

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ

1. Γενικά

Με τον όρο υγρά απόβλητα εννοούμε το σύνολο των ανθρωπογενούς προέλευσης υδάτινων απορροών, που κατά τη διαδικασία αποδέσμευσής τους στο περιβάλλον βρίσκονται σε υγρή μορφή. Κατατάσσονται σε τρεις βασικές κατηγορίες ανάλογα με την πηγή προέλευσής τους.

- **Αστικά:** Αποτελούνται κυρίως από ανθρώπινα εκκρίματα καθώς και από απόβλητα οικιακής χρήσης.
- **Βιομηχανικά:** Περιλαμβάνουν τις υγρές απορροές των βιομηχανικών εγκαταστάσεων οι οποίες είναι κυρίως εκπλύματα δεξαμενών και άλλων στοιχείων εξοπλισμού καθώς και παραπροϊόντα χημικών διεργασιών.
- **Αγροτικά:** Πρόκειται κυρίως για τις απορροές των αρδευτικών συστημάτων.

Στις ανεπτυγμένες χώρες, όλα τα υγρά απόβλητα συλλέγονται από τα συστήματα διαχείρισης, διανομής και πιθανής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Τα συστήματα αυτά είναι κυρίως τριών ειδών:

α) Οι υγειονομικοί υπόνομοι. Συλλέγουν και μεταφέρουν τα αστικά και βιομηχανικά απόβλητα. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις οι υγειονομικοί υπόνομοι οδηγούν τα υγρά απόβλητα σε κάποια εγκατάσταση επεξεργασίας αποβλήτων.

β) Οι υπόνομοι καταιγίδας. Πρόκειται για τους κλασικούς υπονόμους που βρίσκονται στις άκρες των δρόμων και μεταφέρουν επιφανειακά νερά και νερά βροχής. Συνήθως οδηγούν να νερά σε κάποιο φυσικό αποδέκτη (ποτάμι, θάλασσα κ.λ.π.) χωρίς καμιά ιδιαίτερη επεξεργασία.

γ) Οι μικτοί υπόνομοι. Δέχονται νερά από όλες τις πιθανές πηγές. Στις περισσότερες πόλεις καταλήγουν σε κάποια εγκατάσταση επεξεργασίας αποβλήτων.

2. Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων

Τα υγρά αστικά και βιομηχανικά απόβλητα αποτελούνται κυρίως από νερό (99.9 %) στο οποίο υπάρχουν σχετικά μικρές συγκεντρώσεις αιωρούμενων και διαλυμένων οργανικών και ανόργανων στερεών, καθώς και σημαντικός αριθμός μικροοργανισμών και ιών. Μεταξύ των οργανικών συστατικών των υγρών αποβλήτων περιλαμβάνονται

υδατάνθρακες, λιγνίνη, λίπη, σάπωνες, συνθετικά απορριπτικά, πρωτεΐνες και τα προϊόντα αποικοδόμησής τους, καθώς και διάφορες συνθετικές και φυσικές οργανικές ενώσεις που προέρχονται κυρίως από τα απόβλητα των βιομηχανιών και τα συστήματα άρδευσης (π.χ. παρασιτοκτόνα). Στον Πίνακα 1, δίνονται τυπικές τιμές συγκέντρωσης μερικών γενικών συστατικών των αστικών αποβλήτων σε τρία επίπεδα «βαρύτητας» μόλυνσης.

Στα υγρά απόβλητα περιέχεται επίσης και μια μεγάλη ποικιλία ανόργανων συστατικών από αστικές και βιομηχανικές πηγές. Σε αυτά περιλαμβάνονται και πολλά εν δυνάμει τοξικά στοιχεία όπως αρσενικό, κάδμιο, χρώμιο, χαλκός, μόλυβδος, υδράργυρος, ψευδάργυρος κ.ά. Παρόλο που τις περισσότερες φορές οι συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών είναι αρκετά χαμηλές ώστε να μπορούν να προκαλέσουν τοξικές επιδράσεις στους ανθρώπους, υπάρχουν περιπτώσεις όπου αυτές οι συγκεντρώσεις βρίσκονται σε φυτοτοξικά επίπεδα με αποτέλεσμα, να είναι απαραίτητη η απομάκρυνσή τους πριν τη διάθεση του απόβλητου σε κάποιο φυσικό αποδέκτη.

Πίνακας 1. Συγκεντρώσεις βασικών χημικών συστατικών αστικών αποβλήτων (mg/L). Πηγή: UN Department of Technical Cooperation for Development.

	Βεβαρημένο	Μέσο	Ασθενές
Ολικά στερεά	1200	700	350
Ολικά διαλυμένα στερεά (TDS)	850	500	250
Αιωρούμενα στερεά	350	200	100
Άζωτο (N)	85	40	20
Φωσφόρος (P)	20	10	6
Χλώριο (Cl)	100	50	30
Αλκαλικότητα (ως CaCO ₃)	200	100	50
Γράσα	150	100	50
BOD ₅	300	200	100

Από μικροβιολογική άποψη, τα υγρά απόβλητα χαρακτηρίζονται από την παρουσία σε αυτά μιας μεγάλης ποικιλίας μικροβιακών ομάδων. Το είδος και ο αριθμός των μικροβιακών ειδών που βρίσκονται σε ένα υγρό απόβλητο (βλέπε Πίνακας 2) καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την προέλευση και το είδος του απόβλητου. Στην περίπτωση των αστικών υγρών αποβλήτων η συγκέντρωση και το είδος των οργανισμών που είναι παρόντες σε αυτά φαίνεται να καθορίζεται από παράγοντες όπως:

- Το κοινωνικο-οικονομικό επίπεδο του πληθυσμού
- Την εποχή του έτους
- Την κατά κεφαλή κατανάλωση ύδατος
- Την εκδήλωση συγκεκριμένων επιδημιών

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2, δυνητικά παθογόνοι και παθογόνοι μικροοργανισμοί είναι σχεδόν πάντοτε παρόντες στα υγρά αστικά απόβλητα. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι οι μικροοργανισμοί αυτοί εκκρίνονται σε μεγάλες ποσότητες από τα περιττώματα των μολυσμένων ατόμων για μεγάλο χρονικό διάστημα (έως και μήνες) ακόμα και αν τα άτομα αυτά έχουν καταστεί ασυμπτωματικά όσον αφορά στη συγκεκριμένη μόλυνση.

Πίνακας 2. Τυπική μικροβιακή σύσταση ενός μη επεξεργασμένου αστικού απόβλητου.

Οργανισμός	Συγκέντρωση (ανά mL)
Ολικά κολοβακτήρια	$10^5 - 10^6$
Περιττωματικά κολοβακτήρια	$10^4 - 10^5$
Περιττωματικοί στρεπτόκοκκοι	$10^3 - 10^4$
Εντερόκοκκοι	$10^2 - 10^3$
<i>Shigella</i> spp.	Παρουσία
<i>Salmonella</i> spp.	$10^0 - 10^2$
<i>Clostridium perfringens</i>	$10^1 - 10^3$
Κύστες <i>Giardia</i>	$10^{-1} - 10^2$
Κύστες <i>Cryptosporidium</i>	$10^{-1} - 10^1$
Ωά εντεροσκωλήκων ⁽¹⁾	$10^{-2} - 10^1$
Εντεροϊοί ⁽²⁾	$10^1 - 10^2$

⁽¹⁾ *Ascaris*, *Schistosoma* και *Taenia* spp.

⁽²⁾ Περιλαμβάνονται οι polio-, echo και coxsackie ιοί

3. Εκτίμηση οργανικού φορτίου στα απόβλητα

Η ποσότητα οργανικού φορτίου που περιέχεται σε ένα απόβλητο, καθορίζει το βαθμό και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της βιολογικής επεξεργασίας που αυτό θα πρέπει να υποβληθεί. Για την εκτίμηση της ποσότητας του οργανικού φορτίου χρησιμοποιούνται τρεις βασικές δοκιμασίες (tests) που εκφράζονται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

1. Βιοχημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (BOD = Biochemical Oxygen Demand)
2. Χημικά Απαιτούμενο Οξυγόνο (COD = Chemical Oxygen Demand)
3. Ολικός Οργανικός Άνθρακας (TOC = Total Organic Carbon)

3.1. Βιοχημικά απαιτούμενο οξυγόνο (BOD)

