A close-up photograph of water splashing into a clear glass. The water is captured in mid-air, creating a dynamic and energetic scene with many droplets and bubbles. The background is a light-colored, textured surface, possibly a countertop or sink.

Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
Καθηγητής Παράσχος Δ. Μελίδης

Δίκτυα διανομής και η ποιότητα
του πόσιμου νερού

Το πόσιμο νερό

- Ασφαλές πόσιμο νερό είναι βασική ανάγκη
- Η παροχή του αποτελεί ζήτημα κορυφαίας προτεραιότητας
- Αποτελεί κύρια πρόκληση για τις εταιρίες ύδρευσης η τροφοδοσία με νερό μικροβιολογικά και χημικά ασφαλές καθώς και αισθητικά ευχάριστο.
- Το επεξεργασμένο νερό δεν είναι αποστειρωμένο!



Τα συστήματα διανομής πόσιμου νερού

- Αποτελούνται από ένα εκτεταμένο δίκτυο σωλήνων, βαλβίδων, κρουνών, τμημάτων συντήρησης και εγκαταστάσεων αποθήκευσης.
- Αντιπροσωπεύουν το τελευταίο προστατευτικό φράγμα πριν από τη βρύση των καταναλωτών.



Τα συστήματα διανομής πόσιμου νερού

- Στην ιδανική περίπτωση, στο σύστημα διανομής πρέπει να επεμβαίνει ελάχιστα στην ποιότητα του νερού (διατήρηση της βιολογικής σταθερότητας)
- Δεδομένης της πολυπλοκότητας και της δυναμικής φύσης των συστημάτων διανομής, μπορούν να συμβούν σημαντικές αλλαγές στη βιολογική σταθερότητα, οδηγώντας σε επιδείνωση της ποιότητας του πόσιμου νερού.



Τα συστήματα διανομής πόσιμου νερού



Η φυσική, υδραυλική και ποιοτική ακεραιότητα του νερού είναι σημαντικοί πυλώνες για την τροφοδοσία ασφαλούς νερού στους καταναλωτές

Τα συστήματα διανομής πόσιμου νερού

Τα συστήματα διανομής αντιπροσωπεύουν ένα

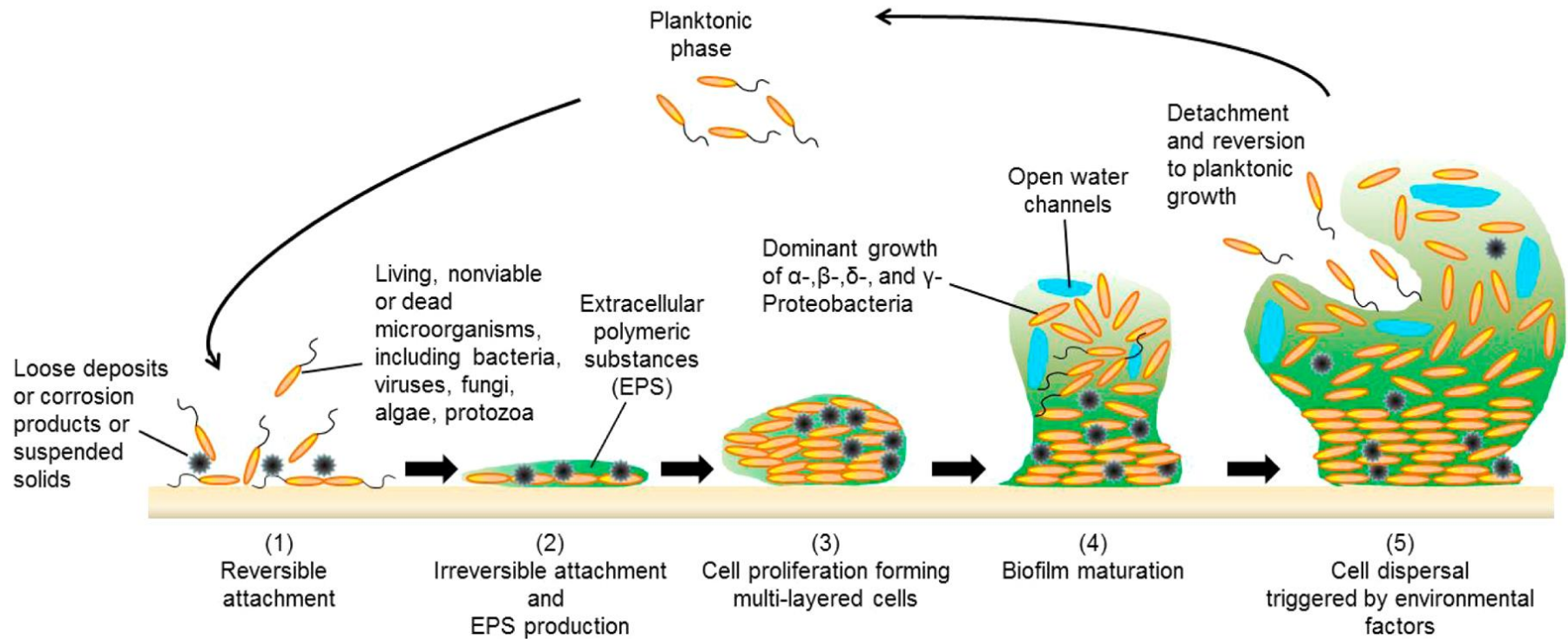
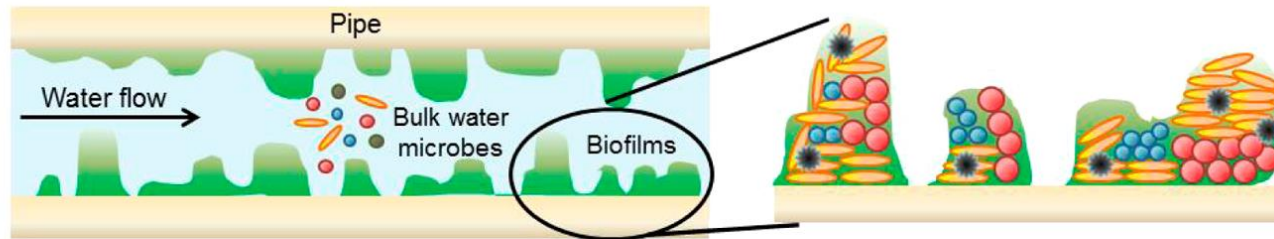
- πολύπλοκο και δυναμικό περιβάλλον (μερικές φορές αναφέρεται ως «αντιδραστήρας»)
- Όπου λαμβάνουν χώρα πολλές φυσικές, χημικές και βιολογικές αλληλεπιδράσεις και αντιδράσεις που περιλαμβάνουν μικροοργανισμούς, θρεπτικά συστατικά και σωματίδια.
- Αυτό το μείγμα σχηματίζει βιοφίλμ και εναποθέσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε
 - 1) επιδείνωση της ποιότητας του νερού
 - 2) σε μια ποικιλία προβλημάτων, όπως
 - άμεσες υδατογενείς επιδημίες
 - έμμεσων κινδύνων για την υγεία (π.χ. εκθέσεις σε ιχνοστοιχεία)
 - και αισθητικά ζητήματα (π.χ. χρώμα, θολότητα ή δυσάρεστη γεύση και οσμή).

