

Βιολογικές Διεργασίες στην Επεξεργασία Υγρών Αποβλήτων

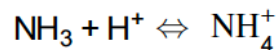
Μάθημα 5

Ανόργανα χημικά χαρακτηριστικά λυμάτων

Τα ανόργανα συστατικά των υγρών αποβλήτων είναι **όλα τα γνωστά συστατικά των φυσικών νερών** και **επιπλέον συστατικά** τα οποία έχουν προστεθεί κατά τη χρήση του νερού από τον άνθρωπο σε διάφορες εφαρμογές.

Τα πιο σημαντικά συστατικά των υγρών αποβλήτων είναι:

(i) Το **άζωτο**, το οποίο απαιτείται για την **ανάπτυξη των μικροοργανισμών**, το οποίο όμως προκαλεί και **προβλήματα ευτροφισμού** στα επιφανειακά νερά, καθώς και η **αμμωνία είναι τοξική στα ψάρια**. Το άζωτο ονομάζεται **αμμωνιακό άζωτο** (ammonia nitrogen) όταν βρίσκεται σε μορφή αμμωνίας (NH_3) ή αμμωνιακού ιόντος (NH_4^+) σύμφωνα με την αντίδραση:

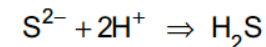
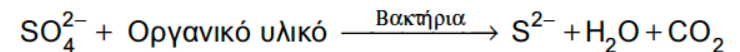


και προφανώς εξαρτάται από το pH. Η παραπάνω αντίδραση μετατοπίζεται προς τα δεξιά για $\text{pH} < 7$ και προς τα αριστερά για $\text{pH} > 7$.

Το άζωτο ονομάζεται **οργανικό άζωτο** όταν βρίσκεται σε μορφή αζωτούχων οργανικών ενώσεων και **ανόργανο άζωτο** όταν βρίσκεται σε μορφή νιτρωδών και νιτρικών.

(ii) Ο **φώσφορος**, ο οποίος είναι απαραίτητος για την **ανάπτυξη των μικροοργανισμών** γιατί είναι βασικό **δομικό στοιχείο των νουκλεϊκών οξέων**. Ο φώσφορος προκαλεί **προβλήματα ευτροφισμού** και συνεισφέρει στην αυξημένη ανάπτυξη τοξικών φυκών. Στα υγρά απόβλητα βρίσκεται σε μορφή ορθοφωσφορικών (π.χ. φωσφορικό οξύ) καθώς και πολυφωσφορικών.

(iii) Το **θείο**, το οποίο είναι απαραίτητο για τη σύνθεση πρωτεϊνών στους μικροοργανισμούς. Σε αναερόβιες συνθήκες τα θειικά των υγρών αποβλήτων μετατρέπονται με τη βοήθεια βακτηρίων σε **θειώδη** και **υδρόθειο** μέσω των παρακάτω αντιδράσεων:



Η **παραγωγή υδρόθειου** εμφανίζεται κυρίως στους **υπόνομους**, όπου και οξειδώνεται σε θειικό οξύ και κατ' επέκταση **προκαλεί διάβρωση τους υπόγειους σωλήνες**.

Μικροβιολογικά χαρακτηριστικά λυμάτων

Οι μικροοργανισμοί παίζουν σπουδαίο ρολό στην επεξεργασία των υγρών αποβλήτων.

Η αφομοίωση και αποδόμηση πολλών οργανικών ρύπων βασίζεται στο βιολογικό αυτοκαθαρισμό των υγρών αποβλήτων με τη βοήθεια βακτηρίων.

Επομένως είναι απαραίτητο και ιδιαίτερα σημαντικό να γνωρίζουμε ποια είδη μικροοργανισμών επικρατούν.

Τα υγρά απόβλητα περιέχουν μεγάλη ποικιλία μικροοργανισμών, μερικοί μπορεί να είναι και παθογόνοι.

Οι κύριες κατηγορίες παθογόνων μικροοργανισμών που εμφανίζονται στα υγρά απόβλητα είναι:

- βακτήρια (bacteria),
- ιοί (viruses),
- πρωτόζωα (protozoa).

Οι παθογόνοι μικροοργανισμοί μεταφέρονται στα υγρά απόβλητα με τα κόπρανα και τα ούρα ανθρώπων ή και ζώων με προβλήματα υγείας.

Μαζί με τους παθογόνους μικροοργανισμούς συνυπάρχουν σε πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις τα κολοβακτηρίδια, τα οποία, παρόλο που είναι εντερικής προέλευσης, θεωρούνται σχετικά ακίνδυνα.

Κάθε άνθρωπος συνεισφέρει στα αστικά λύματα $1-4 \times 10^{11}$ κολοβακτηρίδια την ημέρα.

Ο προσδιορισμός των κολοβακτηριδίων βασίζεται στην ικανότητά τους να ζυμώνουν διάλυμα λακτόζης με παραγωγή αέριων και είναι ευκολότερος από τον προσδιορισμό διάφορων παθογόνων μικροοργανισμών.

Τα κολοβακτηρίδια χρησιμοποιούνται σαν δείκτης παθογόνων μικροοργανισμών.

Τα κολοβακτηρίδια κατατάσσονται σε:

- ολικά κολοβακτηρίδια (total coliforms),
- κολοβακτηρίδια κοπράνων (fecal coliforms),
- στρεπτόκοκκοι κοπράνων (fecal streptococci).

Διαφορετικές διατροφικές συνήθειες και κλιματολογικές συνθήκες επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις κολοβακτηριδίων σε ανθρώπινους πληθυσμούς.

Επίσης, διαφορετικές διατροφικές συνήθειες επηρεάζουν τις συγκεντρώσεις κολοβακτηριδίων στα ζώα.

Κολοβακτηρίδια κοπράνων σε διαφορετικούς ανθρώπινους πληθυσμούς.

Διατροφή	Χώρα	Κολοβακτηρίδια [†]	Στρεπτόκοκκοι [†]
Υδαάνθρακες σε μέγιστο βαθμό	Ινδία	7,9	7,3
	Ιαπωνία	9,4	8,1
	Ουγκάντα	8,0	7,0
	Κίνα	7,0	5,8
Μικτή Δυτική	Αγγλία	7,9	5,8
	Σκώτια	7,6	5,3
	Η.Π.Α.	7,4	5,9
	Δανία	7,0	6,8
	Φιλανδία	7,0	7,8

Κολοβακτηρίδια κοπράνων διαφόρων ζώων.