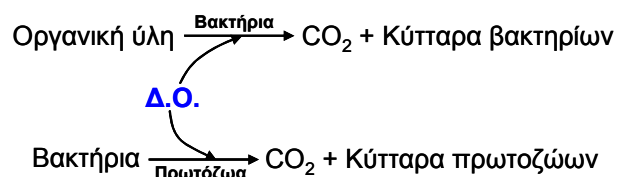
Το BOD αποτελεί μέτρο της περιεκτικότητας ενός αποβλήτου (ή γενικότερα ενός υγρού δείγματος) σε οργανικές ουσίες οι οποίες μπορούν να αποικοδομηθούν με μικροβιακή δράση. Πρόκειται ουσιαστικά για μια έμμεση μέθοδο εκτίμησης του βιοαποικοδομήσιμου οργανικού φορτίου καθώς ορίζεται ως: **Η ποσότητα οξυγόνου η οποία καταναλώνεται, ανά μονάδα όγκου αποβλήτου σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, από μίγμα αερόβιων ετερότροφων μικροοργανισμών για την οξειδωτική αποικοδόμηση των οργανικών ενώσεων που υπάρχουν σε αυτό, στους 20 °C και απουσία φωτός.**

Οι παράμετροι που επιδρούν στην τιμή BOD ενός αποβλήτου είναι οι εξής:

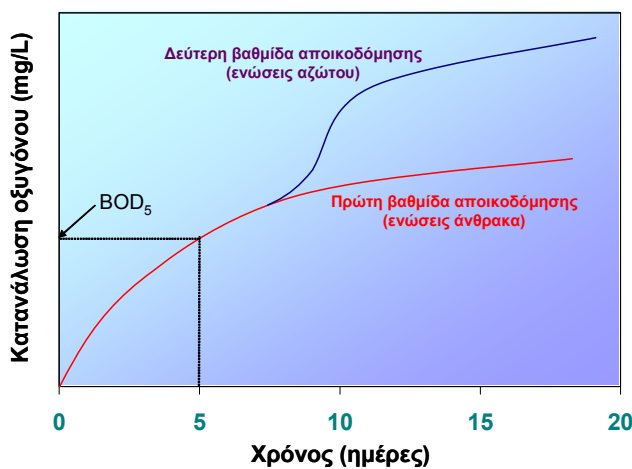
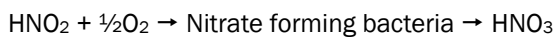
- Το είδος και η συγκέντρωση των μικροοργανισμών που τυχόν υπάρχουν σε αυτό
- Το είδος και η συγκέντρωση των περιεχομένων οργανικών ουσιών
- Η διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών για τους μικροοργανισμούς
- Η διαθεσιμότητα οξυγόνου
- Η διάρκεια του προσδιορισμού (χρόνος δράσης των μικροοργανισμών επί των οργανικών ουσιών)
- Οι τυχόν παρεμποδίσες των βιολογικών διεργασιών λόγω της ύπαρξης τοξικών ή άλλων αναστολέων της μικροβιακής δραστηριότητας

Ο χρόνος των 5 (πέντε) ημερών για την πραγματοποίηση της δοκιμασίας έχει συμβατικά επικρατήσει (BOD₅). Μερικοί συγγραφείς υποστηρίζουν ότι η συγκεκριμένη επιλογή ξεκίνησε από την Αγγλία, όπου ο μέσος χρόνος που χρειάζονται τα νερά των αγγλικών ποταμών για να φτάσουν στη θάλασσα είναι 5 ημέρες. Κατά την επικρατούσα (και επιστημονικά αποδεκτή) άποψη όμως, η επιλογή του χρόνου των 5 ημερών βασίζεται στο γεγονός ότι τα πειραματικά δεδομένα για μεγαλύτερους χρόνους είναι σχετικά ασαφή και εμφανίζουν χαμηλή αναπαραγωγισιμότητα λόγω της εμφάνισης διεργασιών νιτροποίησης.

Στο Διάγραμμα 1 δίνεται η γραφική παράσταση της κατανάλωσης οξυγόνου κατά τη βιοαποικοδόμηση ενός τυπικού υγρού αστικού αποβλήτου. Κατά κανόνα οι οργανικές ενώσεις που περιέχουν μόνο άνθρακα αποικοδομούνται πλήρως μέσα σε 20 περίπου ημέρες σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα:



Η πρωταρχική αντίδραση είναι η αποικοδόμηση της οργανικής ύλης (ενώσεις άνθρακα) από τα βακτήρια, με κατανάλωση διαλυμένου οξυγόνου (Δ.Ο.), αντίστοιχη έκλυση διοξειδίου του άνθρακα και αύξηση του βακτηριακού πληθυσμού. Δευτερογενώς χρησιμοποιείται το διαλυμένο οξυγόνο από πρωτόζωα τυχόν που υπάρχουν στο δείγμα τα οποία αναπτύσσονται καθώς τρέφονται από τα βακτήρια. Οι οργανικές ενώσεις που περιέχουν άζωτο αρχίζουν να νιτροποιούνται μετά τη δέκατη ημέρα σύμφωνα με το ακόλουθο σχήμα γενικών αντιδράσεων:



Διάγραμμα 1. Κατανάλωση οξυγόνου ως συνάρτηση του χρόνου, κατά τη βιοαποικοδόμηση ενός αστικού αποβλήτου.

Οι διεργασίες νιτροποίησης καταναλώνουν σημαντική ποσότητα οξυγόνου και είναι υπεύθυνες για την ταχεία αύξηση της κατανάλωσης οξυγόνου που παρατηρείται στο δείγμα, κατά το χρονικό διάστημα μεταξύ 7 και 15 ημερών από την έναρξη της μέτρησης. Το στοιχείο αυτό εξηγεί το γεγονός της επικράτησης του χρόνου των 5 ημερών κατά τη μέτρηση του BOD (Διάγραμμα 1).

Για τον πειραματικό προσδιορισμό του BOD, δείγμα αποβλήτου μεταξύ 5 και 100 mL (ανάλογα με την αναμενόμενη τιμή BOD) αραιώνεται με ρυθμιστικό διάλυμα ανόργανων θρεπτικών συστατικών σε τελικό όγκο 300 mL σε ειδικές αεροστεγείς φιάλες (Εικόνα 1). Αν η αρχική συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου είναι χαμηλή, το διάλυμα καθίσταται κορεσμένο σε οξυγόνο με τη διαβίβαση ρεύματος ατμοσφαιρικού αέρα. Στην περίπτωση που εκτιμάται πως η μικροβιακή χλωρίδα του δείγματος δεν επαρκεί για να δώσει αποτελέσματα στο χρονικό διάστημα των πέντε ημερών (π.χ. πόσιμο νερό), προστίθενται και συγκεκριμένα ποσότητα μίγματος λυοφιλιωμένων μικροοργανισμών (σήμερα διατίθενται εμπορικά από πολλές εταιρίες με τη μορφή υδατοδιαλυτών δισκίων). Σε

ορισμένες περιπτώσεις τέλος, προστίθεται και μικρή ποσότητα αναστολέων νιτροποίησης (π.χ. αλλοθειουρία).



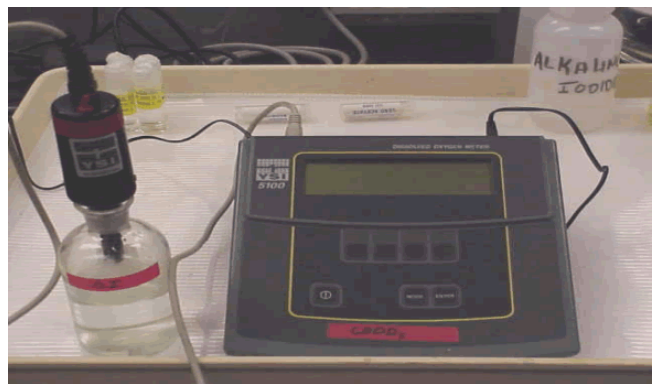
Εικόνα 1. Φιάλες που χρησιμοποιούνται στον προσδιορισμό του BOD.

Οι φιάλες επωάζονται στη συνέχεια για πέντε ημέρες σε θάλαμο σταθερής θερμοκρασίας 20 °C, απουσία φωτός. Μετά το πέρας των πέντε ημερών, προσδιορίζεται η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου που έχει απομείνει στα δείγματα με τη βοήθεια ηλεκτρονικού οξυγονόμετρου (Εικόνα 2).

Η συγκέντρωση BOD στο δείγμα υπολογίζεται εύκολα από τη σχέση:

$$BOD(mg/L) = \frac{D_1 - D_5}{P}$$

όπου D_1 η αρχική συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στη φιάλη (mg/L), D_5 η συγκέντρωση διαλυμένου οξυγόνου στη φιάλη μετά από πέντε ημέρες και P το δεκαδικό ογκομετρικό κλάσμα του δείγματος που χρησιμοποιήθηκε.



Εικόνα 2. Συσκευή προσδιορισμού της συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου κατά τον προσδιορισμό του BOD.

