που αναφέρεται στην επαναχρησιμοποίηση νερού που έχει ανακτηθεί αντιπροσωπεύεται κυρίως από την Κοινή Υπουργική Απόφαση (ΚΥΑ) 145116/2011 (ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011) («Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις»). Στο συγκεκριμένο νομοθετικό κείμενο ως επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων νοείται «η εν γένει διαχείριση των υγρών αποβλήτων, έτσι ώστε να μπορούν να ανακτηθούν ως νερό με σκοπό την

επαναχρησιμοποίηση τους». Στο πλαίσιο της επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων για άρδευση, διακρίνονται δύο τύποι άρδευσης, σύμφωνα με το σύστημα άρδευσης, το είδος των καλλιεργειών, καθώς και την προσβασιμότητα του κοινού στην περιοχή που αρδεύεται, ήτοι:

1. Την περιορισμένη άρδευση, που αναφέρεται αποκλειστικά σε καλλιέργειες των οποίων τα προϊόντα καταναλώνονται έπειτα από θερμική ή άλλης μορφής επεξεργασία ή δεν καταναλώνονται από τον άνθρωπο ή δεν έρχονται σε άμεση επαφή με το έδαφος (π.χ. βιομηχανικές καλλιέργειες, καλλιέργειες ζωοτροφών). Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν επιτρέπεται ο καταιονισμός ούτε η πρόσβαση του κοινού στην έκταση που αρδεύεται.

2. Η απεριόριστη άρδευση, που αναφέρεται στο σύνολο των άλλων καλλιεργειών (π.χ. λαχανικά, αμπέλια). Κατά την απεριόριστη άρδευση δεν υπάρχουν περιορισμοί στο σύστημα άρδευσης και στην πρόσβαση του κοινού στην περιοχή που αρδεύεται.

Στη σχετική ΚΥΑ αναφέρεται επίσης η ανάγκη για εκπόνηση μελέτης σχεδιασμού και εφαρμογής του συστήματος άρδευσης, αναλόγως της καλλιέργειας και της περιοχής. Αντίστοιχες μελέτες αφορούν και τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης του νερού για την τροφοδότηση ή τον εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων, αστικές και περιαστικές χρήσεις, εξαιρουμένης της πόσης, και για βιομηχανικές χρήσεις, εξαιρουμένων των βιομηχανιών παραγωγής προϊόντων τα οποία προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση. Στο Άρθρο 7 της ΚΥΑ αναφέρονται ενδεικτικές βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η χρήση του ανακτημένου νερού ως νερού ψύξης και νερού λέβητα. Για την επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων απαιτείται άδεια που εκδίδεται από την εκάστοτε Αποκεντρωμένη Διοίκηση, έπειτα από εισήγηση της Διεύθυνσης Υδάτων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης και γνωμοδότηση των αρμοδίων υπηρεσιών. Στον Πίνακα 3.1 παρατίθενται τα όρια των κυριότερων παραμέτρων των επεξεργασμένων αποβλήτων που πρέπει τα τελευταία να πληρούν, προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθούν, καθώς και η ελάχιστη επεξεργασία και η ελάχιστη συχνότητα σχετικών δειγματοληψιών. Επίσης, στους Πίνακες 3.2-3.5 δίνονται οι μέγιστες συγκεντρώσεις των μετάλλων και τα εύρη της αλατότητας (EC_w, water electrical conductivity), των ολικών διαλυμένων στερεών (total dissolved solids, TDS), της διαπερατότητας (SAR, sodium adsorption ratio) και της ειδικής τοξικότητας ιόντων που μπορούν να περιορίσουν την επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων για άρδευση.

Πίνακας 3.1. Όρια περιορισμένης άρδευσης και βιομηχανικής χρήσης (νερού ψύξης μίας χρήσης) ως προς βασικές παραμέτρους, ελάχιστη επεξεργασία και συχνότητα δειγματοληψιών των επαναχρησιμοποιημένων αποβλήτων (ΚΥΑ 145116/2011).

| Παράμετρος | Τιμή |
|-----------------------------------|--|
| <i>Escherichia coli</i> | ≤ 200 EC/100 mL (διάμεση τιμή) |
| BOD ₅ | 25 mg/L (βάσει ΚΥΑ 5673/400/1997) |
| TSS | 35/60 mg/L (βάσει ΚΥΑ 5673/400/1997) |
| Ελάχιστη απαιτούμενη επεξεργασία | Δευτεροβάθμια ή τριτοβάθμια |
| Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψιών | BOD ₅ , TSS, N, P: Βάσει ΚΥΑ 5673/400/1997, <i>Escherichiacoli</i> : Μία ανά εβδομάδα, Υπολειμματικό χλώριο: Συνεχώς (σε περίπτωση χλωρίωσης) |

Πίνακας 3.2. Όρια περιορισμένης άρδευσης και βιομηχανικής χρήσης (νερού ψύξης μίας χρήσης) ως προς τις συγκεντρώσεις των μετάλλων (ΚΥΑ 145116/2011).

| Μέταλλο | Ανώτατη συγκέντρωση (mg/L) |
|----------|----------------------------|
| Αργίλιο | 5 |
| Αρσενικό | 0.1 |
| Βηρύλλιο | 0.1 |
| Κάδμιο | 0.01 |
| Κοβάλτιο | 0.05 |
| Χρώμιο | 0.1 |
| Χαλκός | 0.2 |

| | |
|-------------|-------|
| Φθόριο | 1.0 |
| Σίδηρος | 3.0 |
| Λίθιο | 2.5 |
| Μαγγάνιο | 0.2 |
| Μολυβδαίνιο | 0.01 |
| Νικέλιο | 0.2 |
| Μόλυβδος | 0.1 |
| Σελήνιο | 0.02 |
| Βανάδιο | 0.1 |
| Ψευδάργυρος | 2.0 |
| Υδράργυρος | 0.002 |
| Βόριο | 2.0 |

Πίνακας 3.3. Εύρος παραμέτρων που επιδρούν στην αποτελεσματικότητα της άρδευσης με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα (ΚΥΑ 145116/2011).

| Παράμετρος | Βαθμός περιορισμών κατά την εφαρμογή | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------|--------------|
| | Μηδαμινό | Μικρός – μέτριος | Μεγάλος |
| Αλατότητα (σε ECw) | < 0.7 dS/m | 0.7-3.0 dS/m | > 3.0 dS/m |
| TDS | < 450 mg/L | 450-2,000 mg/L | > 2,000 mg/L |
| Διαπερατότητα | | | |
| SAR = 0-3 και ECw (dS/m) = | > 0.7 | 0.7-0.2 | < 0.2 |
| 3-6 | > 1.2 | 1.2-0.3 | < 0.3 |
| 6-12 | > 1.9 | 1.9-0.5 | < 0.5 |
| 12-20 | > 2.9 | 2.9-1.3 | < 1.3 |
| 20-40 | > 5.0 | 5.0-2.9 | < 2.9 |
| Ειδική τοξικότητα ιόντων | | | |
| Νάτριο | | | |
| Επιφανειακή άρδευση: SAR | < 3 | 3-9 | >9 |
| Καταιονισμός: mg/L Na ⁺ | ≤ 70 | > 70 | |
| Χλώριο | | | |
| Επιφανειακή άρδευση: mg/L | < 140 | 140-350 | > 350 |
| Καταιονισμός: mg/L Cl ⁻ | ≤ 100 | > 100 | |

Το 2020 εκδόθηκε ο Ευρωπαϊκός Κανονισμός 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου «σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων», με ισχύ από τις 26 Ιουνίου 2023. Στόχοι του κανονισμού ήταν η θέσπιση εναρμονισμένων παραμέτρων που θα εγγυώνται την ασφάλεια της επαναχρησιμοποίησης του νερού στην άρδευση καλλιεργειών, ώστε η εν λόγω πρακτική να συμβάλλει στην αντιμετώπιση της λειψυδρίας και της ξηρασίας, αλλά και η συμβολή στην επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης του ΟΗΕ. Στον κανονισμό ορίζονται οι ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας και παρακολούθησης των υδάτων και οι κανόνες που αφορούν τη διαχείριση κινδύνου, ώστε να χρησιμοποιείται με ασφάλεια το ανακτημένο νερό για γεωργική άρδευση.

Αναλυτικότερα, στον Κανονισμό ορίζεται η απαίτηση άδειας για την παραγωγή και παροχή ανακτημένου νερού προς άρδευση καλλιεργειών, η οποία καθορίζει τις υποχρεώσεις του φορέα λειτουργίας εγκατάστασης ανάκτησης και άλλων εμπλεκόμενων μερών. Τα προσδιοριστέα στοιχεία είναι τα κάτωθι:

1. Η κατηγορία ποιότητας του ανακτημένου νερού και η γεωργική χρήση, οι εγκαταστάσεις ανάκτησης, ο τόπος διάθεσης και εκτίμηση για τον ετήσιο όγκο του παραγόμενου νερού που ανακτάται.
2. Οι όροι που αφορούν τις ελάχιστες απαιτήσεις ποιότητας και παρακολούθησης του νερού.
3. Οι όροι που αφορούν τις επιπλέον απαιτήσεις αναφορικά με τον φορέα λειτουργίας εγκατάστασης ανάκτησης, όπως αυτοί αναφέρονται στο σχέδιο διαχείρισης κινδύνου.
4. Άλλοι όροι, αναγκαίοι για την εκμηδένιση ενδεχόμενων μη αποδεκτών κινδύνων για τα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία.
5. Η περίοδος ισχύος της άδειας.
6. Το σημείο συμμόρφωσης.

Ενδεικτικά, στον Πίνακα 3.4 δίνονται οι κατηγορίες ποιότητας ανακτημένου νερού, οι επιτρεπόμενες χρήσης, καθώς και οι μέθοδοι άρδευσης που αφορούν κάθε κατηγορία, ενώ στον Πίνακα 3.5 δίνονται οι ελάχιστες απαιτήσεις που διέπουν την ποιότητα του νερού, βάσει του Κανονισμού 2020/741. Στις εν λόγω απαιτήσεις προστίθενται και οι εξής:

1. Legionellaspp. < 1,000 cfu/L, όταν υφίσταται κίνδυνος αερόλυσης.
2. Εντερικά νηματούδη ≤ 1 αυγό/L, για άρδευση χορτονομής ή βοσκοτόπων.

Πίνακας 3.4. Κατηγορίες ποιότητας ανακτημένου νερού, επιτρεπόμενες γεωργικές χρήσεις και μέθοδοι άρδευσης (ΕΥ, 2020).

| Ελάχιστη κατηγορία ποιότητας | Κατηγορία καλλιέργειας | Μέθοδος άρδευσης |
|-------------------------------------|---|--|
| A | Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά, των οποίων το βρώσιμο τμήμα βρίσκεται σε άμεση επαφή με το ανακτημένο νερό και ριζώδη φυτά που καταναλώνονται ωμά | Όλες |
| B | Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά όταν η παραγωγή του βρωσίμου τμήματος πραγματοποιείται πάνω από το έδαφος και δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό, καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που μεταποιούνται, καλλιέργειες μη εδώδιμων φυτών, συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργειών προς παραγωγή ζωοτροφών | Όλες |
| Γ | Καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που καταναλώνονται ωμά όταν η παραγωγή του βρωσίμου τμήματος πραγματοποιείται πάνω από το έδαφος και δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με ανακτημένο νερό, καλλιέργειες εδώδιμων φυτών που μεταποιούνται, καλλιέργειες μη εδώδιμων φυτών, | Στάγδην άρδευση ή άλλη μέθοδος που αποφεύγει την άμεση επαφή του νερού με το βρώσιμο μέρος |

| | | |
|---|--|------|
| | συμπεριλαμβανομένων των καλλιεργειών προς παραγωγή ζωοτροφών | |
| Δ | Ενεργειακές και βιομηχανικές καλλιέργειες, καλλιέργειες σπόρων | Όλες |

Πίνακας 3.5. Απαιτήσεις ποιότητας ανακτημένου νερού για άρδευση (ΕΥ, 2020).

| Κατηγορία ποιότητας | Ενδεικτικός τεχνολογικός στόχος | <i>E. coli</i> (/100 mL) | BOD ₅ (mg/L) | TSS (mg/L) | Θολότητα (NTU) |
|---------------------|--|--------------------------|-------------------------|--|----------------|
| A | Δευτεροβάθμια επεξεργασία, διήθηση, απολύμανση | ≤ 10 | ≤ 10 | ≤ 10 | ≤ 5 |
| B | Δευτεροβάθμια επεξεργασία, απολύμανση | ≤ 100 | ≤25 mg/L | ≤35/60 mg/L (βάσει ΚΥΑ 5673/400/1997) | - |
| Γ | | ≤ 1,000 | | | - |
| Δ | | ≤ 10,000 | | | - |

3.2. Άρδευση

Η άρδευση καλλιεργειών αποτελεί την παλαιότερη και τη συνηθέστερη χρήση των επεξεργασμένων εκροών υγρών αποβλήτων. Γενικά, η γεωργική άρδευση αντιστοιχεί περίπου στο 70% της χρήσης του νερού, ιδιαίτερα σε ξηρές περιοχές. Όπως κατέστη σαφές και στο προηγούμενο Υποκεφάλαιο, βάσει των στοιχείων της νομοθεσίας, διακρίνονται δύο τύποι επαναχρησιμοποίησης του ανακτημένου νερού για άρδευση. Η περιορισμένη άρδευση αφορά καλλιέργειες των οποίων τα προϊόντα καταναλώνονται έπειτα από κάποια επεξεργασία, δεν καταναλώνονται από τον άνθρωπο ή/και οι καρποί τους δεν βρίσκονται σε άμεση επαφή με το έδαφος κατά τη συλλογή τους. Ορισμένα παραδείγματα των εν λόγω καλλιεργειών

αποτελούν καλλιέργειες ζωοτροφών, δενδρώδεις καλλιέργειες, εξαιρουμένων των οπωροφόρων, καλλιέργειες σπόρων κ.ά. Στην περιορισμένη άρδευση απαγορεύονται ο καταιονισμός και η πρόσβαση του κοινού στην έκταση που αρδεύεται. Η περιορισμένη άρδευση περιλαμβάνει κατ' εξοχήν τη στάγδην άρδευση, δηλαδή τη μικροάρδευση φυτών με μικρά ρυάκια ή σταγόνες με την οποία το νερό διοχετεύεται σε σταγόνες επί του εδάφους ή απευθείας κάτω από την επιφάνειά του σε ιδιαίτερα χαμηλές ροές (από 2 έως 20 L/h) διά μέσου συστήματος πλαστικών αγωγών μικρής διαμέτρου, όπου προσαρμόζονται εκροές (σταλάκτες) (Ανδρεαδάκης, 2009; EU, 2020). Απεναντίας, στην απεριόριστη άρδευση, που αφορά είτε είδη καλλιεργειών προς παραγωγή προϊόντων που καταναλώνονται ωμά ή ενεργειακών καλλιεργειών (π.χ. ηλιάνθου προς παραγωγή βιοντίζελ), επιτρέπεται η εφαρμογή διαφόρων τύπων άρδευσης (δηλαδή και ο καταιονισμός), ενώ δεν υφίστανται περιορισμοί ως προς την πρόσβαση του κοινού στην αρδευόμενη έκταση (Ανδρεαδάκης, 2009; EU, 2020).

Γενικά, η άρδευση επεξεργασμένων αποβλήτων, ανεξαρτήτως της προέλευσής τους, είναι ασφαλής υπό προϋποθέσεις, καθώς με την άρδευση αποφεύγεται η υποβάθμιση της ποιότητας των υδάτινων αποδεκτών, εξοικονομείται νερό και λαμβάνει χώρα προσθήκη θρεπτικών συστατικών στο έδαφος, όπως φωσφόρου και αζώτου, που συμβάλλουν στην ανάπτυξη των φυτών. Με δεδομένο ότι μία τυπική επεξεργασμένη εκροή μπορεί να περιέχει άζωτο σε συγκέντρωση 50 mg/L και φωσφόρο σε συγκέντρωση 10 mg/L, αν θεωρηθεί πως ο όγκος νερού άρδευσης που απαιτείται είναι 400-600 m³/στρέμμα, αναλόγως του είδους της καλλιέργειας, διαπιστώνεται ότι με την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων παρέχονται 20-30 kg αζώτου/στρέμμα και 4-6 kg φωσφόρου/στρέμμα σε ετήσια βάση. Ως εκ τούτου, οι ποσότητες θρεπτικών που απαιτούνται για τη φυτική ανάπτυξη είναι δυνατόν να παρέχονται μέσω της άρδευσης με τα επεξεργασμένα λύματα (Πανώρας & Ηλίας, 1999).

Ιδιαίτερη σημασία εμφανίζουν τα κριτήρια επιλογής της καταλληλότερης μεθόδου άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα. Η άρδευση με κατάκλιση προϋποθέτει πλήρη κάλυψη της εδαφικής επιφάνειας με τα επεξεργασμένα λύματα, ώστε είναι δυνατή η ρύπανση τμήματος της φυλλικής επιφάνειας λαχανικών που έρχονται σε επαφή με τα απόβλητα, αλλά και στις συγκομιζόμενες ρίζες. Έπειτα, κατ' αυτόν τον τρόπο, είναι σημαντική η έκθεση των καλλιεργητών στα απόβλητα.

Η άρδευση με αυλάκια δεν προϋποθέτει τη διαβροχή όλης της εδαφικής επιφάνειας, ώστε περιορίζονται οι κίνδυνοι ρύπανσης των φυτών που αναπτύσσονται στον αυχένα των αυλακιών. Εν τούτοις, η έκθεση των καλλιεργητών στα απόβλητα είναι μεγάλη.

Ο καταιονισμός θεωρείται ως αποδοτικότερος ως μέθοδος άρδευσης με επεξεργασμένα λύματα, καθώς μπορεί να εφαρμοστεί κατά τρόπο ομοιόμορφο. Παρ' όλ' αυτά, παθογόνοι μικροοργανισμοί που περιέχονται στα επεξεργασμένα λύματα μπορούν να διασπαρθούν με τον άνεμο δημιουργώντας κίνδυνο για την ανθρώπινη υγεία. Επιπλέον, τα συστήματα καταιονισμού είναι δυνατόν να επηρεαστούν σε μεγαλύτερο βαθμό από την ποιότητα του νερού εν σχέση με τα επιφανειακά συστήματα άρδευσης, κατά βάση επειδή υπάρχει πιθανότητα να σημειωθεί έμφραξη των ακροφυσίων των καταιονιστήρων, να υποστούν βλάβες τα φύλλα και να λάβουν χώρα φαινόμενα φυτοτοξικότητας, στην περίπτωση που το νερό περιέχει υπερβάλλουσα ποσότητα τοξικών συστατικών. Έπειτα, υπάρχει το ενδεχόμενο της συσσώρευσης ιζήματος στις βάνες, τους αυτοματισμούς και τους αγωγούς. Εν γένει, θεωρείται ότι οι εκροές των μονάδων δευτεροβάθμιας επεξεργασίας αστικών λυμάτων είναι κατάλληλες για άρδευση με καταιονισμό, στην περίπτωση που δεν περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων. Επιπλέον, είναι συχνή η υιοθέτηση επιπρόσθετων μέτρων πρόληψης, όπως επεξεργασία σε χαλκικό φίλτρο και αύξηση της διαμέτρου των ακροφυσίων (Πανώρας et al., 1993; Ofori et al., 2021).