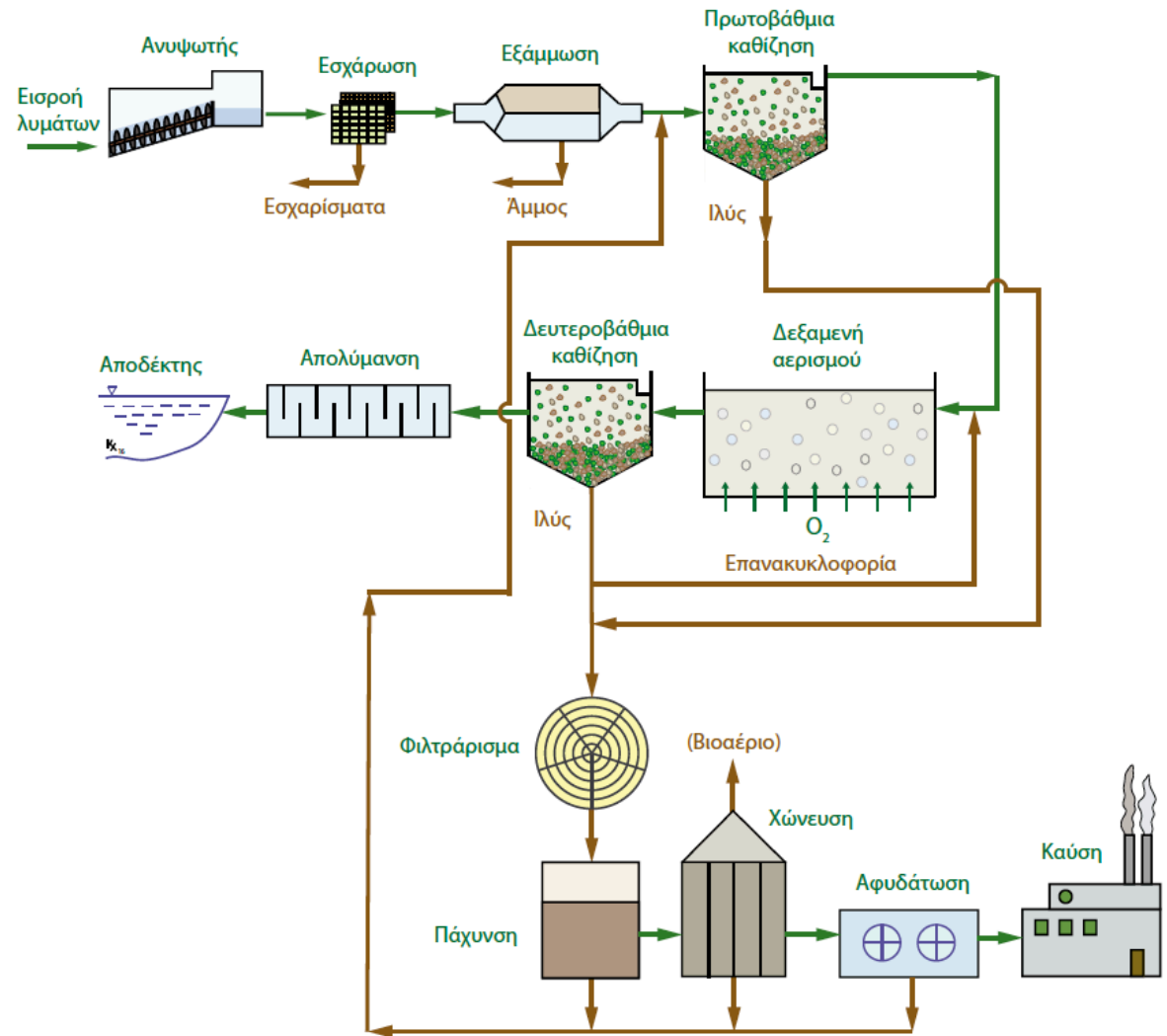
Είδος	Κολοβακτηρίδια [†]	Στρεπτόκοκκοι [†]
Ζώα αγροκτήματος		
Αγελάδα	230	1300
Χοίρος	3300	84000
Πρόβατο	16000	38000
Άλογο	12,6	6300
Πάπια	33000	54000
Κοτόπουλο	1300	3400
Γαλοπούλα	290	2800
Κατοικίδια ζώα		
Γάτα	7900	27000
Σκύλος	23000	980000
Άγρια ζώα		
Ποντίκια	300	7700
Κουνέλια	0,020	47
Άνθρωπος		
	13000	3000

Διεργασίες επεξεργασίας νερού και λυμάτων

Βασικές διεργασίες

Οι βασικές διεργασίες καθαρισμού νερού και λυμάτων κατατάσσονται σε τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες:

προεπεξεργασία,
φυσικές,
χημικές,
φυσικοχημικές.



Διάγραμμα ροής τυπικής μονάδας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.

Προεπεξεργασία

Τα στάδια της προεπεξεργασίας είναι:

(1) **Ανύψωση** – τα υγρά απόβλητα που φθάνουν μέσω του αποχετευτικού δικτύου σε μια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων είναι πολύ πιθανό να χρειάζονται ανύψωση αν οι σωλήνες του αποχετευτικού είναι υπόγειες. Η ανύψωση των λυμάτων στην επιφάνεια και στο ύψος των εγκαταστάσεων επεξεργασίας συνήθως γίνεται με αντλίες.

(2) **Απόσμηση** – τα υγρά απόβλητα που φθάνουν σε μια μονάδα επεξεργασίας λυμάτων είναι αρκετά έως και πάρα πολύ **δύσοσμα** λόγω της **αναερόβιας σήψης** κατά τη διαδρομή τους μέσα στο αποχετευτικό δίκτυο. Τα πλέον διαδεδομένα συστήματα απόσμησης είναι:

(i) προσρόφηση σε ενεργό άνθρακα,

(ii) υγρή πλύση (wet scrubbing) όπου τα δύσοσμα συστατικά του αέρα απομακρύνονται με χρήση πύργων με πληρωτικό υλικό και επιλεγμένα υγρά διαλύματα,

(iii) βιοφίλτρα όπου ο δύσοσμος αέρας μεταφέρεται στον πυθμένα φίλτρου με πληρωτικό υλικό (π.χ. πριονίδια, σανό, φύλλα, πευκοβελόνες, τσόφλια) που επιτρέπει την ανάπτυξη βιοφίλμ. Οι δύσοσμες ουσίες διαχέονται στο βιοφίλμ όπου οι διάφοροι μικροοργανισμοί τις καταναλώνουν.

(3) **Εσχάρωση** – οι εσχάρες **συγκρατούν ογκώδη αντικείμενα** (π.χ. ξύλα, πλαστικά μπουκάλια, σακούλες) για να μη εισέλθουν στις μονάδες επεξεργασίας νερού και λυμάτων. Υπάρχουν δύο είδη εσχάρων: οι **χειροκίνητες** εσχάρες που χρειάζονται καθαρισμό με τσουγκράνα, και οι **μηχανικές** εσχάρες που διαθέτουν αυτόματο σύστημα καθαρισμού με μηχανικό χτένι.

(4) **Εξάμμωση ή αμμοσυλλογή** –απομάκρυνση των χαλικιών, κόκκων άμμου και άλλων ανόργανων στερεών με διάμετρο μεγαλύτερη από 200 μm. Η παρουσία αυτών των στερεών προκαλεί φράξιμο των σωληνώσεων, καταστρέφει τις αντλίες και μειώνει την απόδοση των άλλων διεργασιών καθαρισμού.

