



## Βελτιστοποίηση Χλωρίωσης Κολυμβητικών Δεξαμενών

Αποτελέσματα Παρακολούθησης Παραπροϊόντων Απολύμανσης σε Δύο Πισίνες  
με Εφαρμογή Πρωτοκόλλου Σταθερής Χαμηλής Δοσολογίας TCCA

Παράμετρος	Στοιχεία
Εκδότης	PoolDesign, Νάουσα, Ελλάδα   pooldesign.gr
Έτος	2026
Έκδοση	1.1 — αναθεωρημένη τεχνική έκδοση
Πεδίο εφαρμογής	Ιδιωτικές κολυμβητικές δεξαμενές χαμηλού φορτίου χρηστών
Περίοδος παρακολούθησης	Οκτώβριος 2021 – Σεπτέμβριος 2024 (Πισίνα Β)   Καλοκαίρι 2024 (Πισίνα Α)
Εργαστήρια ανάλυσης	VELTIA Labs (Σίνδος)   ANALYSIS-ΔΕΛΚΟΦ Α.Ε. (Νάουσα)
Κατάσταση	Έκδοση αξιολόγησης — για τεχνική ενημέρωση συνεργατών

**ΑΠΟΠΟΙΗΣΗ ΕΥΘΥΝΗΣ:** Τα αποτελέσματα αυτού του εγγράφου ισχύουν αποκλειστικά για τις δύο πισίνες που περιγράφονται, υπό τις αναφερόμενες συνθήκες λειτουργίας. Δεν αποτελούν καθολική οδηγία λειτουργίας, σύσταση μείωσης υπολειμματικού χλωρίου ή υποκατάστατο των εθνικών απαιτήσεων λειτουργίας κολυμβητικών δεξαμενών. Κάθε εφαρμογή απαιτεί συμμόρφωση με την ισχύουσα εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία, αξιολόγηση από αρμόδιο τεχνικό ή μηχανικό και εξατομικευμένη ανάλυση της συγκεκριμένης εγκατάστασης.

## 1. Περίληψη (Executive Summary)

Το παρόν τεχνικό λευκό βιβλίο παρουσιάζει αποτελέσματα παρακολούθησης παραπροϊόντων απολύμανσης (DBPs) σε δύο ιδιωτικές κολυμβητικές δεξαμενές χαμηλού φορτίου χρηστών, στις οποίες εφαρμόστηκε πρωτόκολλο σταθερής χαμηλής δοσολογίας τριχλωροϊσοκυανουρικού οξέος (TCCA). Στην εξωτερική δεξαμενή 60 m<sup>3</sup> μετρήθηκαν TTHM 8,6 µg/L και HAAs 104,4 µg/L (DBAA 62,2 + TCAA 42,2 µg/L). Το κύριο τεχνικό εύρημα δεν είναι ότι όλα τα DBPs ήταν χαμηλά: τα THMs ήταν χαμηλά, ενώ τα HAAs ήταν μετρήσιμα και αυξημένα έναντι του ενδεικτικού ορίου EPA για πόσιμο νερό (HAA5 ≤ 60 µg/L), το οποίο δεν αποτελεί ειδικό όριο για πισίνες. Μοναδικό ποσοτικοποιημένο THM ήταν το Bromoform, εύρημα συνεπές με πιθανή παρουσία Br<sup>-</sup> στο νερό τροφοδοσίας, χωρίς όμως άμεση μέτρηση βρωμιούχων. Στην εσωτερική δεξαμενή 100 m<sup>3</sup>, η μετάβαση από το προηγούμενο σχήμα NaOCl σε πρωτόκολλο ελεγχόμενης χαμηλής δοσολογίας TCCA συσχετίστηκε με μείωση εισαγόμενου ενεργού χλωρίου κατά 96,7%, χαμηλό CC και μη ανιχνεύσιμους μικροβιολογικούς δείκτες στις διαθέσιμες αναλύσεις. Τα αποτελέσματα πρέπει να ερμηνεύονται ως παρατηρήσεις υπό ειδικές συνθήκες χαμηλού φορτίου και όχι ως γενικεύσιμη οδηγία λειτουργίας. Απαιτείται περαιτέρω επαλήθευση με επαναλαμβανόμενες μετρήσεις DBPs, Br<sup>-</sup>, DOC/TOC και άμεση εκτίμηση δραστικού HOCl πριν από οποιαδήποτε ευρύτερη εφαρμογή.

### 1.1 Κύρια ευρήματα και βαθμός τεκμηρίωσης

Ο παρακάτω πίνακας διαχωρίζει τα άμεσα εργαστηριακά ευρήματα από τις τεχνικές εκτιμήσεις και τις υποθέσεις που απαιτούν επιβεβαίωση.

Εύρημα / Ισχυρισμός	Βάση τεκμηρίωσης	Βαθμός ισχύος
TTHM 8,6 µg/L στην Πισίνα Α	Άμεση εργαστηριακή μέτρηση VELTIA Labs	Ισχυρό για τη συγκεκριμένη δειγματοληψία
HAAs 104,4 µg/L στην Πισίνα Α	Άμεση εργαστηριακή μέτρηση VELTIA Labs	Ισχυρό για τη συγκεκριμένη δειγματοληψία
Μη ανιχνεύσιμοι μικροβιολογικοί δείκτες	Εργαστηριακές αναλύσεις διαθέσιμων δειγμάτων	Ισχυρό για τα δείγματα, όχι για γενίκευση
Πιθανή παρουσία Br <sup>-</sup> στο νερό τροφοδοσίας	Έμμεση ένδειξη από κυριαρχία Bromoform/DBAA	Υπόθεση — απαιτείται μέτρηση Br <sup>-</sup>
Μείωση ενεργού χλωρίου κατά 96,7% στην Πισίνα Β	Υπολογισμός από καταναλώσεις/δοσολογία	Ισχυρό ως υπολογισμός εγκατάστασης
Μείωση DBPs στην Πισίνα Β μετά παρέμβαση	Θεωρητική εκτίμηση, χωρίς μετρήσεις THMs/HAAs	Ασθενές — απαιτείται εργαστηριακή επιβεβαίωση
Απουσία βιοφίλμ	Οπτική επιθεώρηση, όχι εργαστηριακή επιβεβαίωση	Τεχνική παρατήρηση