Η μέτρηση του BOD χρησιμοποιείται ευρέως στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων για πολλούς λόγους, όπως:

- Ο προσδιορισμός της ποσότητας οξυγόνου που θα απαιτηθεί για τη βιολογική επεξεργασία της οργανικής ύλης του αποβλήτου.
- Η διαστασιολόγηση της δεξαμενής και του εξοπλισμού βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων.
- Η αξιολόγηση της αποδοτικότητας μιας διεργασίας βιολογικού καθαρισμού αποβλήτων
- Ως παράμετρος ελέγχου για την απόρριψη ή όχι ενός αποβλήτου (επεξεργασμένου ή μη) σε κάποιον αποδέκτη (Πίνακας 3).

Παρακάτω δίνονται μερικές χαρακτηριστικές τιμές BOD σε ppm (mg/L).

Πόσιμα νερά	1
Ακάθαρτα νερά	20
Αστικά λύματα	100 – 600
Βιομηχανικά απόβλητα	100 – 10000

3.2. Χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (COD)

Ως χημικά απαιτούμενο οξυγόνο (Chemical Oxygen Demand) ορίζεται η ποσότητα οξυγόνου που απαιτείται για την πλήρη χημική οξειδωση του οργανικού άνθρακα ενός αποβλήτου σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό.

Ο προσδιορισμός πραγματοποιείται με ισχυρή θέρμανση του δείγματος με τη χρήση ενός ιδιαίτερα ισχυρού οξειδωτικού μέσου όπως το διχρωμικό κάλιο ($K_2Cr_2O_7$) ή το υπερμαγγανικό κάλιο ($KMnO_4$). Όπως και το BOD, εκφράζεται και αυτό σε mg O_2/L . Σε γενικές γραμμές, 1 g υδατανθράκων ή 1 g πρωτεΐνης αντιστοιχεί σε 1 g COD.

Για ένα τυπικό αστικό απόβλητο, ο λόγος BOD_5/COD κυμαίνεται μεταξύ 0.4 και 0.8. Όταν η παραπάνω αναλογία πέφτει χαμηλότερα από 0.3 τότε σημαίνει ότι το δείγμα περιέχει σημαντικό αριθμό από οργανικές ενώσεις οι οποίες δεν μπορούν εύκολα να βιοαποικοδομηθούν.

Πίνακας 3: Τυπικά όρια απόρριψης υγρών αποβλήτων.

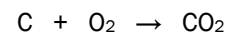
ΑΠΟΔΕΚΤΗΣ	BOD (ppm)	COD (ppm)
Ποταμοί, Λίμνες	40	120
Υγειονομικοί υπόνομοι	500	1000

3.3. Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)

Πρόκειται για μια μέθοδο που αρχίζει να χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια, κυρίως λόγω της μεγάλης ανάπτυξης της σχετικής οργανολογίας.

Η μέτρηση ολικού οργανικού άνθρακα (Total Organic Carbon) πραγματοποιείται με την εισαγωγή μικρής ποσότητας δείγματος σε ειδική συσκευή, στην οποία η περιεχόμενη στο δείγμα οργανική ύλη οξειδώνεται πλήρως με την επιβολή θερμότητας και παρουσία οξυγόνου και το διοξείδιο του άνθρακα που απελευθερώνεται μετρείται με τη βοήθεια ενός αναλυτή υπερέυθρων.

Η μέτρηση TOC τείνει τα τελευταία χρόνια να αντικαταστήσει αυτήν του COD, αφού είναι πολύ πιο γρήγορη και αξιόπιστη, καθώς και οι δυο παράμετροι μετρούν βασικά το ίδιο μέγεθος: **Την ολική (βιοαποικοδομήσιμη και μη) συγκέντρωση οργανικού άνθρακα**. Απλά η μέτρηση TOC την υπολογίζει άμεσα, ενώ αυτή του COD έμμεσα, καθώς μετρά το οξυγόνο που απαιτείται για την πλήρη οξειδωσή της. Η σχέση μεταξύ TOC και COD μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί από τη χημική εξίσωση της πλήρους οξειδωσης του άνθρακα:

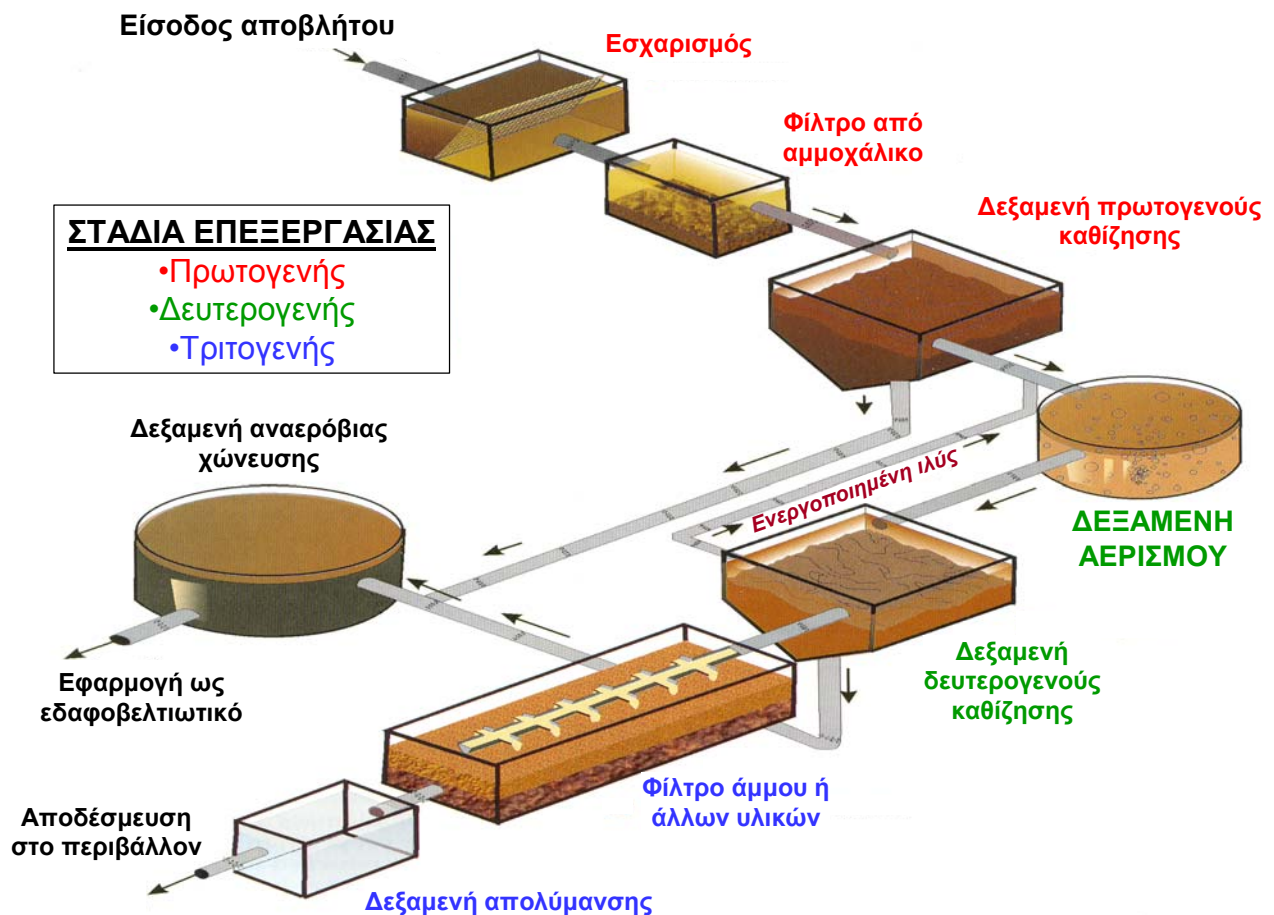


Από την παραπάνω εξίσωση υπολογίζεται εύκολα πως αφού απαιτείται ένα mole (32 g) οξυγόνου για την οξείδωση ενός mole (12 g) άνθρακα, ο λόγος COD/TOC σε ένα απόβλητο θα είναι ίσος προς $32/12$ ή περίπου 2.6.

4. Στάδια Επεξεργασίας Αποβλήτων

Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων η συνολική διαδικασία χωρίζεται σε τρία βασικά στάδια: Τον πρωτογενή, το δευτερογενή και τον τριτογενή

καθαρισμό (Εικόνα 3). Βασικός στόχος της συνολικής διεργασίας είναι η απομάκρυνση και η αποικοδόμηση του οργανικού φορτίου του αποβλήτου, υπό απόλυτα ελεγχόμενες συνθήκες. Εκφράζεται δε από την ελάττωση του BOD και του COD.



Εικόνα 3. Διαδοχή σταδίων βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων με τη μέθοδο της ενεργοποιημένης ιλύος.