Η στάγδην άρδευση εκρών συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων προϋποθέτει την παρουσία κατάλληλων φίλτρων και, ειδικότερα, την ταυτόχρονη χρήση φίλτρου σίτας και χαλκικό φίλτρου και την έγχυση χλωρίου στο σύστημα άρδευσης, ούτως ώστε να αποφευχθούν εμφράξεις. Η διοχέτευση χλωρίου στα απόβλητα είναι αναγκαία, ώστε να αποφευχθεί η ανάπτυξη βακτηρίων και φυκιών εντός του συστήματος διανομής του νερού. Καθώς η περιεκτικότητα του ασβεστίου στα απόβλητα είναι συνήθως υψηλή, είναι αναγκαίος ο υπολογισμός του κινδύνου έμφραξης των σταλακτιών μέσω της καθίζησης του ασβεστίου (Nakayama&Bucks, 1985). Γενικά, η στάγδην άρδευση και άλλες μέθοδοι τοπικής άρδευσης θεωρούνται ως οι καταλληλότερες σε ό,τι αφορά την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων, καθώς (Sakellariou-Makrantonakietal., 2003):

1. Πρόκειται για συστήματα κλειστού τύπου, που δεν εκθέτουν σε κίνδυνο τους καλλιεργητές.

2. Δεν δημιουργούν απορροή λυμάτων προς γειτονικές περιοχές, όπως οι επιφανειακές μέθοδοι.

3. Δεν επιφέρουν διασπορά τοξικών συστατικών μέσω του ανέμου, όπως ενδεχομένως ο καταιονισμός.

Ο Πίνακας 3.6 περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά των τεσσάρων προαναφερθεισών μεθόδων άρδευσης με χρήση επεξεργασμένων λυμάτων.

Πίνακας 3.6. Χαρακτηριστικά μεθόδων άρδευσης με χρήση επεξεργασμένων λυμάτων (Πανώρας et al., 1993).

| Παράμετρος | Κατάκλιση | Αυλάκια | Καταιονισμός | Στάγδην |
|----------------------------------|--|---|--|---|
| Διαβροχή φύλλων και βλάβες αυτών | Ορισμένα κατώτερα φύλλα ενδέχεται να διαβραχούν, όμως η βλάβη μπορεί να είναι μικρή, ώστε να προκαλέσει μείωση της παραγωγής | Δεν παρατηρούνται βλάβες στο φύλλωμα | Ενδέχεται να σημειωθούν μεγάλες βλάβες στο φύλλωμα, με συνέπεια μεγάλη μείωση της παραγωγής. | Καμία βλάβη στα φύλλα |
| Συσσώρευση αλάτων | Τα άλατα δεν συγκεντρώνονται στο ριζόστρωμα | Τα άλατα συσσωρεύονται στον αυχένα των αυλακιών και ενδέχεται να προκληθούν βλάβες στα φυτά | Τα άλατα συσσωρεύονται στον αυχένα των αυλακιών και ενδέχεται να προκληθούν βλάβες στα φυτά | Τα άλατα συσσωρεύονται μεταξύ των σημείων ενστάλαξης |
| Διατήρηση της εδαφικής υγρασίας | Τα φυτικά μπορούν να υποστούν πιέσεις λόγω της έλλειψης νερού μεταξύ των | Τα φυτικά μπορούν να υποστούν πιέσεις λόγω της έλλειψης νερού μεταξύ των | Δεν εξασφαλίζεται υψηλή διαθεσιμότητα υγρασίας του εδάφους καθ' όλη την καλλιεργητική | Μπορεί να εξασφαλίζεται υψηλή διαθεσιμότητα υγρασίας του εδάφους καθ' όλη την καλλιεργητική |

| | άρδεύσεων | άρδεύσεων | περίοδο | περίοδο και να περιορίζεται η επίδραση της αλατότητας |
|---------------------------------------|---|---|---|---|
| Δυνατότητα χρήσης υφάλμυρων αποβλήτων | Καλή – μέτρια. Με στράγγιση και ορθή διαχείριση του νερού είναι δυνατή η επίτευξη σχετικά ικανοποιητικών αποδόσεων. | Καλή – μέτρια. Με στράγγιση και ορθή διαχείριση του νερού είναι δυνατή η επίτευξη σχετικά ικανοποιητικών αποδόσεων. | Μέτρια – ανεπαρκής, λόγω βλαβών στη φυλλική επιφάνεια των περισσότερων καλλιεργειών | Εξαιρετική – καλή. Δυνατή η ανάπτυξη του συνόλου σχεδόν των καλλιεργειών με ελάχιστη μείωση της παραγωγής |

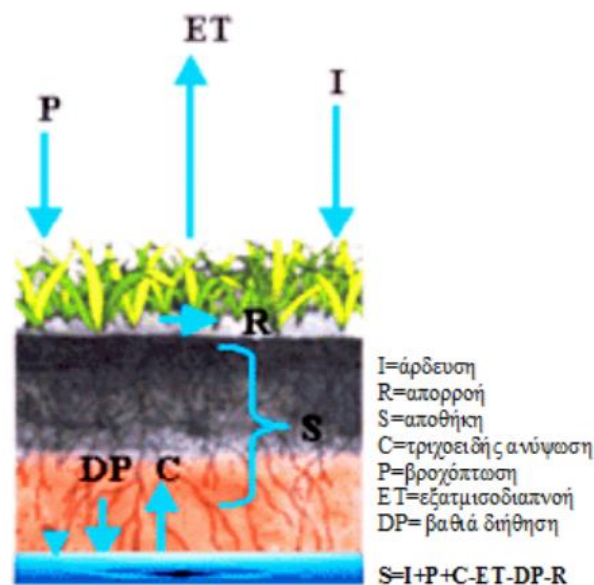
Σε κάθε περίπτωση, όπως έχει αναφερθεί, η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων για άρδευση προϋποθέτει τη διενέργεια μελέτης σχεδιασμού και εφαρμογής του συστήματος άρδευσης είτε στην περίπτωση της περιορισμένης είτε στην περίπτωση της απεριόριστης άρδευσης (Σταματελάτου, 2018). Ειδικότερα, η εν λόγω μελέτη οφείλει να περιλαμβάνει (Σταματελάτου, 2018):

1. Την ποσότητα νερού και των απαραίτητων συστατικών (θρεπτικών, ιχνοστοιχείων, οργανικής ύλης) που απαιτεί η ανάπτυξη της εκάστοτε καλλιέργειας για δεδομένο τύπο εδάφους. Επίσης, απαιτείται ο προσδιορισμός του όγκου των αποβλήτων ανά μονάδα χρόνου και επιφάνειας.
2. Την έκταση προς άρδευση.
3. Ο τρόπος και η συχνότητα παρακολούθησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών της επεξεργασμένης εκροής, του εδάφους και των καλλιεργειών.
4. Πιθανά επιπλέον μέτρα, όπως η παρουσία περίφραξης.
5. Μέτρα προστασίας και ενημέρωσης των καταναλωτών.
6. Η ελάχιστη απόσταση της περιοχής υδροληψίας από την καλλιέργεια.

Επίσης, αναφέρεται ότι το υδατικό ισοζύγιο, διαφορετικό ανά καλλιέργεια και τύπο εδάφους, αποτελεί σημαντικό στοιχείο της μελέτης (Σταματελάτου, 2018). Το υδατικό ισοζύγιο περιλαμβάνει τις ποσότητες νερού που (Σταματελάτου, 2018):

1. Προσπίπτει στο έδαφος με τις υδατοπτώσεις.
2. Διαρρέει προς το έδαφος.
3. Διαφεύγει στην ατμόσφαιρα, εξαιτίας της εξατμισοδιαπνοής.
4. Διαφεύγει προς τα βαθύτερα εδαφικά στρώματα.
5. Ανέρχεται στα ανώτερα στρώματα του εδάφους, εξαιτίας των τριχοειδών φαινομένων.
6. Παρέχεται μέσω της άρδευσης, ώστε να μηδενιστεί το υδατικό ισοζύγιο.

Οι παράμετροι του υδατικού ισοζυγίου παρατίθενται στο Σχήμα 3.1.



Σχήμα 3.1. Παράμετροι του υδατικού ισοζυγίου (Σταματελάτου, 2018).

3.3. Παραγωγική διαδικασία

Σύμφωνα με την κείμενη νομοθεσία, η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων του βιομηχανικού τομέα περιλαμβάνει τη χρήση τους ως νερού ψύξης, νερού αναπλήρωσης των νερών λεβήτων και ως νερό διεργασιών σε διάφορα στάδια της βιομηχανικής επεξεργασίας. Τονίζεται, εν τούτοις, ότι η βιομηχανική επαναχρησιμοποίηση δεν αφορά παραγωγικές διαδικασίες που περιλαμβάνουν την επεξεργασία ή/και παραγωγή προϊόντων που προορίζονται για ανθρώπινη κατανάλωση.

Για τις σύγχρονες βιομηχανικές μονάδες, που τείνουν να υιοθετούν σε ολοένα και μεγαλύτερο βαθμό πρακτικές κυκλικής οικονομίας, η επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων αποτελεί μια προτεραιότητα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν αφενός η κατανάλωση του νερού και αφετέρου ο όγκος των αποβλήτων προς εντατική επεξεργασία. Για παράδειγμα, διυλιστήρια μπορούν να επαναδιυλίζουν ελαιώδη υγρά απόβλητα που προέρχονται είτε από τις ίδιες τις βιομηχανικές μονάδες είτε από εγκαταστάσεις εμπορίας πετροχημικών προϊόντων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα περίπτωσης επαναχρησιμοποίησης των αποβλήτων με επαναδιύλιση αποτελούν τα Ελληνικά Πετρέλαια, που μεταξύ του 2013 και του 2018 προέβησαν στην επαναδιύλιση περίπου 700,000 t ελαιωδών υγρών αποβλήτων (Ελληνικά Πετρέλαια, χ.χ.) (Πίνακας 3.7).

Πίνακας 3.7. Ποσοστά ανάκτησης και ποσότητες υγρών αποβλήτων από τα Ελληνικά Πετρέλαια (στοιχεία 2018) (Ελληνικά Πετρέλαια, 2019).

| Εγκατάσταση | Ποσοστό ανάκτησης (%) | Ποσότητα (t) |
|---------------------|------------------------------|---------------------|
| Μονάδα Ελευσίνας | 1.75 | 112,662 |
| Μονάδα Θεσσαλονίκης | 0.41 | 17,400 |

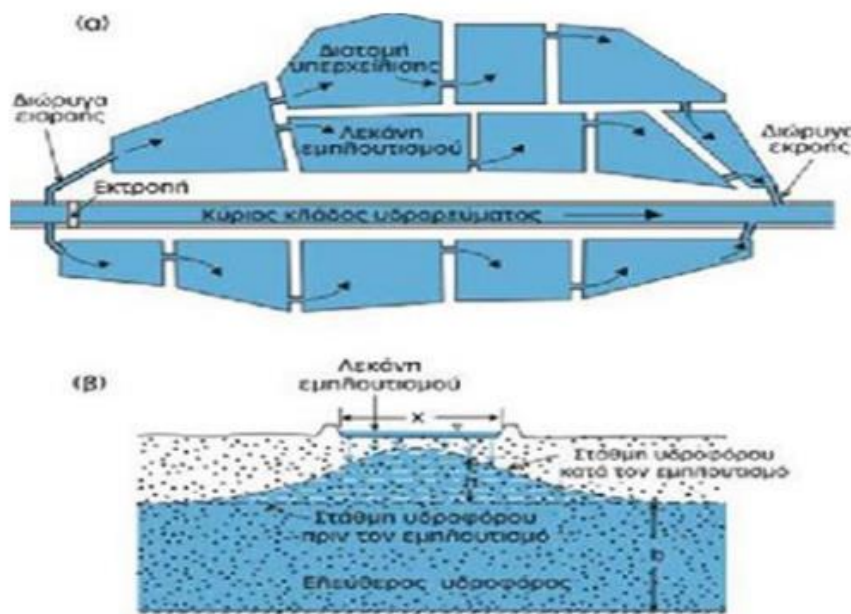
Είναι ευνόητο ότι, εν γένει, η ποιότητα των επεξεργασμένων λυμάτων δεν είναι απαραίτητο να είναι υψηλή. Στην περίπτωση της χρήσης τους ως νερού ψύξης το συνηθέστερο πρόβλημα που προκύπτει αφορά τις αποθέσεις σε λάσπη από τους μικροοργανισμούς. Από την άλλη, στην περίπτωση χρήσης των λυμάτων για την τροφοδοσία των λεβήτων, το ανακτημένο νερό οφείλει να είναι καλύτερης ποιότητας, με το επίπεδο ποιότητας να συναρτάται άμεσα από την πίεση λειτουργίας του λέβητα, καθώς λέβητες που λειτουργούν σε υψηλότερη πίεση χρήζουν νερό καλύτερης ποιότητας. Ουσιαστικά προβλήματα με την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων σε αυτή την περίπτωση αφορούν τις επικαθίσεις και τις αποθέσεις στους λέβητες, καθώς και την αλκαλικότητα που συνεπάγεται αφρισμό (Ανδρεαδάκης, 2009).

3.5. Άλλες χρήσεις

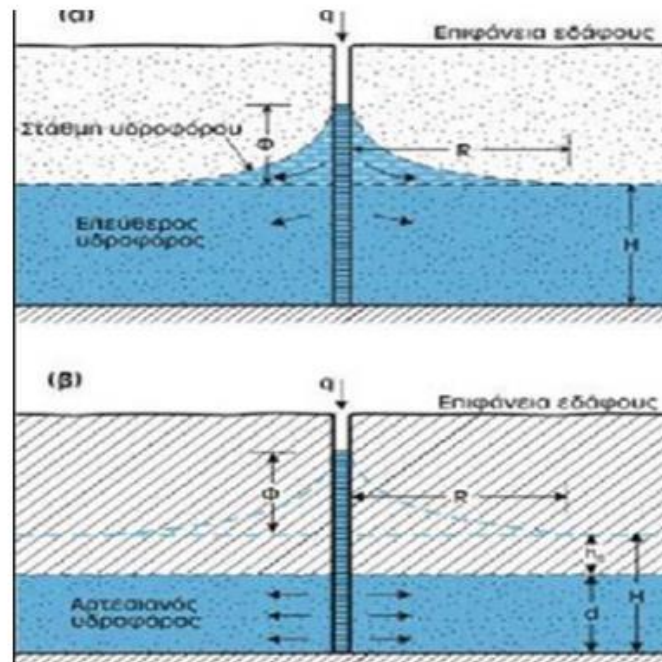
Μία εναλλακτική χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων αποτελεί ο εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων, αποκλειστικά, ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου ο εκάστοτε υδροφορέας δεν αξιοποιείται για την ύδρευση της περιοχής. Στόχος της διαδικασίας εμπλουτισμού είναι να καταστεί η ποιότητα των υπόγειων υδάτων σχεδόν ίση με την ποιότητα που αφορά την αστική ή απεριόριστη αρδευτική χρήση. Σε αυτή την περίπτωση απαιτείται η υλοποίηση υδρογεωλογικής μελέτης της εκάστοτε περιοχής, ώστε να αποφευχθεί η διείσδυση λυμάτων σε υδροφορείς που αξιοποιούνται για υδροληψία (Asano, 2006). Ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων μπορεί να υλοποιηθεί με τις εξής μεθόδους (Asano, 2006):

1. Με την επιφανειακή διάχυση ή διήθηση, δηλαδή με χρήση λάκκων, ορυγμάτων, τάφρων, φραγμάτων, λεκανών κ.ά.
2. Με άρδευση.
3. Με άμεση έγχυση λυμάτων (π.χ. με γεώτρηση).

Επί παραδείγματι, μία τεχνική εμπλουτισμού υπόγειου υδροφορέα αφορά την κατάκλιση λεκανών (Σχήμα 3.2), ενώ μπορεί ο εμπλουτισμός να λάβει χώρα και με γεώτρηση (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.2. Εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα με κατάκλιση (α. Κάτοψη, β. Τομή) (Καλλέργης, 2001).



Σχήμα 3.3. Εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα με γεώτρηση (α. Ελεύθερο υδροφόρο στρώμα, β. Υδροφόρο στρώμα υπό πίεση) (Καλλέργης, 2001).

Σύμφωνα με τη σχετική νομοθεσία, σε περιπτώσεις άμεσου εμπλουτισμού μέσω γεώτρησης υπό πίεση ή με βαρύτητα σε επιλεγμένες θέσεις γεωτρήσεων απαιτείται, πέραν της δευτεροβάθμιας και πιθανής τριτοβάθμιας επεξεργασίας, η εφαρμογή προχωρημένων μεθόδων επεξεργασίας που συνεπάγονται την απομάκρυνση διαλυτού οργανικού υλικού (π.χ. μεμβρανών υπερδιήθησης). Επίσης, όταν λαμβάνει χώρα εμπλουτισμός με διήθηση διά μέσου εδαφικού στρώματος με επαρκές βάθος και άλλα κατάλληλα χαρακτηριστικά, η αποφυγή των προχωρημένων μεθόδων επεξεργασίας θα πρέπει να τεκμηριώνεται μέσω αποδεδειγμένης επάρκειας του εδάφους να κατακρατεί τα οργανικά συστατικά (ΚΥΑ 145116/2011).

Γενικά, ο εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων με επεξεργασμένα λύματα, τηρουμένων των κατάλληλων προϋποθέσεων, συντελεί στην προστασία της ύπαρξης και λειτουργίας υγροτόπων, την αναβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων, την αποφυγή της συνίζησης και την αποφυγή ή την αντιμετώπιση της διείσδυσης θαλασσινού νερού σε παράκτια υδροφόρα στρώματα. Από την άλλη, συνήθως οι εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού δεν είναι οικονομικά βιώσιμες, ενώ πιθανά σφάλματα κατά την υλοποίηση των σχετικών υδρογεωλογικών μελετών

ενδέχεται να συνεπάγονται σοβαρές επιπτώσεις στα οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία (Καλλέργης, 2001).