## 2. Σκοπός και Πεδίο Εφαρμογής

### 2.1 Σκοπός

Το παρόν έγγραφο αποσκοπεί στην τεκμηριωμένη παρουσίαση αποτελεσμάτων εφαρμογής πρωτοκόλλου σταθερής χαμηλής δοσολογίας TCCA σε δύο κολυμβητικές δεξαμενές, με έμφαση στη μέτρηση THMs, HAAs και μικροβιολογικών δεικτών, και στην ανάλυση των μηχανισμών που ερμηνεύουν τα αποτελέσματα.

### 2.2 Πεδίο Εφαρμογής

Τα αποτελέσματα ισχύουν για:

- Ιδιωτικές κολυμβητικές δεξαμενές χαμηλού φορτίου (≤ 10 χρηστών/ημέρα)
- Εξωτερικές και εσωτερικές δεξαμενές με χλωρίωση TCCA
- Θερμοκρασία νερού 20–31°C, pH 7,4–7,6
- Ρυθμός ανακυκλοφορίας: 3,5–4,2 κύκλοι φίλτραρίσματος/ημέρα

Δεν εφαρμόζεται άμεσα σε:

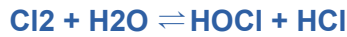
- Δημόσιες ή ημιδημόσιες εγκαταστάσεις υψηλού φορτίου (> 50 χρήστες/ημέρα)

- Δεξαμενές με θαλασσινό νερό ή υψηλή περιεκτικότητα βρωμιούχων ιόντων (> 0,5 mg/L)
- Εγκαταστάσεις με θερμοκρασία νερού > 35°C (spa, υδρομασάζ)

### 3. Θεωρητικό Υπόβαθρο

#### 3.1 Χημεία Χλωρίου — HOCl/OCl- Ισορροπία

Το χλώριο σε υδατικό διάλυμα υφίσταται υδρόλυση:



Το υποχλωριώδες οξύ (HOCl) αποτελεί το ενεργό απολυμαντικό — σημαντικά πιο αποτελεσματικό από το ανιόν υποχλωριώδους (OCl-). Η κατανομή μεταξύ HOCl και OCl- εξαρτάται κρίσιμα από το pH:

pH	% HOCl (ενεργό)	% OCl-	Απολυμαντική ισχύς
7,0	73%	27%	Υψηλή
7,2	67%	33%	Καλή
7,4–7,6*	55–49%	45–51%	Αποδεκτή — ισορροπία
7,8	33%	67%	Μειωμένη
8,0	23%	77%	Χαμηλή

\* Εύρος pH και των δύο πισινών κατά την παρακολούθηση.

#### 3.2 Ρόλος Κυανουρικού Οξέος (CYA) — Διπλός Χαρακτήρας

Το CYA (κυανουρικό οξύ) που αποδεδεσμεύεται από το TCCA σχηματίζει σύμπλοκο με HOCl, επιτελώντας αντιτιθέμενες λειτουργίες:

Συγκ. CYA	Θετική επίδραση	Αρνητική επίδραση — μείωση δραστ. HOCl
0 mg/L	—	0% (βάση)
10 mg/L	Μέτρια UV προστασία	~30%
30 mg/L*	Καλή UV προστασία	~50–55%
50 mg/L	Μέγιστη σύσταση	~70%
> 100 mg/L	Κίνδυνος «chlorine lock»	> 85%

\* Τιμή CYA που μετρήθηκε στην εσωτερική πισίνα μετά 2,5 χρόνια λειτουργίας.

Πρακτική συνέπεια: Σε CYA ~30 mg/L, για διατήρηση ισοδύναμης απολυμαντικής ισχύος, συχνά χρησιμοποιούνται συντηρητικές προσεγγίσεις λόγου FC/CYA. Η παρακολούθηση με FC 0,3–0,7 mg/L και CYA ~30 mg/L στις συγκεκριμένες δεξαμενές δεν πρέπει να ερμηνευθεί ως γενική σύσταση λειτουργίας σε χαμηλό FC. Οι μη ανιχνεύσιμοι μικροβιολογικοί δείκτες αποτελούν παρατήρηση υπό περιορισμένες συνθήκες χαμηλού φορτίου χρηστών, ελεγχόμενης χρήσης και, για την εξωτερική πισίνα, πρόσθετης ηλιακής UV επίδρασης.

### 3.3 Σχηματισμός DBPs — Κινητική

Ο ρυθμός σχηματισμού παραπροϊόντων απολύμανσης (DBPs) περιγράφεται από τη σχέση:

$$d[\text{DBP}]/dt \approx k \times [\text{HOCl}] \times [\text{DOC}] \times f(\text{T}, \text{pH})$$

Σημείωση: Πρόκειται για απλουστευμένη κινητική προσέγγιση. Δεν λαμβάνει υπόψη: (α) τον όρο βρωμιούχων [Br-], ο οποίος στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι πιθανώς σημαντικός λόγω της κυριαρχίας Bromoform έναντι Chloroform, (β) speciation μεταξύ HOCl/OCl-/Cl-CYA, (γ) χρόνο παραμονής και υδραυλική συμπεριφορά. Για πλήρη κινητική ανάλυση βλ. Chowdhury et al. (2014).