Παρουσία μικροοργανισμών στο δίκτυο

Οι μικροοργανισμοί εμφανίζονται βάση :

- 1) εισόδου στο δίκτυο, επιβιώνοντας τις επεξεργασίες του νερού
 - 2) μετά από σπάσιμο ή ρωγμή του αγωγού και ακόλουθη πτώση της πίεσης
 - 3) ευνοϊκών συνθηκών ανάπτυξης στο σύστημα διανομής
- Οι μ/ο βρίσκονται τόσο πάνω στο βιοφίλμ όσο και με τη μορφή παροδικών (πλαγκτονικών) πληθυσμών.
 - Το συνδυασμένο γενετικό υλικό αυτών των μικροβιακών πληθυσμών είναι γνωστό ως το μικροβίωμα.
 - Το μικροβίωμα επηρεάζεται από τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών, το υλικό των αγωγών, την παρουσία θηρευτών και απολυμαντικών
 - Τα μικροβίωμα είναι πολύ ετερογενές και εξαρτάται από τον χρόνο και το σημείο που βρίσκεται μέσα στο δίκτυο

Κύκλος ζωής του βιοφίλμ



Liu et al., (2016) *Environmental Science & Technology*, 50(17), 8954–8976

Παρουσία μικροοργανισμών στο δίκτυο

Τα βιοφίλμ είναι συσσωρεύσεις μικροοργανισμών, τυπικά εγκλωβισμένων σε μια μήτρα εξωκυτταρικών πολυμερών ουσιών (EPS), και που περιέχουν τόσο οργανική όσο και ανόργανη ύλη, συνδεδεμένες στις εσωτερικές επιφάνειες των σωλήνων σε συστήματα διανομής πόσιμου νερού.

Η δομή EPS παρέχει προστασία έναντι θηρευτών και απολυμαντικών, και βοηθά στην πρόσληψη και χρήση θρεπτικών ουσιών.



Παρουσία μικροοργανισμών στο δίκτυο

Τα βιοφίλμ είναι πανταχού παρόντα σε όλα τα συστήματα διανομής και παρέχουν ένα βιότοπο για την επιβίωση και την ανάπτυξη μικροοργανισμών, συμπεριλαμβανομένων των παθογόνων.

Έχουν ανιχνευθεί σε βιοφίλμ:

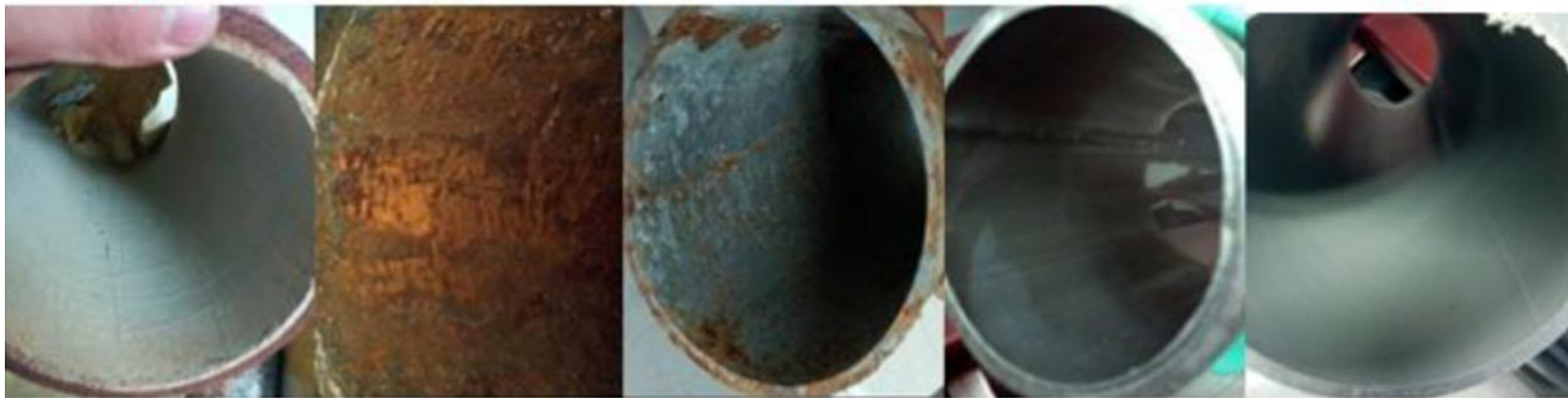
- πολλά είδη εντερικών παθογόνων
- μη εντερικά παθογόνα
- ευκαιριακά παθογόνα όπως *Legionella pneumophila*
- μη φυματιώδη μυκοβακτήρια (π.χ. *M. avium*, *M. intracellulare*)