Στις εναλλακτικές χρήσεις των επεξεργασμένων αποβλήτων περιλαμβάνεται η αστική επαναχρησιμοποίηση, δηλαδή η χρήση του νερού σε αστικές περιοχές για σκοπούς εκτός της πόσης. Οι πλέον σημαντικές αστικές χρήσεις του ανακτημένου νερού περιλαμβάνουν την άρδευση κέντρων αναψυχής, πάρκων, νεκροταφείων, νησίδων και κρασπέδων αυτοκινητοδρόμων, αθλητικών χώρων και, γενικά, χώρων πρασίνου, αλλά και την πυρόσβεση. Σε κάθε περίπτωση, είναι ευνόητο ότι κατά τον σχεδιασμό των συστημάτων επαναχρησιμοποίησης των λυμάτων για αστικές χρήσεις πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται ως γνώμονας η προστασία της δημόσιας υγείας (ΚΥΑ 145116/2011).

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

4.1. Τεχνολογίες επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων

4.1.1. Γενικές παρατηρήσεις

Η πλειονότητα των συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων αποτελούνται κυρίως από την πρωτοβάθμια και τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, με πιθανή προσθήκη μεθόδων προεπεξεργασίας. Στις περιπτώσεις όπου απαιτείται συμμόρφωση με αυστηρότερα περιβαλλοντικά όρια ή/και όπου τα συστήματα δευτεροβάθμιας (βιολογικής) επεξεργασίας αδυνατούν να αντεπεξέλθουν στη ζητούμενη απόδοση και αποτελεσματικότητα και απομάκρυνση των ζητούμενων ρύπων, ιδίως του οργανικού φορτίου. Κατά τα τελευταία 30 έτη έχουν διερευνηθεί, αναπτυχθεί και υλοποιηθεί διάφορες τεχνολογίες επεξεργασίας προς απομάκρυνση των υπολειμματικών συστατικών των επεξεργασμένων εκροών. Οι σημαντικότερες τεχνολογίες προχωρημένης επεξεργασίας είναι οι κάτωθι:

1. Διήθηση χώρου.
2. Διήθηση επιφάνειας.
3. Τεχνολογίες μεμβρανών, όπως μικροδιήθηση, υπερδιήθηση και αντίστροφη ώσμωση.
4. Ηλεκτροδιάλυση, που συνιστά μια ειδική περίπτωση τεχνολογίας μεμβρανών.
5. Προσρόφηση.
6. Απογύμνωση.
7. Τεχνολογίες ανταλλαγής ιόντων.
8. Διεργασίες προχωρημένης οξειδωσης (advanced oxidation processes, AOPs).
9. Απόσταξη.
10. Χημική κατακρήμνιση.
11. Άλλες τεχνολογίες χημικής οξειδωσης.
12. Τεχνολογίες απολύμανσης
13. Εναλλακτικές τεχνολογίες

4.1.2. Διήθηση

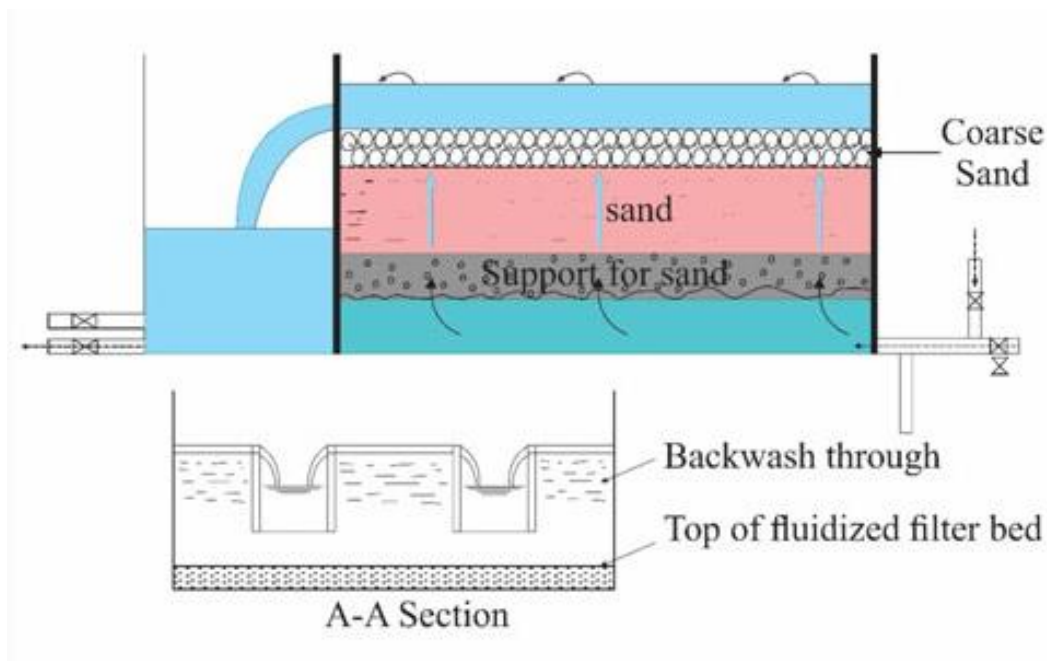
Εν γένει, οι διεργασίες διήθησης οφείλουν να σχεδιάζονται στη βάση της γνώσης των διαθέσιμων τύπων φίλτρων και της εκτίμησης των λειτουργικών παραμέτρων (Metcalf & Eddy, 2003). Τα κυριότερα στοιχεία σχεδιασμού των συστημάτων διήθησης περιλαμβάνουν (Metcalf & Eddy, 2003):

1. Τα χαρακτηριστικά της εισροής.
2. Τα χαρακτηριστικά της διεργασίας βιολογικής επεξεργασίας που προηγείται.
3. Τον τύπο της τεχνολογίας που θα χρησιμοποιηθεί.
4. Τις επιλογές που είναι διαθέσιμες σε ό,τι αφορά τη ρύθμιση της ροής.
5. Τον τύπο του συστήματος αντίστροφης πλύσης που χρησιμοποιείται για τον καθαρισμό του φίλτρου διήθησης.
6. Τον απαραίτητο εξοπλισμό διήθησης.
7. Τα συστήματα ρύθμισης του φίλτρου και τα όργανα ελέγχου.

Οι διεργασίες διήθησης χώρου περιλαμβάνουν την απομάκρυνση των αιωρούμενων υλικών που μπορούν να διακριθούν σε ένα υγρό κατά τη διέλευση του ρευστού διά μέσου διηθητικής κλίνης που αποτελείται από συμπιέσιμο ή κοκκώδες διηθητικό μέσο. Πρόκειται για μία από τις βασικότερες διεργασίες της επεξεργασίας του πόσιμου νερού, όμως κατά τις τελευταίες δεκαετίες υφίσταται μια τάση ενσωμάτωσης της διήθησης χώρου στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η διήθηση χώρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως στάδιο προεπεξεργασίας της διεργασίας με διαχωρισμό μεμβρανών.

Το μέσο διήθησης (π.χ. άμμος) υποστηρίζεται από ένα στρώμα χαλικιού, που παρεμβάλλεται διαδοχικά, μεταξύ του μέσου διήθησης και του κάτω συστήματος αποστράγγισης του διηθήματος (Σχήμα 4.1). Το ρευστό που θα υποστεί διήθηση εισέρχεται στο φίλτρο από ένα κανάλι εισόδου. Το διηθημένο ρευστό συλλέγεται σε σύστημα αποστράγγισης στο κάτω μέρος του φίλτρου που χρησιμοποιείται, επίσης, για την αντιστροφή της ροής, ούτως ώστε να πραγματοποιηθεί η ανάστροφη πλύση του φίλτρου. Για την επαναχρησιμοποίηση του διηθημένου νερού, είναι δυνατή η

τροφοδότησή του σε δεξαμενή αποθήκευσης ή σε σύστημα κατανομής ανακτημένου νερού (Metcalf & Eddy, 2003).



Σχήμα 4.1. Διήθηση χώρου με χρήση αμμόφιλτρου και τομή του συστήματος (KIS Group, χ.χ.).

Το μέγεθος των κόκκων συνιστά το κυριότερο χαρακτηριστικό του διηθητικού μέσου, καθώς αυτό επιδρά άμεσα στη λειτουργία της διήθησης, επιδρώντας και στην πτώση πίεσης του ρευστού, αλλά και την ανάπτυξη της πτώσης πίεσης κατά τη διάρκεια της διήθησης. Αν το μέγεθος των κόκκων είναι υπερβολικά μικρό, σημαντικό μέρος της ωθούσας δύναμης καταναλώνεται για να υπερνικηθεί η αντίσταση λόγω τριβών στην κλίση διήθησης. Κατά τη διάρκεια της διήθησης σε συμβατικό φίλτρο διήθησης χώρου καθοδικής ροής τα υγρά απόβλητα εισάγονται στο άνω μέρος της κλίνης. Καθώς η ροή του ρευστού διέρχεται μέσα από την κλίση, τα αιωρούμενα υλικά απομακρύνονται με διάφορους μηχανισμούς, όπως με κατακράτηση, που είναι ο κυριότερος από αυτούς, η πρόσκρουση, η αναχαίτιση και η προσκόλληση. Κατά τη διέλευση και τη συσσώρευση των υλικών στα διάκενα του κοκκώδους μέσου αρχίζει η ανάπτυξη πτώσης πίεσης εντός του φίλτρου. Μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, η πτώση πίεσης ή η θολότητα της εκροής αγγίζει τα επίπεδα μιας προκαθορισμένης τιμής, όπου απαιτείται ο καθαρισμός του φίλτρου (Metcalf&Eddy, 2003).

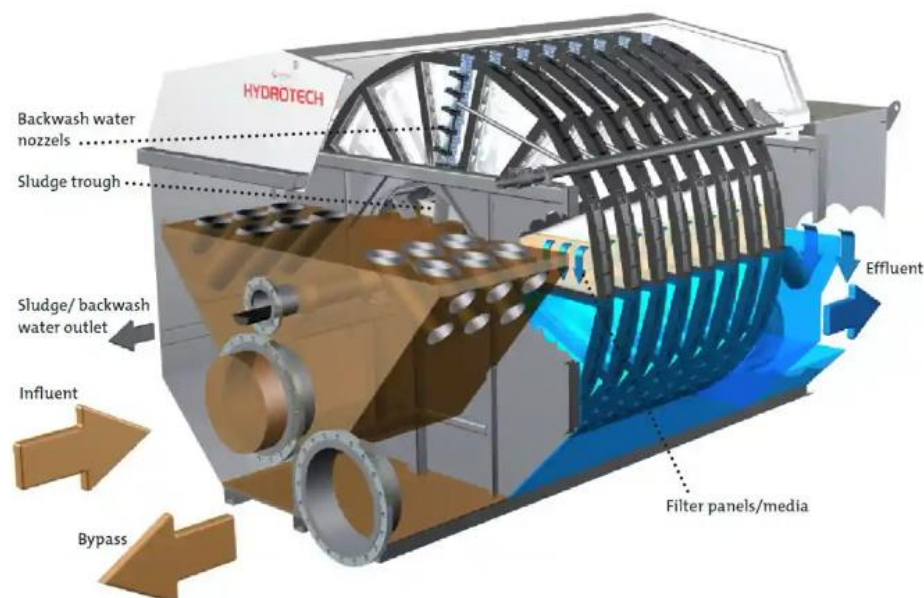
Συνήθη προβλήματα που αντιμετωπίζει η λειτουργία των φίλτρων διήθησης είναι τα ακόλουθα:

1. Η υπέρβαση του ορίου θολότητας. Για τον έλεγχο της αύξησης των επιπέδων θολότητας της εκροής προστίθενται στο φίλτρο πολυμερή και άλλες χημικές ενώσεις.
2. Ο σχηματισμός σβώλων ιλύος, λόγω της συσσώρευσης βιοκροκίδων, διηθητικού υλικού και άλλων υλικών. Το πρόβλημα μπορεί να περιοριστεί με την εφαρμογή διεργασίας βοηθητικής πλύσης (π.χ. με ρεύμα αέρα ή επιφανειακή πλύση με νερό).
3. Η ανάπτυξη λιπαρών επιστρώσεων, που μπορεί να ελεγχθεί μέσω της τροφοδοσίας αέρα και της επιφανειακής πλύσης με νερό.
4. Η ανάπτυξη ρωγμών και η συστολή της διηθητικής κλίνης, που μπορεί να ελεγχθεί με κατάλληλη αντίστροφη πλύση και καθαρισμό.
5. Η μηχανική απώλεια διηθητικού μέσου, που μπορεί να περιοριστεί με την κατάλληλη κατασκευή των καναλιών αντίστροφης πλύσης και την ορθή τοποθέτηση του συστήματος αποστράγγισης ή, ακόμη, και με την τοποθέτηση ειδικών ανακλαστήρων.
6. Η λειτουργική απώλεια διηθητικού μέσου, που μπορεί να περιοριστεί με την προσθήκη βοηθητικού συστήματος αέρα ή/και νερού πλύσης.
7. Η διαταραχή του στρώματος χαλικιού, που μπορεί να αντιμετωπιστεί με την απομάκρυνση και την αντικατάσταση του διηθητικού υλικού και του συστήματος υποστήριξης.

Σε ό,τι αφορά τη διήθηση επιφάνειας, αυτή περιλαμβάνει την απομάκρυνση διακριτών σωματιδίων από την εισροή μέσω μηχανικής κοσκίνισης και, συγκεκριμένα, μέσω της διόδου του ρευστού διά μέσου ενός λεπτού διαφράγματος. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ως διαφράγματα περιλαμβάνουν διάφορα πλέγματα από νήμα, μεταλλικά πλέγματα και ποικιλία συνθετικών υλικών. Σημειώνεται ότι οι διεργασίες μεμβράνης αποτελούν επίσης μηχανισμούς διήθησης επιφάνειας, όμως αυτές διαφοροποιούνται στη βάση του μεγέθους ανοίγματος των πόρων, καθώς στις διεργασίες διήθησης επιφάνειας το εν λόγω μέγεθος κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30 μm , ενώ στα φίλτρα μεμβράνης μεταξύ 0.0001 και 1.0 μm (Metcalf&Eddy, 2003).

Χαρακτηριστική διεργασία διήθησης επιφάνειας αποτελεί η διεργασία φίλτρου δίσκων (Disc filter, DF) που περιλαμβάνει τη χρήση μιας σειράς δίσκων, οι οποίοι

περιλαμβάνουν δύο κάθετα τοποθετημένους δίσκους που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη του διηθητικού πανιού (Σχήμα 4.2). Κάθε δίσκος συνδέεται με κεντρικό αγωγό τροφοδοσίας. Τα υλικά διήθησης μπορεί να κατασκευάζονται από πολυεστέρα ή χάλυβα 316. Κατά τη λειτουργία του DF η τροφοδοσία εισέρχεται διά μέσου κεντρικού καναλιού και διέρχεται μέσω του κοσκίνου του φίλτρου. Κατά την κανονική λειτουργία το 60-70% της επιφάνειας του φίλτρου βυθίζεται εντός του ρευστού και ο δίσκος περιστρέφεται με ταχύτητα 1.0-8.5 r/min, αναλόγως της πτώσης πίεσης. Καθώς ο δίσκος βυθίζεται, το νερό και τα σωματίδια μεγέθους μικρότερου του ανοίγματος του κοσκίνου διέρχονται από το φίλτρο και καταλήγουν στο κανάλι συλλογής της εκροής, ενώ τα σωματίδια με μεγαλύτερο μέγεθος κατακρατούνται.



Σχήμα 4.2. Φίλτροδίσκων (Hydrotech, χ.χ.).

4.1.3. Τεχνολογίες μεμβρανών

Η χρήση τεχνολογιών μεμβρανών αναδεικνύεται ολοένα και περισσότερο ως αποδοτική μέθοδος για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η χρήση μεμβρανών παρέχει, γενικά, τη δυνατότητα για μεγάλη κατακράτηση στερεών, μικρή παραγωγή ιλύος, βελτιωμένη ποιότητα εκροής και, στην περίπτωση που ενσωματώνονται σε βιοαντιδραστήρες μεμβρανών (membrane bioreactors, MBRs), υψηλή συγκέντρωση αιωρούμενης βιομάζας. Σε κάθε περίπτωση, η επέκταση των εφαρμογών μεμβρανών δυσχεραίνεται τα μέγιστα από το υψηλό κόστος των μεμβρανών και την

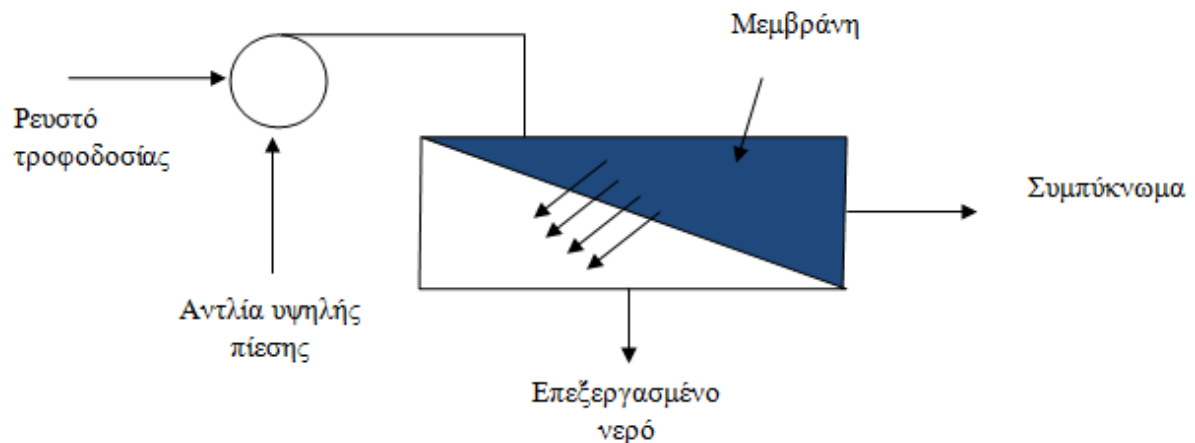
σταδιακή έμφραξη (fouling) των μεμβρανών, που απαιτεί τη διενέργεια συχνών καθαρισμών και, εν τέλει, την αντικατάστασή τους, ώστε το λειτουργικό κόστος των εν λόγω διεργασιών αυξάνεται (Satyawali & Balakrishnan, 2008).

Οι διαχωρισμοί με χρήση μεμβρανών συνιστούν φυσικές διεργασίες μεταφοράς μάζας και εδράζονται στην ιδιότητα πορωδών ημιπερατών μεμβρανών να επιτρέπουν την επιλεκτική δίοδο μίας ή περισσότερων ουσιών διά μέσου των πόρων τους, εμποδίζοντας, ταυτοχρόνως, τη διέλευση άλλων. Οι μεμβράνες εφαρμόζονται κατ' εξοχήν για την απομάκρυνση στερεών με μέγεθος μικρότερο των 0.005 mm, που δεν μπορούν να απομακρυνθούν αποτελεσματικά με απλά συστήματα διήθησης. Οι μεμβράνες μπορούν να ταξινομηθούν, αναλόγως του υλικού κατασκευής τους, σε ανόργανες και οργανικές. Οι ανόργανες κατασκευάζονται από ανοξείδωτο χάλυβα ή κεραμικά υλικά, ενώ οι οργανικές συνήθως από πολυμερή, όπως πολυτετραφθοροαιθυλένιο (polytetrafluoroethylene, PTFE). Οι οργανικές έχουν διερευνηθεί διεξοδικά και χρησιμοποιούνται ευρύτατα, ενώ οι ανόργανες συνιστούν ακόμη αντικείμενο έρευνας (Μαντζαβίνος, χ.χ.). Οι κυριότερες διεργασίες μεμβρανών που εφαρμόζονται στο πλαίσιο της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με στόχο τη βελτίωση της εκροής είναι οι ακόλουθες (Μαντζαβίνος, χ.χ.):

1. Αντίστροφη ώσμωση.
2. Μικροδιήθηση.
3. Υπερδιήθηση.
4. Νανοδιήθηση.
5. Διάλυση
6. Ηλεκτροδιάλυση.