4.1. Πρωτογενής επεξεργασία

Αποτελεί το πρώτο στάδιο στη διαδικασία επεξεργασίας αποβλήτων. Περιλαμβάνει κυρίως το φυσικό διαχωρισμό των μεγάλου μεγέθους στερεών συστατικών του αποβλήτου. Το απόβλητο διέρχεται αρχικά από μια σειρά μεταλλικών κόσκινων (σχάρες) που απομακρύνουν τα πολύ μεγάλα αντικείμενα (κλαδιά δέντρων, μπουκάλια κ.λ.π.) και στη συνέχεια τα μικρότερου μεγέθους (πέτρες, κ.λ.π.). Πολλές φορές το στάδιο αυτό ακολουθείται από διήθηση σε κλίνες από αμμοχάλικο ή άλλου είδους πετρώδες και αδρανές υλικού. Στη συνέχεια οδηγείται σε δεξαμενές πρωτογενούς καθίζησης, όπου καταβυθίζεται σημαντικό ποσοστό του οργανικού φορτίου, δημιουργώντας τη λεγόμενη πρωτογενή λάσπη (primary sludge). Σε ορισμένες

περιπτώσεις βιομηχανικών αποβλήτων, ο πρωτογενής καθαρισμός περιλαμβάνει και τη δίοδο του απόβλητου από ειδικές δεξαμενές επίπλευσης όπου απομακρύνονται σε μεγάλο βαθμό λίπη και ελαιώδεις ουσίες που τυχόν περιέχονται σε αυτό.

Κατά τον πρωτογενή καθαρισμό επιτυγχάνεται συνήθως ένα ποσοστό μείωσης του BOD της τάξης του 20 – 40 %. Στη δεξαμενή πρωτογενούς καθίζησης παρατηρείται σημαντική ελάττωση κυρίως των μεγάλου μεγέθους παθογόνων οργανισμών (π.χ. αυγά εντεροσκωλήκων) αλλά και αξιοσημείωτη μείωση της συγκέντρωσης των βακτηρίων και των ιών λόγω παράσυρσής τους στο ίζημα.

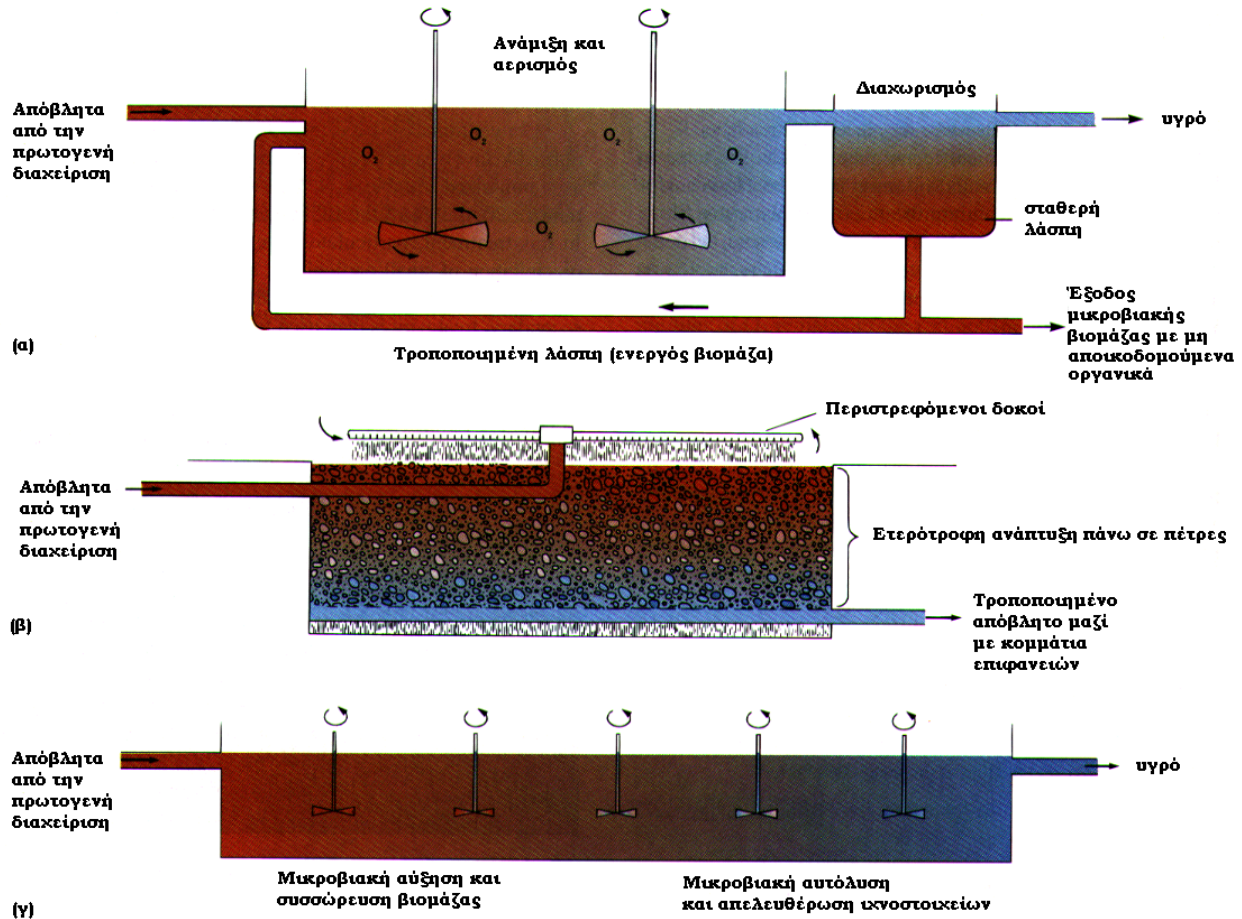
4.2. Δευτερογενής καθαρισμός

Αποτελεί τη βασική βιολογική διεργασία στη διαδοχή των σταδίων επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων κατά την οποία αποικοδομείται το μεγαλύτερο ποσοστό του οργανικού φορτίου και ελαττώνεται σε μεγάλο βαθμό και ο αριθμός των παθογόνων μικροοργανισμών που υπάρχουν σε αυτό.

Στο στάδιο αυτό, το ρεύμα των αποβλήτων προερχόμενο από τον πρωτογενή καθαρισμό επεξεργάζεται, ανάλογα

με το είδος και τη δυναμικότητα της εγκατάστασης, με μια από τις ακόλουθες διεργασίες (Εικόνα 4):

- A) Ενεργού ιλύος (λάσσης) (activated sludge)
- B) Δεξαμενών ενστάλαξης σε αδρανείς φορείς (trickling bed)
- Γ) Αβαθών λιμνών (Oxidation ponds)



Εικόνα 4. Οι τρεις βασικές διεργασίες του δευτερογενούς βιολογικού καθαρισμού. α) Ενεργοποιημένη ιλύς, β) Δεξαμενή ενστάλαξης, γ) Λίμνη οξείδωσης.

4.2.1. Μέθοδος ενεργοποιημένης λάσσης (ιλύος)

Είναι η μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται με επιτυχία σε όλες τις μεγάλες εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων σε επίπεδο Δήμων. Το απόβλητο, από τον πρωτογενή καθαρισμό, οδηγείται με τη βοήθεια αντλιών σε μεγάλες αεριζόμενες δεξαμενές όπου αναμειγνύεται με μια λάσπη (ιλύς) η οποία είναι εμπλουτισμένη με μεγάλο αριθμό βακτηριακών ειδών γνωστή ως **ενεργοποιημένη ιλύς (activated sludge)**. Το όλο σύστημα της δεξαμενής τροφοδοτείται με μεγάλη ποσότητα αέρα, ο οποίος βοηθάει στην ανάπτυξη των αερόβιων βακτηρίων και την ταυτόχρονη κατανάλωση της βιοαποικοδομήσιμης

οργανικής ύλης του αποβλήτου. Το προϊόν της δεξαμενής αερισμού οδηγείται προς τη δεξαμενή δευτερογενούς καθίζησης, στην οποία πραγματοποιείται ο διαχωρισμός μεταξύ της μικροβιακής λάσσης και του επεξεργασμένου αποβλήτου. Το τελευταίο, μεταγγίζεται από την επιφάνεια της δεξαμενής προς τα επόμενα στάδια επεξεργασίας (τριτογενής καθαρισμός) ενώ η μικροβιακή λάσπη απομακρύνεται από τον πυθμένα. Ένα σημαντικό τμήμα της λάσσης επιστρέφει προς την δεξαμενή αερισμού (ενεργοποιημένη ιλύς), παίζοντας το ρόλο ενός συνεχούς εμβολίου για τις εισερχόμενες σε αυτήν ποσότητες αποβλήτου. Η υπόλοιπη ποσότητα, που ορίζεται ως δευτερογενής λάσπη (secondary sludge), απομακρύνεται.