Μορφολογία βιοφίλμ σε εσωτερικά τοιχώματα σωλήνων πριν και μετά από τη δειγματοληψία



Ren et al., (2015), *Applied Microbiology and Biotechnology*, 99(24), 10713–10724



DCIP

GCIP

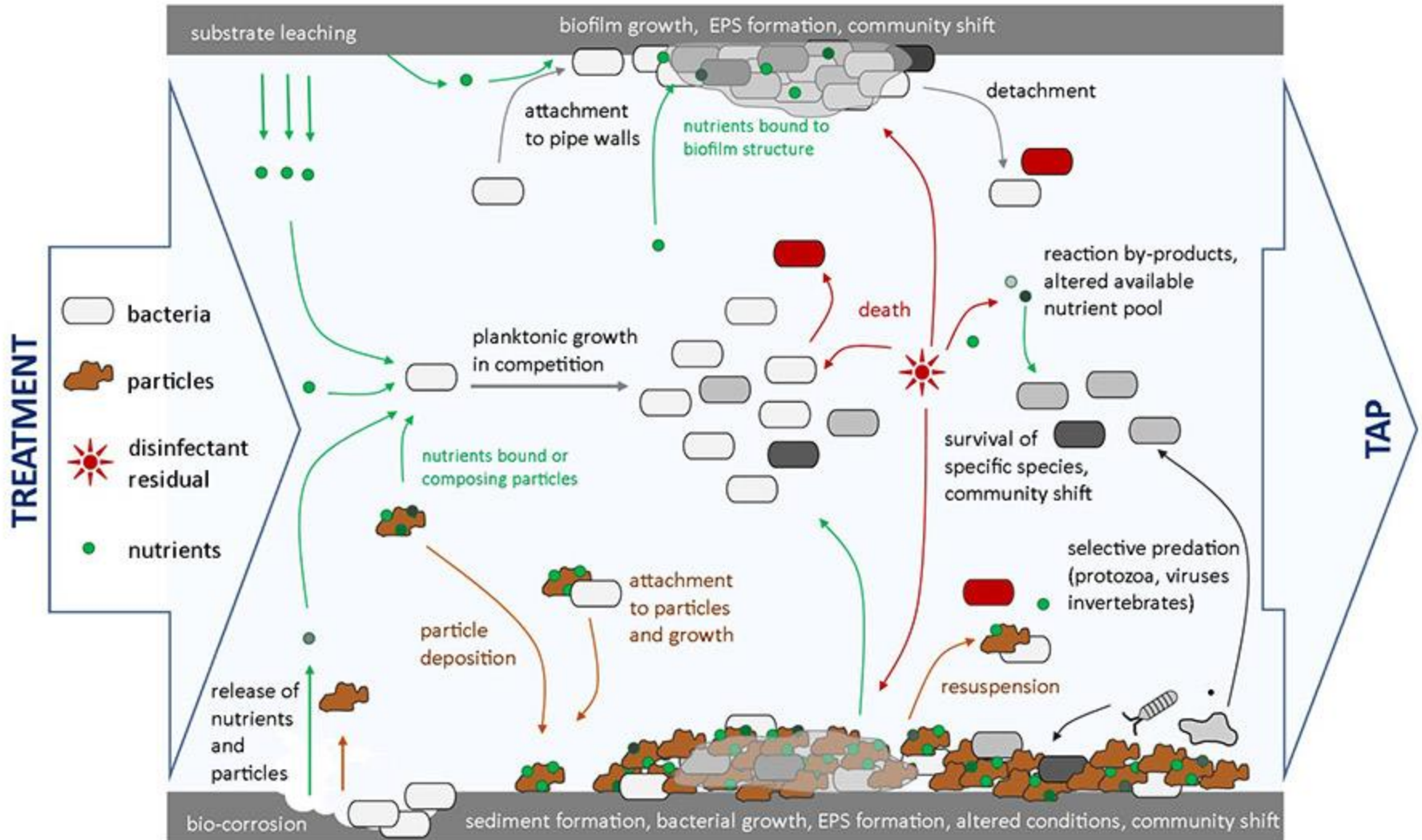
GSP

SSCP

PVC

Όλκιμος χυτοσίδηρος (DCIP), Γκρι χυτοσίδηρος (GCIP), Γαλβανισμένος σωλήνας χάλυβα (GSP), Επενδυμένος σωλήνας από ανοξείδωτο χάλυβα (SSCP), Σωλήνας από χλωριωμένο πολυβινύλιο (PVC),

Μικροβιακή δυναμική σε αγωγό δικτύου ύδρευσης



Prest et al, 2016a, Water Sci. Technol. Water Supply, 16(4): 865-880

Αιτίες επιδείνωσης της ποιότητας του νερού

Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του νερού στο σύστημα διανομής

1. Παρουσία μικροοργανισμών

Η πλειονότητα των μικροοργανισμών στο σύστημα διανομής βρίσκεται σε βιοφίλμ που συνδέονται με τα εσωτερικά τοιχώματα των αγωγών, όπου προστατεύονται.

Τα βιοφίλμ είναι πανταχού παρόντα σε όλα τα συστήματα διανομής και αποτελούν σημαντική πρόκληση για τις εταιρίες νερού

2. Τύπος και διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών

Ορισμένα θρεπτικά συστατικά μπορεί να υπάρχουν στα συστήματα διανομής πόσιμου νερού και μπορούν να προωθήσουν την ανάπτυξη μικροβίων,

- είτε χρησιμεύοντας ως καύσιμο για μικροοργανισμούς
- είτε καταναλώνοντας το υπολειμματικό απολυμαντικό

Αιτίες επιδείνωσης της ποιότητας του νερού

Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του νερού στο σύστημα διανομής

3. Υλικό και κατάσταση σωλήνων

Τα βιοφίλμ και τα αποθέματα συσσωρεύονται σε όλα τα δίκτυα ύδρευσης ανεξάρτητα από το υλικό του αγωγού.