Στην περίπτωση της μικροδιήθησης το μέγεθος των πόρων των μεμβρανών είναι μεγαλύτερο των 50 nm και το τυπικό λειτουργικό εύρος είναι 0.08-2.0 nm. Η υπερδιήθηση χρησιμοποιεί μεμβράνες με μέγεθος πόρων 2-50 nm και το τυπικό λειτουργικό της εύρος είναι 0.005-0.2 μm, ενώ, από την άλλη, η νανοδιήθηση υιοθετεί μεμβράνες με μέγεθος πόρων μικρότερο των 2 nm και εφαρμόζεται σε ένα τυπικό λειτουργικό εύρος 0.001-0.01 μm. Στην περίπτωση της αντίστροφης ώσμωσης το μέγεθος των πόρων των είναι μικρότερο από 2 nm, όπως και στη νανοδιήθηση, ενώ το τυπικό λειτουργικό εύρος της διεργασίας είναι 0.0001-0.001

μm(Metcalf & Eddy, 2003). Απλοποιημένο διάγραμμα ροής διεργασίας αντίστροφης ώσμωσης είναι δίνεται στο Σχήμα 4.3. Τέλος, στην περίπτωση της διάλυσης, όπου η ωθούσα δύναμη στη μεμβράνη δεν είναι πλέον η διαφορά υδροστατικής πίεσης, αλλά η διαφορά συγκέντρωσης εκατέρωθεν της μεμβράνης, χρησιμοποιούνται μεμβράνες μεγέθους πόρων 2-50 nm.



Σχήμα 4.3. Απλοποιημένο διάγραμμα ροής διεργασίας αντίστροφης ώσμωσης (Μαντζαβίνος, χ.χ.).

Η λειτουργία των υπό εξέταση συστημάτων είναι αρκετά απλή, καθώς ενσωματώνουν μία αντλία τροφοδοσίας της εισροής και μία βάνα ρύθμισης για τη διατήρηση της πίεσης στο κατακράτημα. Το διήθημα συλλέγεται συνήθως σε ατμοσφαιρική πίεση. Καθώς τα συστατικά της εισροής συσσωρεύονται στις μεμβράνες, η πίεση στην πλευρά της τροφοδοσίας αυξάνεται και η πυκνότητα ροής και το ποσοστό απόρριψης μειώνεται. Όταν η απόδοση μειωθεί σε ένα ορισμένο επίπεδο, τα συστήματα των μεμβρανών τίθενται εκτός λειτουργίας και καθαρίζονται (Metcalf & Eddy, 2003).

Ο καθαρισμός των μεμβρανών μπορεί να πραγματοποιηθεί με υδραυλικό ή χημικό τρόπο. Ο υδραυλικός καθαρισμός περιλαμβάνει μια σειρά από μεθόδους που δεν καθαρίζουν πλήρως τις μεμβράνες, αλλά παρατείνουν την διάρκεια ζωής τους. Οι μέθοδοι αυτοί είναι οι εξής (Πάσιος, 2015):

1. Πλύση των μεμβρανών με αντιστροφή της ροής του διηθήματος (backwashing), η οποία πραγματοποιείται μόνο στις διεργασίες μικροδιήθησης και υπερδιήθησης,

κυρίως για σωληνοειδείς διατάξεις και κοίλων ινών, καθώς και για διατάξεις στις οποίες χρησιμοποιούνται κεραμικές μεμβράνες.

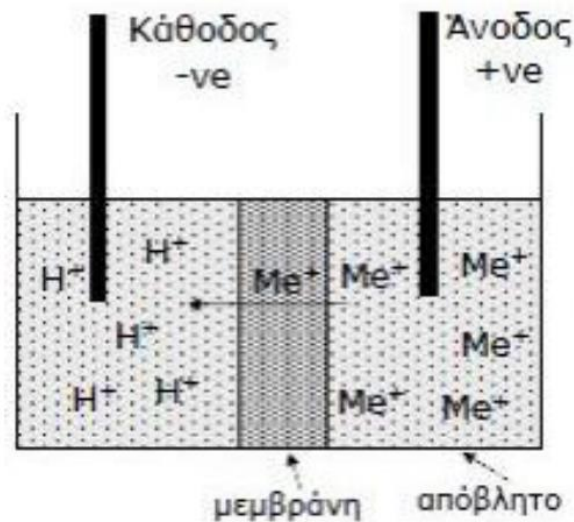
2. Περιοδική αποσυμπίεση (relaxation) του συστήματος των μεμβρανών, που λαμβάνει χώρα μετά από παύση της διαδικασίας της διήθησης για σύντομο χρονικό διάστημα. Η μέθοδος αυτή μειώνει μόνο την επιφανειακή έμφραξη, με την επαναιώρηση στο ανάμεικτο υγρό των σωματιδίων που είχαν επικαθίσει στην επιφάνεια της μεμβράνης, αλλά δεν συμβάλλει στον περιορισμό της έμφραξης στο εσωτερικό της μεμβράνης.

3. Στιγμιαία αντιστροφή της ροής αποτελεί πιο πρόσφατη παραλλαγή του κλασικού συστήματος πλύσης, κατά την οποία η αντίστροφη πλύση είναι στιγμιαία, αλλά πραγματοποιείται με μεγάλη συχνότητα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του συστήματος .

4.1.4. Ηλεκτροδιάλυση

Η ηλεκτροδιάλυση ή ηλεκτροδιαπίδωση αποτελεί μια ηλεκτροχημική διεργασία ιόντων ή ιοντογενών συστατικών από υδατικά διαλύματα ή άλλα υγρά με τη χρήση ηλεκτρικά αγώγιμων μεμβρανών που χαρακτηρίζονται από κατάλληλη εκλεκτικότητα, αλλά και την εφαρμογή κατάλληλου δυναμικού ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να επιφέρει τη μεταφορά των ιόντων (Σχήμα 4.4). Πρόκειται, λοιπόν, για μία ηλεκτροχημική μέθοδο διαχωρισμού διαλυτών συστατικών υδάτινης μάζας με μεμβράνες ηλεκτροδιαπίδωσης ή ηλεκτροδιάλυσης με εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου. Όταν υδατικό διάλυμα που περιλαμβάνει υψηλή συγκέντρωση ιόντων (π.χ. βαρέων μετάλλων) εκτεθεί σε ηλεκτρικό πεδίο, παρατηρείται η μετακίνηση των ανιόντων προς την άνοδο και των κατιόντων προς την κάθοδο. Μεταξύ των ηλεκτροδίων πραγματοποιείται τοποθέτηση εναλλάξ μεμβρανών ηλεκτροδιάλυσης που είναι διαπερατές είτε σε κατιόντα (κατιοντοδιαπερατές μεμβράνες) είτε σε ανιόντα (ανιοντοδιαπερατές μεμβράνες). Οι κατιοντοδιαπερατές μεμβράνες που χρησιμοποιούνται αποτελούνται από πολυανιόντα που είναι αδιάλυτα και τα οποία φέρουν αρνητικό φορτίο, ενώ, παράλληλα, καθιστούν δυνατή την διέλευση αποκλειστικά των ιόντων αντίθετου φορτίου, ήτοι των κατιόντων, αποκλείοντας, ταυτοχρόνως, την διέλευση των ανιόντων. Οι ανιοντοδιαπερατές μεμβράνες, που αποτελούνται από πολυκατιόντα που είναι αδιάλυτα, λειτουργούν με τον αντίστροφο

τρόπο. Στο πεδίο της περιβαλλοντικής εξυγίανσης η μέθοδος της ηλεκτροδιάλυσης παρέχει μια σειρά δυνατοτήτων διαχείρισης ρυπασμένου νερού με ηλεκτροδιαλυτικό διαχωρισμό ιόντων, όπως βαρέων μετάλλων, αναλόγως του τρόπου σχεδιασμού της διεργασίας (Juveetal., 2022).



Σχήμα 4.4. Αρχή λειτουργίας διάταξης ηλεκτροδιαπίδωσης (Juveetal., 2022, επεξεργασία).

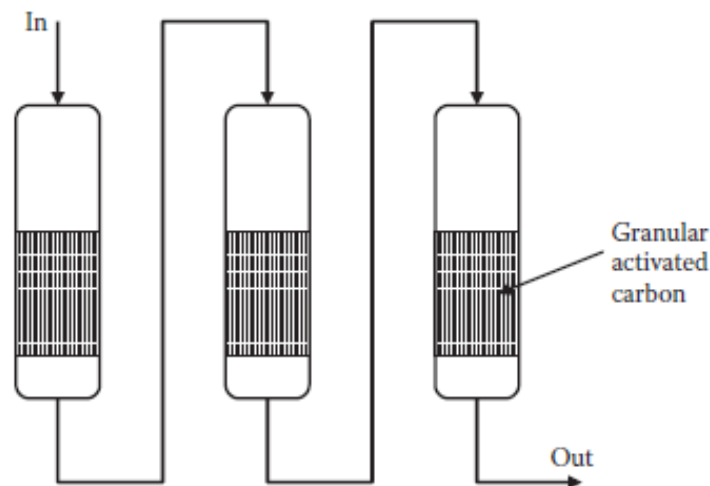
Η βασική διάταξη ενός συστήματος ηλεκτροδιάλυσης περιλαμβάνει την διάταξη τροφοδοσίας της παροχής, την διάταξη των μεμβρανών και έναν ανορθωτή μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές. Η δομική μονάδα κάθε σταδίου της διεργασίας αναφέρεται ως ζεύγος στοιχείων και σε αυτήν περιλαμβάνονται μία ανιονική μεμβράνη, μία κατιονική μεμβράνη, ένας θάλαμος ροής νερού χαμηλής συγκέντρωσης ιόντων και ένας θάλαμος ροής νερού υψηλής συγκέντρωσης ιόντων. Ένα τυπικό στάδιο ενδέχεται να περιλαμβάνει 300 έως 500 ζεύγη στοιχείων. Στην πράξη τα συστήματα ηλεκτροδιάλυσης συγκροτούνται διά του συνδυασμού πολλών σταδίων συνδεδεμένων εν σειρά, στα οποία η τροφοδοσία του επόμενου σταδίου είναι η μερικώς απορρυπασμένη εκροή του προηγούμενου σταδίου. Το γεγονός αυτό συνδέεται με το ότι η απόδοση κάθε σταδίου επεξεργασίας κυμαίνεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Ενδεικτικά, στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν μεμβράνες ηλεκτροδιάλυσης για αφαλάτωση νερού αναφέρεται ότι οι αποδόσεις ανά στάδιο επεξεργασίας κυμαίνονται στα επίπεδα του 40-65% (Μαντζαβίνος, χ.χ.).

Οι μεμβράνες που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο διαμόρφωσης ενός συστήματος ηλεκτροδιάλυσης είναι λεπτά φύλλα πλαστικών υλικών με κατιονικά ή ανιονικά χαρακτηριστικά. Πιο συγκεκριμένα, για την κατασκευή των μεμβρανών μπορούν να χρησιμοποιηθούν οργανικά πολυμερή (π.χ. PTFE ή συμπολυμερή στυρενίου – διβινυλοβενζολίου) που τροποποιούνται με ιονικές ομάδες. Για την κατασκευή των κατιοντοδιαπερατών μεμβρανών χρησιμοποιούνται συνήθως οι σουλφονικές ομάδες, ενώ για την κατασκευή των ανιοντοδιαπερατών μεμβρανών χρησιμοποιούνται συνήθως οι αμινοομάδες. Ως κάθοδοι χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια χάλυβα ή νικελίου και ως άνοδοι διαστασιακά σταθερά ηλεκτρόδια (dimensionally stable anodes, DSA) οξυγόνου ή χλωρίου. Σημειώνεται ότι τα τελευταία ηλεκτρόδια (οι άνοδοι DSA) συνιστούν πρωτοποριακά ηλεκτρόδια που αποτελούνται από έναν σκελετό τιτανίου που επικαλύπτεται με ηλεκτροκαταλυτικά μείγματα οξειδίων και, συγκεκριμένα, οξειδίου του ρουθηνίου και άλλα οξειδία ευγενών μετάλλων, όπως πλατίνας, παλλαδίου και ιριδίου. Με δεδομένο ότι η μέθοδος της ηλεκτροδιάλυσης συνιστά μία διαδικασία μεμβράνης, η παροχή που υφίσταται επεξεργασία θα πρέπει να μην είναι ιδιαίτερα επιβαρυνόμενη με συστατικά που μπορούν να προκαλέσουν δυσλειτουργία της μεμβράνης, ενώ απαιτείται διαρκής έλεγχος του συστήματος και περιοδική συντήρησή του, ώστε να προληφθούν τυχόν προβλήματα που θα ανακύψουν, όπως, επί παραδείγματι, η δυσλειτουργία των μεμβρανών. Στον σχεδιασμό της διεργασίας θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και οι περιορισμοί του φαινομένου, ήτοι το γεγονός ότι οι μεμβράνες δεν είναι ιδανικές και, κατά συνέπεια, καθιστούν δυνατή την διέλευση προς μη επιθυμητή κατεύθυνση ενός μικρού ποσοστού ιόντων (Μαντζαβίνος, χ.χ.).

4.1.5. Προσρόφηση

Η προσρόφηση είναι διεργασία συσσώρευσης υλικών που βρίσκονται σε ένα διάλυμα πάνω σε μία κατάλληλη διεπιφάνεια. Πρόκειται για μία διεργασία μεταφοράς μάζας κατά την οποία λαμβάνει χώρα μεταφορά από την υγρή στη στερεή φάση. Οι κύριοι τύποι προσροφητικών μέσων περιλαμβάνουν τον ενεργό άνθρακα, τα συνθετικά πολυμερή και τα πυριτικά υλικά, όμως σε εφαρμογές επεξεργασίας υγρών αποβλήτων χρησιμοποιείται συνήθως ο ενεργός άνθρακας (Cooper & Alley, 2002; Metcalf & Eddy, 2003). Η προσρόφηση σε άνθρακα εφαρμόζεται κυρίως για την απομάκρυνση δυσδιάσπαστων οργανικών συστατικών, αλλά και για την

απομάκρυνση υπολειμματικών συγκεντρώσεων ανόργανων ουσιών, συμπεριλαμβανομένων του αζώτου, των σουλφιδίων και των βαρέων μετάλλων. Επίσης, ιδιαίτερα στις εφαρμογές επαναχρησιμοποίησης νερού, η προσρόφηση εφαρμόζεται για την απομάκρυνση ενώσεων που προσδίδουν οσμή και γεύση, με χρήση κυρίως κονιοποιημένου και κοκκώδους ενεργού άνθρακα. Η επεξεργασία με κοκκώδη ενεργό άνθρακα (granular activated carbon, GAC) λαμβάνει χώρα με χρήση κλίνης ενεργού άνθρακα τοποθετημένης σε αντιδραστήρα (κλίνη επαφής). Οι κλίνες μπορεί να είναι συστήματα πίεσης ή βαρύτητας, σταθερής κλίνης καθοδικής ή ανοδικής ροής με δύο ή τρεις στήλες εν σειρά (Σχήμα 4.5) ή διαστελλόμενης κλίνης που λειτουργεί κατ' αντιρροή με ανοδική ροή του υγρού (Metcalf & Eddy, 2003; Jiang et al., 2024).



Σχήμα 4.5. Διάταξη προσρόφησης με GAC τριών στηλών εν σειρά (Riffat, 2013).

4.1.6. Απογύμνωση – απόσταξη

Η απογύμνωση ή εκρόφηση αερίου συνίσταται στη μεταφορά μάζας ενός αερίου από την υγρή στην αέρια φάση. Η απομάκρυνση διαλελυμένων αερίων από υγρά απόβλητα έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως για την απομάκρυνση αμμωνίας, δύσοσμων αερίων και πτητικών οργανικών ενώσεων (volatile organic compounds, VOCs). Οι διατάξεις απογύμνωσης μπορεί να είναι κατ' αντιρροή (οι συνηθέστερες), κατ' ομορροή ή κατά εγκάρσια ροή (Riffat, 2013). Στην απλούστερη μορφή του η διάταξη απογύμνωσης αποτελείται από μία στήλη, έναν δίσκο υποστήριξης για το πληρωτικό υλικό, ένα σύστημα κατανομής του υγρού που θα υποστεί απογύμνωση

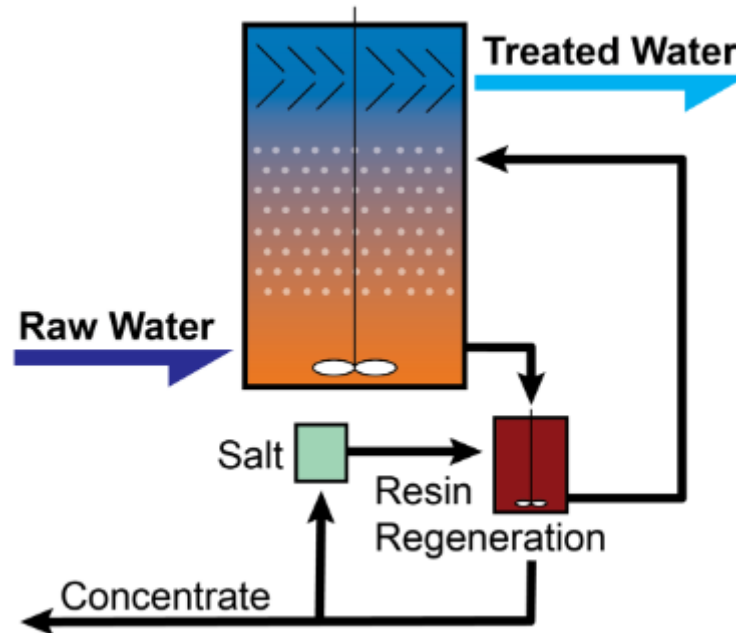
και ένα σύστημα παροχής αέρα. Σημειώνεται ενδεικτικά ότι στις περισσότερες περιπτώσεις όπου έχει υιοθετηθεί διεργασία απογύμνωσης για την απομάκρυνση της αμμωνίας έχουν εμφανιστεί αρκετά λειτουργικά προβλήματα, σημαντικότερα από τα οποία είναι η διατήρηση του απαιτούμενου pH, η επικάθιση αλάτων εντός της στήλης και των γραμμών τροφοδοσίας και η μικρή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες (Metcalf & Eddy, 2003; Riffat, 2013).

