



**Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών**  
Ελληνικό Μεσογειακό Πανεπιστήμιο

# Χημική και Περιβαλλοντική Τεχνολογία

## Διάλεξη 6η: Επεξεργασία Πόσιμου Νερού

**Νικόλαος Γ. Σαββάκης**

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

ΕΛΜΕΠΑ

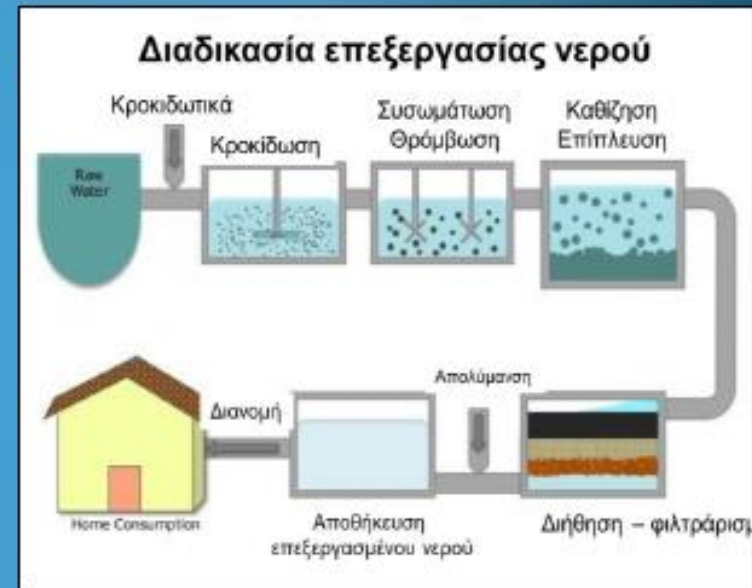
Ακαδημαϊκό Έτος 2023-2024



## Διήθηση

Η διεργασία απομάκρυνσης αιωρούμενων σωματιδίων από το νερό με συγκράτηση στην επιφάνεια ή στη μάζα του διηθητικού μέσου.

- Κατά τη διήθηση τα σωματίδια διέρχονται μέσα από ένα μέσο διήθησης και απομακρύνονται
  - είτε με συσσώρευση στην επιφάνεια του διηθητικού μέσου,
  - είτε με συγκράτηση στη μάζα του.
- Σε **συνδυασμό** με τις άλλες διεργασίες νερού είναι δυνατόν να οδηγήσει στην απομάκρυνση αιωρούμενων σωματιδίων όλων των ειδών και μεγεθών.
- Αποτελεί το **τελικό στάδιο** της συνολικής διεργασίας καθαρισμού του νερού πριν την απολύμανση



Η χρήση της περιλαμβάνει τους εξής συνδυασμούς διεργασιών, ανάλογα με την κατάσταση των αιωρούμενων σωματιδίων:

- α) (Συγκέντρωση > 50 mg/L): Καθίζηση → Διήθηση → Απολύμανση
- β) (Συγκέντρωση < 50 mg/L): Θρόμβωση → Διήθηση → Απολύμανση
- γ) (Ευμεγέθη σωματίδια): Διήθηση → Απολύμανση

Άλλες ονομασίες εκτός από διήθηση: διύλιση ή φιλτράρισμα

## Σωματίδια που απομακρύνονται με διήθηση

Δυνατότητα απομάκρυνσης μιας μεγάλης ποικιλίας σωματιδίων φυσικής ή ανθρώπινης προέλευσης:

- **Μέγεθος:** από 0.1 έως 1000  $\mu\text{m}$
- **Πυκνότητα:** από 1 g/mL έως 5 g/mL

Τα σωματίδια που συγκρατούνται στο διηθητικό μέσο είναι δυνατόν να συμπαρασυρθούν εξαιτίας διατμητικών τάσεων κατά τη συσσώρευση. Χαρακτηριστικό μέγεθος αντίστασης σε διατμητικές τάσεις είναι η **ισχύς θρόμβου**, η οποία επηρεάζει και τη διεργασία διήθησης.

### Χαρακτηριστικά σωματιδίων που απομακρύνονται με διήθηση

Είδος	Εύρος μεγεθών ( $\mu\text{m}$ )	Πυκνότητα (g/ml)	Ισχύς θρόμβου
Θρόμβοι βακ/ρίων	0,5 – 1000	$\approx 1,02$	Μέση
Άλγη	1 – 200	$\approx 1,05$	Μέση
$\text{Fe}(\text{OH})_3 - \text{Al}(\text{OH})_3$	0,1 – 1000	$\approx 1,01$	Χαμηλή
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	0,1 – 50	5,2	Χαμηλή
$\text{CaCO}_3$	0,1 – 50	2,4	Χαμηλή

Αντίσταση των σωματιδίων στις διατμητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους καθώς αυξάνεται η ποσότητά τους

Όσο πιο μεγάλη είναι η **Ισχύς Θρόμβου** τόσο μεγαλώνει η ικανότητα συγκράτησής τους στο διηθητικό μέσο.

## Είδη διήθησης

**Με βάση το μηχανισμό της διήθησης:**

- **Διήθηση επιφανείας** => το νερό με τα σωματίδια διέρχονται από πορώδη επιφάνεια, η οποία συγκρατεί τα σωματίδια
- **Διήθηση χώρου** => το νερό με τα σωματίδια διέρχονται μέσα από παχύ στρώμα πορώδους υλικού (π.χ. άμμος που είναι και το πιο κοινό πληρωτικό υλικό) το οποίο συγκρατεί τα σωματίδια

**Με βάση τα φυσικά χαρακτηριστικά του διηθητικού μέσου:**

- **Διήθηση σε κλίνες** με κοκκώδες διηθητικό μέσο (άμμος, ανθρακίτης)
- **Διήθηση σε φίλτρα** με προεπίστρωση (λεπτό στρώμα διηθητικού μέσου)

**Με βάση τον υδραυλικό τρόπο που διέρχεται το νερό από το διηθητικό μέσο:**

- **Διήθηση με βαρύτητα** (ανοιχτά φίλτρα)
- **Διήθηση υπό πίεση** (κλειστά φίλτρα)

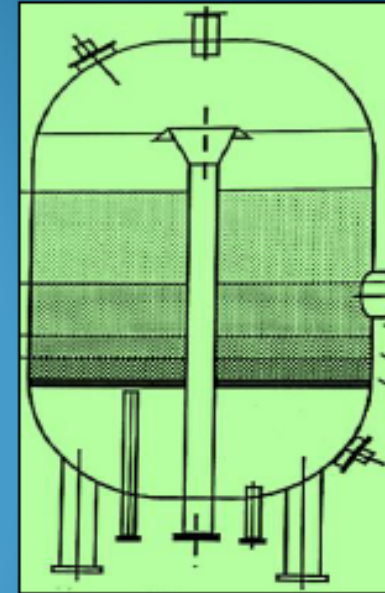
**Με βάση το ρυθμό διήθησης (σε κλίνες με κοκκώδες διηθητικό μέσο):**

- **Ταχεία διήθηση** (5 – 25 m/h)
- **Αργή διήθηση** (0,04 – 0,4 m/h)

## Διήθηση Χώρου

Είναι η σημαντικότερη μέθοδος που χρησιμοποιείται στην επεξεργασία του νερού με τη χρήση στρωμάτων διηθητικού μέσου αρκετού ύψους.