Οι σιδερένιοι αγωγοί, ειδικότερα,

- ευνοούν τη μικροβιακή πρόσφυση και ανάπτυξη,
- οδηγούν σε αυξημένες αναπτύξεις (εξογκώσεις, tubercles)

Οι εξογκώσεις μπορούν να φιλοξενήσουν ευκαιριακά παθογόνα μικρόβια και να οδηγήσουν σε

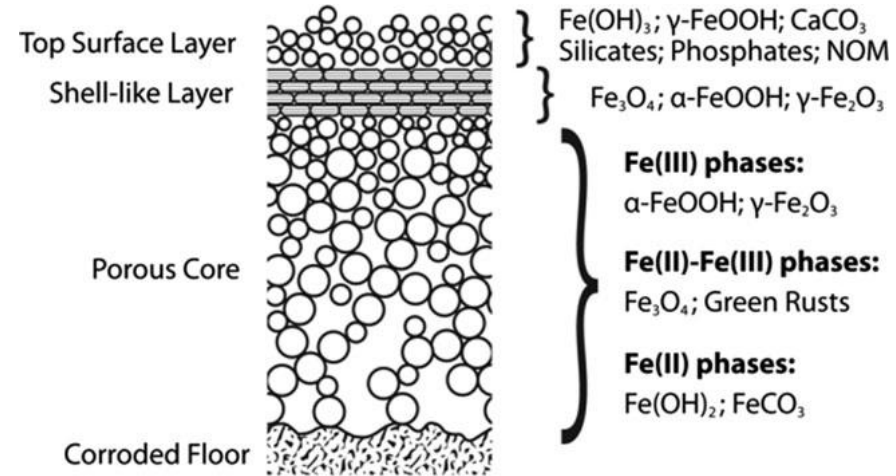
- σημαντική μείωση του υπολειμματικού χλωρίου
- χρωματισμό του νερού, θολότητα, δημιουργία ξένων γεύσεων και οσμών,
- καθώς και μείωση της υδραυλικής απόδοσης.

Καθώς οι αγωγοί παλαιώνουν, γίνονται επιρρεπείς σε διαρροές και θραύσεις, οδηγώντας στην είσοδο μικροβίων, διάβρωση και ανάπτυξη

βιοφίλμ

Αιτίες επιδείνωσης της ποιότητας του νερού

Αυξημένες αναπτύξεις (εξογκώσεις, tubercles)



Αιτίες επιδείνωσης της ποιότητας του νερού

Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του νερού στο σύστημα διανομής

4. Είδος και συγκέντρωση υπολειμματικού απολυμαντικού

Οι υπολειμματικές συγκεντρώσεις των απολυμαντικών έχουν διαφορετικές δυνατότητες όσον αφορά

- την απολυμαντική ισχύ,
- την αντιδραστικότητα με οργανικό και ανόργανο υλικό,
- τη ικανότητα διείσδυσης στο βιοφίλμ,
- τη δυνατότητα σχηματισμού παραπροϊόντων απολύμανσης και
- τη δυνατότητα νιτροποίησης.

Μια ελάχιστη συγκέντρωση υπολειμματικού απολυμαντικού συνίσταται συνήθως για τον έλεγχο της ανάπτυξης βιοφίλμ

Αιτίες επιδείνωσης της ποιότητας του νερού

Παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα του νερού στο σύστημα διανομής

5. Γενικές συνθήκες συστήματος διανομής

Η ποιότητα του νερού μπορεί επίσης να μειωθεί σημαντικά εξαιτίας των γενικών συνθηκών που επικρατούν στο δίκτυο, συμπεριλαμβανομένων

- των υδραυλικών συνθηκών,
- του χρόνου παραμονής,
- της θερμοκρασίας του νερού
- του pH

Οι υδραυλικές αλλαγές είναι συχνές και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη ζήτηση νερού.

Η ζήτηση νερού, με τη σειρά της, καθορίζει την ηλικία του νερού, η οποία επηρεάζει την ποιότητα του νερού.

Η θερμοκρασία και το pH του νερού διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο σε διάφορες φυσικές, χημικές και βιολογικές διεργασίες που συμβαίνουν στο σύστημα διανομής πόσιμου νερού και, ως εκ τούτου, μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα του νερού.