Η απόσταξη αποτελεί και αυτή μία φυσική διεργασία και αποσκοπεί στην απομάκρυνση των συστατικών των υγρών αποβλήτων με εξάτμιση και συμπύκνωση. Στην περίπτωση ορθολογικής επαναχρησιμοποίησης των αποβλήτων, η διεργασία μπορεί να συνδυαστεί με την αντίστροφη ώσμωση, με στόχο τον έλεγχο της αύξησης της συγκέντρωσης των αλάτων. Καθώς πρόκειται για μία διεργασία υψηλού λειτουργικού κόστους, η απόσταξη περιορίζεται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται υψηλή ποιότητα εκροής, όπου οι ρύποι δεν μπορούν να απομακρυνθούν με άλλες μεθόδους και όπου είναι διαθέσιμη θερμική ενέργεια χαμηλού κόστους (Metcalf&Eddy, 2003; Riffat, 2013).

4.1.7. Τεχνολογίες ανταλλαγής ιόντων

Οι διεργασίες ανταλλαγής ιόντων αποτελούν διεργασίες κατά τις οποίες ιόντα ενός ορισμένου είδους σε αδιάλυτο μέσο ανταλλαγής αντικαθίστανται με ιόντα διαφορετικού μεγέθους που βρίσκονται εντός του διαλύματος. Σε εφαρμογές επεξεργασίας υγρών αποβλήτων οι εν λόγω διεργασίες έχουν χρησιμοποιηθεί για την απομάκρυνση ολικών διαλυτών στερεών, βαρέων μετάλλων και αζώτου. Οι υπό εξέταση διεργασίες μπορούν να είναι συνεχείς ή ασυνεχείς. Στις τελευταίες το μέσο ανταλλαγής, συνήθως ρητίνη, αναμειγνύεται με την εισροή σε αντιδραστήρα μέχρι την ολοκλήρωση της αντίδρασης. Η ρητίνη που χρησιμοποιείται απομακρύνεται με καθίζηση και, κατόπιν, αναγεννάται και επαναχρησιμοποιείται. Σε μία συνεχή διεργασία το υλικό ανταλλαγής τοποθετείται σε κλίνη ή σε στήλη πληρωτικού υλικού και η τροφοδοσία διέρχεται μέσω αυτής. Οι μονάδες ανταλλαγής ιόντων συνεχούς λειτουργίας είναι συνήθως στήλες, με κλίνη με πληρωτικό υλικό, και καθοδικής ροής. Τα απόβλητα εισέρχονται από την κορυφή της στήλης υπό πίεση, διαπερνούν την κλίνη της ρητίνης και εξέρχονται από τον πυθμένα. Όταν εξαντληθεί η χωρητικότητα της ρητίνης, λαμβάνουν χώρα αντίστροφη πλήση, για να απομακρυνθούν τα

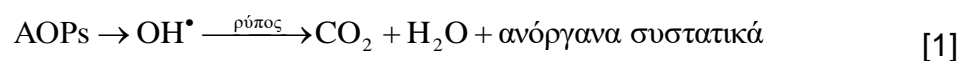
εγκλωβισμένα στερεά, και, κατόπιν, αναγέννηση της στήλης. Στο Σχήμα 4.6 δίνεται μια τυπική διάταξη ιονανταλλαγής για την απομάκρυνση αλάτων από την τροφοδοσία.



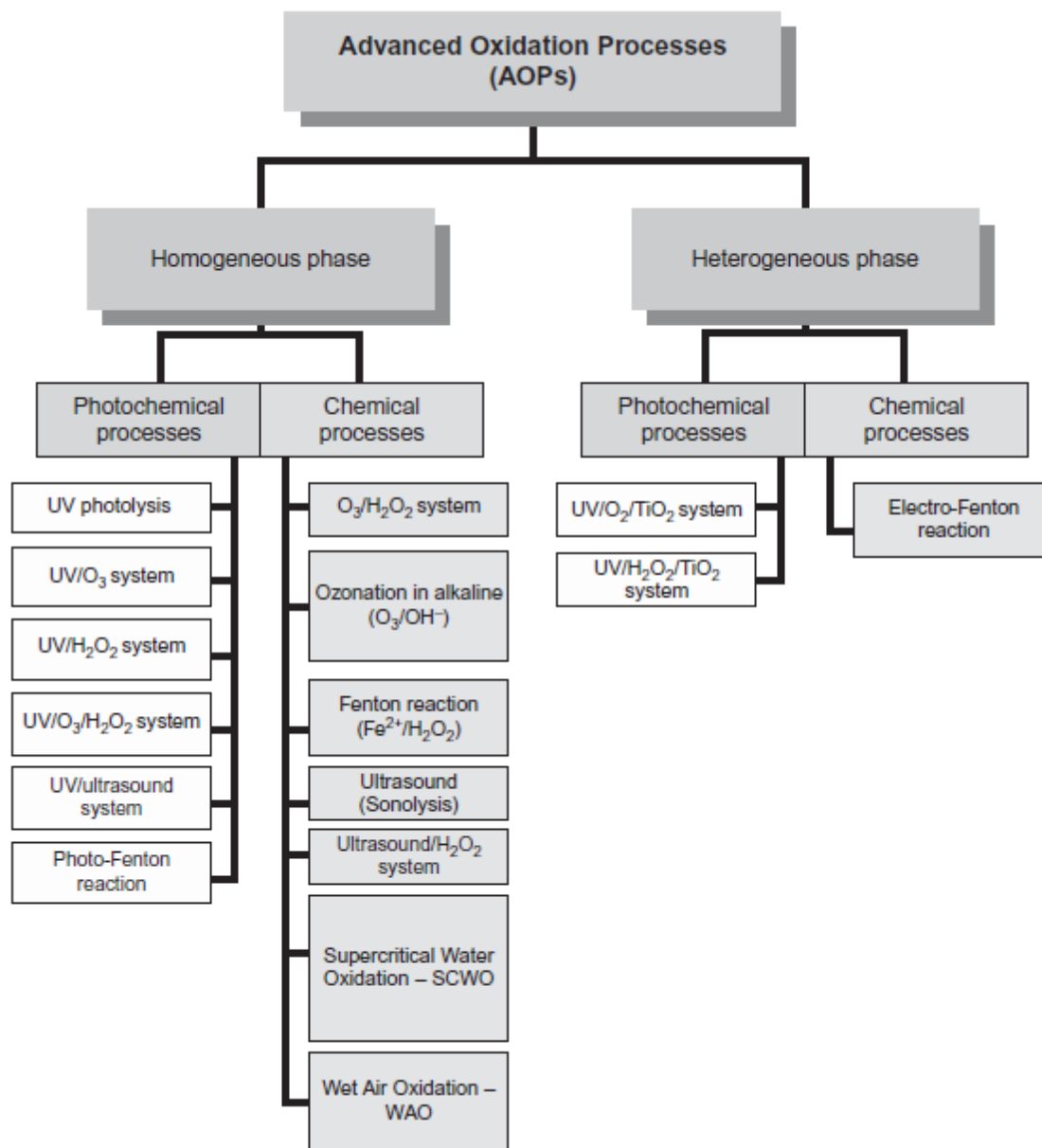
Σχήμα 4.6. Τυπική διάταξη ιονανταλλαγής για την απομάκρυνση αλάτων από το νερό (IXOM Watercare, χ.χ.).

4.1.8. Διεργασίες προχωρημένης οξειδωσης

Το ενδιαφέρον των ερευνητών έχει πρόσφατα εστιάσει στη διερεύνηση των AOPs στο πλαίσιο της προχωρημένης επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων. Οι εν λόγω τεχνολογίες μπορούν να εφαρμοστούν στην υγρή ή την αέρια φάση και κοινό τους χαρακτηριστικό συνιστά το γεγονός ότι η δράση τους εδράζεται στον σχηματισμό ριζών υδροξυλίου ως ενδιάμεσου προϊόντος χημικών αντιδράσεων με τελικό στόχο την αποικοδόμηση του εκάστοτε ρύπου. Με τη χρήση ριζών υδροξυλίου ως των κύριων οξειδωτικών παραγόντων είναι εφικτή η αποικοδόμηση των ρύπων σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και ανόργανα συστατικά ή ο μετασχηματισμός τους σε οξειδωμένα και περισσότερο αβλαβή παράγωγα, σύμφωνα με την αντίδραση 1 (Metcalf & Eddy, 2003).



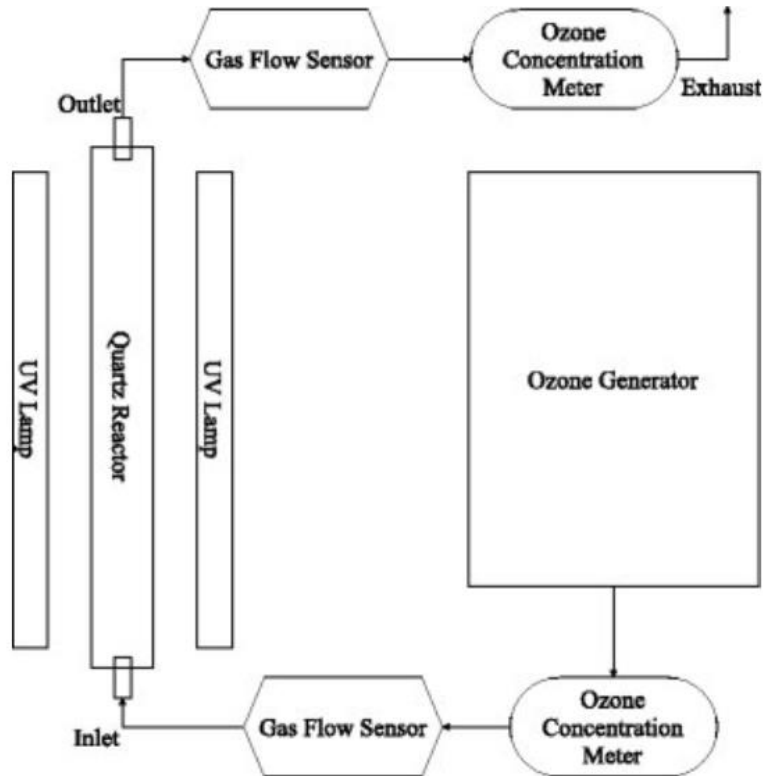
Οι AOPs διακρίνονται σε ομοιογενείς και σε ετερογενείς διεργασίες και, περαιτέρω, σε φωτοχημικές και χημικές διεργασίες (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7. Βασικές AOPs (Metcalf&Eddy, 2003).

Συνήθης AOP είναι ο συνδυασμός της οζόνωσης με την υπεριώδη (ultraviolet, UV) ακτινοβολία. Γενικά, η συνήθης χρήση του όζοντος στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων σχετίζεται με την ανάγκη ελέγχου των συστατικών που προσδίδουν χρώμα και οσμή στη μάζα του νερού, αλλά και των δύσκολα αποικοδομήσιμων διαλυτών οργανικών συστατικών (Limetal., 2022). Λόγω των φυσικοχημικών του χαρακτηριστικών, το όζον δεν παρέχεται από εξωτερική πηγή,

αλλά λαμβάνει χώρα η επιτόπια παραγωγή του. Αρχικά, το όζον μεταφέρεται στην υγρή φάση σε διαλελυμένη μορφή και, κατόπιν, οξειδώνει ορισμένα συστατικά των αποβλήτων. Επιπροσθέτως, μέρος του όζοντος μετασχηματίζεται σε ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου, αφού αντιδράσει με ανιόντα υδροξυλίου ή άλλες ελεύθερες ρίζες (Masoomi et al., 2019). Το κυτταρικό τοίχωμα των μικροοργανισμών διασπάται άμεσα με τη χρήση του όζοντος, ενώ η οζόνωση έχει θεωρηθεί ως περισσότερο αποδοτική από τη χλωρίωση σε ό,τι αφορά την αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης των ιών από τα λύματα. Επίσης, η οζόνωση δεν οδηγεί στην παραγωγή χημικών υπολειμμάτων στην εκροή (Metcalf&Eddy, 2003). Ο συνδυασμός της οζόνωσης με τη χρήση ακτινοβολίας UV διασφαλίζει νερό ακόμη πιο υψηλής ποιότητας, καθώς, για παράδειγμα, η εν λόγω ακτινοβολία εμφανίζει μικροβιοκτόνο δράση λόγω της φωτοχημικής προσβολής του γενετικού υλικού των μικροοργανισμών (Τσώνης, 2004). Η χρήση ακτινοβολίας UV περιλαμβάνει την εγκατάσταση λυχνιών εκπομπής UV, εξωτερικού περιβλήματος χαλαζία, όπου τοποθετούνται οι λυχνίες, διάταξης στήριξης, πυκνωτών και διάταξης παροχής ισχύος στους πυκνωτές. Οι παράγοντες που επιδρούν στην απόδοση απομάκρυνσης των μικροοργανισμών με χρήση ακτινοβολίας UV περιλαμβάνουν τον συνδυασμό λυχνίας – πυκνωτή, τον χρόνο έκθεσης της εισροής στην ακτινοβολία, η έντασή της, καθώς και, όπως είναι ευνόητο, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των ρύπων (Metcalf & Eddy, 2003). Στο Σχήμα 4.8 παρατίθεται τυπική διάταξη όζοντος – ακτινοβολίας UV για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων.



Σχήμα 4.8. Τυπική διάταξη όζοντος – ακτινοβολίας UV για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων (Yu et al., 2016).

Από τις τεχνολογίες AOPs εκείνες που περιλαμβάνουν την ηλεκτροχημική οξείδωση θεωρούνται ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων που εμφανίζουν χαμηλές συγκεντρώσεις COD, δηλαδή μικρότερες από 5 g/L. Εν τούτοις, οι εν λόγω τεχνολογίες μπορούν να εφαρμοστούν ικανοποιητικά και για την επεξεργασία λυμάτων με επίπεδα COD περί τα 30 g/L ή ακόμη και τα 100 g/L (Serikawa et al., 2009). Το βασικό πλεονέκτημα των τεχνολογιών αυτών περιλαμβάνει το γεγονός ότι δεν είναι αναγκαία η χρήση χημικών αντιδραστηρίων, καθώς για την εφαρμογή τους απαιτείται μόνον η ηλεκτρική ενέργεια η οποία καταναλώνεται για την οξείδωση των ρύπων (οργανικών συστατικών) και, με δεδομένο ότι το ηλεκτρόνιο καθεαυτό θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματικό και ασφαλές «αντιδρών», οι τεχνολογίες ηλεκτροχημικής οξείδωσης αντιμετωπίζονται ως κατ' αρχήν «φιλικές» προς το περιβάλλον.

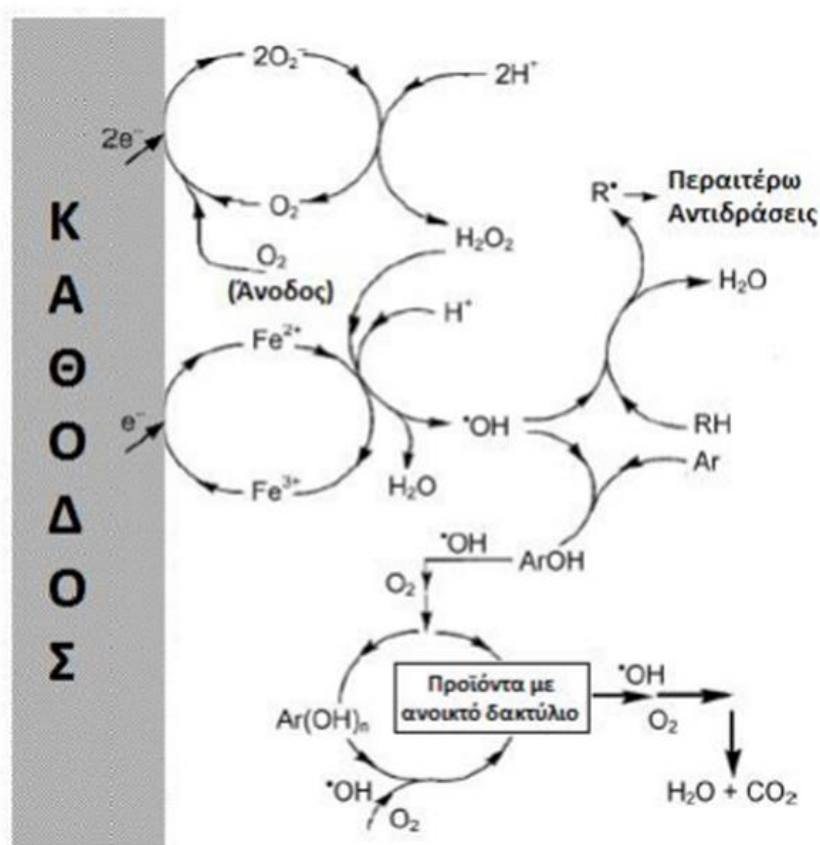
Γενικά, τα βασικά πλεονεκτήματα που συχνά αναφέρονται στα σχετικά αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας είναι τα ακόλουθα (Metcalf & Eddy Inc., 2003; Plakas et al., 2016):

1. Η ευελιξία τους, καθώς οι τεχνολογίες δεν είναι επιλεκτικές και η εφαρμογή της μπορεί να συνεπάγεται την αποικοδόμηση ποικίλων ρύπων, αλλά και να υλοποιηθεί για όγκους αποβλήτων που κυμαίνονται από μL έως και εκατομμύρια L.
2. Η ενεργειακή τους απόδοση, καθώς οι ηλεκτροχημικές διεργασίες προϋποθέτουν χαμηλά θερμοκρασιακά επίπεδα, ενώ το δυναμικό δύναται να ελεγχθεί εύκολα.
3. Η επιδεκτικότητα που εμφανίζουν σε αυτοματοποίηση, καθώς οι χρησιμοποιούμενες ηλεκτρικές παράμετροι θεωρούνται κατάλληλες για απόκτηση δεδομένων και τον έλεγχο των διεργασιών, παρέχοντας τη δυνατότητα αυτοματοποίησης αυτών.