- Τα σωματίδια ρέουν διαμέσου της πορώδους κλίνης η οποία τα συγκρατεί στη μάζα της.
- Με τη διαδικασία της **αντίστροφης πλύσης** γίνεται απόρριψη των συγκρατούμενων σωματιδίων και έτσι **καθαρίζεται** η κλίνη.
- Η χρονική διάρκεια μεταξύ των πλύσεων ονομάζεται **κύκλος διήθησης**



Στη διήθηση χώρου τα αιωρούμενα σωματίδια ρέουν διαμέσου πορώδους κλίνης, η οποία τα συγκρατεί με τους εξής μηχανισμούς:

1. **Στάδιο μεταφοράς (φυσικά φαινόμενα):** τα σωματίδια παρεκκλίνουν από τη γραμμή ροής και μεταφέρονται στην επιφάνεια του διηθητικού μέσου.
2. **Στάδιο συγκράτησης (χημικά φαινόμενα):** τα σωματίδια πλησιάζουν τόσο τον κόκκο, ώστε αναπτύσσονται δυνάμεις που επιτρέπουν ή όχι τη συγκράτηση τους στον κόκκο.
3. **Στάδιο αποκόλλησης:** συμπαρασυρμός από το νερό συγκρατημένων σωματιδίων εξαιτίας διατμητικών τάσεων.

## Χαρακτηριστικά διηθητικών μέσων

Η επιλογή του διηθητικού μέσου αποτελεί τη σημαντικότερη σχεδιαστική παράμετρο αφού αποτελεί την καρδιά ενός συστήματος διήθησης χώρου.

### Χημικά χαρακτηριστικά

Το πρώτο υλικό που χρησιμοποιήθηκε ως διηθητικό μέσο είναι η χαλαζιακή άμμος (Χρησιμοποιείται και σήμερα ευρύτατα). Άλλα υλικά είναι ο ανθρακίτης, ο γρανίτης και ο σχιστόλιθος.

Προϋπόθεση για τη χρησιμοποίηση κάποιου υλικού ως διηθητικού μέσου είναι:

- Η μηχανική του αντοχή (να μην θρυμματίζεται εύκολα)
- Η αντοχή του στα οξέα

### Χαρακτηριστικά των συνεθέστερων υλικών διήθησης. Μήτρακας, 2001

Υλικό	Πυκνότητα κάποιου g/mL	Πορώδες κλώνης $\epsilon_p$	Σφαιρικότητα $\psi$
Χαλαζιακή άμμος	2,65	0,42 - 0,47	0,70 - 0,80
Ανθρακίτης	1,4 - 1,7	0,56 - 0,60	0,46 - 0,60
Κοκκοειδής εν. άνθρακας	1,3 - 1,5	0,48 - 0,52	0,72 - 0,78
Γρανίτης	3,6 - 4,2	0,45 - 0,55	0,58 - 0,62

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος διασποράς (νερού με σωματίδια) επηρεάζουν την επιλογή του είδους του διηθητικού μέσου. Παραδείγματα:

- Για τριτοβάθμια επεξεργασία λυμάτων γίνεται χρήση σχιστόλιθου.
- Για απομάκρυνση οσμής, χρώματος, οργανικών ενώσεων και χλωρίου χρησιμοποιείται ο κοκκώδης ενεργός άνθρακας.



Χαλαζιακή άμμος

## Διήθηση Επιφανείας ή Διήθηση με μεμβράνες

Στη διήθηση επιφανείας η συγκράτηση της διασποράς επιτυγχάνεται εξαιτίας της διαφοράς του **μεγέθους των σωματιδίων της και των οπών του διηθητικού μέσου** κυρίως με μηχανισμούς αποστράγγισης.

Η πτώση πίεσης κατά τη διήθηση επιφάνειας εξαρτάται από τη **ροή**, τα χαρακτηριστικά της **διηθητικής συσκευής** και το **πορώδες** του πλακούντα (Πλακούντας: Το στρώμα σχηματισμένο από συγκρατημένα σωματίδια πάνω στην οπή → **αποτελεί το κύριο μέσο συγκράτησης της διασποράς**)

### Είδη Διήθησης Επιφανείας

Τα είδη Διήθησης Επιφανείας ταξινομούνται με διάφορους τρόπους: Συνεχή ή διακοπόμενη λειτουργία, εφαρμογή ή όχι πίεσης και το **μέγεθος των συγκρατούμενων σωματιδίων**.

Με κριτήριο το **μέγεθος των σωματιδίων** που συγκρατούνται:

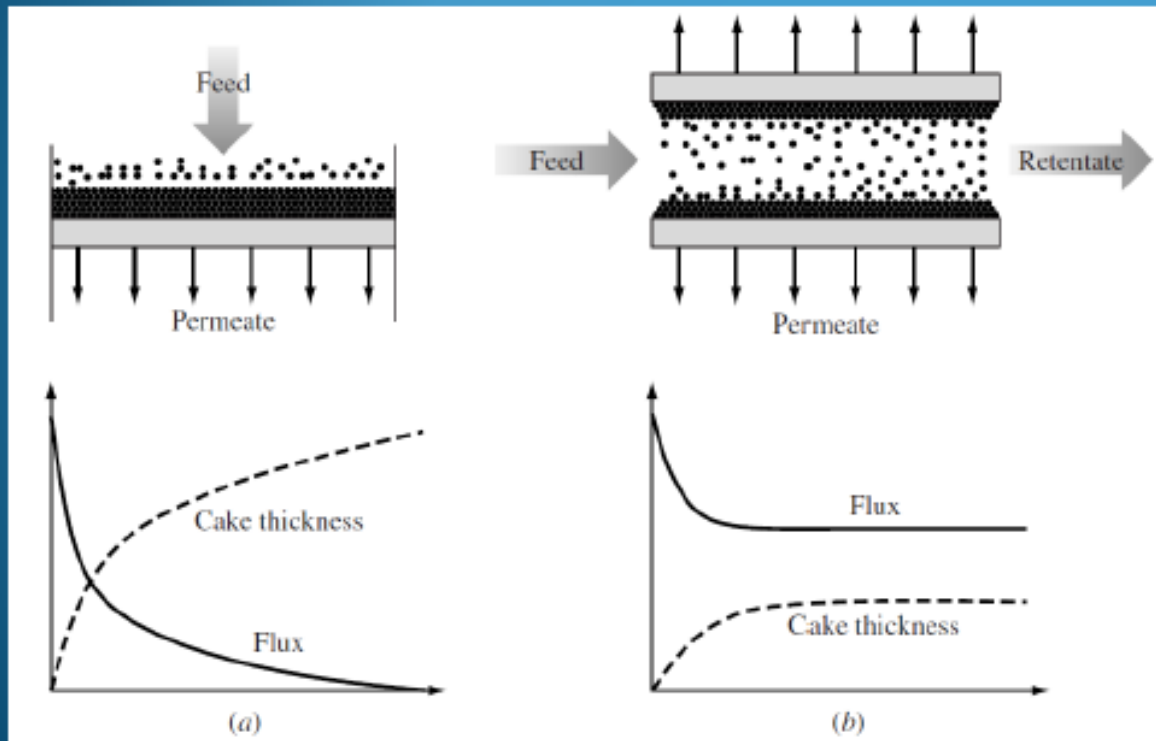
- **Νανοδιήθηση** (0,0005 – 0,01  $\mu\text{m}$ )
- **Υπερδιήθηση** (0,005 – 0,5  $\mu\text{m}$ )
- **Μικροδιήθηση** (0,5 – 150  $\mu\text{m}$ )
- **Μακροδιήθηση** (> 150  $\mu\text{m}$ )

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μικροδιήθηση με κύριους εκπροσώπους τα φίλτρα μικροπλέγματος και τα φίλτρα προεπίστρωσης.



*Συγκρότημα μεμβρανών υπερδιήθησης, Μήτρακας*

## Διήθηση με μεμβράνες



- Σχηματικά διαγράμματα για (α) συμβατική διήθηση (dead end filtration) και (β) διήθηση εγκάρσιας (εφαπτομενικής) ροής.
- Για τη συμβατική διήθηση το πάχος της συσσώρευσης στερεών αυξάνεται και η ροή του διηθήματος μειώνεται με το χρόνο.
- Στη διήθηση εγκάρσιας ροής, τα στερεά συμπυκνώνονται στην επιφάνεια της μεμβράνης.
- Η ροή του διηθήματος φτάνει σε μια σταθερή τιμή σε μόνιμη κατάσταση.

**Παράδειγμα σχεδιασμού**

## Ερωτήσεις - Διήθηση

1. Η διήθηση χρησιμοποιείται στην επεξεργασία του νερού και των αποβλήτων για:

- α) Την πλήρη καταστροφή των παθογόνων μικροοργανισμών.
- β) Τη συνένωση των αιωρούμενων στερεών, με τη βοήθεια φυσικοχημικών μεθόδων.
- γ) Την απομάκρυνση των αιωρούμενων σωματιδίων.
- δ) Την απομάκρυνση των ιχνοστοιχείων.

2. Το μέγεθος των σωματιδίων, τα οποία μπορούν να απομακρυνθούν από το νερό με διήθηση, είναι μεταξύ:

- α) 0.0001-0.001  $\mu\text{m}$ .
- β) 0.001-0.01  $\mu\text{m}$ .
- γ) 0.1-1000  $\mu\text{m}$ .
- δ) 1000-10000  $\mu\text{m}$ .

3. Το ποιοτικό χαρακτηριστικό, που δείχνει την αντίσταση των σωματιδίων στις διατμητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ τους καθώς συγκρατούνται από το διηθητικό μέσο (αιτία του συμπαρασυρμού στη διήθηση), ονομάζεται ισχύς:

- α) Διήθησης.
- β) Κόκκου.
- γ) Φίλτρου.
- δ) Θρόμβου

## Ερωτήσεις - Διήθηση

**4. Οι δυο κατηγορίες στις οποίες διακρίνονται τα φίλτρα με βάση το μηχανισμό της διήθησης είναι:**

- α) Επιφανείας
- β) Πολυστρωματικής κλίνης.
- γ) Χώρου.
- δ) Πλακούντα – χώρου.
- ε) Πορώδους κλίνης.

**5. Η μεταφορά των αιωρούμενων σωματιδίων, με το μηχανισμό της πρόσκρουσης, πραγματοποιείται όταν :**

- α) Τα σωματίδια, τα οποία παραμένουν στις ροϊκές γραμμές και κινούνται σε απόσταση ίση με τη μισή διάμετρό τους κοντά στην επιφάνεια των κόκκων του διηθητικού μέσου, συγκρατούνται από αυτό, λόγω των στενώσεων που δημιουργούνται ανάμεσα στους κόκκους.
- β) Η αδράνεια των σωματιδίων τα οποία πλησιάζουν τους κόκκους του διηθητικού μέσου, είναι μεγαλύτερη από την υδροδυναμική δύναμη που τείνει να τα παρασύρει.
- γ) Σωματίδια με πυκνότητα συγκριτικά μεγαλύτερη από αυτή του νερού τείνουν να παρεκκλίνουν από τις ροϊκές γραμμές εξαιτίας του φαινομένου της καθίζησης.
- δ) Τα σωματίδια που επηρεάζονται από την κίνηση Brown παρεκκλίνουν από τις ροϊκές γραμμές εξαιτίας της διάχυσης.

## Ερωτήσεις - Διήθηση

**8. Ποιες είναι οι φυσικές ιδιότητες των διηθητικών μέσων οι οποίες επηρεάζουν τόσο την απόδοση της διήθησης όσο και τη διαδικασία αντίστροφης πλύσης :**

- α) Μέγεθος - σχήμα - σφαιρικότητα, κόκκων.
- β) Κατανομή μεγέθους - πυκνότητα (και φαινομενική) κόκκων.
- γ) Σκληρότητα κόκκων και πορώδες της κλίνης.
- δ) Όλα τα παραπάνω.

**9. Το πραγματικό μέγεθος των κόκκων  $d_{10}$  ενός διηθητικού μέσου είναι το μέγεθος εκείνο, που ποσοστό 10% κατά βάρος των κόκκων, έχουν :**

- α) Μεγαλύτερο μέγεθος από αυτό.
- β) Ίσο μέγεθος με αυτό.
- γ) Μικρότερο μέγεθος από αυτό.