Στο στάδιο αυτό της επεξεργασίας, παρατηρείται και η μεγαλύτερη ελάττωση στη συγκέντρωση των παθογόνων μικροοργανισμών του αποβλήτου, κυρίως εξ' αιτίας του ανταγωνισμού με τα κυρίαρχα μικροβιακά είδη της ενεργοποιημένης ιλύος, αλλά και λόγω προσρόφησής τους στα σωματίδια της δευτερογενούς λάσπης. Το τελευταίο φαινόμενο ισχύει πολύ περισσότερο για τους ιούς, καθώς οι περισσότεροι από αυτούς προσροφώνται με ευκολία στην καθιζάνουσα βιομάζα και απομακρύνονται στην ενεργοποιημένη ιλύ.

Μια τυπική διεργασία ενεργοποιημένης λάσπης απομακρύνει περίπου το 90% των εντεροβακτηρίων του απόβλητου ενώ τα ποσοστά απομάκρυνσης εντεροϊών και ροταϊών κυμαίνονται από 80 έως και 99%. Αντίστοιχα ποσοστά απομάκρυνσης (της τάξης του 90%) έχουν αναφερθεί για βακτήρια των γενών *Giardia* και *Cryptosporidium*. Παρόλο που τα παραπάνω ποσοστά απομάκρυνσης παθογόνων βακτηρίων μπορεί να φαίνονται υψηλά θα πρέπει να σημειωθεί πως οι συγκεντρώσεις εντεροβακτηρίων που παραμένουν στο επεξεργασμένο απόβλητο μετά το δευτερογενή καθαρισμό είναι ακόμα υψηλές, καθώς οι αρχικές συγκεντρώσεις των βακτηρίων αυτών μπορεί να φτάνουν και μέχρι τα 100,000 κύτταρα ανά L.

Ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά της μεθόδου της ενεργοποιημένης λάσπης είναι η συνεχής ανακύκλωση ενός μεγάλου ποσοστού της μικροβιακής βιομάζας. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την επίτευξη υψηλής συγκέντρωσης μικροοργανισμών μέσα στη δεξαμενή αερισμού με αποτέλεσμα την ταχεία βιολογική οξειδωση της οργανικής ύλης του αποβλήτου. Στις σύγχρονες εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας λυμάτων, ο μέσος χρόνος παραμονής του αποβλήτου μέσα στη δεξαμενή αερισμού δεν ξεπερνάει τις 10 h.

Η όλη λειτουργία ενός συστήματος βιολογικού καθαρισμού με τη μέθοδο της ενεργού ιλύος θα πρέπει να ελέγχεται κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να διατηρείται στα σωστά επίπεδα η λεγόμενη αναλογία τροφής / βιομάζας ($F/M = \text{food} - \text{to} - \text{microorganisms ratio}$) η οποία ορίζεται ως:

$$F/M = Q \times \text{BOD}_5 / \text{TSS} \times V$$

όπου Q = η ογκομετρική παροχή αποβλήτου στη δεξαμενή (m^3/day), BOD_5 = η τιμή BOD_5 του αποβλήτου στην είσοδο της δεξαμενής αερισμού (mg/L), TSS = η συγκέντρωση ολικών αιωρούμενων στερεών στη δεξαμενή (mg/L) και V = ο ολικός όγκος της δεξαμενής αερισμού (m^3).

Για τις συμβατικές δεξαμενές αερισμού η αναλογία F/M κυμαίνεται μεταξύ 0.2 - 0.5 $\text{kg BOD}_5 / \text{ημέρα} / \text{kg}$ αιωρούμενων στερεών ενώ μπορεί να φτάσει σε ακόμα υψηλότερες τιμές (έως 1.5) στις δεξαμενές αερισμού οι οποίες τροφοδοτούνται από καθαρό οξυγόνο.

Η αναλογία F/M ελέγχεται σε μεγάλο βαθμό από το ποσοστό λάσπης που από τη δεξαμενή δευτερογενούς καθίζησης επιστρέφει ως ενεργοποιημένη ιλύς πίσω στη δεξαμενή αερισμού (Εικόνες 3 και 4α). Όσο χαμηλότερο είναι το ποσοστό αυτό τόσο υψηλότερος είναι ο λόγος F/M και αντίστροφα. Χαμηλές τιμές F/M σημαίνουν πως οι μικροοργανισμοί που βρίσκονται στη δεξαμενή αερισμού βρίσκονται σε κατάσταση «υποσιτισμού», γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλότερων βαθμών απορρύπανσης του αποβλήτου.



Εικόνα 5. Δεξαμενή αερισμού κατά τη δευτερογενή επεξεργασία υγρών αποβλήτων.

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη συνολική λειτουργία μιας διεργασίας ενεργοποιημένης ιλύος είναι ο ρυθμός τροφοδοσίας σε οργανικό φορτίο, η παροχή οξυγόνου, και ο έλεγχος της λειτουργίας της δεξαμενής δευτερογενούς καθίζησης. Η δεξαμενή αυτή επιτελεί δυο βασικές λειτουργίες: Τη διαύγαση του αποβλήτου και την πάχυνση της ενεργοποιημένης ιλύος.

Η μικροβιακή μάζα που παράγεται στη δεξαμενή αερισμού θα πρέπει να καθιζήσει στη δεξαμενή δευτερογενούς καθίζησης, έτσι ώστε να είναι δυνατή είτε η επιστροφή της στη δεξαμενή αερισμού είτε η απομάκρυνσή της ως στερεό απόβλητο της διεργασίας. Υψηλοί ρυθμοί καθιζήσεως επιτυγχάνονται όταν οι μικροοργανισμοί βρίσκονται στην ενδογενή φάση ανάπτυξης, η οποία συμβαίνει όταν υπάρχει περιορισμός στη διαθεσιμότητα των πηγών άνθρακα και ενέργειας και χαμηλός ειδικός ρυθμός μικροβιακής αύξησης (μ). Τις περισσότερες φορές ένας μέσος χρόνος παραμονής 3 - 4 ημερών είναι απαραίτητος για αποδοτική καθίζηση στη δεξαμενή. Ξαφνικές αλλαγές στη θερμοκρασία και το pH, απουσία συγκεκριμένων θρεπτικών ουσιών ή παρουσία τοξικών μετάλλων ή άλλων οργανικών μορίων στο απόβλητο είναι δυνατό να αποτρέψουν την επιτυχή καθίζηση της μικροβιακής βιομάζας στη δεξαμενή δευτερογενούς καθίζησης.

Ένα πρόβλημα που συχνά συναντάται στις διεργασίες ενεργοποιημένης ιλύος είναι η λεγόμενη **νηματοειδής συσσώρευση (filamentous bulking)** η οποία προκαλείται από την ανάπτυξη μεγάλου αριθμού νηματοειδών βα-

κτηρίων και οδηγεί σε ιδιαίτερα χαμηλούς ρυθμούς καθίζησης. Οι μικροοργανισμοί αυτοί κυριαρχούν συνήθως σε συνθήκες χαμηλής συγκέντρωσης διαλυμένου οξυγόνου, χαμηλούς λόγους F/M και υψηλές συγκεντρώσεις σουλφιδικών ενώσεων στο απόβλητο. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την κατεργασία του ρεύματος επιστροφής προς τη δεξαμενή αερισμού (ενεργοποιημένη ιλύς) με χλώριο ή υπεροξειδίο του υδρογόνου.

4.2.2. Δεξαμενές ενστάλαξης

Πρόκειται για απλές κλίνες από πέτρες ή πτυχωτά πλαστικά φύλλα. Αποτελούν ένα από τα παλαιότερα συστήματα βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων, που ακόμα και σήμερα εφαρμόζεται με επιτυχία από κοινότητες και μικρής κλίμακας βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Το απόβλητο αντλείται από την πρωτογενή επεξεργασία και, μέσω ενός ψεκαστικού μηχανισμού, ενσταλάζει στην κορυφή της κλίνης. Καθώς διασχίζει τη δεξαμενή, έρχεται σε επαφή με τους μικροοργανισμούς οι οποίοι είναι εγκατεστημένοι στην επιφάνεια των υλικών της κλίνης και βιοαποικοδομείται αερόβια.

Ως πληρωτικά στις δεξαμενές ενστάλαξης μπορεί να χρησιμοποιηθούν πέτρες, κεραμικά υλικά, κοκκώδη άνθρακας ή πλαστικά υλικά. Τα τελευταία (PVC ή πολυπροπυλένιο) έχουν επικρατήσει σχεδόν ολοκληρωτικά. Εξ αιτίας του χαμηλού τους βάρους, τα πλαστικά πληρωτικά υλικά μπορούν να στοιβαχτούν σε μεγάλο βαθμό σχηματίζοντας κλίνες ταχείας βιοαποικοδόμησης που φτάνουν μέχρι και 10 m ύψος οι οποίοι καλούνται και βιολογικοί πύργοι (biotowers).