Για παράδειγμα, ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον μεταξύ των AOPs έχει προσελκύσει η χρήση της μεθόδου Electro-Fenton. Το αντιδραστήριο Fenton αποτελεί ένα μείγμα του υπεροξειδίου του υδρογόνου και αλάτων του δισθενούς σιδήρου. Η ονομασία του οφείλεται στον Henry Horstman Fenton, ο οποίος πρώτος πειραματίστηκε με το εν λόγω αντιδραστήριο, στο πλαίσιο διερεύνησης της οξειδωσης του ταρταρικού οξέος. Αργότερα, σε ό,τι αφορά τη χρήση του αντιδραστηρίου Fenton, οι χημικοί Haber και Weiss πρότειναν έναν μηχανισμό οξειδοαναγωγικών αντιδράσεων που περιλάμβανε τον σχηματισμό ελευθέρων ριζών υδροξυλίου. Από τη δεκαετία του 1960 το εν λόγω αντιδραστήριο έχει χρησιμοποιηθεί για τη διάσπαση τοξικών οργανικών μικρορρυπαντών στο νερό. Η μέθοδος Electro-Fenton έχει θέσει τις βάσεις της ανάπτυξης συναφών ηλεκτροχημικών μεθόδων απορρύπανσης των υδάτων. Η τεχνολογία Electro-Fenton είναι εξέλιξη της κλασικής μεθόδου Fenton, ώστε αντιμετωπίζονται τα μειονεκτήματα της τελευταίας που αφορούν κατά βάση τον σχηματισμό ιλύος, λόγω της καθίζησης των ιόντων σιδήρου, καθώς και το σημαντικό κόστος του υπεροξειδίου του υδρογόνου. Πιο συγκεκριμένα, στην Electro-Fenton λαμβάνει χώρα συνεχής και επιτόπια ηλεκτροχημική παραγωγή υπεροξειδίου του υδρογόνου επί της επιφάνειας μίας καθόδου, το δε σύστημα τροφοδοτείται με αέρα ή οξυγόνο, ενώ εφαρμόζεται κατάλληλη τάση ηλεκτρικού ρεύματος. Η μέθοδος εφαρμόζεται παρουσία ιόντων

σιδήρου ή νανοσωματιδίων σιδήρου, αφού τα ιόντα σιδήρου λειτουργούν ως καταλύτης (Plakas et al., 2016).

Η διεργασία Electro-Fenton απεικονίζεται συνοπτικά στο Σχήμα 4.9. Ο κύκλος της διαδικασίας καταλυτικής οξείδωσης περιλαμβάνει την ταυτόχρονη αναγωγή του διαλελυμένου οξυγόνου και των ιόντων τρισθενούς σιδήρου. Ακολούθως, πραγματοποιούνται η ηλεκτροχημική παραγωγή υπεροξειδίου του υδρογόνου και ιόντων δισθενούς σιδήρου που αντιδρούν βάσει της αντίδρασης Fenton προς παραγωγή ισχυρών ελευθέρων ριζών υδροξυλίου και ιόντων τρισθενούς σιδήρου. Οι εν λόγω ρίζες συμμετέχουν, έπειτα, σε διάφορες χημικές αντιδράσεις, όπως στην αφυδρογόνωση υδρογονανθράκων, την υδροξυλίωση αρωματικών υδρογονανθράκων κ.ά., μέχρι να μετατραπούν σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό (Oturán, 2000).



Σχήμα 4.9. Κύριες αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο πλαίσιο αξιοποίησης της τεχνολογίας Electro-Fenton για την απομάκρυνση υδρογονανθράκων (Oturán, 2000).

4.1.9. Τεχνολογίες απολύμανσης

Η απολύμανση των υγρών αποβλήτων αναφέρεται στις διεργασίες αδρανοποίησης που υιοθετούνται, ώστε τα απόβλητα να μπορέσουν να διατεθούν ή/και να επαναχρησιμοποιηθούν με ασφάλεια. Επομένως, οι εν λόγω διεργασίες αποσκοπούν στην εξάλειψη της παθογόνου δράσης των μικροοργανισμών (Τσώνης, 2004). Γενικά, η αδρανοποίηση αυτή δύναται να επιτευχθεί με τους εξής μηχανισμούς (Metcalf&Eddy, 2003; Τσώνης, 2004):

1. Με καταστροφή ή βλάβη του κυτταρικού υλικού των μικροοργανισμών, έπειτα από την επίδραση του μέσου απολύμανσης σε βασικά συστατικά του συγκεκριμένου υλικού.
2. Με αδρανοποίηση της λειτουργίας κάποιων ενζύμων, ώστε να επηρεαστούν οι μεταβολικοί μηχανισμοί των μικροοργανισμών.
3. Με παρεμπόδιση της σύνθεσης βιολογικών μακρομορίων και του κυτταρικού τοιχώματος των μικροοργανισμών.

Ο βαθμός εξασφάλισης των παραπάνω επιδράσεων καθορίζεται κυρίως από τις εξής παραμέτρους (Τσώνης, 2004; Zhang et al., 2017):

1. Τη δόση του μέσου απολύμανσης και τη συγκέντρωσή του.
2. Το είδος του μέσου απολύμανσης.
3. Του χρόνου επαφής μεταξύ των αποβλήτων και του μέσου απολύμανσης.
4. Τον τύπο και τη φυσιολογική κατάσταση του μικροοργανισμού.
5. Σε ορισμένες περιπτώσεις, από το pH της τροφοδοσίας.
6. Τη θερμοκρασία της τροφοδοσίας.
7. Τη θολότητα της τροφοδοσίας.
8. Το διαλυτό οργανικό υλικό της τροφοδοσίας.

Στις συνήθεις μεθόδους απολύμανσης περιλαμβάνονται η χλωρίωση, η οζόνωση και η χρήση ακτινοβολίας UV (οι δύο τελευταίες έχουν περιγραφεί παραπάνω). Η χλωρίωση έχει υπάρξει η περισσότερο ενδεδειγμένη και διαδεδομένη μέθοδος απολύμανσης και αφορά τη χρήση μορφών χλωρίου είτε ως μοριακού χλωρίου το οποίο αποθηκεύεται σε φιάλες υπό πίεση ή δεξαμενές ή σε μορφή

διαλύματος υποχλωριώδους νατρίου (εναλλακτικά, το χλώριο μπορεί να προκύπτει από διαλυτοποίηση υποχλωριώδους ασβεστίου επί τόπου) (Τσώνης, 2004). Ο σχεδιασμός της διεργασίας περιλαμβάνει τη χρήση κατάλληλων δεξαμενών και κατάλληλου χρόνου παραμονής, ώστε εξασφαλίζεται ότι το 90% της μάζας της τροφοδοσίας παραμένει στη δεξαμενή για το προβλεπόμενο χρονικό διάστημα. Συνήθως υιοθετείται η χρήση μακρόστενων δεξαμενών χλωρίωσης μαιανδρικού τύπου, όπως αυτές του Σχήματος 4.10 (Τσώνης, 2004). Αν η υπολειμματική συγκέντρωση του χλωρίου μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τοξικές επιδράσεις στους οργανισμούς των υδάτινων οικοσυστημάτων, η επεξεργασμένη εκροή αποχλωριώνεται είτε με την προσθήκη θειωδών αλάτων είτε με την προσθήκη διοξειδίου του θείου (Metcalf&Eddy, 2003).



Σχήμα 4.10. Δεξαμενή χλωρίωσης (Enviro Mix, χ.χ.).

4.1.10. Εναλλακτικές τεχνολογίες προχωρημένης επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

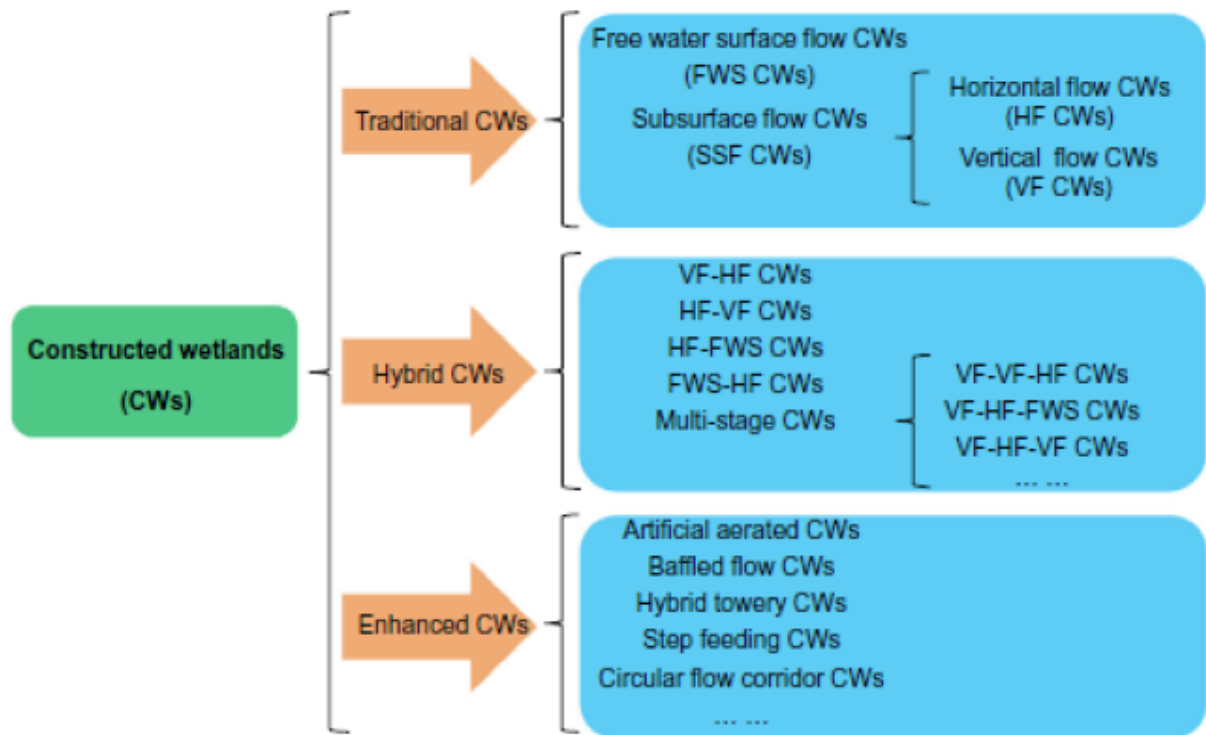
Πέρα από τις τεχνολογίες που υιοθετούνται στο πλαίσιο της λειτουργίας μιας μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, έχουν πρόσφατα προταθεί εναλλακτικές τεχνολογίες, όπως η χρήση τεχνητών υγροτόπων και η διήθηση με χρήση γεωσκωλήκων.

Οι υγρότοποι ή υδροβιότοποι αποτελούν τμήματα του εδάφους, συνήθως με βάθος μικρότερο των 0.6 m, που κατακλύζεται από νερό και μέσα στο οποίο λαμβάνει χώρα η ανάπτυξη διαφόρων φυτικών ειδών, όπως καλαμιών. Η βλάστηση του υγροτόπου παρέχει ένα βασικό υπόστρωμα ανάπτυξης βακτηριακών οργανισμών, ώστε πραγματοποιούνται διάφορες διεργασίες απομάκρυνσης των συστατικών υγρών αποβλήτων (διήθηση, προσρόφηση κ.ά.). Ουσιαστικά, πρόκειται για συστήματα φυτικής βλάστησης, χώματος, μικροοργανισμών, νερού και διαφόρων υποστρωμάτων, με τα υγρά απόβλητα να εφαρμόζονται πάνω ή κάτω από την εδαφική επιφάνεια (Wu et al., 2015). Γενικά, πρόκειται για τεχνολογία που εμφανίζει χαμηλό κόστος και που συνήθως δεν συνοδεύεται από σημαντική κατανάλωση ενέργειας (Metcalf & Eddy, 2003). Οι τεχνητοί υγρότοποι αξιοποιούνται για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και υδάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Κατά συνέπεια, οι σχεδιαστικές μεταβλητές και τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των εν λόγω συστημάτων είναι γνωστά εδώ και αρκετά έτη, με τις σύγχρονες προσπάθειες και δημοσιεύσεις να επικεντρώνονται στη συγκέντρωση και σύγκριση πληροφοριών και δεδομένων που έχουν ληφθεί από διάφορες πηγές (EPA, 2000).

Οι τεχνητοί υγρότοποι διακρίνονται κατά βάση σε (Σχήμα 4.11) (Metcalf & Eddy, 2003):

1. Τεχνητούς υγρότοπους επιφανειακής ροής ή ελεύθερης επιφάνειας (free-water surface wetlands / systems, FWS).
2. Τεχνητούς υγρότοπους υποεπιφανειακής ροής (sub surface flow wetlands/systems, SFS).

Τα συστήματα SFS διακρίνονται περαιτέρω στους τεχνητούς υγροτόπους οριζόντιας ροής (horizontal flow systems, HF) και στους τεχνητούς υγροτόπους κατακόρυφης ροής (vertical flow, VF) (Metcalf & Eddy, 2003).



Σχήμα 4.11. Ταξινόμηση τεχνητών υγροτόπων (Metcalf & Eddy, 2003).

Για τις σύγχρονες ανάγκες επεξεργασίας και επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων τα συστήματα διαχείρισης υιοθετούν συνήθως συνδυασμό των παραπάνω τύπων, που στις περισσότερες περιπτώσεις συνδέονται εν σειρά, με αποτέλεσμα να γίνεται λόγος για υβριδικά συστήματα υγροτόπων (συνδυασμούς HF, VF ή και άλλων εν σειρά). Η υβριδική αυτή ενσωμάτωση περιορίζει την επίδραση των μειονεκτημάτων των επιμέρους συστημάτων, καθώς αυτά αντισταθμίζονται με τα πλεονεκτήματα των άλλων και, ως εκ τούτου, περιορίζεται σε σημαντικό βαθμό η απαιτούμενη επιφάνεια (Vymazal, 2013).

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της χρήσης τεχνητών υγροτόπων ως εναλλακτικής τεχνολογίας επεξεργασίας αποβλήτων στο πλαίσιο επαναχρησιμοποίησης νερού είναι τα εξής (EPA, 2000):

1. Μπορούν να επεξεργαστούν αποτελεσματικά την τροφοδοσία με παθητικό και φυσικό τρόπο, ώστε η χρήση τους ελαχιστοποιεί τις απαιτήσεις σε μηχανικό εξοπλισμό, καταναλισκόμενη ενέργεια και εξειδικευμένο προσωπικό το οποίο επιβλέπει τη λειτουργία των συστημάτων.
2. Εμφανίζουν χαμηλό κόστος λειτουργίας και συντήρησης.

3. Η λειτουργία τους είναι δυνατή καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, χωρίς την εμφάνιση ιδιαίτερων προβλημάτων.
4. Εφόσον σχεδιαστούν κατάλληλα, οι τεχνητοί υγρότοποι εμφανίζουν υψηλή αισθητική αξία και μπορούν να συμβάλλουν στην αναβάθμιση του περιβάλλοντος.
5. Η λειτουργία τους δεν έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή ιλύος.

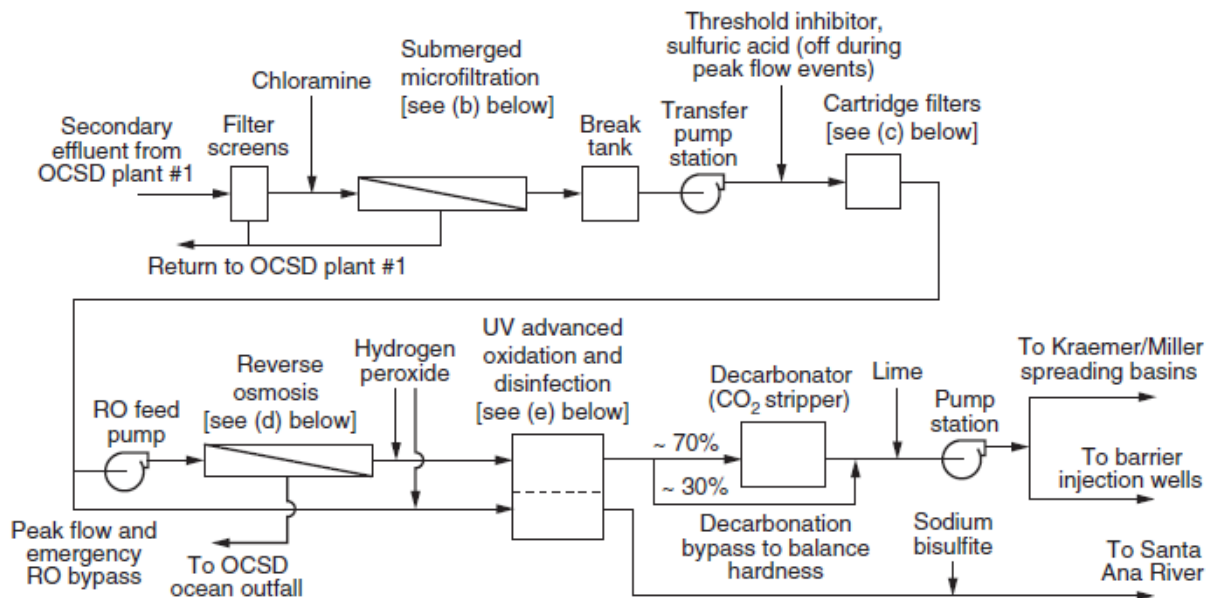
Ωστόσο, οι τεχνητοί υγρότοποι παρουσιάζει τα εξής μειονεκτήματα (EPA, 2000):

1. Η εγκατάστασή τους προϋποθέτει τη διαθεσιμότητα σχετικά μεγάλων εκτάσεων, ιδίως όταν απαιτείται η μείωση της περιεκτικότητας της τροφοδοσίας σε θρεπτικά συστατικά.
2. Εμφανίζουν σημαντικά μειωμένη ικανότητα απομάκρυνσης φωσφόρου και περιορισμένη βιολογική απομάκρυνση του αζώτου, καθώς στο μεγαλύτερο τμήμα της υδατίνης μάζας επικρατούν κυρίως ανοξικές συνθήκες.
3. Ενίοτε χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να περιορίσουν την ταχύτητα της νιτροποίησης, της απονιτροποίησης και της απομάκρυνσης του οργανικού άνθρακα. Μεγάλοι χρόνοι παραμονής μπορούν να αντιμετωπίσουν το εν λόγω πρόβλημα, όμως προϋποθέτουν σημαντικό μέγεθος συστήματος.
4. Αποτελούν εστίες αναπαραγωγής κουνουπιών και άλλων εντόμων που συνιστούν φορείς ασθενειών.

4.2. Διεθνές επίπεδο

Σε διεθνές επίπεδο οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής (ΗΠΑ) έχουν πρωτοπορήσει στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων προς επαναχρησιμοποίησή τους σε ποικίλες εφαρμογές. Είναι χαρακτηριστικό ότι τα συστήματα των μονάδων επεξεργασίας είναι τόσο προηγμένα, ώστε επιτρέπουν και την αναβάθμιση της ποιότητας της εκροής στο επίπεδο του πόσιμου νερού. Ενδεικτικά, οι μεγαλύτερες εγκαταστάσεις επαναχρησιμοποίησης νερού για έμμεση διάθεση προς πόση βρίσκονται στην Orange County της Καλιφόρνια. Η εγκατάσταση έχει δυναμικότητα 2.65 εκατομμυρίων m³/d και περιλαμβάνει τη χρήση εσχαρών μικρού μεγέθους ανοίγματος, τη χρήση χλωραμίνης, διεργασίες μικροδιήθησης (εις διπλούν), αντίστροφης ώσμωσης, ακτινοβολίας UV σε συνδυασμό με υπεροξειδίο

του υδρογόνου, εκγύμνωση προς απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα και προσθήκη ασβέστη. Η εκροή καταλήγει στην άρδευση, στον εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων και του γειτονικού ποταμιού, από τα οποία αντλείται νερό για πόση (Σχήμα 4.12) (Metcalf&Eddy, 2014).