**10. Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η τιμή του λόγου των ενεργών μεγεθών των κόκκων των υλικών, που συνιστούν τα στρώματα διήθησης μιας κλίνης;**

- α) Την μέθοδο πλύσης της κλίνης.
- β) Τη σφαιρικότητα των κόκκων του κάθε υλικού.
- γ) Το συντελεστή ομοιομορφίας των κόκκων του κάθε υλικού.
- δ) Την πυκνότητα των κόκκων του κάθε υλικού.
- ε) Τη φύση της διασποράς.
- στ) Το πραγματικό μέγεθος  $d_{10}$  του διηθητικού μέσου.

## Προσρόφηση σε Ενεργό Άνθρακα

Ο ενεργός (κοκκώδης) άνθρακας χρησιμοποιείται:

- Για απο-χλωρίωση του νερού
- Για απομάκρυνση μικρο-ρυπαντών από το νερό
- Για απομάκρυνση τοξικών μετάλλων

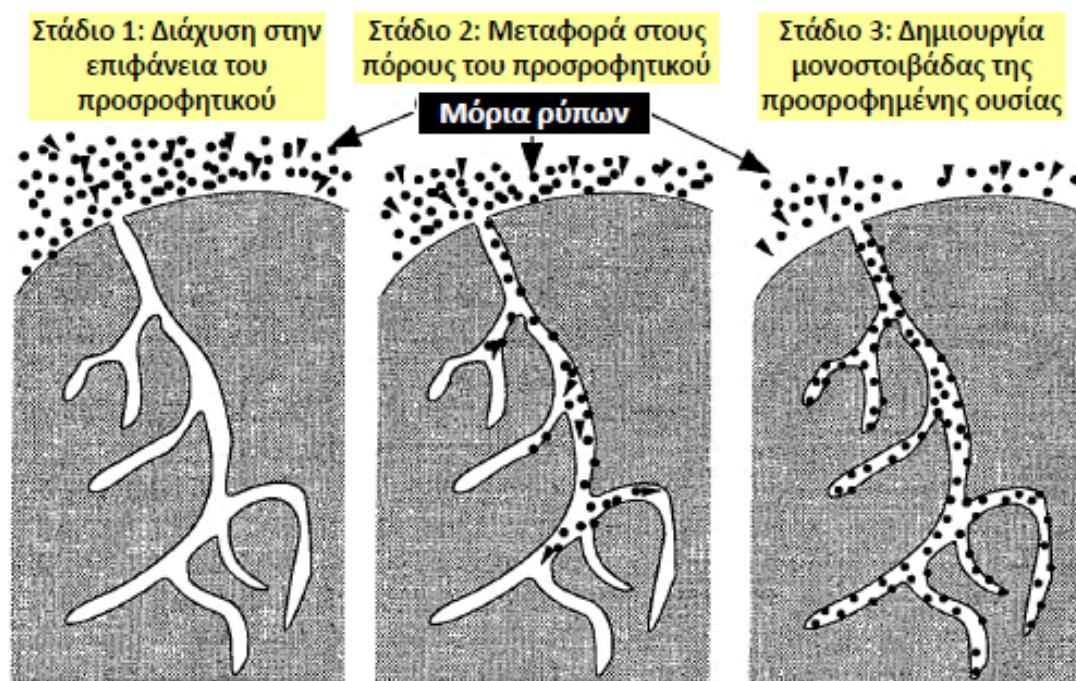
Ο ενεργός άνθρακας αποτελεί σημείο αναφοράς για την αξιολόγηση κάθε άλλης μεθόδου προσρόφησης οργανικών συστατικών



Κατά τα τελευταία στάδια της επεξεργασίας του νερού διέρχεται από **φίλτρα ενεργού άνθρακα** για την απομάκρυνση και των τελευταίων υπολειμμάτων των ουσιών και ιδιαίτερα **των οργανικών ενώσεων** και των προϊόντων διάσπασής τους.

- Ο ενεργός άνθρακας είναι παρόμοιος με τον απλό άνθρακα, επεξεργάζεται όμως με διαφορετικό τρόπο που του επιτρέπει να έχει μία **εξαιρετικά πορώδη επιφάνεια**.
- Οι πόροι αυτοί **αυξάνουν σημαντικά το εμβαδόν της επιφάνειας του**.
- Λόγω αυτής της επεξεργασίας **μπορεί και δεσμεύει διάφορες ουσίες που έρχονται σε επαφή με αυτόν και σε ποσότητες πολλαπλάσιες από το βάρος του**.

## Μηχανισμοί Προσρόφησης



Μηχανισμός προσρόφησης σωματιδίων ρύπων, Μήτρακας

Η απομάκρυνση των ρυπαντών από το ρεύμα επεξεργασίας συμβαίνει αρχικά με τη φυσική προσρόφησή τους στην επιφάνεια του άνθρακα

Η φυσική προσρόφηση αυξάνεται από την αδυναμία διάλυσης των ρυπαντών στο νερό. Οι οργανικοί διαλύτες προσροφούνται εύκολα εξαιτίας της χαμηλής τους διαλυτότητας στο νερό. Αντίθετα, υδατοδιαλυτές ενώσεις όπως οι αλκοόλες και οι αλδεΐδες προσροφούνται δυσκολότερα.

Μεγάλη διαλυτότητα στο νερό →  
Μικρή φυσική προσρόφηση

## Αλλαγή ενεργού άνθρακα

Η **αλλαγή του κορεσμένου άνθρακα με νέο** είναι συχνά η πιο κρίσιμη παράμετρος στη διαδικασία του συστήματος προσρόφησης, επειδή είναι η **κύρια παράμετρος του κόστους λειτουργίας**, καθώς επίσης και το **κλειδί για ασφαλή αποκομιδή των οργανικών ρυπαντών**.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της διεργασίας προσρόφησης με άνθρακα είναι ότι όχι μόνο απομακρύνει τους ρυπαντές από το νερό, **αλλά τους συγκεντρώνει και τους κατακρατά μέσα στον κόκκο του άνθρακα**.

Ο κορεσμένος ενεργός άνθρακας μπορεί να χειρισθεί με:

- Μπορεί να ταφεί
- Μπορεί να αποτεφρωθεί σαν στερεό απόβλητο



Επιλογές αξιόπιστες και οικονομικά συμφέρουσες

Ο ασφαλτώδης κοκκοειδής ενεργός άνθρακας συνήθως αξιοποιείται με:

- Θερμική αναγέννηση



Οικονομικά συμφέρουσα, ασφαλής όσον αφορά την καταστροφή των προσροφημένων οργανικών ενώσεων και επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του άνθρακα.