(5) **Λιποσυλλογή** – απομάκρυνση ελαιωδών και λιπαρών προσμίξεων. Τα λίπη και έλαια δημιουργούν προβλήματα στη βιολογική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Επειδή τα λίπη και έλαια επιπλέουν στην επιφάνεια των υγρών αποβλήτων, ο **τρόπος απομάκρυνσής των** είναι με:

(i) απλή αναρρόφηση,

(ii) ξέστρα επιφάνειας.

(6) **Μέτρηση παροχής** – ο **συνεχής προσδιορισμός** της παροχής είναι απαραίτητος για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας της μονάδας.

Φυσικές διεργασίες

Οι διάφορες τυπικές φυσικές διεργασίες καθαρισμού νερού και λυμάτων είναι:

(7) *Ανάμιξη* – επιτυγχάνει ομοιόμορφη μείξη στο νερό των επιπρόσθετων στερεών, υγρών και αερίων χημικών ουσιών που είναι χρήσιμες για τις διάφορες διαδικασίες του καθαρισμού. Ανάμιξη επιτυγχάνεται με:

- (α) *υδραυλικές μεθόδους* που βασίζονται στην κινητική ενέργεια της ροής χρησιμοποιώντας κρουνοί, υπερχειλιστές, γωνίες και βαλβίδες σε σωλήνες, δεξαμενές μαιανδρικής ροής (κανάλια με εμπόδια), και υδραυλικά άλματα,
- (β) *μηχανικές μεθόδους* που χρησιμοποιούν αναμικτήρες με έλικες, στροβίλους ή πτερύγια.

(8) *Θρόμβωση (flocculation)* – συσσωμάτωση μικρών αιωρούμενων θρόμβων λόγω των συγκρούσεων που προκαλούνται από θερμικές κινήσεις Brown.

(9) *Καθίζηση (sedimentation)* - εφαρμόζεται για το διαχωρισμό αιωρούμενων στερεών με ειδικό βάρος μεγαλύτερο του νερού.

(10) *Επίπλευση* - εφαρμόζεται για το διαχωρισμό στερεών, στις περιπτώσεις που τα αιωρούμενα στερεά έχουν ειδικό βάρος μικρότερο του νερού (π.χ. στερεά προσκολλημένα σε φυσαλίδες αέρος).

(11) *Διήθηση (φιλτράρισμα)* – επιτυγχάνει απομάκρυνση των αιωρούμενων στερεών που παραμένουν στο νερό ή τα υγρά απόβλητα μετά την καθίζηση. Στη διεργασία αυτή το νερό ή τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα διέρχονται μέσω πορώδους στρώματος (π.χ. άμμος, ανθρακίτης ή πολλαπλά στρώματα διηθητικών υλικών).

(12) *Υπερδιήθηση* – διεργασία διήθησης κάτω από ένα δυναμικό πίεσης μέσω ημιπερατών μεμβρανών.

(13) *Αντίστροφη ώσμωση (reverse osmosis)* – κατακράτηση ιόντων από το νερό ή τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα με ημιπερατές μεμβράνες.

Χημικές διεργασίες

Οι πιο συνηθισμένες χημικές διεργασίες καθαρισμού νερού και λυμάτων είναι:

(14) *Απολύμανση (disinfection)* - καταστροφή ή αδρανοποίηση μικροοργανισμών είτε με χημικά οξειδωτικά (π.χ. χλώριο, όζον) είτε με υπεριώδη ακτινοβολία (UV).

(15) *Κροκίδωση (coagulation)* – αποσταθεροποίηση των αιωρημάτων με προσθήκη κροκιδωτικών, όπως διάφορα άλατα του σιδήρου και του αργιλίου. Σε συνδυασμό με ταχεία μείξη του νερού επιτυγχάνεται η συσσωμάτωση των αιωρούμενων στερεών. Τα **κροκιδωτικά μειώνουν** τις **ηλεκτροστατικές δυνάμεις** απώθησης που υπάρχουν μεταξύ ομοιόμορφα φορτισμένων στερεών. Δηλαδή, μειώνουν το ζήτη δυναμικό (μέτρο ηλεκτροστατικών δυνάμεων).

(16) *Χημική ιζηματοποίηση* – **αφαίρεση** των ιόντων ασβεστίου και μαγνήσιου (**σκληρότητα**) με προσθήκη υδροξειδίου του ασβεστίου και αφαίρεση **άλλων μετάλλων** με τη προσθήκη ορισμένων χημικών ενώσεων.

(17) *Οξείδωση (oxidation)* – Προσθήκη οξειδωτικού (διοξείδιο του χλωρίου, όζον, υπερμαγγανικό κάλιο) για την **παρεμπόδιση της ανάπτυξης μικροοργανισμών και φυκιών**.

(18) *Ενανθράκωση (recarbonation)* - μετά την αποσκλήρυνση προστίθεται CO₂ ώστε να κατεβεί το pH για να αποφευχθούν αποθέσεις ιζημάτων.

Φυσικοχημικές διεργασίες

Οι τυπικές φυσικοχημικές διεργασίες είναι οι εξής:

(19) *Αερισμός (aeration)* – χρησιμοποιείται για την **οξυγόνωση** του νερού ή των λυμάτων. Ο αερισμός του νερού γίνεται σε πύργους με πληρωτικό υλικό μεγάλης ειδικής επιφάνειας, με πολλαπλές υδατοπτώσεις, πίδακες (σιντριβάνια), και με διαχυτές αέρα στην υγρή φάση.

(20) *Ενεργός άνθρακας (activated carbon)* – χρησιμοποιείται είτε σε **κοκκώδη μορφή** (Granular Activated Carbon, GAC) είτε σε **κονιοποιημένη μορφή** (Powdered Activated Carbon, PAC) για την προσρόφηση οργανικών συστατικών από το νερό (π.χ. χλωριωμένοι διαλύτες, φαινόλες, αρωματικά παράγωγα, απορρυπαντικά, ενώσεις που παρέχουν έντονες οσμές και γεύσεις στο νερό). Ο **GAC τοποθετείται σε απλές στήλες**, ενώ ο **PAC προστίθεται** όπως τα κροκιδωτικά και απομακρύνεται από το νερό με τις διεργασίες καθίζησης και διήθησης.

Επιλογή διεργασιών

Κάθε εγκατάσταση επεξεργασίας νερού και λυμάτων περιλαμβάνει μια σειρά βασικών ή και πολύ εξειδικευμένων διεργασιών.