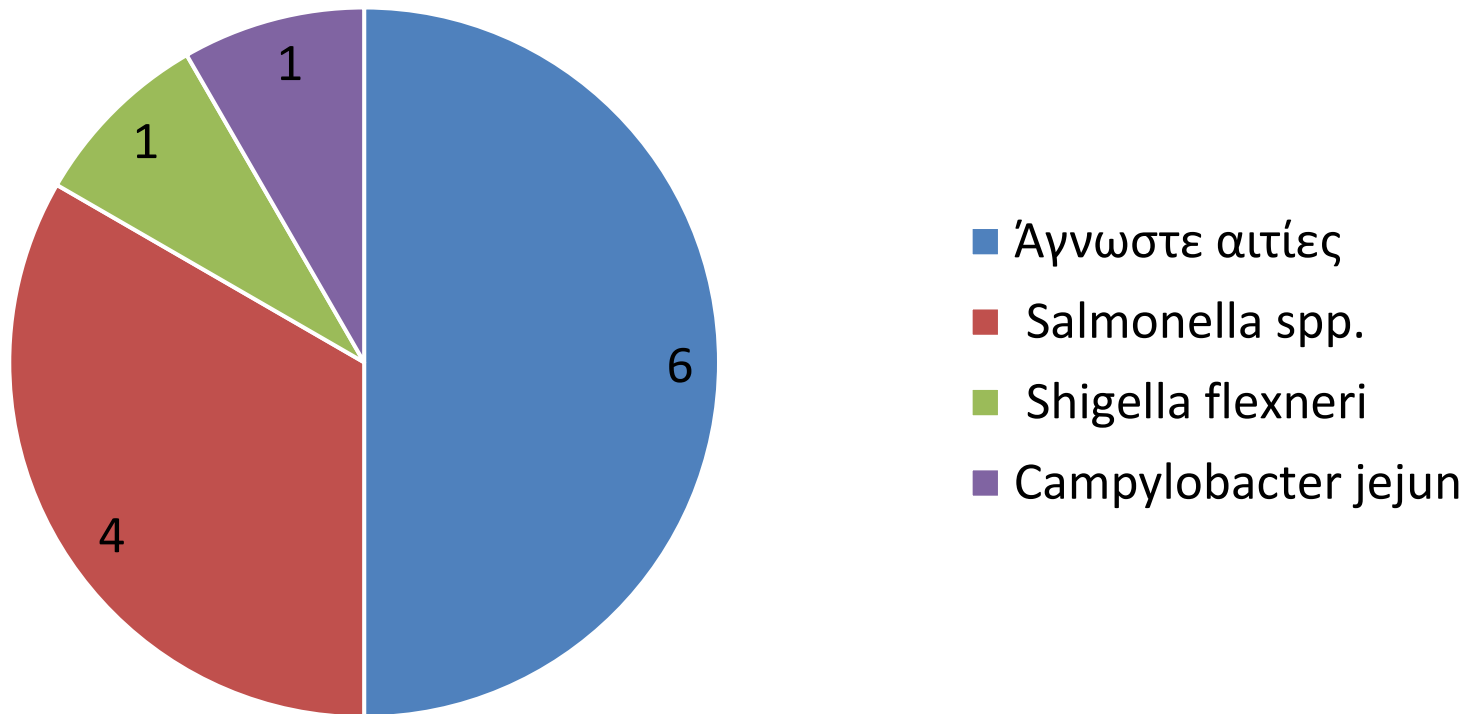
Άμεσοι κίνδυνοι για την υγεία

Ο βαθμός στον οποίο η υποβάθμιση της ποιότητας του νερού στο σύστημα διανομής προκαλεί υγειονομικά προβλήματα είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ποσοτικά επειδή πολλά γεγονότα δεν εντοπίζονται ή αναγνωρίζονται.

- Υπάρχουν πολύ περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με το μέγεθος και τις πηγές των υδατογενών ασθενειών στην Ελλάδα
- Σαφώς καλύτερα και εμπεριστατωμένα είναι τα στοιχεία που έχουμε από τις ΗΠΑ
 - 1995-2014, >40 κρούσματα υδατογενών ασθενειών εξαιτίας ανεπάρκειας του συστήματος διανομής
 - Αυτά είχαν ως αποτέλεσμα περισσότερες από 4.800 περιπτώσεις ασθενειών.
 - Η πλειονότητα των επιδημιών οφείλονται στο σύστημα διανομής και σχετίζονται με προσμίξεις με βρώμικα νερά (βακτήρια)
 - Η απελευθέρωση βιοφίλμ και εναποθέσεων στο σύστημα διανομής, που σχετίζεται με την αλλαγή της πηγής νερού (ξέσπασμα Legionella στο Flint, Michigan, ΗΠΑ, 2015)

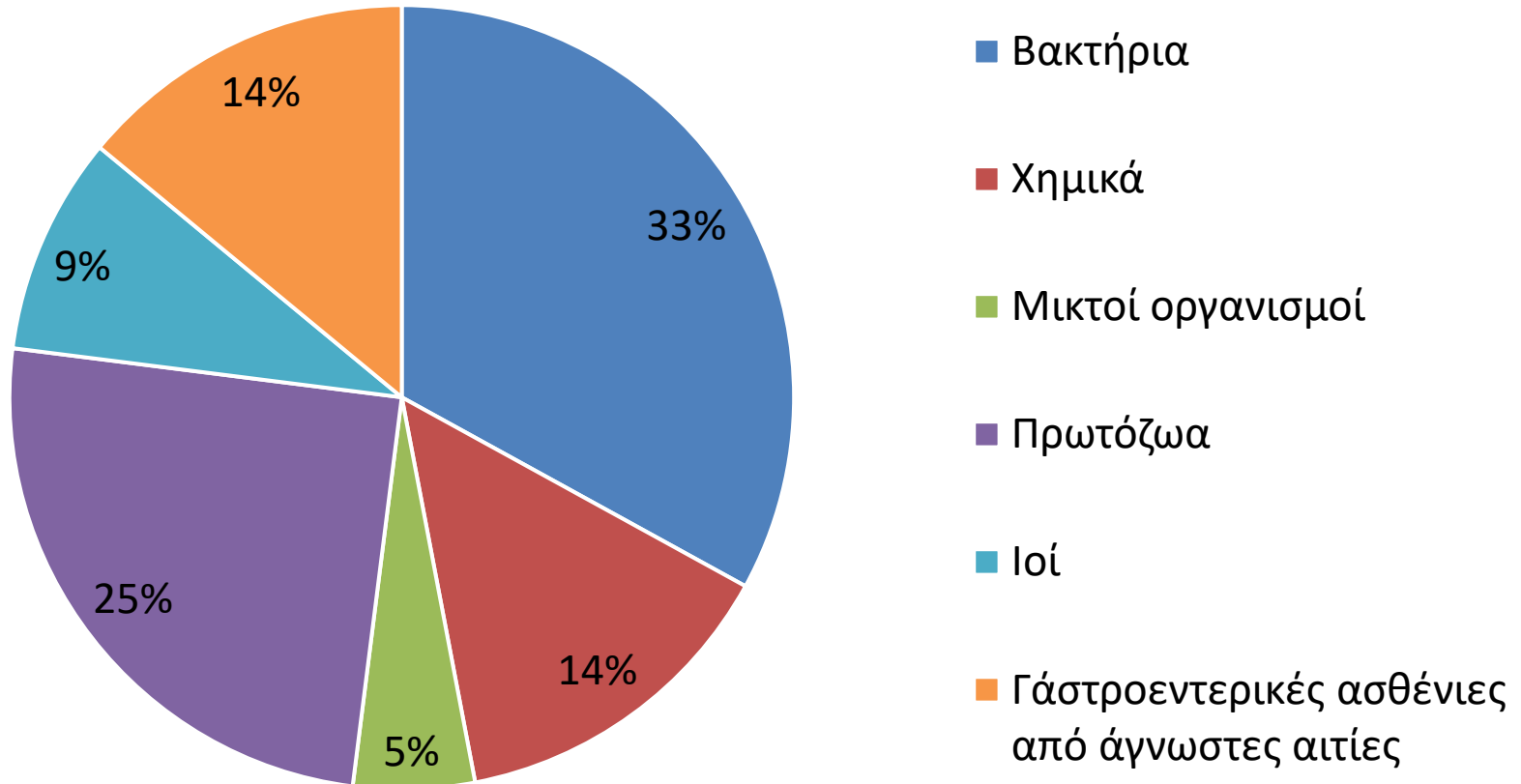
Τα συστήματα διανομής πόσιμου νερού

Σύστημα Υποχρεωτικής Δήλωσης Νοσημάτων
2004-2010 12 υδατογενείς επιδημίες.