όπου  $k$  = ταχύτητα αντίδρασης, DOC = διαλελυμένος οργανικός άνθρακας,  $f(\text{T}, \text{pH})$  = συνάρτηση θερμοκρασίας και pH. Επομένως ο έλεγχος DBPs συνδέεται με: (α) έλεγχο [HOCl] μέσω σταθερής χαμηλής δοσολογίας, (β) περιορισμό [DOC] μέσω χαμηλού φορτίου χρηστών και καθαρού φίλτρου, (γ) έλεγχο θερμοκρασίας και pH. Οι σχέσεις αυτές ερμηνεύουν τάσεις και όχι από μόνες τους αιτιώδη απόδειξη για τις δύο εγκαταστάσεις.

Διάκριση THMs/HAA5: Τα THMs είναι πτητικά και μπορούν να απομακρύνονται στον αέρα, ενώ σε εξωτερικές πισίνες μπορεί να επηρεάζονται επιπλέον από φωτοχημικές διεργασίες. Τα HAA5 είναι πολύ λιγότερο πτητικά και τείνουν να παραμένουν στο νερό και να συσσωρεύονται, επηρεαζόμενα κυρίως από πρόδρομες οργανικές ενώσεις, δοσολογία, pH, θερμοκρασία και παρουσία αλογονιδίων όπως Br-.

### 3.4 Βιοφίλμ στο Μέσο Φιλτραρίσματος

Σε τυπικές πισίνες, το μέσο φιλτραρίσματος (άμμος, γυαλί) μπορεί να αποτελέσει δευτερεύουσα πηγή DOC όταν αναπτύσσεται βιοφίλμ στη μάζα του. Σε ορισμένες μελέτες εκτιμάται ότι αυτός ο μηχανισμός μπορεί να συνεισφέρει έως ~30% της συνολικής παραγωγής DBPs (Hansen et al., 2012), ανάλογα με το φορτίο χρηστών, την ηλικία και τη συχνότητα πλύσης του φίλτρου. Στην παρούσα εργασία δεν πραγματοποιήθηκε εργαστηριακή επιβεβαίωση βιοφίλμ· συνεπώς οι σχετικές αναφορές βασίζονται σε οπτική επιθεώρηση και πρέπει να αντιμετωπίζονται ως τεχνική παρατήρηση, όχι ως εργαστηριακό εύρημα.

### 3.5 Εκτίμηση Δραστικού Χλωρίου (HOCl) σε Παρουσία CYA — Bounded Estimation

Σε παρουσία κυανουρικού οξέος (CYA), το ελεύθερο χλώριο (FC) δεν αντιστοιχεί πλήρως σε δραστικό υποχλωριώδες οξύ (HOCl). Σχηματίζονται ισοκυανουρικά σύμπλοκα (chloroisocyanurates) που μειώνουν δραστικά το διαθέσιμο HOCl:



Η ακριβής κατανομή HOCl/δεσμευμένου χλωρίου δεν μετρήθηκε άμεσα στην παρούσα εργασία. Βάσει βιβλιογραφικών δεδομένων (Wojtowicz, 2001· White, 1999), σε pH 7,4–7,6 και CYA ~30 mg/L, η σχετική απολυμαντική ισχύς (ως HOCl) εκτιμάται ότι μειώνεται κατά 50–70% σε σχέση με σύστημα χωρίς CYA. Κατά συνέπεια, οι τιμές CT που υπολογίζονται βάσει FC (Ενότητα 4.3) υπερεκτιμούν την πραγματική απολυμαντική ικανότητα. Χωρίς άμεση μέτρηση HOCl, ακριβής ποσοτικοποίηση δεν είναι εφικτή — το CT\_effective (ως HOCl) εκτιμάται ότι βρίσκεται στο 30–50% των τιμών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Εκτιμώμενο εύρος CT\_effective (ως HOCl) για Πισίνα A:

- FC = 0,3 mg/L, CYA ~30 mg/L → CT\_effective ≈ 18–30 mg·min/L (έναντι 60 που δίνει ο απλός υπολογισμός)
- FC = 0,7 mg/L, CYA ~30 mg/L → CT\_effective ≈ 42–70 mg·min/L (έναντι 140)

Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι το σύστημα λειτουργεί κάτω από το κλασικό όριο Giardia. Η απουσία ανιχνεύσιμων μικροβιολογικών δεικτών στις διαθέσιμες αναλύσεις είναι πιθανώς συνεπής με: (α) εξαιρετικά χαμηλό φορτίο χρηστών, (β) απουσία κολοβακτηριοειδών στο νερό τροφοδοσίας, (γ) συμπληρωματική επίδραση ηλιακής UV στην Πισίνα Α.

## 4. Μεθοδολογία

### 4.1 Χαρακτηριστικά Κολυμβητικών Δεξαμενών

Παράμετρος	Πισίνα Α (Εξωτερική)	Πισίνα Β (Εσωτερική)
Τύπος	Εξωτερική (outdoor)	Εσωτερική (indoor)
Όγκος νερού (V)	60 m <sup>3</sup>	100 m <sup>3</sup>
Επιφάνεια νερού	—	55 m <sup>2</sup>
Κάλυμμα	Χωρίς κάλυμμα	—
Παροχή αντλίας (Q)	18 m <sup>3</sup> /h	28 m <sup>3</sup> /h
Turnover time (V/Q)	3,33 h	3,57 h
Κύκλοι φίλτρου/ημέρα	4,2	3,9
Ώρες λειτουργίας αντλίας	2 × 7 h/24h = 14 h/ημέρα	2 × 7 h/24h = 14 h/ημέρα
Τύπος φίλτρου	Άμμου	Άμμου
Περίοδος παρακολούθησης	6 μήνες (Καλοκ. 2024)	2,5 χρόνια (2021–2024)