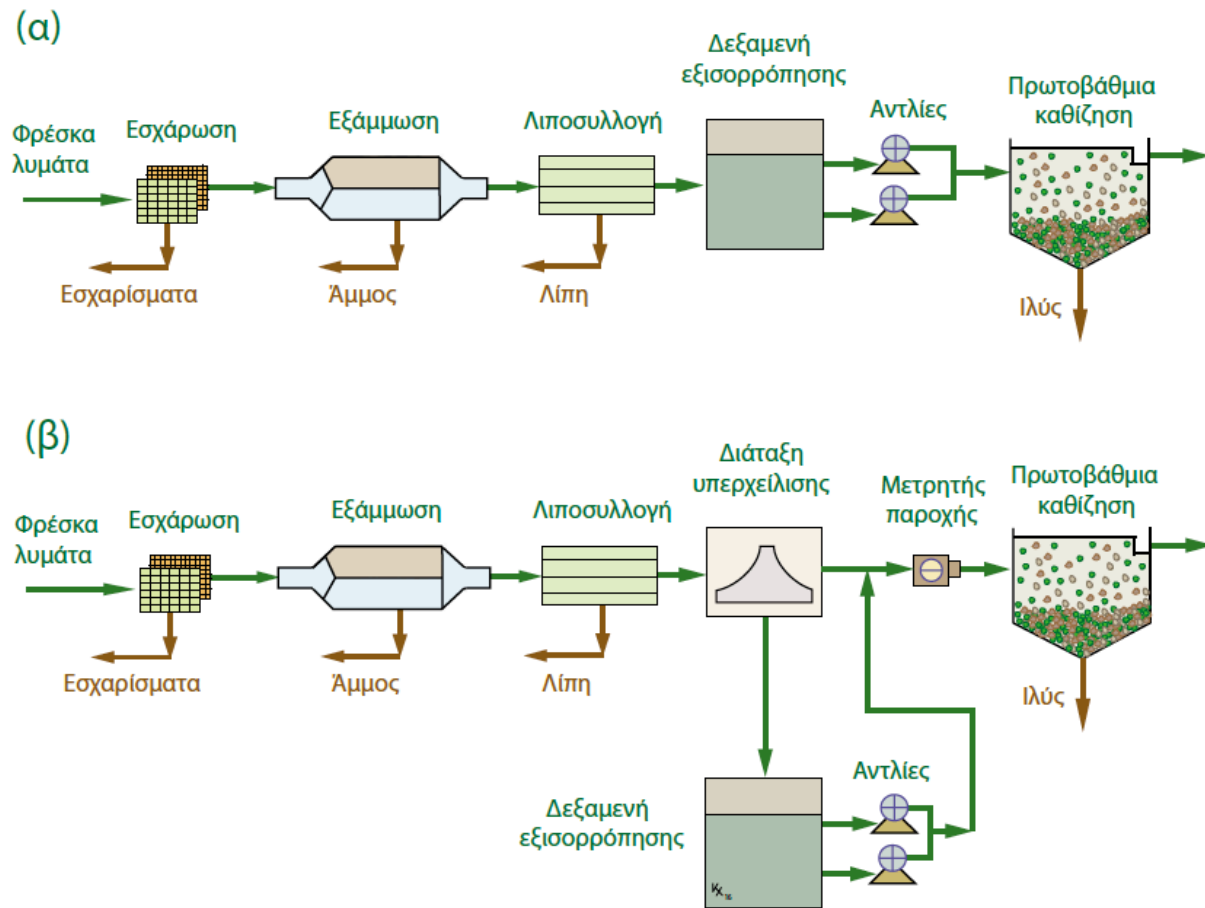
Η επιλογή των διαφόρων διεργασιών **basίζεται στα χαρακτηριστικά** των ανεπεξέργαστων λυμάτων και την επιθυμητή **ποιότητα** των επεξεργασμένων λυμάτων.

Η **σωστή επιλογή** των διεργασιών εξασφαλίζει τα επιδιωκόμενα χαρακτηριστικά στο επεξεργασμένο νερό, και **basίζεται στις γνώσεις και εμπειρία των μηχανικών** που αναλαμβάνουν το σχεδιασμό του συστήματος καθαρισμού.

Πρωτοβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία ή προεπεξεργασία υγρών αποβλήτων ονομάζεται και μηχανική επεξεργασία γιατί περιλαμβάνει τα στάδια:

εσχάρωση,
εξάμμωση,
λιποσυλλογή,
εξισορρόπηση παροχής,
πρωτοβάθμια καθίζηση.



Διάγραμμα ροής πρωτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων με δεξαμενή εξισορρόπησης τοποθετημένη: (α) στη σειρά και (β) πλευρικά.

Εσχάρωση

Τα λύματα που φτάνουν στη μονάδα επεξεργασίας περνούν από εσχάρες οι οποίες είναι τοποθετημένες με γωνιά 75° σε σχέση με την οριζόντια ροή των λυμάτων.

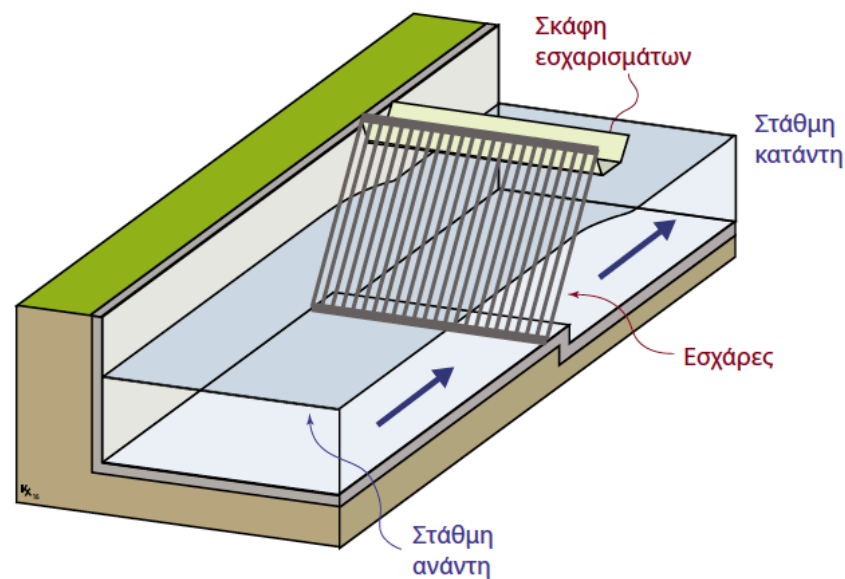
Οι εσχάρες χρησιμεύουν για τη συγκράτηση μεγάλων στερεών (π.χ. ξύλα, πλαστικά μπουκάλια, σακούλες, γυαλιά, φλοιοί φρούτων, πανιά) τα οποία πολύ πιθανόν να προκαλέσουν αποφράξεις σε σωληνώσεις, αεριστήρες και αντλίες. Συνήθως οι εσχάρες τοποθετούνται σε μια διαδοχική σειρά. Πρώτα τοποθετούνται οι εσχάρες με μεγάλα ανοίγματα (διάκενα) και στη συνέχεια εσχάρες με μικρότερα ανοίγματα.

Οι εσχάρες κατασκευάζονται από παράλληλες μπάρες ανοξείδωτου χάλυβα και η απόσταση των μπαρών ποικίλει από μερικά χιλιοστά μέχρι και μερικά εκατοστά.