Εικόνα 6: Υπαίθρια δεξαμενή ενστάλαξης κατά τη δευτερογενή επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Καθώς η οργανική ύλη του αποβλήτου διατρέχει τη δεξαμενή ενστάλαξης, μετατρέπεται σε μικροβιακή μάζα η οποία σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα βιολογικού υλικού (biofilm) πάνω στις επιφάνειες των τεμαχίων του πληρωτικού υλικού. Το στρώμα αυτό που καλείται **ζωο-**

γλοία (zooleal), αποτελεί έναν μικτό πληθυσμό από βακτήρια, μύκητες, φύκη και πρωτόζωα. Με την πάροδο του χρόνου, το πάχος του στρώματος ζωογλοίας αυξάνεται συνεχώς, με αποτέλεσμα τον περιορισμό στη διάχυση του οξυγόνου στο εσωτερικό του. Εξ αιτίας του γεγονότος αυτού, οι συνθήκες στα εσωτερικά σημεία κοντά στην επιφάνεια του πληρωτικού υλικού μετατρέπονται σε αναερόβιες με αποτέλεσμα, κάποια στιγμή, το στρώμα των μικροοργανισμών να αποκολλάται και να ξεκινά η αναγέννησή του. Ο κύκλος αυτός επαναλαμβάνεται πολλές φορές κατά τη διάρκεια της λειτουργίας μιας δεξαμενής ενστάλαξης.

Η μέση ελάττωση της συγκέντρωσης BOD σε μια τέτοια εγκατάσταση που λειτουργεί υπό συνθήκες χαμηλής ροής μπορεί να φτάσει και στα επίπεδα του 85%. Η απομάκρυνση παθογόνων μικροοργανισμών και ιών, όμως, συνήθως δεν είναι ικανοποιητική στα συστήματα αυτά, κυρίως λόγω συνθηκών κακής οξυγόνωσης που συνήθως επικρατούν.

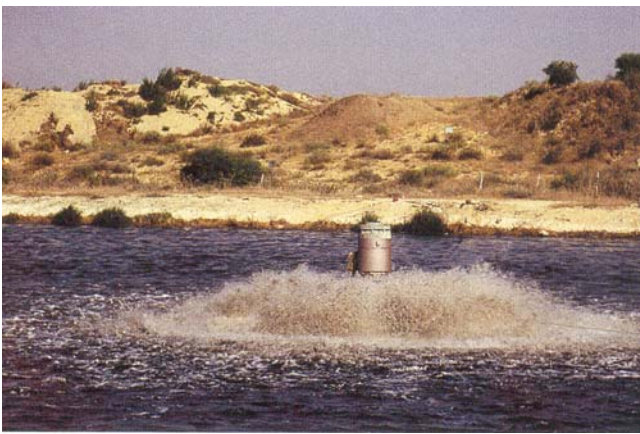
4.2.3. Αβαθείς λίμνες (ή λίμνες οξειδωσης)

Αποτελούν από τα παλαιότερα συστήματα βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων. Καλούνται και λίμνες οξειδωσης ή σταθεροποίησης (oxidation or stabilization ponds) και αποτελούν το βασικό στάδιο βιολογικής επεξεργασίας των αποβλήτων στις αναπτυσσόμενες χώρες καθώς και σε περιοχές όπου το κόστος εκμετάλλευσης της γης είναι χαμηλό. Πρόκειται για σχετικά αβαθείς ανοικτές (φυσικές ή τεχνητές) δεξαμενές (βάθος 1 έως 10 m) συνολικής έκτασης η οποία δεν ξεπερνά συνήθως τα 10 στρέμματα (10,000 m²). Το απόβλητο, προερχόμενο από την όποια πρωτογενή επεξεργασία, εισέρχεται από το ένα άκρο της λίμνης και βιοαποικοδομείται κατά τη διάρκεια της φυσικής του κίνησης προς το αντιδιαμετρικό άκρο. Ανάλογα με το είδος των μικροβιακών διεργασιών που πραγματοποιούνται σε αυτές, οι λίμνες βιολογικής οξειδωσης διακρίνονται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες.

- **Αερόβιες λίμνες** στις οποίες η ανάμειξη γίνεται με φυσικό τρόπο. Πρέπει να διαθέτουν μικρό βάθος έτσι ώστε να είναι δυνατή η διείσδυση του ηλιακού φωτός το οποίο επάγει την ανάπτυξη φυκών η οποία έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή οξυγόνου που είναι απαραίτητο για τη μικροβιακή αποικοδόμηση του αποβλήτου. Ο χρόνος παραμονής στις λίμνες αυτές είναι συνήθως 3 έως 5 ημέρες.
- **Αναερόβιες λίμνες** οι οποίες μπορεί να έχουν βάθος μέχρι και 10 m και απαιτούν μεγάλους χρόνους παραμονής μεταξύ 20 και 50 ημερών. Οι λίμνες αυτές, δεν απαιτούν έντονο μηχανικό αερισμό και παράγουν μι-

κρές ποσότητες λάσπης. Συχνά, οι αναερόβιες λίμνες χρησιμεύουν ως στάδιο προκατεργασίας για τον πρωτογενή καθαρισμό οργανικών αποβλήτων με πολύ υψηλό BOD, πλούσιων σε πρωτεΐνες και λίπη και με μεγάλη συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών.

- **Διαστρωματικές λίμνες** οι οποίες αποτελούν την πιο συνηθισμένη περίπτωση για την επεξεργασία αστικών αποβλήτων. Η βιολογική οξειδωση του αποβλήτου σε αυτές, πραγματοποιείται με τη βοήθεια αερόβιων και αναερόβιων διεργασιών. Το βάθος των λιμνών αυτών κυμαίνεται από 1 έως 3 m και υπάρχει μια διαστρωμάτωση σε τρεις ζώνες μικροβιακής ανάπτυξης: Η επιφανειακή αεριζόμενη ζώνη, η ενδιάμεση δυνητική ζώνη και η ζώνη αναερόβιας ανάπτυξης κοντά στον πυθμένα. Ο χρόνος παραμονής του αποβλήτου στις λίμνες αυτές κυμαίνεται από 5 έως και 30 ημέρες.
- **Αεριζόμενες λίμνες** στις οποίες υπάρχει εγκατεστημένο σύστημα μηχανικού αερισμού. Διαθέτουν 1 – 2 m βάθος, και ο χρόνος παραμονής τα αποβλήτου σε αυτές είναι συνήθως μικρότερος από 10 ημέρες.



Εικόνα 7. Λίμνη βιολογικής οξειδωσης με μηχανικό σύστημα αερισμού.

Με την προϋπόθεση επαρκούς χρόνου παραμονής οι λίμνες οξειδωσης είναι σε θέση να προκαλέσουν σημαντική μείωση στις συγκεντρώσεις των εντερικών παθογόνων, ιδιαίτερα δε στα αυγά εντεροσκλητικών. Βασικό μειονέκτημα είναι η απουσία καλής ανάδευσης καθώς και η θερμική ανομοιομορφία που, σε πολλές περιπτώσεις, οδηγούν στην ανίχνευση σημαντικού αριθμού παθογόνων μικροοργανισμών στο επεξεργασμένο απόβλητο.

Η καταστροφή και/ή απομάκρυνση των παθογόνων μικροοργανισμών στις λίμνες οξειδωσης εξαρτάται από ένα σημαντικό αριθμό παραγόντων στους οποίους περιλαμβάνονται οι διακυμάνσεις στη θερμοκρασία και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας του περιβάλλοντος, το pH του αποβλήτου, η ύπαρξη βακτηριοφάγων, η θήρευση (predation) από άλλους μικροοργανισμούς και η απορρό-

ψηση ή η παγίδευση στα καθιζάνοντα στερεά. Παρόλη τη μειωμένη αποδοτικότητά τους σε σχέση με τις διεργασίες ενεργοποιημένης λάσπης και εξ' αιτίας του πολύ χαμηλού κόστους εγκατάστασης και λειτουργίας τους, οι λίμνες οξειδωσης αποτελούν βασικό στάδιο σε πολλές εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων με αποτέλεσμα ο σχεδιασμός και ο έλεγχος της λειτουργίας τους να έχει απολέσει αντικείμενο σημαντικού αριθμού επιστημονικών μελετών. Έτσι έχει βρεθεί πως ο ρυθμός θανάτωσης των παθογόνων εντερικών βακτηρίων στις λίμνες οξειδωσης αυξάνεται με την ηλιακή ακτινοβολία και την αύξηση της θερμοκρασίας. Οι ίδιοι παράγοντες, αλλά σε μικρότερο βαθμό, επιδρούν στην καταστροφή των εντεροϊών. Από τα παραπάνω γίνεται εύκολα αντιληπτό πως η λειτουργία των λιμνών οξειδωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και πως η αποδοτικότητά τους αυξάνεται σημαντικά στα θερμά κλίματα.