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά κολυμβητικών δεξαμενών

### 4.2 Λειτουργικές Συνθήκες

Παράμετρος	Πισίνα Α (Εξωτερική)	Πισίνα Β (Εσωτερική)
Χημικό απολύμανσης	TCCA (ταμπλέτες 200 g)	TCCA (ταμπλέτες 200 g)
Δοσολογία TCCA	200 g/εβδομάδα	200 g/μήνα
Δοσολογία (mg/L/ημέρα)	0,47 mg/L/ημέρα	0,097 mg/L/ημέρα
Ενεργό Cl <sub>2</sub> εισαγόμενο/ημέρα	~25,7 g Cl <sub>2</sub> /ημέρα	~5,8 g Cl <sub>2</sub> /ημέρα
Ελεύθερο χλώριο (FC)	0,3–0,7 mg/L	0,3–0,7 mg/L
Combined Chlorine (CC)	0,1–0,2 mg/L	0,1–0,2 mg/L
pH	7,4–7,6	7,4–7,6
Θερμοκρασία περιβ.	40°C (θερινό)	—
Θερμοκρασία νερού	~28–32°C (εκτ.)	31°C
Φορτίο χρηστών	~6 άτομα/ημέρα	Ιδιωτική χρήση (χαμηλό)
Ανανέωση νερού	~800 L/εβδομάδα	~800 L/εβδομάδα
Σοκ χλωρίωση	Εποχιακή	Ανά 2 μήνες
CYA (μετρηθέν)	~41 mg/L (εκτ.)	~30 mg/L (μετρηθέν στα 2,5 χρ.)

Πίνακας 2. Λειτουργικές συνθήκες κολυμβητικών δεξαμενών

### 4.3 Υπολογισμός CT (Χρόνος Επαφής × Συγκέντρωση)

Ο δείκτης CT (mg·min/L) εκφράζει την απολυμαντική ισχύ του συστήματος:

$$CT = [FC] \text{ (mg/L)} \times t \text{ (min)}$$

όπου t = turnover time σε λεπτά.

**ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ ΕΠΙΦΥΛΑΞΗ:** Ο υπολογισμός βασίζεται σε FC (ολικό ελεύθερο χλώριο) και όχι σε HOCl (πραγματικά ενεργό κλάσμα). Σε παρουσία CYA ~30 mg/L, το CT\_effective (ως HOCl) εκτιμάται στο 30–50% των παρακάτω τιμών — βλ. Ενότητα 3.5.

Πισίνα	FC (mg/L)	Turnover (min)	CT_FC (mg·min/L)*	CT_effective εκτίμηση†
A — Εξωτερική (ελάχ.)	0,3	200	60	18–30 mg·min/L
A — Εξωτερική (μέγ.)	0,7	200	140	42–70 mg·min/L
B — Εσωτερική (ελάχ.)	0,3	214	64	19–32 mg·min/L
B — Εσωτερική (μέγ.)	0,7	214	150	45–75 mg·min/L

\* CT\_FC: υπολογισμός βάσει ολικού FC — υπερεκτιμά την πραγματική απολυμαντική ισχύ λόγω CYA.

† CT\_effective: εκτιμώμενο εύρος ως HOCl (βάσει Wojtowicz, 2001 — βλ. Ενότητα 3.5). Απαιτούμενο CT για 99,9% αδρανοποίηση Giardia: ~150 mg·min/L (WHO, 2022). Οι εκτιμήσεις δείχνουν ότι το πρωτόκολλο λειτουργεί κάτω από αυτό το συντηρητικό σημείο αναφοράς. Το εύρημα αυτό ενισχύει την ανάγκη να μη γενικευθεί η πρακτική σε δημόσιες ή υψηλού φορτίου εγκαταστάσεις χωρίς ξεχωριστή τεχνική και ρυθμιστική αξιολόγηση.

Πίνακας 3. Υπολογισμός δείκτη CT — βάσει FC και εκτιμώμενο ως HOCl

### 4.4 Δειγματοληψία

- Ώρα δειγματοληψίας: 09:00 (πριν πρώτη ημερήσια χρήση — αντιστοιχεί στην ελάχιστη ημερήσια τιμή DBPs)
- Δειγματοληψία από τον πελάτη κατά δήλωσή του — αποστολή στο εργαστήριο αυθημερόν
- Πισίνα A: 1 δειγματοληψία χημική + 1 μικροβιολογική
- Πισίνα B: 2 μικροβιολογικές αναλύσεις κατά τη 2,5ετή περίοδο

### 4.5 Αναλυτικές Μέθοδοι

Παράμετρος	Μέθοδος	Όριο Ανίχνευσης	Εργαστήριο
THMs (4 ενώσεις)	GC-MS/HS-SPME (In-house O.B.15.002) βάσει ISO/DIS 17943	1,0 µg/L	VELTIA Labs, Σίνδος
HAAs (9 ενώσεις)	LC-MS/MS (In-house O.15.006) βάσει J. Chromatogr. A 1217 (2010) 4873	5,0 µg/L	VELTIA Labs, Σίνδος
Αριθμός αποικιών 36°C	ΕΛΟΤ EN ISO 6222:1999	1 cfu/mL	ANALYSIS-ΔΕΛΚΟΦ

Παράμετρος	Μέθοδος	Όριο Ανίχνευσης	Εργαστήριο
Αριθμός αποικιών 22°C	ΕΛΟΤ EN ISO 6222:1999	1 cfu/mL	ANALYSIS-ΔΕΛΚΟΦ
Ολικά κολοβακτηριοειδή	ΕΛΟΤ EN ISO 9308-1:2014	1 cfu/100mL	ANALYSIS-ΔΕΛΚΟΦ
E. coli	ΕΛΟΤ EN ISO 9308-1:2014	1 cfu/100mL	ANALYSIS-ΔΕΛΚΟΦ
Εντερόκοκκοι	ΕΛΟΤ EN ISO 7899-2:2000	1 cfu/100mL	ANALYSIS-ΔΕΛΚΟΦ