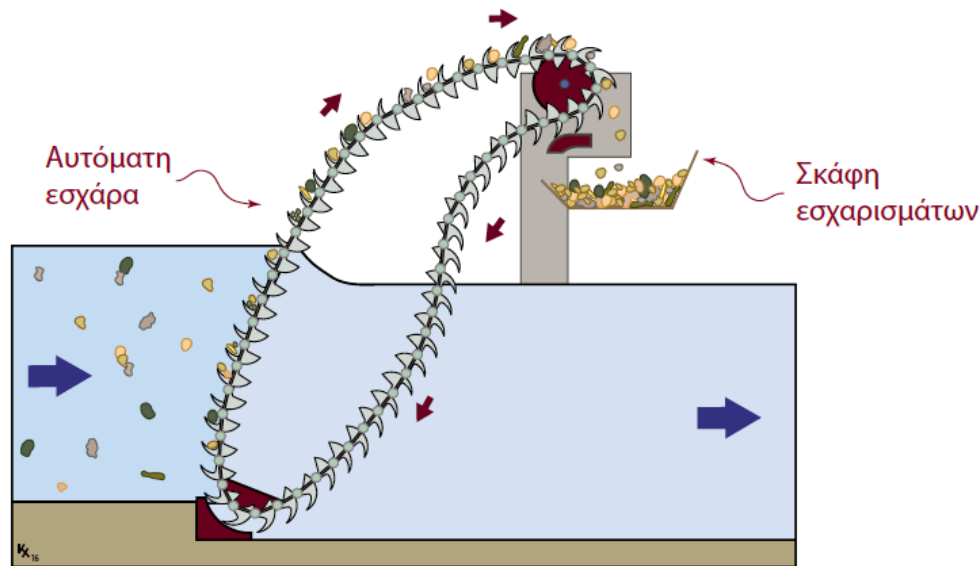
Οι εσχάρες κατατάσσονται σε:

- (i) χονδρές με απόσταση μπαρών 40-150 mm,
- (ii) λεπτές με απόσταση μπαρών 6-40 mm,
- (iii) πολύ λεπτές με απόσταση μπαρών 3-6 mm.

Οι εσχάρες καθαρίζονται χειρωνακτικά με τσουγκράνες ή μηχανικά δηλαδή διαθέτουν αυτόματο σύστημα καθαρισμού με μηχανικό χτένι.



Σταθερή εσχάρα χειρωνακτικού καθαρισμού.



Εσχάρα με αυτόματο και συνεχές σύστημα καθαρισμού.

Οι **υδραυλικές απώλειες** που προκύπτουν εξαιτίας των εσχάρων μπορούν να υπολογιστούν με εμπειρικές εξισώσεις.

Για **χονδρές εσχάρες** οι υδραυλικές απώλειες, h_L [m], υπολογίζονται ως εξής:

$$h_L = \frac{1}{\beta_{sc}} \left(\frac{u^2 - v^2}{2g} \right) \quad [m]$$

όπου β_{sc} [-] είναι ο **συντελεστής εκροής για χονδρές εσχάρες (screen coarse)** που και για καθαρές εσχάρες και έχει τιμή $\beta_{sc}=0,7$ ενώ για εσχάρες με **μερική έμφραξη** έχει τιμή $\beta_{sc}=0,6$, u [m/s] είναι η **ταχύτητα** του υγρού διαμέσου της εσχάρας, v [m/s] είναι η **ταχύτητα προσέγγισης (ανάντη)** του υγρού και $g=9,81$ [m/s²] είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Για πολύ **λεπτές εσχάρες** οι υδραυλικές απώλειες, h_L [m], υπολογίζονται από την εμπειρική σχέση:

$$h_L = \frac{1}{2g} \left(\frac{Q}{\beta_{sf} A} \right)^2 \quad [m]$$

όπου β_{sf} [-] είναι ο **συντελεστής εκροής για πολύ λεπτές εσχάρες (screen fine)** με τυπική τιμή $\beta_{sc}=0,6$, Q [m³/s] είναι η **ογκομετρική παροχή** του υγρού, A [m²] είναι η **ενεργή ανοιχτή επιφάνεια** της βυθισμένης στο υγρό εσχάρας.

Εξάμμωση (αμμοσυλλογή)

Η άμμος που περιέχεται στα λύματα πρέπει να αφαιρεθεί γιατί κατακάθεται στον πυθμένα των δεξαμενών, καταστρέφει αντλίες και αναδευτήρες και αυξάνει τον όγκο της παραγόμενης ιλύος.

Ο αμμοσυλλέκτης είναι μια δεξαμενή καθίζησης όπου διακεκριμένα στερεά με διάμετρο μεγαλύτερη των 200 μm επιταχύνονται μέχρι να φτάσουν την τερματική ταχύτητά τους ώστε να μπορέσουν να καθιζάνουν στον πυθμένα της δεξαμενής.

Η εξάμμωση έχει στόχο την απομάκρυνση κόκκων άμμου και άλλων αδρανών στερεών μεγάλης πυκνότητας, αλλά όχι των οργανικών στερεών.

Η ροή των λυμάτων σε αμμοσυλλέκτες δεν πρέπει να είναι πολύ μικρή για να αποφευχθεί καθίζηση οργανικών σωματιδίων, αλλά όχι και πολύ μεγάλη ώστε τα λύματα να συμπαρασύρουν την άμμο από τον πυθμένα της δεξαμενής.

Η καθίζηση μικρής ποσότητας οργανικής ύλης μαζί με την άμμο σε πυθμένα δεξαμενής εξάμμωσης αντιμετωπίζεται με την πλύση της άμμου μετά την αμμοσυλλογή.

Η ταχύτητα συμπαρασυρμού (scour velocity) αδρανών στερεών από τον πυθμένα οριζόντιας δεξαμενής καθίζησης, v_σ [m/s], δίνεται από την εμπειρική σχέση:

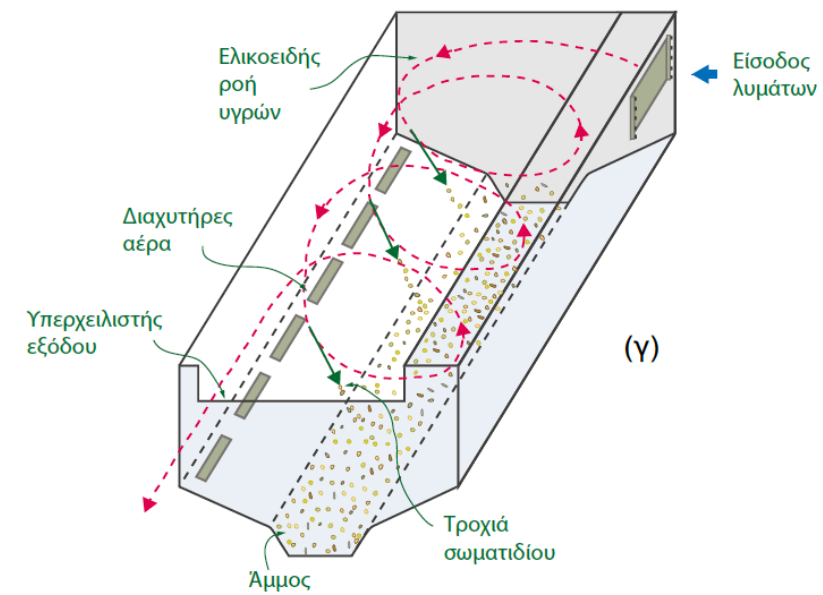
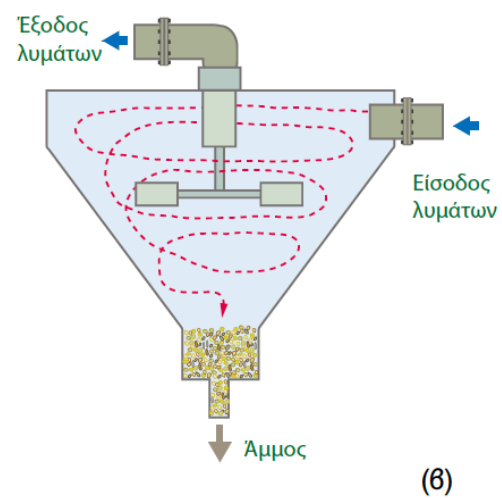
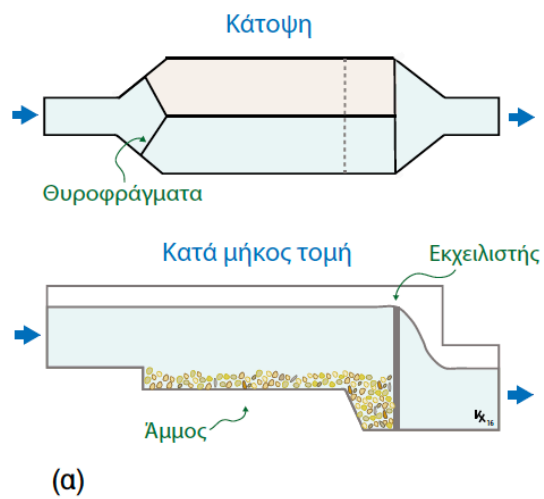
$$v_\sigma = \left[\frac{8k(\rho_p - \rho_w)gd_p}{f_f} \right]^{1/2} \left[\frac{m}{s} \right]$$

όπου ρ_p [kg/m³] είναι η πυκνότητα του στερεού, ρ_w [kg/m³] είναι η πυκνότητα του υγρού, $g=9,81$ [m/s²] είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, d_p [m] είναι η διάμετρος του στερεού σωματιδίου, f_f [-] είναι ο συντελεστής τριβής και έχει εύρος τιμών $f_f=0,02-0,03$, k [-] είναι μια εμπειρική σταθερά που έχει σχέση με την επιφάνεια του στερεού (δηλαδή πόσο κολλώδες είναι) και έχει τιμές:

$k=0,04$ για άμμο

$k=0,06$ για κολλώδη στερεά.

Το στερεό συμπαρασύρεται όταν $v_\sigma > 0,3$ m/s.



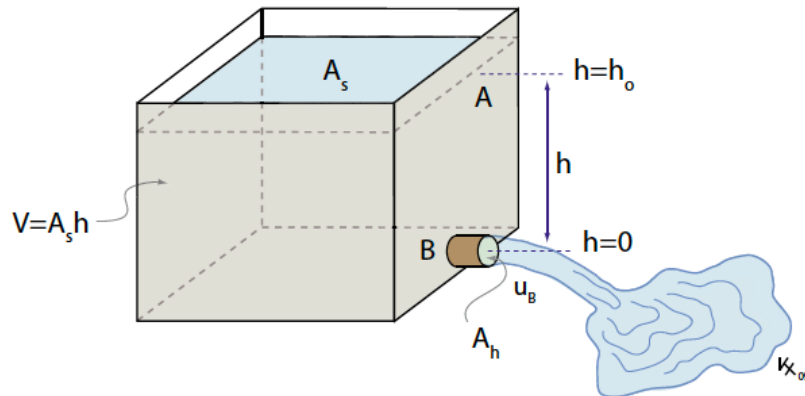
Τύποι αμμοσυλλεκτών: (α) οριζόντιος, (β) κυκλικός και (γ) αεριζόμενος.

Ταχύτητα εκροής

Η ταχύτητα εκροής της δεξαμενής του παρακάτω σχήματος βρίσκεται εφαρμόζοντας το **νόμο του Bernoulli** για τα σημεία A στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού και B στο κέντρο του στόμιου εκροής:

$$\left(\frac{p_A}{\gamma_w} + z_A + \frac{u_A^2}{2g} \right) = \left(\frac{p_B}{\gamma_w} + z_B + \frac{u_B^2}{2g} \right) + \sum h_L$$

όπου $\gamma_w = \rho_w g$ είναι το ειδικό βάρος του νερού, z_i είναι το υψομετρικό φορτίο, u είναι η ταχύτητα του νερού και $\sum h_L$ είναι το άθροισμα των υδραυλικών απωλειών ανάμεσα στα σημεία A και B.



Δεξαμενή με ελεύθερη επιφάνεια A_s , στην οποία υπάρχει ένα στόμιο στο τοίχωμα της δεξαμενής με επιφάνεια διατομής A_h .

Με αναφορά ύψους τον άξονα της φλέβας εκροής (σημείο B):

$$z_A = h \quad \& \quad z_B = 0$$

Η πίεση στην επιφάνεια του νερού και στον άξονα της δέσμης είναι η ατμοσφαιρική.

Με αναφορά πίεσης την ατμοσφαιρική, έχουμε $p_A = p_B = 0$.

Η **ταχύτητα του νερού στην επιφάνεια** μπορεί να θεωρηθεί **αμελητέα** συγκριτικά με την ταχύτητα με την οποία ρέει το νερό στο B, $u_A \sim 0$.

Θεωρώντας ότι η υδραυλική απώλεια μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας και το στόμιο στο τοίχωμα της δεξαμενής είναι πρακτικά μηδέν, $\sum h_L \sim 0$, η εξίσωση Bernoulli απλοποιείται ως εξής:

$$(0 + h + 0) = \left(0 + 0 + \frac{u_B^2}{2g} \right) + 0 \Rightarrow u_B = \sqrt{2gh} \quad (*)$$

Η εξίσωση αυτή δίνει τη **ταχύτητα εκροής συναρτήσει του ύψους h** και αντιστοιχεί στην **ταχύτητα ελεύθερης πτώσης** από την επιφάνεια της δεξαμενής, δηλαδή την ταχύτητα που θα είχε το υγρό εάν έπεφτε ελεύθερα από ύψος h .

Η εξίσωση (*) είναι απλά η θεωρητική ταχύτητα γιατί αγνοήθηκαν οι απώλειες μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας και το στόμιο στο τοίχωμα της δεξαμενής.

Ο λόγος της πραγματικής ταχύτητας ως προς τη θεωρητική ταχύτητα δίνεται από το συντελεστή ταχύτητας (velocity coefficient), c_v .