Η **διεργασία της αναγέννησης** αφορά θέρμανση σε αδρανή ατμόσφαιρα μέσα σε φούρνο πολλαπλών βαθμίδων σε θερμοκρασία έως 900°C. Η αναγέννηση απομακρύνει τις πτητικές οργανικές ενώσεις και αποσυνθέτει με πυρόλυση τις λιγότερο πτητικές που συγκεντρώνονται μέσα στους πόρους.

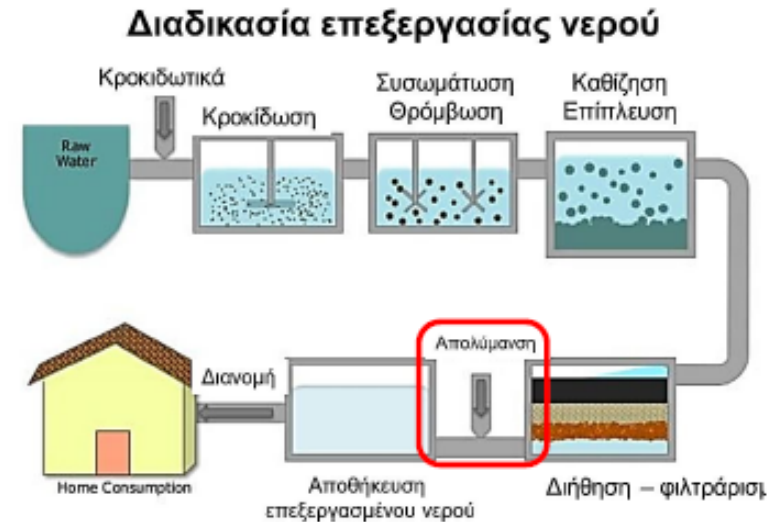
Παράγει έναν ενεργό άνθρακα που είναι μικρότερος από τον αρχικό (10-20%), επειδή μερικοί από τους μικρότερους προσροφητικούς πόρους καταστρέφονται. Κατά συνέπεια η ικανότητα συγκράτησης μικρών συγκεντρώσεων (ίχνη) μικρο-ρυπαντών μπορεί να μειωθεί στο αναγεννημένο προϊόν.

## Απολύμανση

Η παρουσία παθογόνων μικροοργανισμών στο νερό ευνοείται από ορισμένους παράγοντες, όπως είναι:

- το ουδέτερο pH,
- η παρουσία οργανικής ύλης που είναι η τροφή τους,
- η ύπαρξη θρεπτικών συστατικών (N, P), τα οποία είναι απαραίτητα στη βιοσύνθεσή τους.

Εξαιτίας του **πολύ μικρού μεγέθους** τους οι μικροοργανισμοί είναι **δύσκολο να απομακρυνθούν πλήρως** από το νερό μόνο με φυσικοχημικές διεργασίες, όπως είναι η **καθίζηση** και η **διήθηση**, οπότε για να διασφαλισθεί η απουσία τους από το νερό **απαιτείται η απολύμανσή του**.



Είναι η επεξεργασία εκείνη του νερού η οποία έχει ως σκοπό την καταστροφή ή την αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών που τυχόν περιέχει, ώστε να προστατευθεί η δημόσια υγεία.

**(!) Να μην μπερδεύουμε τους παρακάτω όρους!**

**Αποστείρωση:** Πλήρης καταστροφή όλων των μικροοργανισμών

**Απολύμανση:** Εκλεκτική ελάττωση σε ανεκτά (συνήθως πολύ μικρά) επίπεδα των μικροοργανισμών

## Μηχανισμοί Απολύμανσης

### Καταπολέμηση Των Μικροοργανισμών Του Νερού

- ✓ Οι μικροοργανισμοί υπάρχουν παντού στη φύση
- ✓ Διατηρούν τη φυσική ισορροπία του κύκλου ζωής
- ✓ Το νερό είναι δυνατόν να περιέχει: Βακτήρια, Ιούς, Άλγη και Μύκητες
- ✓ Αδύνατη η απομάκρυνση με φυσικά μέσα – γίνεται καταστροφή με **απολυμαντικά μέσα**

Η μικροβιοκτόνος δράση των απολυμαντικών μέσων επιτυγχάνεται με τρεις διαφορετικούς τρόπους:

- Καταστροφή ή εξασθένηση της **οργάνωσης** της κυτταρικής δομής
- Παρέμβαση στον **μεταβολισμό** που είναι υπεύθυνος για την παραγωγή ενέργειας
- Παρέμβαση στη **βιοσύνθεση** και την ανάπτυξη

### Μηχανισμοί Απολυμάνσεως Παραδείγματα

- Φθορά ή καταστροφή του κυτταρικού τοιχώματος (πενικιλίνη)
- Αλλαγή της εκλεκτικής διαπερατότητας της κυτταρο-πλασματικής μεμβράνης (φαινολικές ουσίες, απορρυπαντικά)
- Αλλαγή της κολλοειδούς φύσεως του πρωτοπλάσματος (θέρμανση)

## Απολύμανση

Τα οξειδωτικά μέσα, όπως είναι το χλώριο, μεταβάλλουν τη χημική σύνθεση των **ενζύμων** και τα αδρανοποιούν, με αποτέλεσμα να **παρεμποδίζεται** ο κανονικός ρυθμός μεταβολισμού.

Τα απαραίτητα για το μεταβολισμό ένζυμα βρίσκονται σε πολύ μικρές ποσότητες, γεγονός που εξηγεί τη **σημαντική μικροβιοκτόνο δράση του χλωρίου** ακόμα και σε πολύ μικρή συγκέντρωση (0,5-1 mg/L).

Επίσης, είναι δυνατόν το χλώριο να αντικαταστήσει ένα από τα υδρογόνα των **αμινοομάδων** των πρωτεϊνών των κυττάρων, οπότε η **χλωραμίνη** που σχηματίζεται είναι **τοξική** και επιφέρει το θάνατο.

### Παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της απολύμανσης

Η αποτελεσματικότητα της απολύμανσης είναι μια σύνθετη συνάρτηση πολλών μεταβλητών:

1. Χαρακτηριστικά μέσου απολύμανσης
2. Χρόνος επαφής
3. Ποιοτικά χαρακτηριστικά νερού
4. Άλλοι παράγοντες

## 1. Χαρακτηριστικά μέσου απολύμανσης

### Δυναμικό οξειδοαναγωγής

Ένα μέτρο της ικανότητας του απολυμαντικού να οξειδώνει οργανική ύλη είναι το **δυναμικό οξειδοαναγωγής**. Όσο μεγαλύτερο είναι το **δυναμικό οξείδωσης**, τόσο πιο εύκολα η ένωση **οξειδώνει την οργανική ύλη**. Αν η οξείδωση ήταν ο μόνος μηχανισμός απολύμανσης, τότε η σειρά της ικανότητας απολύμανσης θα ήταν:

Όζον > διοξείδιο του χλωρίου > χλώριο > βρώμιο > ιώδιο

Συνήθως η επιλογή του μέσου απολύμανσης όμως είναι **πιο σύνθετη** εξαιτίας και άλλων παραγόντων, όπως είναι:

- Η **διάχυση** μέσα στο κύτταρο,
- Η **διαπερατότητα** του κυττάρου και
- Οι **μικροβιοκτόνες ικανότητες** (MB, το φορτίο κ.α. χαρακτηριστικά της ένωσης)

Έτσι στις περισσότερες περιπτώσεις η διαδικασία επιλογής **καθοδηγείται** από τη μελέτη σε **πειραματικές μονάδες**. Αυτό συμβαίνει ειδικά στον **καθορισμό της απαιτούμενης δόσης του απολυμαντικού μέσου**, η οποία είναι συνάρτηση της ποιότητας του νερού.

## 2. Χρόνος επαφής

Η απολύμανση ακολουθεί **κινητική αντίδρασης πρώτης τάξης**. Συνεπώς η αποτελεσματικότητα της εξαρτάται άμεσα από το χρόνο επαφής. Η καταστροφή ενός ποσοστού μικροοργανισμού μπορεί να επιτευχθεί με τη **ρύθμιση του χρόνου επαφής** και της **συγκέντρωσης του απολυμαντικού**.

## 3. Ποιοτικά χαρακτηριστικά νερού που επηρεάζουν την απολύμανση

Χαρακτηριστικά της ποιότητας του νερού, που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της απολύμανσης είναι η **θολότητα**, οι **οργανικές ενώσεις**, η **θερμοκρασία** και το **pH**.

Η **θολότητα** έχει αποδειχθεί ότι εμποδίζει την απολύμανση, επειδή τα σωματίδια που την αποτελούν μπορούν να **περιβάλλουν και να προστατέψουν τους μικροοργανισμούς** από τη δράση του απολυμαντικού μέσου.

Οι **οργανικές ενώσεις** μπορούν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα που απολυμαντικού μέσου, επειδή με την προσκόλλησή τους στην επιφάνεια των κυττάρων εμποδίζουν τη δράση του.

Επίσης, ενώσεις όπως είναι ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το υδρόθειο, τα κυανιούχα και τα νιτρώδη, μπορούν να **μειώσουν την αποτελεσματικότητα** της απολύμανσης καθώς **οξειδώνονται από το απολυμαντικό μέσο**. Αυτές οι αντιδράσεις με το απολυμαντικό μέσο δημιουργούν μια επιπρόσθετη απαίτηση απολυμαντικού.

## Ταξινόμηση απολυμαντικών μέσων

Τα μέσα απολύμανσης με βάση τη φύση τους μπορούν να διαχωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

### ➤ Μη χημικά μέσα απολύμανσης:

1. Υπεριώδης ακτινοβολία
2. Αποστειρωτική διήθηση
3. Θερμότητα
4. Ραδιενεργός ακτινοβολία

### ➤ Χημικά μέσα απολύμανσης

- **Μη οξειδωτικά:** Οργανικές κυρίως ενώσεις, όπως είναι το μεθυλενοδιθειοκυάνιο, το διβρωμονιτριλοπροπιοναμίδιο, οι ισοθειαζολόνες κ.α.
- **Οξειδωτικά μέσα απολύμανσης:** Ενώσεις με οξειδωτικό δυναμικό, όπως είναι το αέριο χλώριο, το υποχλωριώδες νάτριο, το διοξείδιο του χλωρίου, το βρώμιο, το ιώδιο, το υπεροξείδιο του υδρογόνου και το όζον.

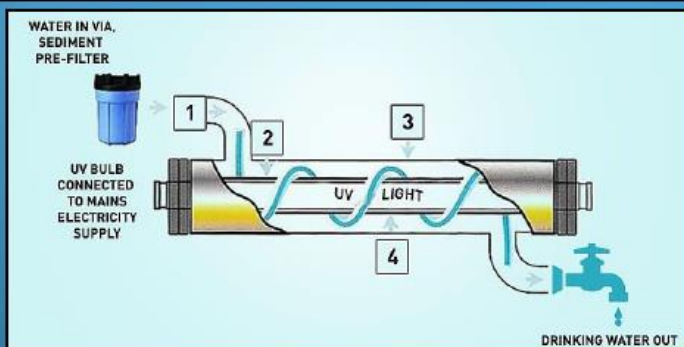
## 1. Υπεριώδης ακτινοβολία

Με την υπεριώδη ακτινοβολία η απολύμανση του νερού επιτυγχάνεται κατά τη διέλευση μέσα από ειδικές συσκευές ακτινοβόλησής του με **υπεριώδη ακτινοβολία (UV)**. Η UV εκπέμπεται από λαμπτήρες πολύ χαμηλής πίεσης ατμών υδραργύρου.

Τα εκπεμπόμενα μήκη κύματος κυμαίνονται από **200-300 nm**. Το νερό ρέει γύρω από τη λυχνία σε επίπεδο τόσο ρηχό, όσο χρειάζονται οι υπεριώδεις ακτίνες για να απορροφηθούν γρήγορα από το νερό.

Για πάχος νερού 15-20 cm μια λάμπα ισχύος 36 W αποστειρώνει 3 m<sup>3</sup>/h.

Πρακτικά, για αποτελεσματική απολύμανση απαιτείται ειδική κατανάλωση ενέργειας ίση με 40 Wh/m<sup>3</sup>).



Λυχνίες πολύ χαμηλής πίεσης ατμών Hg. Μαμάσης



## 2. Αποστειρωτική διήθηση

Διήθηση του νερού υπό πίεση διαμέσου ειδικών μεμβρανών οι οποίες κατακρατούν τους μικροοργανισμούς.

- Πόροι μεμβρανών: Διάκενα σπών  $< 0,5\mu\text{m}$  έως  $0,1\mu\text{m}$
- Συγκράτηση μικροοργανισμών μεγαλύτερου από τις σπές μεγέθους

Μειονεκτήματα: Δε συγκρατεί πολύ μικρούς μικροοργανισμούς (ιούς), υψηλή ενεργειακή κατανάλωση και μικρή απόδοση

## 3. Θερμότητα

Η θέρμανση του νερού ως το σημείο βρασμού του επιφέρει την καταστροφή των περισσοτέρων σπορογόνων ΜΟ και σε  $T > 100^{\circ}\text{C}$  για σύντομο χρόνο επέρχεται στείρωση του νερού.