4.3. Τριτογενής καθαρισμός

Ο όρος τριτογενής καθαρισμός περιλαμβάνει όλες τις επιπλέον επεξεργασίες που τυχόν υφίσταται το απόβλητο το οποίο εξέρχεται από τη δευτερογενή βιολογική επεξεργασία. Το είδος και η διαδοχή των σταδίων της τριτογενούς επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον φυσικό αποδέκτη και την ενδεχόμενη χρήση του επεξεργασμένου απόβλητου. Ο τριτογενής καθαρισμός είναι μια πρακτική η οποία εφαρμόζεται στις σύγχρονες μονάδες επεξεργασίας υγρών αποβλήτων στις ανεπτυγμένες χώρες, κυρίως για την προστασία της πανίδας και της χλωρίδας των αποδεκτών (όταν αυτοί είναι λίμνες ή ποτάμια) ή όταν το επεξεργασμένο απόβλητο πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την άρδευση καλλιεργειών, κήπων κ.λ.π.

Ο στόχος μιας τριτογενούς επεξεργασίας είναι η περαιτέρω μείωση της συγκέντρωσης οργανικών ουσιών, αζωτούχων και φωσφορούχων ενώσεων, βαρέων μετάλλων, τοξικών ουσιών και παθογόνων μικροοργανισμών και ιών που δεν απομακρύνθηκαν κατά τα προηγούμενα στάδια επεξεργασίας του αποβλήτου. Οι περισσότερες διεργασίες του τριτογενούς καθαρισμού είναι φυσικοχημικές και περιλαμβάνουν διεργασίες όπως η συσσωμάτωση με προσθήκη χημικών, η διήθηση σε φίλτρα άμμου ή σε φίλτρα ενεργού άνθρακα και η προσθήκη απολυμαντικών ουσιών.

Η διήθηση αποτελεί την πιο κοινή διεργασία του τριτογενούς καθαρισμού. Είναι ιδιαίτερα αποδοτική στην απομάκρυνση πρωτοζωικών παρασίτων και ωοκυστών του γένους *Giardia*. Το ποσοστό απομάκρυνσης ιών είναι συνήθως κάτω του 90 %.

Η προσθήκη ενός μέσου συσσωμάτωσης, ιδιαίτερα άσβεστου (lime - $\text{Ca}(\text{OH})_2$), συνήθως βοηθά πολύ στην ελάττωση της συγκέντρωσης των παθογόνων. Το υψηλό pH (11 - 12) που επιτυγχάνεται με την προσθήκη του εν λόγω χημικού, συμβάλλει δραστικά και στη θανάτωση των εντεροϊών. Η απενεργοποίηση των τελευταίων πραγματοποιείται λόγω αποδιάταξης του πρωτεϊνικού τους μανδύα. Η προσθήκη αλάτων σιδήρου ή αργιλίου δίνει αντίστοιχα αποτελέσματα.

Για την απομάκρυνση των ιών έχουν χρησιμοποιηθεί και φίλτρα ενεργού άνθρακα, χωρίς όμως μεγάλη επιτυχία,

καθώς υφίστανται ταχύ κορεσμό. Τα τελευταία χρόνια, έχουν χρησιμοποιηθεί με μεγάλη επιτυχία και συστήματα αντίστροφης όσμωσης και/ή υπερδιήθησης, χωρίς όμως να έχει γενικευθεί η εφαρμογή τους, κυρίως λόγω του πολύ υψηλού τους κόστους. Καθώς οι πόροι των μεμβρανών στα συστήματα αυτά είναι πολύ μικροί (με μέση διάμετρο μικρότερη από αυτή των ιών) τα ποσοστά απομάκρυνσης παθογόνων συνήθως είναι της τάξης του 99.99 %.

Πίνακας 4. Τυπικές συγκεντρώσεις και ποσοστά απομάκρυνσης (σε παρένθεση) παθογόνων και BOD κατά τα διάφορα στάδια επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.

	Εντεροϊοί (Αριθμός/L)	<i>Salmonella</i> sp. (Αρ. κυττάρων/L)	<i>Giardia</i> sp. (Αρ. κυττάρων/L)	<i>Cryptosporidium</i> sp. (Αρ. κυττάρων/L)	BOD ₅ (mg/L)
Μη επεξεργασμένο απόβλητο	$10^5 - 10^6$	5,000 - 80,000	9,000 - 200,000	1 - 4000	1,000 - 10,000
Πρωτογενής καθαρισμός	1,700 - 500,000 (50 - 98)	150 - 3,300 (95 - 99.8)	7,000 - 140,000 (27 - 64)	0.7	500 - 8,000
Δευτερογενής Καθαρισμός	80 - 400,000 (53 - 99.9)	3 - 1,000 (98.5 - 99.995)	6,500 - 110,000 (45 - 96)		5 - 100
Τριτογενής καθαρισμός	0.007 - 200 (99.9 - 99.99999)	0.000004 - 7 (99.99 - 99.999999)	0.1 - 3,000 (98.5 - 99.99995)	2.7	1 - 10

5. Η «Μοίρα» των βιοστερεών

Η λάσπη που παράγεται από τα διάφορα στάδια επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων (πρωτογενής λάσπη και ενεργοποιημένη ιλύς του δευτερογενούς καθαρισμού) χρήζει περαιτέρω επεξεργασίας με σκοπό τη σταθεροποίηση του οργανικού της φορτίου και την ελάττωση της περιεκτικότητάς της σε νερό. Η περιεκτικότητα σε στερεά της λάσπης από τη δεξαμενή πρωτογενούς καθίζησης είναι περίπου 3 - 8 %, ενώ αυτή της ενεργοποιημένης ιλύος από τη δεξαμενή καθίζησης του δευτερογενούς καθαρισμού είναι 0.5 - 2 % κατά βάρος. Η σταθεροποίηση της οργανικής ύλης προλαμβάνει την ανάπτυξη ανεπιθύμητων οσμών και ελαττώνει τον αριθμό των παθογόνων (κυρίως εντερικά παράσιτα και ιοί) που υπάρχουν σε μεγάλες συγκεντρώσεις στη λάσπη. Η ελάττωση της περιεκτικότητας σε νερό ελαττώνει δραστικά τον όγκο της λάσπης και καθιστά οικονομικότερη τη μεταφορά της στα τελικά σημεία εναπόθεσης.

Στους Πίνακες 5 και 6 δίνονται οι τυπικές περιεκτικότητες παθογόνων και μικροβιακών δεικτών για τη πρωτογενή και δευτερογενή λάσπη, αντίστοιχα.

Πίνακας 5. Τυπικές συγκεντρώσεις παθογόνων και μικροβιακών δεικτών στην πρωτογενή λάσπη.

Είδος	Οργανισμός	Πυκνότητα (Αριθμός ανά g ξηρού βάρους)
Ιοί	Εντεροϊοί	$10^2 - 10^4$
	Βακτηριοφάγοι	10^5
Βακτήρια	Ολικά κολίμορφα	$10^8 - 10^9$
	Περιπτωματικά κολίμορφα	$10^7 - 10^8$
	Περιπτωματικοί στρεπτόκοκκοι	$10^6 - 10^7$
	<i>Salmonella</i> sp.	$10^2 - 10^3$
	<i>Clostridium</i> sp.	10^6
	<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	10^6
Πρωτόζωα	<i>Giardia</i> sp.	$10^2 - 10^3$
Σκώληκες	<i>Ascaris</i> sp.	$10^2 - 10^3$
	<i>Trichuris vulpis</i>	10^2
	<i>Toxocara</i> sp.	$10^1 - 10^2$

Πίνακας 6. Τυπικές συγκεντρώσεις παθογόνων και μικροβιακών δεικτών στη δευτερογενή λάσπη.

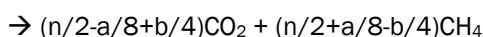
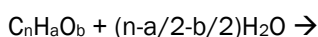
Είδος	Οργανισμός	Πυκνότητα (Αριθμός ανά g ξηρού βάρους)
Ιοί	Εντεροϊοί	3×10^2
Βακτήρια	Ολικά κολίμορφα	7×10^8
	Περιπρωματικά κολίμορφα	8×10^6
	Περιπρωματικοί στρεπτόκοκκοι	2×10^2
	<i>Salmonella</i> sp.	9×10^2
Πρωτόζωα	<i>Giardia</i> sp.	$10^2 - 10^3$
Σκώληκες	<i>Ascaris</i> sp.	10^3
	<i>Trichuris vulpis</i>	$< 10^2$
	<i>Toxocara</i> sp.	3×10^2

Η επεξεργασία της λάσπης περιλαμβάνει τα ακόλουθα διαδοχικά στάδια:

1. Πάχυνση (thickening): Πρόκειται για ένα στάδιο που έχει ως στόχο την ελάττωση του όγκου και επιτυγχάνεται είτε με τη χρήση δεξαμενών καθίζησης είτε με φυγοκέντρηση.

2. Χώνευση (digestion): Είναι μια καθαρά βιολογική διεργασία η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη σταθεροποίηση της οργανικής ύλης και την καταστροφή μεγάλου μέρους των παθογόνων μικροοργανισμών που υπάρχουν στη λάσπη, κυρίως λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που αναπτύσσονται. Η διεργασία της χώνευσης μπορεί να είναι είτε αναερόβια είτε αερόβια.