Σχήμα 4.12. Διάγραμμα ροής του συστήματος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων της Orange County της Καλιφόρνια (Metcalf&Eddy, 2014).

Πρωτοπόρο σε διεθνές επίπεδο είναι και το Ισραήλ σε ό,τι αφορά τη χρήση ανακτημένου νερού, καθώς στην εν λόγω χώρα, που αντιμετωπίζει σημαντικά προβλήματα ξηρασίας και λειψυδρίας, που επιδεινώνονται από την κλιματική αλλαγή, λαμβάνει χώρα η επαναχρησιμοποίηση περίπου του 90% των αστικών λυμάτων με στόχο την άρδευση. Η μεγαλύτερη μονάδα επαναχρησιμοποίησης είναι η μονάδα του Shafdan, η οποία λειτουργεί παράλληλα ως κέντρο έρευνας και ανάπτυξης. Οι εγκαταστάσεις επεξεργάζονται 140 εκατομμύρια m³ λυμάτων το έτος που παράγονται από την κεντρική μητροπολιτική ζώνη του Ισραήλ και παράγουν επεξεργασμένη εκροή που διοχετεύεται σε καλλιέργειες του νοτίου τμήματος της χώρας. Η μονάδα, που είναι η μεγαλύτερη του είδους της στη Μέση Ανατολή, περιλαμβάνει την άντληση της εκροής της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας σε υπόγειο υδροφόρο, όπου υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία, χωρίς να αναμειγνύεται με το

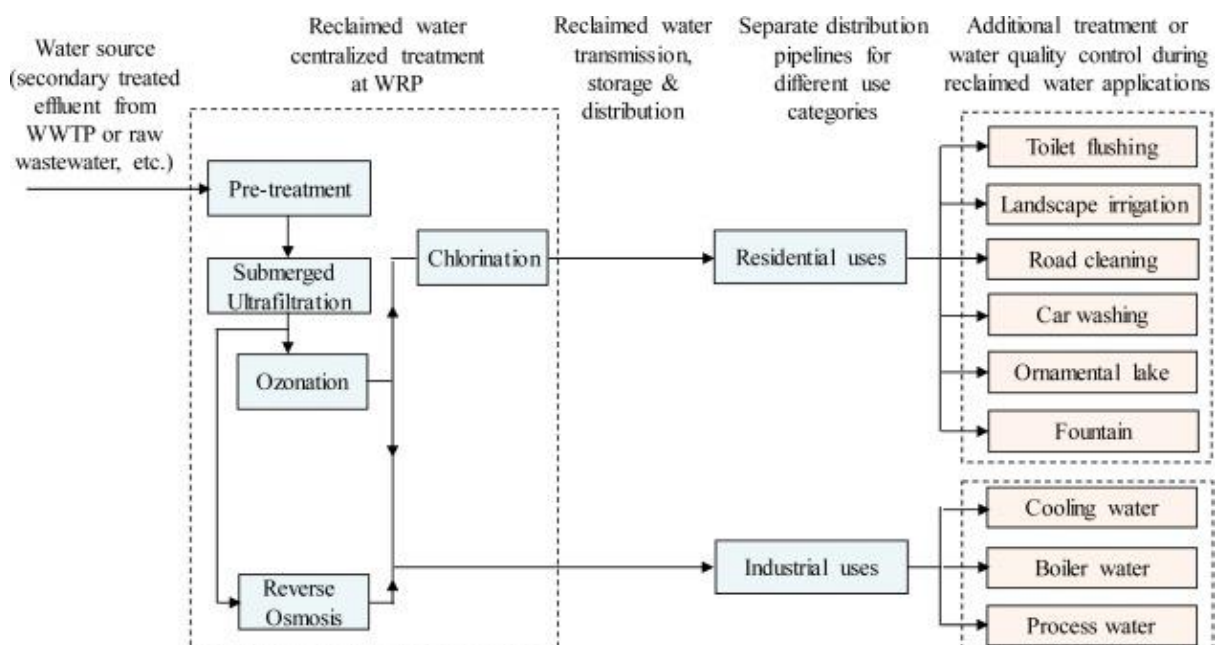
φυσικό νερό, με φυσική διήθηση μέσω του εδάφους, χωρίς μηχανική παρέμβαση (Σχήμα 4.13).



Σχήμα 4.13. Επεξεργασία της εκροής της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων Shafdan σε υδροφορέα (EPA, 2023).

Το ζήτημα της αποδοτικής και αποτελεσματικής χρήσης των υδάτινων πόρων είναι κρίσιμης σημασίας ιδίως σε αναπτυσσόμενες χώρες και σε χώρες που αντιμετωπίζουν ραγδαία αστικοποίηση, όπως η Κίνα. Στην περίπτωση της Κίνας έχει φανεί ότι η ανάπτυξη κεντρικών συστημάτων επαναχρησιμοποίησης νερού έχει θετικές επιπτώσεις στην κατά τόπους διαθεσιμότητα του νερού και στα επίπεδα του περιφερειακού ακαθάριστου εγχωρίου προϊόντος, ενώ ο βαθμός επαναχρησιμοποίησης του νερού σε ορισμένες πυκνοκατοικημένες πόλεις της χώρας έχει ήδη ανέλθει σε επίπεδα 35-60%. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση κεντρικού συστήματος επεξεργασίας νερού στην πυκνοκατοικημένη πόλη Tianjin σε έκταση που καλύπτει πάνω από 200 km². Στην περίπτωση αυτή οι κύριοι χρήστες του ανακτημένου νερού περιλαμβάνουν μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, αλλά και νοικοκυριά στην περιφερειακή οικιστική ζώνη. Λόγω των διαφορετικών προδιαγραφών που εμφανίζει η ποιότητα του ανακτημένου νερού στις διάφορες εφαρμογές, η κεντρική μονάδα επεξεργασίας ενσωματώνει διάφορες διεργασίες και διανέμει το ανακτημένο νερό σε διαφορετικούς αγωγούς για την ιεραρχική επαναχρησιμοποίηση του νερού. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.14, έπειτα από τη δευτεροβάθμια επεξεργασία, το νερό υφίσταται κάποιου είδους προεπεξεργασία και,

κατόπιν, έπειτα από υπερδιήθηση, ακολουθεί δύο εναλλακτικές πορείες. Το ένα τμήμα του ανακτημένου νερού οζονώνεται. προς αποχρωματισμό και, κατόπιν, χλωριώνεται προς απολύμανση, ενώ, ακολούθως, διανέμεται σε πάνω από 60,000 νοικοκυριά. Οι οικιακοί χρήστες χρησιμοποιούν το ανακτημένο νερό για χρήση σε αποχωρητήρια, άρδευση χώρων πρασίνου, καθαρισμό οδών και αυτοκινήτων, για τη λειτουργία συντριβανιών και για τη συντήρηση λιμνών στο αστικό τοπίο. Σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να απαιτείται επιμέρους επεξεργασία για την εξασφάλιση κατάλληλης ποιότητας νερού. Το δεύτερο τμήμα του ανακτημένου νερού διοχετεύεται σε συστήματα αντίστροφης ώσμωσης προς απομάκρυνση των ολικών διαλελυμένων σωματιδίων, θειικών ιόντων, ιόντων χλωρίου και άλλων συστατικών. Για μείωση του κόστους, το διήθημα της αντίστροφης ώσμωσης αναμειγνύεται με την επεξεργασμένη εκροή της διεργασίας οζόνωσης σε αναλογία 2:3. Το προκύπτον μείγμα είναι ποιότητας τέτοιας που επιτρέπει τη χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές. Υπό συνθήκες χαμηλής ποιότητας νερού και υψηλών διακυμάνσεων των εισροών του ανακτημένου νερού ο λόγος ανάμειξης προσαρμόζεται κατάλληλα και το μείγμα μπορεί να παρέχεται και για οικιακή χρήση. Με βάση στοιχεία του 2015 η μονάδα προμηθεύει 13 εκατομμύρια m³ ανακτημένου νερού σε ετήσια βάση, το 45% του οποίου αξιοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές (Chen et al., 2017).



Σχήμα 4.14. Κεντρικό σύστημα επαναχρησιμοποίησης νερού στην Tianjin της Κίνας (Chen et al., 2017).

Η ΕΕ υπολείπεται εν γένει σε σημαντικό βαθμό σε ό,τι αφορά την επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων σε σύγκριση με κράτη που έχουν πρωτοπορήσει σε αυτόν τον τομέα, όπως η Ιαπωνία και οι ΗΠΑ. Σε επίπεδο ΕΕ επαναχρησιμοποιείται μόλις περί το 1 δισεκατομμύριο m^3 των εκροών υγρών αποβλήτων, ενώ, αντίθετα, το δυναμικό επαναχρησιμοποίησης είναι 6-7 φορές μεγαλύτερο (Αγγελάκης, 2023). Οι διαφοροποιήσεις της διαθεσιμότητας των υδατικών πόρων μεταξύ των κρατών-μελών της ΕΕ έχουν επιβραδύνει τη συγκρότηση ενιαίου νομοθετικού πλαισίου για την επαναχρησιμοποίηση του νερού και σήμερα η επαναχρησιμοποίηση για άρδευση υιοθετείται κατά βάση από μεσογειακές χώρες της ΕΕ, όπως την Ιταλία, την Ισπανία και την Πορτογαλία. Επί παραδείγματι, από το 2003 στη Costa Brava της Ισπανίας χρησιμοποιούνται περί τα 3 εκατομμύρια m^3 ανακτημένου νερού σε ετήσια βάση, προκειμένου να εμπλουτιστεί ο υδροφορέας Tordera (Αγγελάκης, 2013). Γενικότερα, η Ισπανία, ως χώρα με περιοδικές ξηρασίες και με αυξημένη τουριστική δραστηριότητα αντιμετωπίζει ιδιαίτερο πρόβλημα λειψυδρίας και, ως εκ τούτου, η επαναχρησιμοποίηση του νερού αποτελούσε μονόδρομο. Σύμφωνα με τα σχετικά δεδομένα, ο όγκος του επαναχρησιμοποιούμενου νερού κατ' έτος στην Ισπανία αυξήθηκε από τα 500 εκατομμύρια m^3 την περίοδο 2014-2015 στα 1,200 το 2018 (Echevarria et al., 2022). Σήμερα στην Ισπανία ανακυκλώνεται γύρω στο 14% των χρησιμοποιούμενων υδάτων (Αγγελάκης, 2023).

Η Γαλλία συνιστά χώρα που έχει δώσει έμφαση στην επαναχρησιμοποίηση νερού, καθώς ήταν μία από τις πρώτες της ΕΕ που υιοθέτησε σχετικές τεχνικές. Η νομοθεσία που διέπει τη λειτουργία των συστημάτων διαμορφώθηκε μεταξύ του 2010 και του 2014 και αφορούσε τη χρήση νερού που προερχόταν από την επεξεργασία αστικών λυμάτων στην άρδευση καλλιεργειών ή χώρων πρασίνου (Mendr et, 2022). Ωστόσο, στη Γαλλία ανακυκλώνεται μόλις το 1% των χρησιμοποιούμενων υδάτων (Αγγελάκης, 2023).

4.3. Ελλάδα

Η Ελλάδα υστερεί σε σημαντικό βαθμό σε ό,τι αφορά την υλοποίηση έργων επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων, καθώς εκτιμάται ότι επαναχρησιμοποιείται λιγότερο από το 5% των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων,

ώστε η συμβολή της επαναχρησιμοποίησης στη συνολική χρήση υδατικών πόρων είναι μικρότερη από 1%. Από το παραπάνω 5% μόλις το 2% αξιοποιείται για άρδευση καλλιεργειών και αστικών χώρων πρασίνου και το 3% επαναχρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό υδροφορέων (Αγγελάκης, 2023). Η χώρα εμφανίζει, γενικότερα, σημαντική υστέρηση σε σχέση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες σε ό,τι αφορά τη διασφάλιση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας αναφορικά με τη διαχείριση των υδάτινων πόρων, ενώ, αντίθετα, γεωγραφικά της χαρακτηριστικά και η μικρή διαθεσιμότητα των υδατικών πόρων επιβάλλουν τη δρομολόγηση έργων επαναχρησιμοποίησης νερού (ΕΕΤΑΑ, 2020). Στην Ελλάδα η αγροτική χρήση των υδατικών πόρων αποτελεί το 83% της συνολικής χρήσης νερού. Καθώς τα μεγάλα αρδευτικά δίκτυα περιορίζονται κυρίως στις μεγάλες παραγωγικές πεδιάδες της χώρας, η συντριπτική πλειοψηφία της άρδευσης στην υπόλοιπη χώρα πραγματοποιείται με νερό γεωτρήσεων ή νερό πόσιμο από άλλες πηγές. Ωστόσο, η υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων τείνει να τους εξαντλήσει και σε αρκετές παράκτιες περιοχές έχει εμφανιστεί η εισροή υφάλμυρου νερού, γεγονός που καθιστά την υφιστάμενη διαδεδομένη αρδευτική πρακτική μη βιώσιμη. Κατά συνέπεια, για τη διαφύλαξη των υδάτινων πόρων κρίνεται αναγκαίο να υπάρξει μεταστροφή αυτής της κατάστασης στα επόμενα χρόνια (Lever, χ.χ.). Σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία, ο συνολικός όγκος επαναχρησιμοποιούμενων υγρών αποβλήτων ανέρχεται στα 198,250 m³/d που χρησιμοποιούνται για την άρδευση περίπου 50,000 στρεμμάτων καλλιεργήσιμων επιφανειών, ενώ διατίθενται προς επαναχρησιμοποίηση επιπλέον 10,250 m³/d για τη συντήρηση χώρων πρασίνου. Επίσης, περί τα 108,000 m³/d διατίθενται σε φυσικούς αποδέκτες για την άρδευση καλλιεργειών.

Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα επαναχρησιμοποίησης νερού αποτελούν οι περιπτώσεις της Χαλκίδας και της Καρύστου. Στην πρώτη περίπτωση έλαβε χώρα ενίσχυση της υφιστάμενης εγκατάστασης επεξεργασίας αστικών λυμάτων (ΕΕΛ) βάσει των αυστηρότερων περιβαλλοντικών ορίων, με προσθήκη μονάδας τριτοβάθμιας επεξεργασίας, ενώ, επιπλέον, υλοποιήθηκαν έργα συστημάτων άρδευσης, όπως φρεάτια και δίκτυα, για περιοχές όπου πραγματοποιήθηκε δενδροφύτευση, καθώς και για δημοτικά πάρκα. Το έργο της Χαλκίδας εντάχθηκε στη γενικότερη αναβάθμιση και επέκταση των μονάδων επεξεργασίας του Δήμου Χαλκίδας και περιλαμβάνει τη μεταφορά των επεξεργασμένων εκροών που

αξιοποιούνται για την άρδευση χώρων πρασίνου διά μέσου υποθαλάσσιου αγωγού. Αντίστοιχο έργο έχει πραγματοποιηθεί και στην Κάρυστο (ΔΕΥΑ Χαλκίδας, χ.χ.).

Από το 2007 έως το 2012 η ΕΕΛ Θεσσαλονίκης εφάρμοσε πρόγραμμα επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων με σκοπό την άρδευση εκτάσεων στην πεδιάδα Χαλάστρας – Καλοχωρίου σε περιόδους λειψυδρίας και εκτάκτων αναγκών, δηλαδή σε περιόδους κοντινές στην ΕΕΛ. Συγκεκριμένα, έως και 160,000 m³ επεξεργασμένης εκροής οδηγούνταν σε αρδευτικό κανάλι του Αξιού, χωρίς επιπρόσθετο κόστος για τους χρήστες, υποστηρίζοντας την ανάπτυξη καλλιεργειών ρυζιού, βαμβακιού και αραβοσίτου. Εν τούτοις, μετά από το 2012 ο κορεσμένος υδροφόρος ορίζοντας, η επιβολή αυστηρής νομοθεσίας με διενέργεια πολυπαραμετρικών ελέγχων και η αυξημένη αγωγιμότητα των λυμάτων σήμαιναν τη διακοπή του προγράμματος επαναχρησιμοποίησης (Χριστοδούλου, 2017).

Από το 2013 και εξής η ΕΕΛ Ηρακελίου τροφοδοτεί καλλιέργειες της Δημοτικής Ενότητας Τεμένους, με εκτιμηθείσες μέσες ημερήσιες παροχές 6,000-9,000 m³. Η τριτοβάθμια επεξεργασία της ΕΕΛ περιλαμβάνει μονάδα φίλτρανσης (περιστρεφόμενους δίσκους διπλής επιφάνειας και εσωτερικής τροφοδοσίας), αναδευόμενη δεξαμενή χημικής κροκίδωσης και απολύμανση με χρήση ακτινοβολίας UV. Το αρδευτικό δίκτυο, που εξυπηρετείται και από δύο υδρογεωτρήσεις, υποστηρίζει τις καλλιέργειες ελιάς και αμπελιού 7 αρδευτικών ζωνών συνολικής έκτασης 14,588 στρεμμάτων. Η διάθεση των επεξεργασμένων λυμάτων γίνεται από Απρίλιο έως Σεπτέμβριο. Σε περιπτώσεις που δεν υφίστανται αρδευτικές ανάγκες και, εφόσον παρατηρηθεί υπέρβαση των περιβαλλοντικών ορίων που αφορούν την εκροή, τα επεξεργασμένα απόβλητα οδηγούνται στον επιφανειακό αποδέκτη (Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης, 2013).

Στην ΕΕΛ Πόρου-Σκάλας Ν. Κεφαλονιάς έχει εγκατασταθεί ολοκληρωμένο σύστημα τριτοβάθμιας επεξεργασίας, για την επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων, με χρήση μεμβρανών υπερδιήθησης που επεξεργάζονται την εκροή των συστημάτων δευτεροβάθμιας επεξεργασίας της ΕΕΛ. Η δυναμικότητα εγκατάστασης του εν λόγω συστήματος είναι 36 m³/hr, η περιεκτικότητα της εκροής σε αιωρούμενα σωματίδια 1 mg/L και η απόδοση του συστήματος ως προς την απομάκρυνση των στερεών 97% (Μεσόγειος Α.Ε., χ.χ.).