Πίνακας 4. Αναλυτικές μέθοδοι και όρια ανίχνευσης

## 5. Αποτελέσματα

### 5.1 Πισίνα Α — Εξωτερική 60 m<sup>3</sup>

#### 5.1.1 Παραπροϊόντα Απολύμανσης

Παράμετρος	Αποτέλεσμα	Όριο Αναφοράς	Ανώτ. Νομοθ. Όριο	Αξιολόγηση
Trichloromethane (Χλωροφόρμιο)	< 1,0 µg/L	1,0 µg/L	—	< ορίου ανίχν.
Bromodichloromethane	< 1,0 µg/L	1,0 µg/L	—	< ορίου ανίχν.
Dibromochloromethane	< 1,0 µg/L	1,0 µg/L	—	< ορίου ανίχν.
Tribromomethane (Bromoform)	8,6 µg/L	1,0 µg/L	—	Ποσοτικοποιήθηκε
ΤΗΜ (άθροισμα)	8,6 µg/L	—	Ενδεικτικό όριο αναφοράς — απαιτείται επιβεβαίωση προτύπου	Χαμηλό εύρημα ΤΗΜ — όχι πλήρης αξιολόγηση DBPs
Chloroacetic acid (MCAA)	< 5,0 µg/L	5,0 µg/L	—	< ορίου ανίχν.
Bromoacetic acid (MBAA)	< 5,0 µg/L	5,0 µg/L	—	< ορίου ανίχν.
Dichloroacetic acid (DCAA)	< 5,0 µg/L	5,0 µg/L	—	< ορίου ανίχν.
Dibromoacetic acid (DBAA)	62,2 µg/L	5,0 µg/L	—	Ποσοτικοποιήθηκε
Trichloroacetic acid (TCAA)	42,2 µg/L	5,0 µg/L	—	Ποσοτικοποιήθηκε
Λοιπά HAAs (4 ενώσεις)	< 5,0 µg/L	5,0 µg/L	—	< ορίου ανίχν.
Σύνολο HAAs (ποσοτικοπ.)	104,4 µg/L	—	—	—

Πίνακας 5. Αποτελέσματα χημικής ανάλυσης Πισίνας Α — VELTIA Labs 02/10/2024 (Αρ. 15-891/2024)

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ** — Κυριαρχία Bromoform: Το μοναδικό ποσοτικοποιημένο ΤΗΜ ήταν Bromoform (8,6 µg/L) έναντι Chloroform < 1,0 µg/L. Σε πισίνες ΤCCA χωρίς εξωτερική προσθήκη βρωμιούχων, αυτό υποδηλώνει παρουσία βρωμιούχων ιόντων (Br-) στο νερό τροφοδοσίας — πιθανώς από το δίκτυο ύδρευσης της περιοχής. Το φαινόμενο αξίζει επιβεβαίωσης με ανάλυση βρωμιούχων στο νερό δικτύου.

## 5.1.2 Μικροβιολογικοί Δείκτες

Παράμετρος	Αποτέλεσμα	Μέθοδος
Αριθμός αποικιών 36°C	Μη ανιχνεύσιμος (N.D.)	ΕΛΟΤ EN ISO 6222:1999
Αριθμός αποικιών 22°C	Μη ανιχνεύσιμος (N.D.)	ΕΛΟΤ EN ISO 6222:1999
Ολικά κολοβακτηριοειδή	Μη ανιχνεύσιμος (N.D.)	ΕΛΟΤ EN ISO 9308-1:2014
E. coli	Μη ανιχνεύσιμος (N.D.)	ΕΛΟΤ EN ISO 9308-1:2014
Εντερόκοκκοι	Μη ανιχνεύσιμος (N.D.)	ΕΛΟΤ EN ISO 7899-2:2000

Πίνακας 6. Μικροβιολογικά αποτελέσματα — ANALYSIS-ΔΕΛΚΟΦ 06/10/2023 (Κωδ. 4101/10/231003)

## 5.2 Πισίνα Β — Εσωτερική 100 m<sup>3</sup>

### 5.2.1 Αποτελέσματα πριν και μετά την παρέμβαση

Παράμετρος	Πριν (NaOCl)	Μετά (TCCA)	Μεταβολή
Κατανάλωση χημικού/μήνα	50 L NaOCl (~55 kg)	200 g TCCA	-99,6% κατά μάζα
Ενεργό Cl <sub>2</sub> εισαγόμενο/μήνα	~5.500 g Cl <sub>2</sub>	~180 g Cl <sub>2</sub>	-96,7%
Ενεργό Cl <sub>2</sub> (mg/L/ημέρα)	~1,83 mg/L/ημέρα	~0,060 mg/L/ημέρα	-96,7%
Ελεύθερο χλώριο (FC)	1,0–1,5 mg/L	0,3–0,7 mg/L	Μειώθηκε
Combined Chlorine (CC)	Υψηλό (εκτ.)	0,1–0,2 mg/L	Σημαντική μείωση
Οσμή χλωρίου	Παρούσα	Μη ανιχνεύσιμη	Δεν αναφέρθηκε μετά την παρέμβαση
Βιοϋμένιο φίλτρου/τοιχωμάτων	Παρόν / οπτικά παρατηρήσιμο	Χωρίς οπτικές ενδείξεις (2,5 χρόνια)	Μη εργαστηριακά επιβεβαιωμένο
Μικροβιολ. δείκτες	N.D.	N.D.	Διατηρήθηκε
CYA (μετρηθέν)	0 mg/L	~30 mg/L	Σταθεροποίηση
Αλλαγή νερού	Τακτική	1η στα 2,5 χρόνια	Δραστική μείωση

Πίνακας 7. Συγκριτικά αποτελέσματα Πισίνας Β πριν και μετά αντικατάσταση NaOCl με TCCA

**ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΗ — Απουσία μετρήσεων DBPs για Πισίνα Β μετά παρέμβαση:** Δεν πραγματοποιήθηκε χημική ανάλυση THMs/HAA5 μετά την αντικατάσταση. Τα αναμενόμενα επίπεδα μπορούν μόνο να εκτιμηθούν θεωρητικά βάσει: (α) μείωσης εισαγόμενου Cl<sub>2</sub> κατά 96,7%, (β) χαμηλού CC, (γ) απουσίας οπτικών ενδείξεων βιοφίλμ. Η εκτίμηση αυτή δεν έχει εργαστηριακή επιβεβαίωση και δεν πρέπει να παρουσιάζεται ως αποτέλεσμα μέτρησης.