Μειονεκτήματα: Δεν προσφέρεται για μεγάλες ποσότητες νερού λόγω υψηλού κόστους

## 4. Ραδιενεργός ακτινοβολία

Ανάλογα με την ένταση και το χρόνο έκθεσης έχει μικροβιοκτόνες ιδιότητες  
Τα νερό διέρχεται διαμέσου ειδικών αγωγών από το χώρο ακτινοβολήσης με τρόπο που να αποφεύγεται η ρύπανση του με ραδιενεργό υλικό.

## Οξειδωτικά χημικά μέσα απολύμανσης

Τα χημικά οξειδωτικά παίζουν αρκετά σημαντικό ρόλο στην επεξεργασία του νερού και προστίθενται σε αρκετά σημεία των εγκαταστάσεων ανάλογα με τις απαιτήσεις σχεδιασμού της διεργασίας.

Μπορεί να γίνει προσθήκη στην **αρχή των εγκαταστάσεων** επεξεργασίας νερού για την επίτευξη μίας σειράς στόχων, όπως είναι:

- ο έλεγχος της ανάπτυξης μικροοργανισμών στις δεξαμενές της εγκατάστασης επεξεργασίας
- η απομάκρυνση χρώματος
- η βελτίωση οργανοληπτικών χαρακτηριστικών (οσμή-γεύση)
- η καταστροφή ορισμένων οργανικών ρυπαντών
- η ιζηματοποίηση μετάλλων.

Η χρήση χημικών οξειδωτικών στο **τέλος της εγκατάστασης** επεξεργασίας έχει ως μοναδικό σκοπό την **απολύμανση** του νερού πριν την ασφαλή του διάθεση.

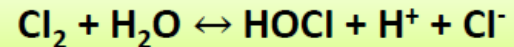
Μέχρι πρόσφατα χρησιμοποιούνταν σχεδόν αποκλειστικά το **αέριο χλώριο** και τα **υποχλωριώδη άλατα**, σταδιακά όμως άρχισαν πλέον να χρησιμοποιούνται και άλλες ενώσεις, όπως το **διοξείδιο του χλωρίου**, οι **χλωραμίνες**, το **τριχλωρο-ισοκυανουρικό οξύ** (στέρεο χλώριο) και το **όζον**.

## Αέριο Cl<sub>2</sub>

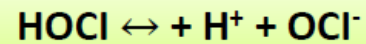
- Είναι πολύ αποτελεσματικό μικροβιοκτόνο και έχει πρασινοκίτρινο χρώμα.
- Είναι αέριο μικρής διαλυτότητας στο νερό (1,5 – 3 g/L Cl<sub>2</sub>).
- Είναι 2,5 φορές βαρύτερο από τον αέρα και παρουσία υγρασίας οξειδώνει τα μέταλλα.
- Είναι ιδιαίτερα τοξικό για τον άνθρωπο και προκαλεί περιβαλλοντικά προβλήματα.

Το χλώριο καταστρέφει διάφορους παθογόνους μικροοργανισμούς, όπως είναι τα βακτήρια *E. coli*, τα οποία χρησιμοποιούνται ως δείκτης μικροβιακής μόλυνσης. Η απολυμαντική του δράση εξαρτάται από τη τιμή pH, τη θερμοκρασία, το περιεχόμενο του νερού σε οργανικές ενώσεις, καθώς επίσης και από άλλα ποιοτικά χαρακτηριστικά του νερού.

**Το αέριο χλώριο**, όταν διαλύεται στο νερό, υδρολύεται γρήγορα σύμφωνα με την εξίσωση:



Το υποχλωριώδες οξύ (HOCl) είναι το **δραστικό συστατικό** που σχηματίζεται, το οποίο στη συνέχεια παίρνει μέρος σε μια σειρά αντιδράσεων που περιλαμβάνουν τις αντιδράσεις απολύμανσης, **αντιδράσεις με διάφορες οργανικές και ανόργανες ενώσεις**, καθώς επίσης και μερική διάσπασή του σε ιόντα υδρογόνου και υποχλωριώδη σύμφωνα με την αντίδραση:



## Όζον (O<sub>3</sub>)

Η σπουδαιότερη ιδιότητα του όζοντος είναι η ισχυρή οξειδωτική του δράση, γεγονός που το καθιστά **πρώτη επιλογή** όταν απαιτείται η εκτέλεση ισχυρά οξειδωτικών αντιδράσεων.

Το όζον δρα πάνω στα αιωρούμενα ή στα διαλυμένα σωματίδια στο νερό με άμεση ή έμμεση οξείδωση, με οζονόλυση και με κατάλυση.

### **Το όζον παράγει αντιδράσεις άμεσης και έμμεσης οξείδωσης:**

Οι αντιδράσεις **άμεσης οξείδωσης** του όζοντος, οι οποίες προκύπτουν από τη δράση ενός ατόμου ενεργού οξυγόνου, είναι συνήθως ακαριαίες.

Στις αντιδράσεις **έμμεσης οξείδωσης** ένα μέρος του όζοντος που διαλύεται στο νερό διασπάται και σχηματίζει ελεύθερες ρίζες (HO<sup>•</sup>), οι οποίες αντιδρούν πολύ γρήγορα κι οξειδώνουν οργανικές και ανόργανες ενώσεις διαλυμένες στο νερό.

Η διάσπαση αυτή του όζοντος επιταχύνεται σε υψηλές τιμές pH, οι οποίες ευνοούν το σχηματισμό των ελεύθερων ριζών (HO<sup>•</sup>).

Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματά του είναι ότι διασπάται δίνοντας οξυγόνο στο νερό, γεγονός κατά κανόνα ευπρόσδεκτο. Έτσι, αποτελεί ένα μέσο απολύμανσης που δεν έχει ανεπιθύμητες επιδράσεις στη γεύση, την οσμή και την εμφάνιση του νερού.