Στην Ανατολική Αττική βρίσκονται στο στάδιο κατασκευής τρία μεγάλα έργα επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων για τις περιοχές Ραφήνα – Πικέρμι – Σπάτα – Αρτέμιδα, Κορωπί – Παιανία και Μαραθώνα – Νέας Μάκρης. Οι εν λόγω μονάδες θα παράγουν νερό που θα εμπλουτίζει υπόγειους υδροφορείς κυρίως τη χειμερινή περίοδο, ώστε να πραγματοποιείται αποκατάσταση υπόγειων υδατικών σωμάτων. Επιπλέον, κατά τη θερινή περίοδο θα παράγουν νερό για άρδευση καλλιεργειών και χώρων πρασίνου (Paradoroulou et al., 2022). Αντίθετα, η επαναχρησιμοποίηση αποβλήτων της μονάδας Ψυττάλειας, που είναι και το μεγαλύτερο έργο επεξεργασίας υγρών αποβλήτων στην Ελλάδα, θεωρείται ως σχεδόν αδύνατη, λόγω του υψηλού κόστους που απαιτείται για την άντληση και τη μεταφορά του νερού στην Αττική (Αγγελάκης, 2023).

Σε εξέλιξη βρίσκεται, επίσης, το έργο επαναχρησιμοποίησης λυμάτων της ΕΕΛ Λαμίας για άρδευση με άμεσα ωφελούμενους τους καλλιεργητές των αγροκτημάτων του Τοπικού Οργανισμού Εγγείων Βελτιώσεων (ΤΟΕΒ) Μεγάλης Βρύσης – Ροδίτσας – Αυλακίου, ήτοι του μεγαλύτερου μέρους της καλλιεργούμενης έκτασης μεταξύ της Λαμίας και του Μαλιακού Κόλπου (14,000 στρέμματα). Η διάθεση του νερού θα λαμβάνει χώρα διά μέσου του υφιστάμενου ανοικτού καναλιού του ΤΟΕΒ, με παροχή 16,000 m³ ανά ημέρα καθ' όλη τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου. Η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων εδράζεται στη διήθηση της εκροής της δευτεροβάθμιας επεξεργασίας με τη χρήση φίλτρων συνεχούς λειτουργίας, ρηχής κλίνης, καθοδικής ροής και αυτόματης έκπλυσης μέσω μετακινούμενης γέφυρας και, ακολούθως, στην απολύμανση με ακτινοβολία UV με χρήση λαμπτήρων χαμηλής πίεσης και υψηλής έντασης (ΔΕΥΑ Λαμίας, 2020; Βούτσινος, 2022).

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η επαναχρησιμοποίηση του νερού θεωρείται ως μία από τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές προκλήσεις του 21ου αιώνα, αφού οι υδάτινοι πόροι καλής ποιότητας τείνουν να περιορίζονται, λόγω και της κλιματικής αλλαγής και της πληθυσμιακής αύξησης. Βασικοί προβληματισμοί αναφορικά με την επαναχρησιμοποίηση του νερού αποτελούν η εγκατάσταση αξιόπιστων συστημάτων επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, ώστε να επιτευχθούν οι αυστηρές απαιτήσεις που αφορούν την ποιότητα του επαναχρησιμοποιούμενου νερού, η προστασία της δημόσιας υγείας και η επίτευξη της αποδοχής από το κοινό. Όπως έχει καταστεί σαφές στην παρούσα εργασία, η επαναχρησιμοποίηση του νερού προϋποθέτει εκτενή διερεύνηση της υποδομής και του σχεδιασμού των εγκαταστάσεων, αλλά και τη διαχείριση των χρήσεων νερού στη βάση αποτελεσματικής προσέγγισης των υδάτινων πόρων και του ανακτημένου νερού. Η σκοπιμότητα της ανάκτησης καθορίζεται σε κάθε περίπτωση από διάφορους παράγοντες, όπως η οικονομικότητα των σχεδιαζόμενων διεργασιών, όμως γενικά ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός των υδάτινων πόρων και η υιοθέτηση των κατάλληλων τεχνολογιών μπορεί να προσδώσει ικανοποιητική αποτελεσματικότητα και ευελιξία, που επιτρέπει τις υπηρεσίες ύδρευσης να ανταποκριθούν ικανοποιητικά στις βραχυπρόθεσμες και τις μακροπρόθεσμες απαιτήσεις υδροδότησης.

Στην παρούσα εργασία περιγράφηκε ένα πλήθος τεχνολογιών, οι περισσότερες από τις οποίες εμπίπτουν στις διεργασίες προχωρημένης επεξεργασίας των μονάδων επεξεργασίας λυμάτων. Συστήματα διήθησης και τεχνολογίες μεμβρανών, διεργασίες προχωρημένης οξειδωσης, συμπεριλαμβανομένης της οζόνωσης, της ακτινοβολίας UV και της καινοτόμου τεχνολογίας Electro-Fenton, βρίσκονται σε διαφορετικό βαθμό τεχνολογικής ωριμότητας, με ορισμένα συστήματα να έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε μονάδες μεγάλης κλίμακας και άλλα να διερευνώνται κυρίως σε πιλοτικό ή/και πειραματικό επίπεδο. Τα συστήματα αυτά έρχονται να συμπληρώσουν εναλλακτικές τεχνολογίες χαμηλού κόστους, όπως η χρήση τεχνητών υγροτόπων.

Επίσης, στην παρούσα εργασία σκιαγραφήθηκε αδρά το τοπίο της επαναχρησιμοποίησης νερού σε διεθνές επίπεδο και σε επίπεδο ΕΕ και, ειδικότερα, Ελλάδας. Σε πρωταγωνιστές στον βαθμό υιοθέτησης των σχετικών τεχνολογιών έχουν αναδειχθεί οι ΗΠΑ και το Ισραήλ, ενώ, σε επίπεδο ΕΕ, κυρίως η Ισπανία, με

την Ελλάδα να υστερεί σε σημαντικό βαθμό στην υλοποίηση των υπό εξέταση συστημάτων. Πράγματι, παρά τα έργα που δρομολογούνται στην προσπάθεια βέλτιστης αξιοποίησης των υδάτινων πόρων, υπάρχει «μεγάλος δρόμος» ακόμη έως την επίτευξη ικανοποιητικών επιπέδων ανάκτησης του νερού, πολύ δε περισσότερο αν ληφθεί υπόψιν ότι σε ορισμένες περιοχές, όπως στη Θεσσαλονίκη, έχουν σημειωθεί υπαναχωρήσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Asano, T. (2006). Water Reuse via Groundwater Recharge. *International Review for Environmental Strategies*, 6(2), 205-216.

Brunner, P. H. & Rechberger, H. (2015). Waste to energy-key element for sustainable waste management. *Waste Management*, 37, 3-12.

Chen, Z., Wu, Q., Wu, G. & Hu, H.-Y. (2017). Centralized water reuse system with multiple applications in urban areas: Lessons from China's experience. *Resources, Conservation and Recycling*, 117(Part B), 125-136.

Cooper, C. D. & Alley, F. C. (2002). *Air Pollution Control, A Design Approach* (3η εκδ.). Long Grove, IL: Waveland Press Inc.

Cornejo, P. K., Zhang, Q. & Mihelcic, J. (2016). How Does Scale of Implementation Impact the Environmental Sustainability of Wastewater Treatment Integrated with Resource Recovery? *Environmental Science and Technology*, 50(13), 6680-6689.

De Vries, J. W., Groenestein, C. M. & DeBoer, I. J. M. (2012). Environmental consequences of processing manure to produce mineral fertilizer and bioenergy. *Journal of Environmental Management*, 102, 173-183.

Echevarria, C., Pastur, M., Valderrama, C., Cortina, J. L., Vega, A., Mesa, C. & Aceves, M. (2022). Techno-economic assessment of decentralized polishing schemes for municipal water reclamation and reuse in the industrial sector in coastal semiarid regions: The case of Barcelona (Spain). *Science of the Total Environment*, 815, 152842.

EnviroMix (χ.χ.). Chlorine contact tanks. *EnviroMix*. <https://enviro-mix.com/application-services/chlorine-contact-chamber/>

EPA (2000). *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*, EPA/625/R-99/010. Washington, DC: U.S. EPA Office of Research and Development.

EPA (2023). *From Water Stressed to Water Secure: Lessons from Israel's Water Reuse Approach. 2022 U.S. Delegation Summary*. Washington, DC: EPA.

EU (2020). Κανονισμός (ΕΕ) 2020/741 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου της 25ης Μαΐου 2020 σχετικά με τις ελάχιστες απαιτήσεις για την επαναχρησιμοποίηση των υδάτων. Βρυξέλλες.

European Parliament (2023). Circular economy: definition, importance and benefits. *European Parliament*.
<https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>

Fragkos, P. (2022). Analysing the systemic implications of energy efficiency and circular economy strategies in the decarbonisation context. *AIMS Energy*, 10(2), 191-218.

Hydrotech (χ.χ.). Disc Filters. *Hyrdotech*. <https://praqua.com/products/hydrotech-disc-filters>

IXOM Watercare (χ.χ.). MIEX® Magnetic Ion Exchange Systems. *IXOM Watercare*.
<https://www.ixomwatercare.com/equipment/miex-magnetic-ion-exchange-systems>

Jawahir, J. S. & Bradley, R. (2016). Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, 40, 103-108.

Jiang, S., Lyu, Y., Zhang, J., Zhang, X., Yuan, M., Zhang, Z., Jin, G., He, B., Xiong, W. & Yi, H. (2024). Continuous adsorption removal of organic pollutants from wastewater in a UiO-66 fixed bed column. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(2), 111951.

Juve, J.-M., Christensen, F. M. S., Wang, Y. & Wei, Z. (2022). Electrodialysis for metal removal and recovery: A review. *Chemical Engineering Journal*, 435(Part 2), 134857.

KIS Group (χ.χ.). Tertiary Treatment & Reuse. *KIS Group*.
<https://www.kisgroup.net/tertiary-treatment-reuse.html>

Lever (χ.χ.). ΕΥΔΑΠ: Παραγωγή και διάθεση ανακυκλωμένου νερού στην Ανατολική Αττική. *Lever*. <https://www.lever.gr/eydap-paragogi-diathesi-anakyklomenoy-neroy-stin-anatoliki-attiki/>

- Lim, S., Shi, J. L., von Gunten, U. & McCurry, D. L. (2022). Ozonation of organic compounds in water and wastewater: A critical review. *Water Research*, 213, 118053.
- Masoomi, B., Jaafarzadeh, N., Tabatabaie, T., Kouhgardi, E. & Jorfi, S. (2019). Effects of pre-ozonation and chemical coagulation on the removal of turbidity, color, TOC, and chlorophyll a from drinking water. *Environ. Health Eng. Manag.*, 6(1), 53-61.
- Mendret, J. (2022). Wastewater Reuse: What will the new European regulation change? *University of Montpellier*.
<https://www.umontpellier.fr/en/articles/reutilisation-des-eaux-usees-que-va-changer-le-nouveau-reglement-europeen>
- Metcalf & Eddy, Inc. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (4η έκδ.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (5η έκδ.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Nakayama, F. S. & Bucks, D. A. (1985) Temperature effect on calcium carbonate precipitate clogging of trickle emitter. *Proc Third Intern Drip/Trickle Irrig Congress*, Fresno, CA, 18–21 November 1985.
- Ofori, S., Puskacova, A., Ruzickova, I. & Wanner, J. (2021). Treated wastewater reuse for irrigation: Pros and cons. *Science of the Total Environment*, 760, 144026.
- Oturan, M. A. (2000). An ecologically effective water treatment technique using electrochemically generated hydroxyl radicals for in situ destruction of organic pollutants: Application to herbicides 2,4-D. *Journal of Applied Electrochemistry*, 30, 475–482.
- Papadopoulou, A., Stefanakou, G. & Fougias, E. (2022). Promotion of environmental projects to conform with UWWTD and integrated water management. *Water Practice and Technology*, 17, 1421-1432.
- Plakas, K. V., Sklari, S. D., Yiankakis, D. A., Sideropoulos, G. T., Zaspalis, V. T. & Karabelas, A. J. (2016). Removal of organic micropollutants from drinking water by a novel electro-Fenton filter: Pilot-scale studies. *Water Research*, 91, 183–194.

Reddy, V. R., Kurian, M. & Ardakanian, R. (2015). *Life-cycle Cost Approach for Management of Environmental Resources*. New York, NY: Springer.

Riffat, R. (2013). *Fundamentals of Wastewater Treatment and Engineering*. IWA Publishing/CRC Press: London/Boca Raton, FL.

Sakellariou-Makrantonaki, M., Tentas, I., Koliou, A., Kalfountzos, D. & Vyrlas, P. (2003). Irrigation on Ornamental Shrubs with treated municipal wastewater. *8th Conference on Environmental Science and Technology*, Lemnos, 8-10 September 2003.

Satyawali, Y., Balakrishnan, M. 2008. Treatment of distillery effluent in a membrane bioreactor (MBR) equipped with mesh filter. *Separation and Purification Technology*, 63(2), 278-286.

Serikawa, R., Senda, Y. & Sasaki, K. (2009). Industrial E-AOP application using boron doped diamond electrodes. Στο: Συλλογικό (επιμ.), *Proceedings of the 5th IWA Specialist Conference*. London: IWA Publishing.

Vymazal, J. (2013). The use of hybrid constructed wetlands for wastewater treatment with special attention to nitrogen removal: A review of a recent development. *Water Research*, 47, 4795-4811.

Wu, H., Zhang, J., Ngo, H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., Fan, J. & Liu, H. (2015) A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation. *Bioresource Technology*, 175, 594–601.

Yu, X., Yang, H. & Sun, I. (2016). Kinetics Study on the Degradation of Tri-ethyl Phosphate in O₃, UV, and UV/O₃ Treatments. *Water, Air and Soil Pollution*, 227(6), 185.

Zhang, C. M., Xu, L. M., Wang, X. C., Zhuang, K. & Liu, Q. Q. (2017). Effects of ultraviolet disinfection on antibiotic-resistant *Escherichia coli* from wastewater: inactivation, antibiotic resistance profiles and antibiotic resistance genes. *J. Appl. Microbiol.*, 123(1), 295-306.

Αγγελάκης, Α. Ν. (2013). *Αστική Χρήση μη Συμβατικών Υδατικών Πόρων Διεθνώς και στην Ελλάδα*. Θεσσαλονίκη: Ένωση ΔΕΥΑ.

Αγγελάκης, Α. Ν. (2023, 15 Ιουνίου). Αυξητικές τάσεις επαναχρησιμοποίησης των υδατικών πόρων σε Ευρώπη και Ελλάδα. *Ελευθερία*. <https://www.eleftheria.gr/απόψεις/item/341009.html>

Ανδρεαδάκης, Α. (2009). *Θεσμικό πλαίσιο και απαιτούμενη επεξεργασία για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων λυμάτων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης (2013). Χορήγηση άδειας επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για άρδευση «χωρίς περιορισμούς» της Εγκατάστασης Επεξεργασίας λυμάτων Ηρακλείου Δήμου Ηρακλείου, Περιφερειακής Ενότητας Ηρακλείου. Ηράκλειο: Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης.

Βουτσίνος, Γ. (2022, 16 Ιουνίου). Σε εξέλιξη το έργο κατασκευής της μονάδας επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων της εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων Λαμίας. *Lamia.gr*. <https://www.lamia.gr/roi-eidiseon/se-exelixi-ergo-kataskeyis-tis-monadas-epanahrisimopoiisis-ygron-apobliton-tis>

ΔΕΥΑ Λαμίας (2020). Επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων ΕΕΛ Λαμίας. *ΔΕΥΑ Λαμίας*. <https://www.deyalamias.gr/blog/epanahrisimopoiisi-ygron-apovliton-eel-lamias>

ΔΕΥΑ Χαλκίδας (χ.χ.). Επαναχρησιμοποίηση – Δενδροφύτευση. *ΔΕΥΑ Χαλκίδας*. <https://deyax.dimoschalkideon.gr/epanachrisimopiisi-dendrofytefsi/>

ΕΕΤΑΑ (2020). *Κυκλική οικονομία και Τοπική Αυτοδιοίκηση*. ΕΕΤΑΑ. https://www.eetaa.gr/odhgoi/13102020_odhgos_kyklikhs_oikonomias.pdf

Ελληνικά Πετρέλαια (2019). *Απολογισμός Βιώσιμης Ανάπτυξης & Εταιρικής Κοινωνικής Ευθύνης*. Αθήνα: Ελληνικά Πετρέλαια.

Καλλέργης Γ. Α. (2001). *Εφαρμοσμένη – περιβαλλοντική υδρογεωλογία*, τ. 1. Αθήνα: ΤΕΕ.

Μαντζαβίνος, Δ. (χ.χ.). *Τεχνολογία Περιβάλλοντος: Επεξεργασία Βιομηχανικών Υγρών Αποβλήτων*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

Μαρούλης, Α., Χατζηαντωνίου, Κ., Μάντζου, Γ., Μπενέτου, Π., Χαρίτου, Α. Η. (2012). *Εκτίμηση του κύκλου ζωής (LCA): Περιγραφή ενός σημαντικού περιβαλλοντικού*

εργαλείου Πράσινης Χημείας. <http://www.gcex.gr/wp-content/uploads/2012/01/benetou2.pdf>

Μεσόγειος Α.Ε. (χ.χ.). Προκατασκευασμένο Σύστημα Επαναχρησιμοποίησης Λυμάτων. *Μεσόγειος Α.Ε.* <https://mesogeos.gr/compact-reuse-systems/>

Πανώρας, Α. Γ. & Ηλίας, Α. Κ. (1999). *Άρδευση με επεξεργασμένα υγρά αστικά απόβλητα*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γιαχούδη-Γιαπούλη.

Πανώρας, Α. Γ., Μαυρουδής, Ι. Γ. & Χατζηγιαννάκης, Σ. Λ. (1993). Εφαρμογή της ισοπέδωσης με laser στην πεδιάδα Θεσσαλονίκης. *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα*, 4, 14-19.

Σταματελάτου, Κ. (2018). *Τεχνολογίες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων*. Ξάνθη: Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης.

Τσώνης, Π. (2004). *Επεξεργασία λυμάτων*. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

Υ.Α. οικ. 145116/2011 (ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011) (2011). Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις. Αθήνα: Εφημερίς της Κυβερνήσεως.

ΥΑ 179182/656 (ΦΕΚ 582/2-7/1979). Περί διαθέσεως υγρών αποβλήτων, από τις παραγωγικές διαδικασίες των βιομηχανιών Περιοχής Μείζονος Πρωτευούσης, δια του δικτύου υπονόμων και των ρευμάτων που εκτρέπονται στον Κ.Α.Α και που εμποτεύονται από τον Ο.Α.Π., με αποδέκτη τη θαλάσσια περιοχή Κερατσινίου Πειραιώς. Αθήνα: Εφημερίς της Κυβερνήσεως.

Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας (ΥΠΕΝ) (χ.χ.). Κυκλική Οικονομία. *ΥΠΕΝ*. <https://ypen.gov.gr/perivallon/kykliki-oikonomia/>

Χριστοδούλου, Κ. (2017). *Επαναχρησιμοποίηση Νερού: Η πρόκληση για τους κανονιστικούς φορείς της Ευρώπης κι η εφαρμογή της από τις εταιρείες νερού*. Θεσσαλονίκη: ΕΥΑΘ.