## 6. Συζήτηση

### 6.1 Ερμηνεία Χαμηλών THMs στην Πισίνα A

Η τιμή TTHM 8,6 µg/L (αποκλειστικά Bromoform) είναι συνεπής με τη συνδρομή τεσσάρων πιθανών μηχανισμών:

- Χαμηλή δοσολογία Cl<sub>2</sub> (0,47 mg/L/ημέρα), η οποία πιθανώς συνέβαλε σε χαμηλότερη παραγωγή THM υπό τις συγκεκριμένες συνθήκες
- Ηλιακή UV ακτινοβολία και εξωτερική λειτουργία, που μπορούν να επηρεάζουν τη συγκέντρωση πτητικών THMs μέσω πτητικοποίησης και φωτοχημικών διεργασιών
- Χαμηλό οργανικό φορτίο λόγω περιορισμένης χρήσης και απουσίας οπτικών ενδείξεων βιοφίλμ
- Κυριαρχία Bromoform, εύρημα συμβατό με πιθανή παρουσία Br<sup>-</sup> στο νερό τροφοδοσίας. Η υπόθεση αυτή χρειάζεται επιβεβαίωση με άμεση ανάλυση βρωμιούχων.

### 6.2 Ερμηνεία Επιπέδων HAAs

Τα HAAs 104,4 µg/L (DBAA 62,2 + TCAA 42,2 µg/L) αποτελούν το πιο σημαντικό σημείο τεχνικής προσοχής του dataset. Η τιμή υπερβαίνει το όριο EPA για πόσιμο νερό (HAA5 ≤ 60 µg/L), το οποίο αναφέρεται αποκλειστικά ως ενδεικτικό σημείο σύγκρισης, καθώς δεν υπάρχει εναρμονισμένο ευρωπαϊκό ή ελληνικό όριο για HAAs σε νερό πισίνας. Η σύγκριση με όρια πόσιμου νερού δεν είναι άμεσα εφαρμόσιμη, επειδή τα πρότυπα έκθεσης και οι οδοί πρόσληψης διαφέρουν ουσιαστικά. Παρ' όλα αυτά, το εύρημα δείχνει ότι η χαμηλή σταθερή χλωρίωση μπορεί να συνδέεται με χαμηλά THMs υπό συγκεκριμένες συνθήκες, αλλά δεν αρκεί από μόνη της για τον πλήρη έλεγχο μη πτητικών HAAs όταν υπάρχουν βρωμιούχα ή οργανικοί πρόδρομοι.

- Κυριαρχία DBAA (βρωμιούχα): εύρημα συνεπές με πιθανή παρουσία Br<sup>-</sup> στο νερό τροφοδοσίας — απαιτείται άμεση μέτρηση για επιβεβαίωση
- Παρουσία TCAA: εύρημα συμβατό με χλωρίωση και παρουσία οργανικών προδρόμων
- Απουσία DCAA (< 5 µg/L): ασυνήθιστο για χλωριωμένη πισίνα· πιθανές εξηγήσεις είναι η χαμηλή δόση Cl<sub>2</sub>, η χημεία βρωμιούχων και οι ειδικές συνθήκες δειγματοληψίας
- HAAs: λόγω χαμηλής πτητικότητας τείνουν να παραμένουν στο νερό και να συσσωρεύονται· συνεπώς απαιτούν ξεχωριστή παρακολούθηση και δεν πρέπει να αξιολογούνται μόνο μέσω THMs

### 6.3 Ο Ρόλος του Καθαρού Φίλτρου ως Ανεξάρτητος Παράγοντας

Δεν παρατηρήθηκαν οπτικές ενδείξεις βιοφίλμ στο μέσο φιλτραρίσματος και στα τοιχώματα κατά την επιθεώρηση, όμως δεν πραγματοποιήθηκε εργαστηριακή επιβεβαίωση. Το εύρημα αυτό μπορεί να αποτελεί ανεξάρτητο παράγοντα μείωσης πρόδρομων οργανικών ενώσεων, πέραν της δοσολογίας χλωρίου. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Hansen et al., 2012), το βιοφίλμ φίλτρου μπορεί να λειτουργεί ως αποθήκη DOC που τροφοδοτεί συνεχώς το νερό με πρόδρομες ενώσεις DBP. Η πιθανή συνεισφορά του στην παρούσα περίπτωση παραμένει εκτίμηση και χρειάζεται εργαστηριακή επαλήθευση.

### 6.4 Ερμηνεία Μείωσης 96,7% Κατανάλωσης Ενεργού Χλωρίου

Στη συγκεκριμένη εγκατάσταση, η μετάβαση από το προηγούμενο σχήμα NaOCl σε πρωτόκολλο

ελεγχόμενης χαμηλής δοσολογίας TCCA συσχετίστηκε με μείωση του εισαγόμενου ενεργού χλωρίου κατά 96,7%. Το αποτέλεσμα δεν πρέπει να αποδοθεί αποκλειστικά στο είδος του απολυμαντικού, αλλά στο συνολικό λειτουργικό πρωτόκολλο, στο χαμηλό φορτίο χρηστών, στη σταθεροποίηση CYA, στη θερμοκρασία λειτουργίας και στις ειδικές συνθήκες της εγκατάστασης.