Τα συστήματα διανομής πόσιμου νερού

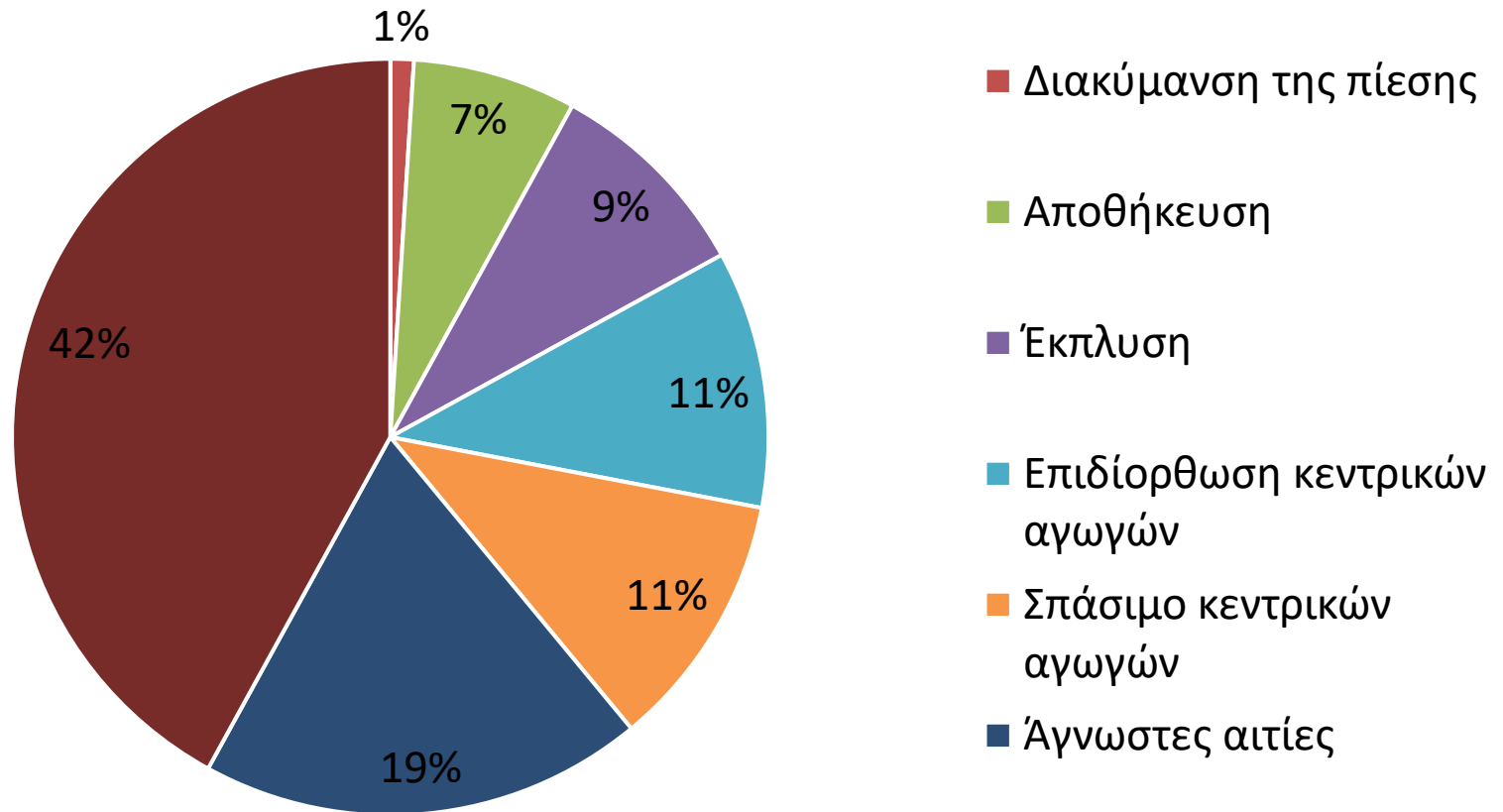
Υδατογενείς επιδημίες ΗΠΑ, 1981-2010 - Αίτια



Renwick et al., 2019 J. Am. Water Works Assoc., 111(2): 42-53.