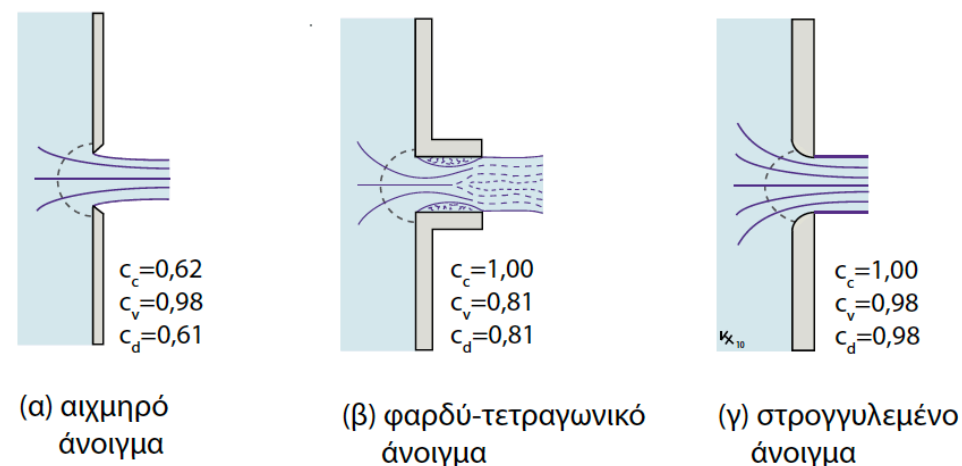
Ο λόγος του εμβαδού της συνεσταλμένης διατομής (διάμετρος της φλέβας σε μικρή απόσταση από την οπή συστέλλεται, *vena contracta*) προς το εμβαδόν του στόμιου εκροής δίνεται από το συντελεστή συστολής (coefficient of contraction), c_c .

Οι συντελεστές ταχύτητας και συστολής συγχωνεύονται και δίνουν το συντελεστή εκροής (discharge coefficient),

$$C_d = c_v c_c$$

και η πραγματική ταχύτητα εκροής γράφεται:

$$u_B = c_d \sqrt{2gh}$$

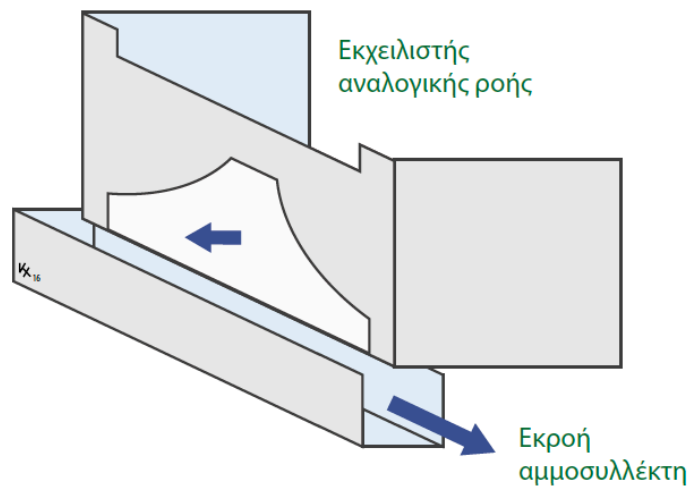


Τυπικές τιμές των συντελεστών ταχύτητας, συστολής και εκροής για στόμια εκροής με (α) αιχμηρό, (β) φαρδύ-τετραγωνικό και (γ) στρογγυλεμένο άνοιγμα.

Σταθεροποίηση οριζόντιας ροής

Για την **αποφυγή συμπαρασυρμού** στερεών από τον πυθμένα μιας οριζόντιας δεξαμενής πρέπει να διατηρείται μια σταθερή οριζόντια ταχύτητα.

Για **σταθεροποίηση και έλεγχο της οριζόντιας ταχύτητας** τοποθετείται στην έξοδο του αμμοσυλλέκτη ένας **εκχειλιστής** αναλογικής ροής (**Sutro weir**).



Σχηματική απεικόνιση εκχειλιστή αναλογικής ροής στην έξοδο αμμοσυλλέκτη.

Αυτός ο τύπος εκχειλιστεί παρατηρείται πολύ συχνά σε παλαιότερες εγκαταστάσεις επεξεργασίας νερού και λυμάτων.

Βάσει της εξίσωσης Bernoulli η **ταχύτητα εκροής** δίνεται από τη σχέση:

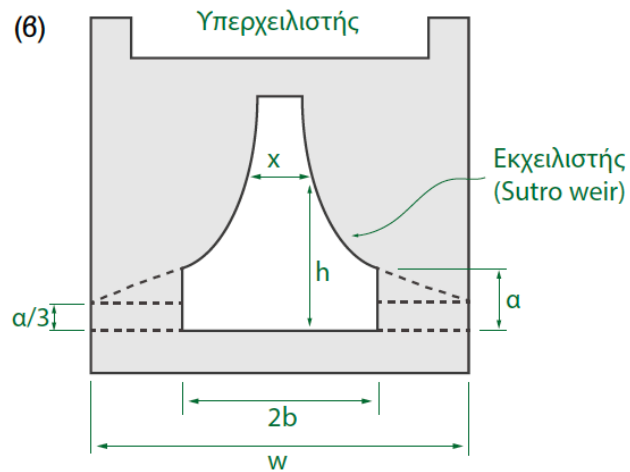
$$u_B = C_d \sqrt{2gh}$$

όπου C_d [-] είναι ο **συντελεστής εκροής** και h [L] είναι το βάθος υγρού στην δεξαμενή (head).

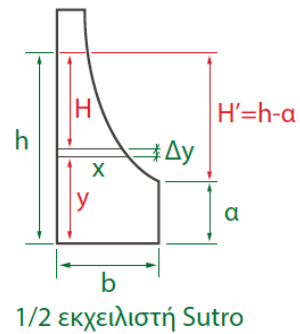
Η **παροχή** σε ορθογώνια δεξαμενή με εγκάρσια διατομή A [L²] είναι:

$$Q = Au_B = AC_d \sqrt{2gh} \left\{ \begin{array}{l} A = hw \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow wu_B = \frac{Q}{h} = \text{σταθερό}$$



(γ)



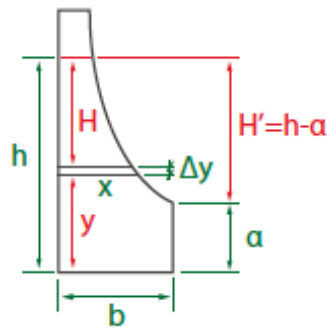
Η παροχή dQ διαμέσου της διαφορικής επιφάνειας dA δίνεται από τη σχέση:

$$\left. \begin{array}{l} dQ = C_d \sqrt{2gH} dA \\ H = h - y \\ dA = x dy \end{array} \right\} \Rightarrow dQ = C_d \sqrt{2g(h - y)} x dy$$

όπου $H [L]$ είναι το πιεζομετρικό ύψος πάνω από τη στοιχειακή επιφάνεια ($x \cdot dy$).

Σχηματική απεικόνιση: (β) της γεωμετρίας του εκχειλιστή Sutro και (γ) το ήμισυ του συμμετρικού εκχειλιστή Sutro.