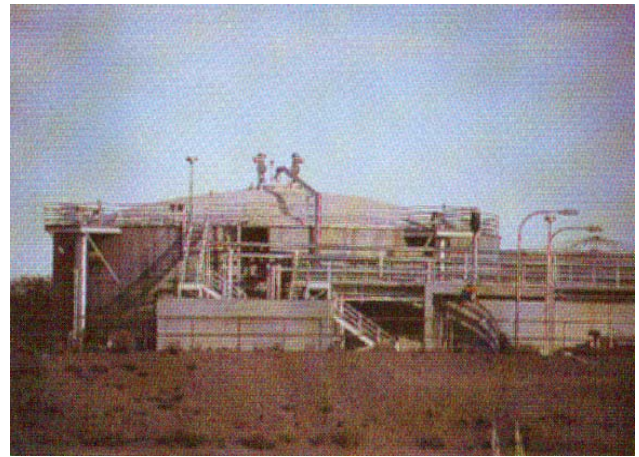
Η **αναερόβια χώνευση** αποτελεί την πιο κοινή διαδικασία και λαμβάνει χώρα σε ειδικές κλειστές δεξαμενές που βρίσκονται συνήθως κοντά στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας των αποβλήτων (Εικόνα 8). Η διάρκεια επεξεργασίας κυμαίνεται μεταξύ δύο και τριών εβδομάδων. Η διεργασία αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι παράγονται ταυτόχρονα σημαντικές ποσότητες μεθανίου το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για την κάλυψη μεγάλου μέρους των ενεργειακών αναγκών της εγκατάστασης επεξεργασίας αποβλήτων. Ο μετασχηματισμός της οργανικής ύλης κατά τη βακτηριακή μεθανογένεση παριστάνεται με την ακόλουθη γενική σχέση:



Στη βιοδιεργασία συμμετέχουν σημαντικός αριθμός βακτηριακών γενών τα οποία δρουν συνεργιστικά. Η αποτελεσματικότητα της διεργασίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όμως η θερμοκρασία, το pH, ο χρόνος παρα-

μόνης, η χημική σύσταση του αποβλήτου, ο ανταγωνισμός με σιδηροαναγωγικά βακτήρια και η τυχόν παρουσία τοξικών ουσιών (π.χ. βαρέα μέταλλα).

Ο βαθμός ελάττωσης της συγκέντρωσης των παθογόνων βακτηρίων κατά τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και του χρόνου επεξεργασίας. Υψηλές θερμοκρασίες ($50 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$) και μεγάλοι χρόνοι παραμονής ευνοούν την καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών. Γενικά, σε μια εγκατάσταση αναερόβιας χώνευσης η οποία λειτουργεί στη μεσόφιλη περιοχή ($30 - 38 \text{ }^\circ\text{C}$) με μια μέση διάρκεια επεξεργασίας της τάξης των 14 - 15 ημερών, αναμένεται μέση μείωση στη συγκέντρωση των ολικών κολίμορφων, των περιπρωματικών κολίμορφων και των περιπρωματικών στρεπτόκοκκων στο 1/100 της αρχικής. Τα ωά εντεροσκωλήκων συνήθως επιβιώνουν της αναερόβιας χώνευσης σε μεγάλο ποσοστό.



Εικόνα 8. Δεξαμενή αναερόβιας χώνευσης λάσπης βιολογικού καθαρισμού.

Η **αερόβια χώνευση** έχει και αυτή πρακτικά το ίδιο αποτέλεσμα όσον αφορά στη σταθεροποίηση της λάσπης. Πιο συγκεκριμένα, ατμοσφαιρικός αέρας ή καθαρό οξυγόνο διοχετεύονται μέσα στη λάσπη η οποία βρίσκεται σε ανοικτές δεξαμενές, βάθους 3 έως 6 μέτρων. Η συγκέντρωση οξυγόνου ελέγχεται στα επίπεδα πάνω από το 1 mg/L για την αποφυγή ανάπτυξης δυσάρεστων οσμών. Ο χρόνος παραμονής στη δεξαμενή αερόβιας χώνευσης κυμαίνεται μεταξύ 15 και 30 ημερών, ανάλογα με τη θερμοκρασία. Οι μικροοργανισμοί αποικοδομούν αερόβια την εναπομείνουσα στη λάσπη οργανική ύλη, με αποτέλεσμα τη σημαντική ελάττωση του οργανικού φορτίου.

Τα πλεονεκτήματα της αερόβιας χώνευσης είναι το χαμηλό κόστος εγκατάστασης, η ευκολία στους χειρισμούς και η παραγωγή σταθεροποιημένης και άοσμης λάσπης. Παρόλα αυτά, με τη διεργασία αυτή παράγονται περαιτέρω ποσότητες μικροβιακής λάσπης οι οποίες θα πρέπει να επεξεργαστούν πριν τη διάθεσή τους σε κάποιον αποδέκτη.

Οι θερμοκρασίες που επικρατούν κατά την αερόβια χώνευση ανήκουν συνήθως στη μεσόφιλη περιοχή (37 °C). Η καταστροφή των παθογόνων οργανισμών πραγματοποιείται κυρίως λόγω της έλλειψης θρεπτικών συστατικών, αφού η συνεχής μετατροπή της οργανικής ύλης σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της ποσότητας των διαθέσιμων για τα παθογόνα βακτήρια πηγών άνθρακα.

3. Σταθεροποίηση (conditioning): Πρόκειται για μια χημική επεξεργασία η οποία συνήθως ακολουθεί το στάδιο της χώνευσης. Συνίσταται στην προσθήκη χημικών όπως στυπτηρία ($\text{alum} - \text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), χλωριούχου σιδήρου ή ασβέστου ($\text{lime} - \text{Ca}(\text{OH})_2$), τα οποία βοηθούν στη συσσωμάτωση των στερεών σωματιδίων της λάσπης και στην απομάκρυνσή τους με καταβύθιση ή διήθηση από διαφόρων ειδών φίλτρα (άμμου, ενεργού άνθρακα, γρανάτη κ.λ.π.). Η συσσωμάτωση που λαμβάνει χώρα στο στάδιο αυτό είναι ιδιαίτερα αποδοτική στην απομάκρυνση των ιών.

Κατά τη διάρκεια της σταθεροποίησης με τη χρήση ασβέστου, η λάσπη αναμειγνύεται με ικανή ποσότητα ασβέστου έτσι ώστε το pH να διατηρηθεί στο 12 για τουλάχιστον 2 ώρες. Στην τιμή αυτή pH, τα ιόντα NH_4^+ αποπρωτονιώνονται και παράγεται σημαντική ποσότητα αέριας αμμωνίας (NH_3). Ο συνδυασμός του υψηλού pH και της παρουσίας αμμωνίας προκαλεί πολύ μεγάλη ελάττωση στις συγκεντρώσεις εντεροϊών (τέσσερις τάξεις μεγέθους) και κολίμορφων βακτηριακών δεικτών (δύο έως επτά τάξεις μεγέθους).

4. Αφυδάτωση (dewatering): Είναι ουσιαστικά μια διαδικασία ελάττωσης του όγκου με την απομάκρυνση του περιεχόμενου νερού. Επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους όπως η ξήρανση με αέρα, η συνεχής φυγοκέντρωση ή η διήθηση υπό κενό.

5. Απόρριψη: Μετά τα παραπάνω στάδια επεξεργασίας, η συμπυκνωμένη και επεξεργασμένη λάσπη μπορεί να απορριφθεί σε κάποιον φυσικό αποδέκτη, ή να αποτεθεί σε ελεγχόμενους χώρους ταφής. Στις ανεπτυγμένες χώρες, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, έχουν αναπτυχθεί διαδικασίες ελεγχόμενης εναπόθεσης της επεξεργασμένης λάσπης από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων σε εδάφη που προορίζονται για αγροτική

χρήση (land farming). Η διαδικασία αυτή έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση του εδάφους με τα θρεπτικά υλικά που υπάρχουν στα οργανικά βιοστερεά της λάσπης (Εικόνα 9). Ανάλογα με το μικροβιακό φορτίο παθογόνων της λάσπης έχουν θεσπιστεί μια σειρά από κριτήρια που αφορούν σε θέματα όπως, το είδος των καλλιεργειών που θα αναπτυχθούν στις περιοχές αυτές, το χρονικό διάστημα μεταξύ εναπόθεσης και σποράς κ.λ.π.



Εικόνα 9. Ελεγχόμενη απόθεση επεξεργασμένης λάσπης από εγκαταστάσεις βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων. Α) Έγχυση της λάσπης στο έδαφος, Β) Ανάπτυξη καλλιέργειας βαμβακιού στην ίδια περιοχή.