Τα συστήματα διανομής πόσιμου νερού

Υδατογενείς επιδημίες ΗΠΑ, 1981-2010, από σφάλμα συστήματος



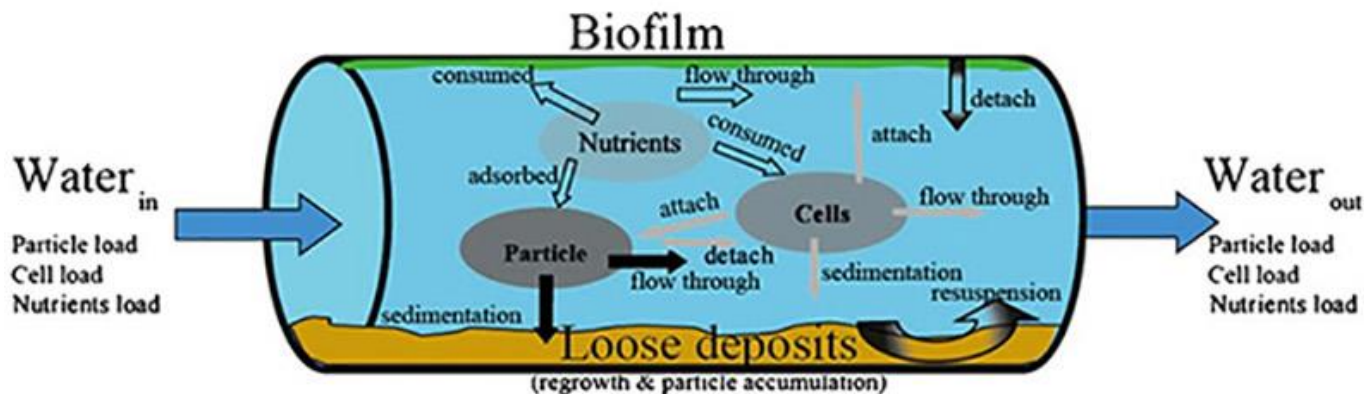
Renwick et al., 2019 J. Am. Water Works Assoc., 111(2): 42-53.

Έμμεσοι κίνδυνοι για την υγεία

Το υλικό που συσσωρεύεται στα συστήματα διανομής αποικίζεται με κολοβακτηρίδια, ετερότροφα, νιτροποιητές, βακτήρια οξείδωσης Fe και βακτήρια αναγωγής S.

Τα ιζήματα μετάλλων, Al, Fe, Mn, μέσα στις χαλαρής δομής επικαθήσεις μπορούν να λειτουργήσουν ως σημείο συσσώρευσης άλλων ρύπων (π.χ. αρσενικό, χρώμιο, χαλκός, μόλυβδος κλπ).

Αυτές οι εναποθέσεις μπορούν να διαταραχθούν και να "απελευθερωθούν" με ανεξέλεγκτο τρόπο λόγω υδραυλικών διαταραχών (π.χ. δραστηριότητες πυρόσβεσης, διαλείμματα νερού, λειτουργία αντλιοστασίου) ή ακατάλληλες εργασίες έκπλυσης.



Έμμεσοι κίνδυνοι για την υγεία

Συγκεντρώσεις βιολογικών υλικών και ιζημάτων μετάλλων σε διάφορες ταχύτητες έκπλυσης (Hill et al., 2018, Report #4653. Water Research Foundation, Denver, Colorado).

Community and pipe material	Ταχύτητα (m/sec)	HPC-R2A	Συνολική ενεργή βιομάζα	Ενεργά βακτήρια	Fe	Mn
		(cfu/mL)	(pg/mL)	(cells/mL)	(μg/L)	(μg/L)
A – Επένδυση τσιμέντου	1,22	930	9.3	89.200	4	800
	1,83	750	2.7	28.700	4,4	180
	1,83	3,3	5.9	54..500	6,4	200
A – Επενδυμένος με τσιμέντος (cement-lined with unlined)	1,83	380	4.0	34.000	4,3	330
A – Μη επενδυμένος χυτοσίδηρος (unlined cast iron)	0,91	130	1,2	20.700	3,7	140
	1,46	2,4	19	28.100	26,4	870
	1,83	430	2	37.900	15,1	300
	1,83	2,9	54	61.400	16,5	800
	1,95	1,03	4,7	31.300	7,5	210
B - Μη επενδυμένος χυτοσίδηρος (unlined cast iron)	0,91	1,47	270	590.700	193,1	20,6
	1,28	15,5	807	689.000	139	30,1
	1,65	3,3	430	577.300	155,7	18,4
	1,83	1,5	280	601.500	199	20,9
	1,83	10,4	325	788.300	153,3	11,3 ²³

Διαχείριση μικροβιολογικών κινδύνων

Το σύστημα διανομής πόσιμου νερού είναι το τελευταίο προστατευτικό φράγμα πριν από τη βρύση των καταναλωτών.

Ένα καλά διατηρημένο και λειτουργικό σύστημα διανομής είναι ένα κρίσιμο συστατικό της παροχής ασφαλούς πόσιμου νερού.

Παρόλο που τα συστήματα διανομής πόσιμου νερού μπορεί να διαφέρουν σημαντικά, αντιμετωπίζουν κοινές προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένης της υποβάθμισης της ποιότητας του νερού

Προκειμένου να διασφαλιστεί η παροχή ασφαλούς πόσιμου νερού στους καταναλωτές, πρέπει να γίνουν κατανοητές οι αιτίες αυτής της επιδείνωσης.

Συνιστάται η ανάπτυξη ενός σχεδίου παρακολούθησης για τον εντοπισμό πηγών μόλυνσης και / ή αιτιών (εκ νέου) ανάπτυξης των μ/ο

Διαχείριση μικροβιολογικών κινδύνων

Οι στρατηγικές για την ελαχιστοποίηση των μικροβιακών κινδύνων περιλαμβάνουν:

1. Βελτιστοποίηση επεξεργασίας για την ελαχιστοποίηση των θρεπτικών ουσιών που εισέρχονται στο σύστημα (π.χ. οργανικός άνθρακας, αμμωνία, νιτρώδες / νιτρικό άλας, ολικός φωσφόρος).
2. Διαχείριση της ηλικίας του νερού
3. Διαχείριση των επιπτώσεων της θερμοκρασίας του νερού
4. Διατήρηση μίας αποτελεσματικής υπολειμματικής συγκέντρωσης απολυμαντικού
5. Διατήρηση του pH σε $\pm 0,2$ μονάδες
6. Καθαρό σύστημα διανομής
7. Διατήρηση θετικής πίεσης
8. Ελαχιστοποίηση φυσικών και υδραυλικών διαταραχών

Διαχείριση μικροβιολογικών κινδύνων

Οι στρατηγικές για την ελαχιστοποίηση των μικροβιακών κινδύνων περιλαμβάνουν:

9. πρόληψη της ροής και τον έλεγχο της διασύνδεσης
10. έλεγχος διάβρωσης και συντήρηση
11. καθαρισμός των αγωγών του συστήματος διανομής
12. αυστηρή υγιεινή σε όλες τις κατασκευές, την επισκευή ή τη συντήρηση του νερού

Προτεινόμενες παράμετροι / μέθοδοι για την αξιολόγηση της βιολογικής σταθερότητας

Water Quality Objective	Parameter/Method	Rapid	Laboratory	Advanced
Microbial/Disinfection	Disinfectant residual	X	N/A	N/A
	c-ATP Footnotea	X	N/A	N/A
	HPC-R2A Footnoteb	N/A	X	N/A
	Bacterial indicators (total coliforms and <i>E. coli</i>)	N/A	X	N/A
	Bulk water disinfectant demand/ decay when conducting unidirectional flushing	N/A	X	X
	Biofilm formation rate	N/A	X	X
	Bacterial cell count using FCM Footnotec	N/A	N/A	X
	Molecular methods	N/A	N/A	X
	Biofilm analysis	N/A	N/A	X
	Solids	Turbidity	X	N/A
Apparent colour		N/A	X	N/A
Chemistry	pH	X	N/A	N/A
	Water temperature	X	N/A	N/A
	Oxidation-reduction potential	X	N/A	N/A

Προτεινόμενες παράμετροι / μέθοδοι για την αξιολόγηση της βιολογικής σταθερότητας

Water Quality Objective	Parameter/Method	Rapid	Laboratory	Advanced
Nutrients	Organic carbon	X	X	N/A
	Total and free ammonia	X	X	N/A
	Nitrite + nitrate	X	X	N/A
	Total phosphorus	X	X	N/A
Metals - Level 1 ^{Footnoted}	Aluminum	N/A	X	N/A
	Iron	N/A	X	N/A
	Manganese	N/A	X	N/A
	Arsenic	N/A	X	N/A
	Lead	N/A	X	N/A
Metals - Level 2 ^{Footnotee}	Scale formation and dissolution metals	N/A	X	N/A

a cATP, cellular adenosine triphosphate

b HPC, heterotrophic plate count using R2A medium

c FCM, flow cytometry

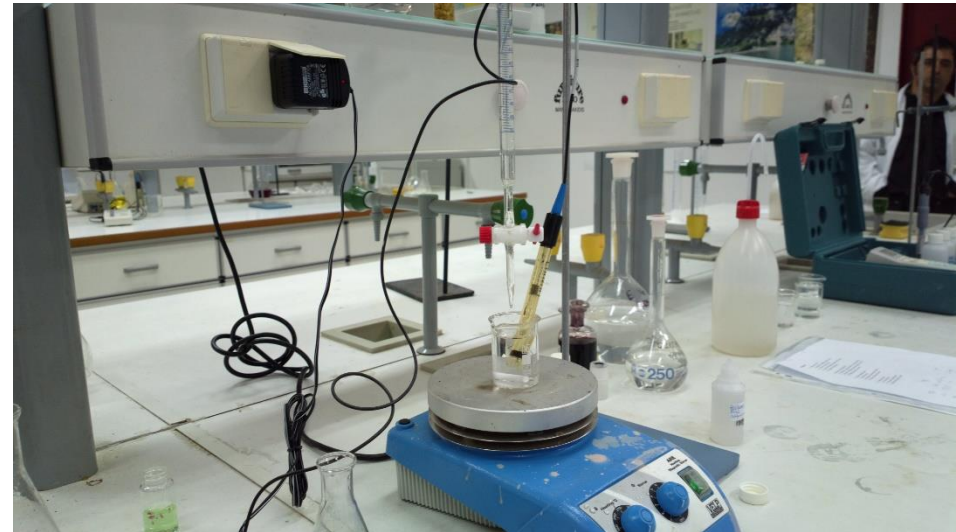
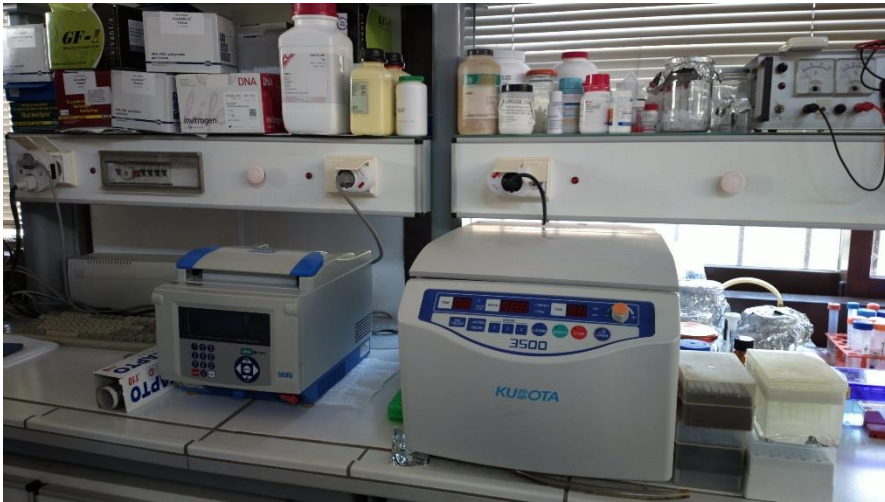
d Level 1 metals include the three major accumulation sinks (aluminum, iron and manganese) and key health-based contaminants. Water utilities may wish to add additional parameters if treatment is in place for a specific metal.

e Level 1 metals + copper, cadmium, chromium, cobalt, nickel, tin, zinc, calcium, magnesium, barium, strontium, sodium, potassium, vanadium.

Συμπεράσματα

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την ανάπτυξη του βιοφίλμ στο δίκτυο ύδρευσης:

- εξετάζοντας τους παράγοντες που επηρεάζουν το σχηματισμό και τα χαρακτηριστικά του,
- καθώς και τις διάφορες τεχνολογίες για τον χαρακτηρισμό και την παρακολούθηση
- και, τελικά, τον έλεγχο της ανάπτυξής τους.



Ευχαριστώ για την προσοχή σας