## 7. Περιορισμοί

1. Περιορισμένο dataset: Δύο πισίνες μίας γεωγραφικής περιοχής. Δεν επαρκεί για στατιστικά σημαντικά συμπεράσματα.
2. Χαμηλό φορτίο χρηστών: Τα αποτελέσματα ισχύουν για  $\leq 10$  χρήστες/ημέρα. Δεν γενικεύονται άμεσα σε δημόσιες εγκαταστάσεις.
3. Μονή δειγματοληψία χημική (Πισίνα Α): Δεν καταγράφηκε χρονική εξέλιξη DBPs κατά τη διάρκεια της ημέρας ή της σεζόν.
4. Απουσία DBPs μετά παρέμβαση (Πισίνα Β): Δεν υπάρχουν εργαστηριακές μετρήσεις THMs/HAA5 μετά αντικατάσταση NaOCl με TCCA.
5. Ώρα δειγματοληψίας 09:00: Αντιστοιχεί στην ελάχιστη ημερήσια τιμή. Απογευματινές τιμές εκτιμώνται υψηλότερες κατά 50–100%.
6. Βρωμιούχα ιόντα: Η παρουσία Br<sup>-</sup> στο νερό δικτύου δεν μετρήθηκε — εκτίμηση βάσει κυριαρχίας Bromoform στα THMs.
7. Μη μέτρηση DOC/TOC: Η συγκέντρωση διαλελυμένου οργανικού άνθρακα δεν μετρήθηκε άμεσα.
8. CT υπολογισμός απλοποιημένος: Χρησιμοποιήθηκε turnover time — όχι υδραυλικός χρόνος παραμονής (HRT) που είναι πιο ακριβής.

## 8. Συμπεράσματα

Βάσει των αποτελεσμάτων και υπό τις αναφερόμενες συνθήκες, εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η εφαρμογή σταθερής χαμηλής δοσολογίας TCCA (0,47 mg/L/ημέρα) σε εξωτερική πισίνα χαμηλού φορτίου συσχετίστηκε με TTHM 8,6 μg/L και HAA5 104,4 μg/L. Τα THMs ήταν χαμηλά, ενώ τα HAA5 ήταν αυξημένα έναντι του ενδεικτικού ορίου EPA για πόσιμο νερό (HAA5  $\leq 60$  μg/L). Το εύρημα δείχνει ότι THMs και HAA5 πρέπει να αξιολογούνται χωριστά.
2. Τα THMs αποτελούνταν αποκλειστικά από Bromoform, εύρημα που υποδηλώνει πιθανή παρουσία βρωμιούχων ιόντων στο νερό τροφοδοσίας. Η υπόθεση χρειάζεται επιβεβαίωση με άμεση ανάλυση Br<sup>-</sup>.
3. Οι μικροβιολογικοί δείκτες (5 παράμετροι) ήταν μη ανιχνεύσιμοι στις διαθέσιμες αναλύσεις. Το αποτέλεσμα είναι θετικό για τις συγκεκριμένες συνθήκες, αλλά δεν αποτελεί γενική τεκμηρίωση λειτουργίας σε χαμηλό FC, ιδίως επειδή το εκτιμώμενο CT<sub>effective</sub> βρίσκεται κάτω από συντηρητικά σημεία αναφοράς.
4. Στην Πισίνα Β, η μετάβαση από NaOCl σε ελεγχόμενο πρωτόκολλο TCCA συσχετίστηκε με μείωση εισαγόμενου ενεργού χλωρίου κατά 96,7%, χαμηλό CC (0,1–0,2 mg/L), μη ανιχνεύσιμους μικροβιολογικούς δείκτες και απουσία οπτικών ενδείξεων βιοφίλμ για 2,5 χρόνια.
5. Η απουσία οπτικών ενδείξεων βιοφίλμ στο μέσο φιλτραρίσματος μπορεί να αποτελεί παράγοντα μείωσης πρόδρομων οργανικών ενώσεων και DBPs. Επειδή δεν έγινε

εργαστηριακή επιβεβαίωση, το εύρημα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως τεχνική παρατήρηση και όχι ως ποσοτικοποιημένη απόδειξη.

6. Τα αποτελέσματα δεν γενικεύονται άμεσα σε εγκαταστάσεις υψηλού φορτίου ή δημόσιας χρήσης χωρίς επαναλαμβανόμενες χημικές και μικροβιολογικές μετρήσεις, άμεση μέτρηση Br<sup>-</sup> και DOC/TOC, καθώς και έλεγχο συμμόρφωσης με την ισχύουσα νομοθεσία.

## 9. Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

- Μέτρηση DBPs στην Πισίνα Β μετά παρέμβαση — εργαστηριακή επαλήθευση θεωρητικής εκτίμησης
- Εφαρμογή πρωτοκόλλου σε δημόσιες πισίνες μέτριου φορτίου (50–200 χρήστες/ημέρα) με πλήρη μέτρηση παραμέτρων
- Ανάλυση βρωμιούχων ιόντων (Br<sup>-</sup>) στο νερό τροφοδοσίας — επιβεβαίωση υπόθεσης Bromoform
- Μέτρηση DOC/TOC παράλληλα με DBPs — ποσοτικοποίηση της συσχέτισης
- Σύγκριση φίλτρου άμμου vs υαλοβάμβακα ως προς ανάπτυξη βιοφίλμ και DBPs
- Χρονοσειρά μετρήσεων DBPs (πρωί/μεσημέρι/απόγευμα) για χαρτογράφηση ημερήσιας διακύμανσης