## Ερωτήσεις – Απολύμανση

1. Απολύμανση είναι η επεξεργασία εκείνη του νερού :
  - α) Που έχει ως σκοπό την πλήρη καταστροφή όλων των μικροοργανισμών ενός ανοικτού ή κλειστού δικτύου νερού.
  - β) Που έχει ως σκοπό την εκλεκτική ελάττωση σε ανεκτά επίπεδα των μικροοργανισμών.
  - γ) Που έχει ως σκοπό την καταστροφή ή την αδρανοποίηση των παθογόνων μικροοργανισμών που τυχόν περιέχει, ώστε να προστατευθεί η δημόσια υγεία.
2. Ενώσεις, όπως ο σίδηρος, το μαγγάνιο, το υδρόθειο και τα νιτρώδη, μειώνουν την αποτελεσματικότητα της απολύμανσης, επειδή :
  - α) Οξειδώνονται από το απολυμαντικό μέσο, καταστρέφοντάς το.
  - β) Ανάγονται από το απολυμαντικό μέσο, καταστρέφοντάς το.
  - γ) Επηρεάζουν τη χημική μορφή του απολυμαντικού στο νερό.
  - δ) Επηρεάζουν το ρυθμό της απολύμανσης.
3. Το πρώτο κριτήριο για την επιλογή ενός μέσου απολύμανσης είναι :
  - α) Η ικανότητά του να καταστρέφει τους μικροοργανισμούς.
  - β) Η ικανότητά του να διατηρεί μια υπολειμματική συγκέντρωση στο σύστημα διανομής και να εξασφαλίζει ένα τελικό αποτέλεσμα το οποίο να προστατεύει τη δημόσια υγεία.
  - γ) Η ικανοποιητική απόδοση της μονάδας και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας της

## Άσκηση 1

Για την απολύμανση 20000 m<sup>3</sup>/d νερού χρησιμοποιείται 9 kg/d χλώριο. Εάν το ελεύθερο διαθέσιμο χλώριο που παραμένει στο νερό μετά από 15 λεπτά ανάμιξης είναι 0,25 mg/L , να βρεθεί η προστιθέμενη δόση χλωρίου και η ολική ζήτηση του χλωρίου σε mg/L.

Λύση

Η προστιθέμενη δόση είναι:

$$\text{Δόση} = \left(\frac{9 \frac{\text{kg}}{\text{d}}}{20000 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}\right) \left(\frac{1000000 \text{mg}}{\text{kg}}\right) \left(\frac{\text{m}^3}{1000 \text{L}}\right) = 0,45 \text{ mg/L}$$

Η ολική ζήτηση του χλωρίου είναι η διαφορά μεταξύ της προστιθέμενης δόσης και του ελεύθερου διαθέσιμου χλωρίου:

$$\text{Ολική ζήτηση χλωρίου} = 0,45 \text{ mg/L} - 0,25 \text{ mg/L} = 0,20 \text{ mg/L}$$

## Πραγματικό και διαθέσιμο χλώριο

Το ποσοστό του πραγματικού και του διαθέσιμου χλωρίου χρησιμοποιούνται για τη σωστή επιλογή χλωριούχων ουσιών για αποτελεσματική χλωρίωση.

Το ποσοστό του πραγματικού χλωρίου υπολογίζεται ως εξής:

$$(Cl_2)_{\text{πραγματικό}} = \frac{\text{Βάρος χλωρίου στην ουσία}}{\text{MB ουσίας}} \times 100 \%$$

Και το ποσοστό του διαθέσιμου χλωρίου δίνεται από τη σχέση:

$$(Cl_2)_{\text{διαθέσιμο}} = [(Cl_2)_{\text{ισοδύναμο}}] \times [(Cl_2)_{\text{πραγματικό}}]$$

Το διαθέσιμο χλώριο βασίζεται στην οξειδωτική ισχύ του χλωρίου (ή αντίστοιχα στον αριθμό ηλεκτρονίων που ανταλλάσσονται για να ληφθεί από την αρχική ένωση το ιόν του χλωρίου ( $Cl^-$ ))

Ο αριθμός ηλεκτρονίων που ανταλλάσσονται βρίσκεται από την αντίστοιχη ημιαντίδραση αναγωγής



Το ισοδύναμο χλώριο είναι 5 γιατί τα ηλεκτρόνια που ανταλλάχτηκαν ήταν 5.

Επίσης το πραγματικό ποσοστό χλωρίου είναι  $[(35,5/67,5) \times 100] = 52,6$

Και το διαθέσιμο χλώριο είναι  $(5 * 52,6\%) = 260\%$

## Πραγματικό και διαθέσιμο χλώριο

Ουσία	Μοριακό βάρος	Ισοδύναμο χλώριο**	Πραγματικό χλώριο (%)	Διαθέσιμο χλώριο (%)
Cl <sub>2</sub>	71	1	100	100
Cl <sub>2</sub> O	87	2	81,7	163,4
ClO <sub>2</sub>	67,5	5	52,6	263,2
CaClOCl	127	1	56	56
Ca(OCl) <sub>2</sub>	143	2	49,6	99,2
HOCl	52,5	2	67,7	135,4
NaClO <sub>2</sub>	90,5	4	39,2	156,8
NaOCl	74,5	2	47,7	95,4
NHCl <sub>2</sub>	86	2	82,5	165
NH <sub>2</sub> Cl	51,5	2	69	138

Πηγή: Εισαγωγή στις Διεργασίες Καθαρισμού νερού και λυμάτων, Χρυσικόπουλος Κ.Β.

## Άσκηση 2

Για την απολύμανση ενός δικτύου ύδρευσης με ογκομετρική παροχή  $Q = 50000 \text{ L/d}$  απαιτείται  $45 \text{ mg/L}$  χλώριο. Εάν χρησιμοποιηθεί υποχλωριώδες νάτριο ( $\text{NaOCl}$ ) να βρεθεί:

α) η μάζα του  $\text{NaOCl}$  σε  $\text{kg}$  που πρέπει να διαλυθεί ανά  $100 \text{ L}$  νερό ώστε να παρασκευαστεί διάλυμα με συγκέντρωση  $25000 \text{ mg/L Cl}_2$  και

β) ο όγκος του διαλύματος σε  $\text{L}$  που απαιτείται κάθε μέρα.

Για ευκολία χρησιμοποιούμε τον συμβολισμό:  $L_{(s)} = \text{L διάλυμα}$  και  $L_{(w)} = \text{L νερό}$ .

Λύση

$\text{NaOCl}$  : Περιέχει  $95,4\%$  διαθέσιμο χλώριο

$$\alpha: \left( 25000 \frac{\text{mg Cl}_2}{L_{(s)}} \right) \left( \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ mg}} \right) \left( \frac{\text{NaOCl}}{0,954 \text{ Cl}_2} \right) = 0,0263 \text{ kg NaOCl} / L_{(s)} = 2,63 \text{ kg NaOCl} / 100 L_{(s)}$$

β. ο όγκος του  $\text{NaOCl}$  διαλύματος που απαιτείται ημερησίως είναι:

$$\left( 50000 \frac{L_{(w)}}{d} \right) \left( \frac{45 \text{ mg Cl}_2}{L_{(w)}} \right) \left( \frac{L_{(s)}}{25000 \text{ mg Cl}_2} \right) = 90 L_{(s)}$$