Η παροχή διαμέσου του ορθογώνιου τμήματος του εκχειλιστή Sutor δίνεται από τη σχέση:



$$\left. \begin{aligned} Q_r &= \int_0^{Q_r} dQ = 2C_d \sqrt{2g} \int_0^a \sqrt{h-y} b dy \\ \int \sqrt{ay+b} dy &= \left(\frac{2b}{3a} + \frac{2y}{3} \right) \sqrt{ay+b} \\ a &= -1, b = h: \int \sqrt{h-y} dy = -\frac{2}{3} (h-y)^{3/2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$Q_r = 2bC_d \sqrt{2g} \left[-\frac{2}{3} (h-a)^{3/2} + \frac{2}{3} h^{3/2} \right]$$

$$\Rightarrow Q_r = 2bC_d \sqrt{2g} \left(\frac{2}{3} \right) \left[h^{3/2} - (h-a)^{3/2} \right]$$

Η παροχή διαμέσου του καμπυλωτού τμήματος του εκχειλιστή Sutor δίνεται από τη σχέση:

$$Q_c = \int_0^{Q_c} dQ = 2C_d \sqrt{2g} \int_a^h \sqrt{h-y} x dy \quad (**)$$

Η συνολική παροχή διαμέσου του εκχειλιστή αναλογικής ροής είναι:

$$Q_t = Q_r + Q_c = 2C_d \sqrt{2g} \left\{ \frac{2}{3} b \left[h^{3/2} - (h - \alpha)^{3/2} \right] + \int_{\alpha}^h \sqrt{h - y} \times dy \right\} \quad (3^*)$$

Η **συνολική παροχή** πρέπει να είναι **ανάλογη του βάθους, h**, πάνω από κάποιο αυθαίρετο επίπεδο αναφοράς.

Το επίπεδο αναφοράς επιλέγεται ως το $\alpha/3$, διότι αυτή η επιλογή διευκολύνει τους μαθηματικούς υπολογισμούς που ακολουθούν. Επομένως ορίζουμε

$$Q_t = K \left(h - \frac{\alpha}{3} \right) \quad (4^*)$$

όπου $K [L^2/t]$ είναι μια σταθερά ώστε να ικανοποιείται η συνθήκη της σταθερής οριζόντιας ταχύτητας:

$$Q/(h - \alpha/3) = \text{σταθερό}$$

Η σταθερά K βρίσκεται παρατηρώντας από την (4^*) ότι:

$$Q_c = 0 \quad \text{στο} \quad h = \alpha$$

Εξισώνοντας τις σχέσεις (3^*) και (4^*) στο $h = \alpha$, προκύπτει:

$$2C_d \sqrt{2g} \left(\frac{2}{3} b \alpha^{3/2} \right) = K \left(\alpha - \frac{\alpha}{3} \right) = K \frac{2}{3} \alpha$$

$$\Rightarrow K = 2C_d b \sqrt{2g\alpha} \quad (5^*)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση (5^*) και (4^*) προκύπτει:

$$\Rightarrow Q_t = 2C_d b \sqrt{2g\alpha} \left(h - \frac{\alpha}{3} \right) \quad (6^*)$$

Εξισώνοντας τις σχέσεις (3^*) και (6^*) , προκύπτει:

$$2C_d b \sqrt{2g\alpha} \left(h - \frac{\alpha}{3} \right) = 2C_d \sqrt{2g} \left\{ \frac{2}{3} b \left[h^{3/2} - (h - \alpha)^{3/2} \right] + \int_{\alpha}^h \sqrt{h - y} \times dy \right\}$$

$$\Rightarrow b \alpha^{1/2} \left(h - \frac{\alpha}{3} \right) = \frac{2}{3} b \left[h^{3/2} - (h - \alpha)^{3/2} \right] + \int_{\alpha}^h \sqrt{h - y} \times dy$$

Για μαθηματική διευκόλυνση αλλάζουμε μεταβλητές, $z = y - \alpha$, $dz = dy$ και ορίζουμε

$$H' = h - \alpha.$$

Κατά συνέπεια, η παραπάνω εξίσωση μετατρέπεται ως εξής:

$$b \alpha^{1/2} \left(h - \frac{\alpha}{3} \right) = \frac{2}{3} b \left[(H' + \alpha)^{3/2} - (H')^{3/2} \right] + \int_0^{H'} \sqrt{H' - z} \times dz \quad (7^*)$$

Αναπτύσσοντας το $(H' + \alpha)^{3/2}$ σε δυναμοσειρά και θεωρώντας ότι το x έχει την παρακάτω μορφή:

$$x = M_0 + M_1 z^{1/2} + M_2 z^{3/2} + M_3 z^{5/2} \dots \quad (8^*)$$

μετά από αντικατάσταση της (8^*) στην (7^*) , το ολοκλήρωμα μπορεί να υπολογιστεί. Εξισώνοντας παρόμοιους συντελεστές σε κάθε πλευρά, προκύπτει:

$$x = b - \frac{2b}{\pi} \left[\left(\frac{z}{\alpha} \right)^{1/2} - \frac{1}{3} \left(\frac{z}{\alpha} \right)^{3/2} + \frac{1}{5} \left(\frac{z}{\alpha} \right)^{5/2} - \frac{1}{7} \left(\frac{z}{\alpha} \right)^{7/2} + \dots \right]$$

Αναγνωρίζοντας ότι η παραπάνω σχέση είναι η γνωστή δυναμοσειρά: $\tan^{-1}(z/\alpha)^{1/2}$ για $z \geq \alpha$, η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως εξής:

$$\begin{aligned} x &= b \left[1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{z}{\alpha} \right)^{1/2} \right] \\ z &= y - \alpha \end{aligned} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x = b \left[1 - \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{y - \alpha}{\alpha} \right)^{1/2} \right] \quad (9^*)$$

Επίσης η συνολική παροχή βρίσκεται από την εξίσωση (6^*) με $H' = h - \alpha$, ως εξής:

$$Q_t = 2C_d b \sqrt{2g\alpha} \left(H' + \frac{2\alpha}{3} \right) \quad (10^*)$$

Για το σχεδιασμό του εκχειλιστή αναλογικής ροής, με βάση το μέγιστο βάθος ροής ($h = H' + \alpha$) και τη μέγιστη παροχή υπολογίζεται το φάρδος της βάσης του εκχειλιστή $(2b)$ με την εξίσωση (10^*) .

Στη συνέχεια, γνωρίζοντας το b κατασκευάζεται το καμπυλωτό τμήμα του εκχειλιστή, υπολογίζοντας τις τιμές του x για κάθε y με την εξίσωση (9^*) .

Το ύψος της ροής στη μέγιστη παροχή πρέπει να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη ότι η οριζόντια ταχύτητα δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την ταχύτητα συμπαρασυρμού των αδρανών στερεών από τον πυθμένα της δεξαμενής ($v_o = 0,3 \text{ m/s}$).

Επίσης, συνήθως χρησιμοποιούνται οι τυπικές επιλογές:

$$\alpha = 2,5 \text{ cm}$$

$$C_d = 0,62.$$