## 10. Βιβλιογραφία

- [1] World Health Organization (2022). Guidelines for Safe Recreational Water Environments, Vol. 2: Swimming Pools and Similar Environments. Geneva: WHO. ISBN 978-92-4-156785-0.
- [2] Richardson S.D. et al. (2010). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water. *Mutation Research*, 636(1–3), 178–242. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.09.001>
- [3] Chowdhury S. et al. (2014). Disinfection by-products in swimming pool: Occurrences, implications and future needs. *Water Research*, 53, 68–109. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.017>
- [4] Kanan A. & Karanfil T. (2011). Formation of disinfection by-products in indoor swimming pool water. *Water Research*, 45(16), 5084–5092. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.07.016>
- [5] Hansen K.M.S. et al. (2012). Particles in swimming pool filters — does pH determine the DBP formation? *Chemosphere*, 87(3), 325–331. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.12.001>
- [6] Manasfi T. et al. (2017). Identification of disinfection byproducts in freshwater and seawater swimming pools and evaluation of genotoxicity. *Environment International*, 103, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.03.025>
- [7] White G.C. (1999). Handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants, 4th Ed. New York: Wiley.
- [8] Wojtowicz J.A. (2001). Effects of cyanuric acid on pool water chemistry. *Journal of the Swimming Pool and Spa Industry*, 4(2), 17–22.
- [9] Montana Department of Public Health and Human Services (DPHHS). Cyanuric Acid in Swimming Pools. <https://dphhs.mt.gov/assets/publichealth/FCS/PublicSwimmingPools/CyanuricAcid.pdf>
- [10] VELTIA Labs (2024). Έκθεση Δοκιμών Αρ. 15-891/02.10.2024/GR. Εργαστήριο Περιβάλλοντος Σίνδου. [Αρχείο εσωτερικής τεκμηρίωσης]
- [11] ANALYSIS-ΔΕΛΚΟΦ Α.Ε. (2023). Πιστοποιητικό Ανάλυσης Κωδ. 4101/10/231003, 06/10/2023. Κοπανός Νάουσας. [Αρχείο εσωτερικής τεκμηρίωσης]
- [12] Amusement Logic (2024). Biofilm in swimming pools — formation, effects and prevention. <https://amusementlogic.com/general-news/biofilm-in-swimming-pools/>
- [13] CDC (2023). Healthy Swimming — Operating Public Pools. <https://www.cdc.gov/healthy-swimming>

## Νομική Επιφύλαξη

---

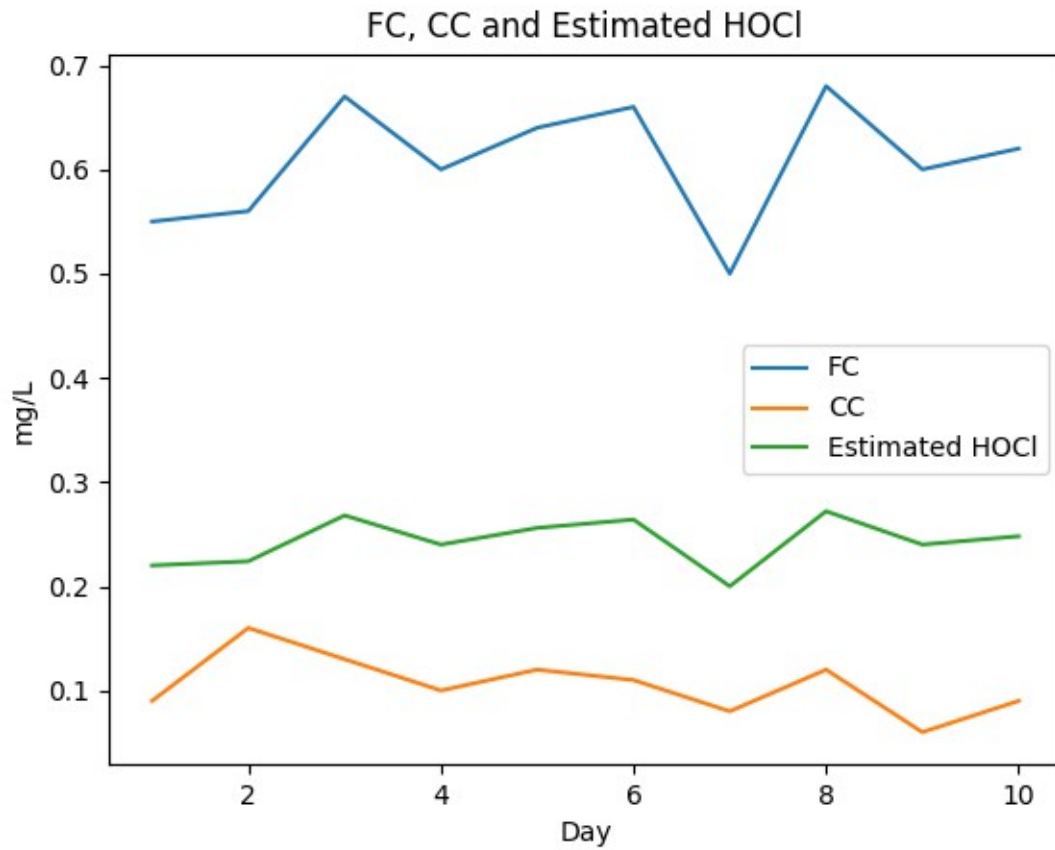
Το παρόν τεχνικό λευκό βιβλίο εκδίδεται από την PoolDesign για ενημερωτικούς και επιστημονικούς σκοπούς. Δεν αποτελεί καθολική οδηγία λειτουργίας κολυμβητικών δεξαμενών, σύσταση μείωσης υπολειμματικού χλωρίου ή υποκατάστατο των εθνικών απαιτήσεων λειτουργίας.

Κάθε εφαρμογή απαιτεί:

- (α) συμμόρφωση με την ισχύουσα εθνική και ευρωπαϊκή νομοθεσία,
- (β) αξιολόγηση από αρμόδιο τεχνικό ή μηχανικό,
- (γ) εξατομικευμένη ανάλυση των παραμέτρων της συγκεκριμένης εγκατάστασης,
- (δ) εργαστηριακή επαλήθευση όπου οι συνθήκες διαφέρουν από τις δύο περιπτώσεις που παρουσιάζονται.

Η PoolDesign δεν φέρει ευθύνη για εφαρμογές που δεν έχουν προηγουμένως αξιολογηθεί κατά τα ανωτέρω.

## Παράρτημα Α — Ενδεικτική Χρονοσειρά FC, CC και Estimated HOCl



**Σημείωση:** Η χρονοσειρά είναι ενδεικτική και χρησιμοποιείται αποκλειστικά για οπτικοποίηση της σχέσης FC, CC και εκτιμώμενου HOCl. Δεν αποτελεί πλήρη εργαστηριακή χρονοσειρά DBPs ή άμεση μέτρηση HOCl.