

Elektroklórozás lehetőségének vizsgálata hálózathidraulikai modelleken

Salamon Endre

Nemzeti Közzolgálati Egyetem, Víz tudományi Kar, Vízellátási és Környezetmérnöki
Intézet

6500 Baja, Bajcsy-Zsilinszky utca 12-14.

Bevezetés

Az elektroklórozás napjainkra elfogadott és hatásos fertőtlenítési eljárássá vált. A gyakorlatban megvalósított eljárások nagy többsége klorid-ionokat magas koncentrációban tartalmazó oldatból állítja elő a tömény hipoklorit oldatot, melyet a kezelendő vízhez kevernek. Amennyiben a hipoklorit oldat elektrolízissel történő előállításához felhasznált sólé maga is sótalanított vízből készül és tiszta nátrium-klorid oldatnak tekinthető, úgy a melléktermék képződés kockázata alacsony. Azonban a valóságban nem feltétlenül ez a helyzet, hiszen például fordított ozmózisos tengervíz sótalanítás esetén gazdaságosabb lehet a keletkező koncentrátumot elektrolízisnek alávetni, mintsem az értékes permeátumból sóoldatot készíteni.

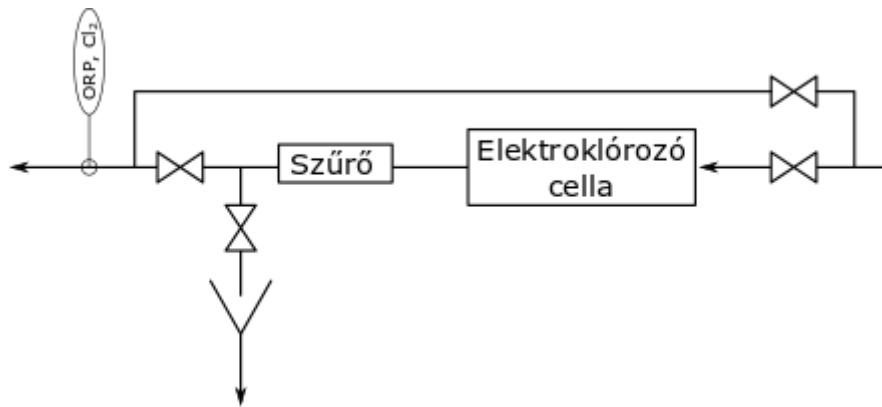
Mindezek miatt legalább elméleti szinten érdemes megvizsgálni azt az alternatívát, amikor maga a fertőtlenítendő víz folyik át az elektrolizáló cellán, miközben csak annyi aktív klór képződik, amennyi a hálózatba táplált vízben szükséges (0,1-1 mg Cl₂/L). Ettől az elrendezéstől a következő előnyök várhatóak:

- Az alacsony klórtartalom mellett kevesebb fertőtlenítési melléktermék keletkezik, szemben azzal a megoldással, amikor az elkeveredés ideje alatt a tömény hipoklorit oldat érintkezik a kezelendő vízzel.
- Az egyszeri átfolyással működő elektrolizáló cellában az elektrolízis során kevesebb melléktermék keletkezik, mint amikor a tömény sóoldat elektrolízise történik, magas tartózkodási idő mellett.
- A berendezés automatikusan képes üzemelni, a pH és redoxpotenciál vagy az aktív klór on-line mérése segítségével.
- Az egyszeri átfolyással lehetséges olyan elrendezést kialakítani, ahol az átfolyó víz sebessége és a turbulencia csökkenti az elektródok felületére történő lerakódásokat.

Az elrendezés várható hátrulütői a tömény sólé elektrolízisével szemben:

- A kisebb térfogat és rövidebb tartózkodási idő miatt az elektrolízis hatásfoka várhatóan kevesebb lesz.
- A elektrolízis során keletkező, kicsapódó anyagok (oxidált vas, mangán, pH növekedés miatt kalcium és magnézium sók) szükséges lehet egy szűrő alkalmazása a berendezés után. Ennek karbantartása, időszakos tisztítása bonyolítja az üzemeltetést.

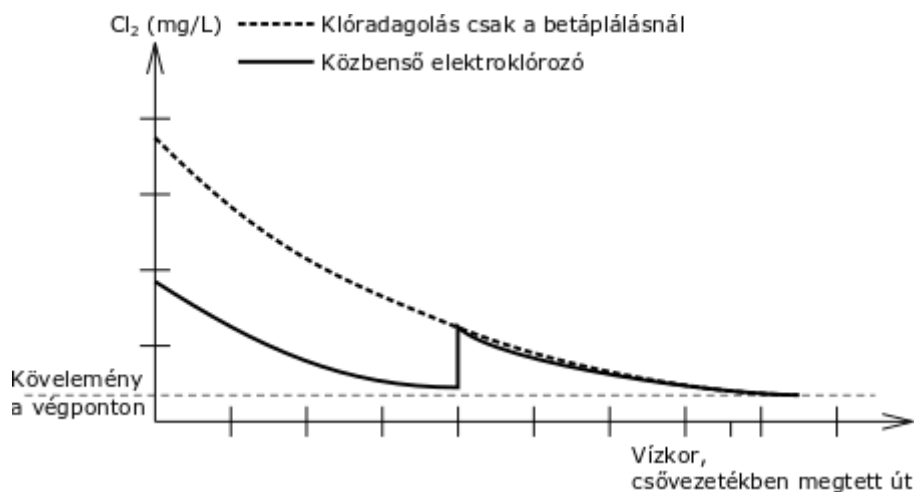
Egy ilyen megoldás vizsgálatához javasolt kísérleti elrendezést mutat az 1. ábra. Az időszakos tisztításhoz az elektrolizáló cella és a hozzá tartozó szűrő kizárható, leüríthető, illetve vegyszeres tisztításhoz feltölthető. (Folyamatos működéshez a karbantartás idejére két részre osztott cella lenne szükséges).



1. ábra: Egyszeri átfolyással működő elektroklórozó cella vizsgálati elrendezés

Az elektrolizáló cella kis térfogata és a hozzá tartozó elektronika méretei lehetővé teszik, hogy akár magának a vízellátó hálózat közbenső pontján vagy éppen a szolgáltatási pont után az ingatlanon belül is elhelyezésre kerülhessen. Ilyen módon csökkenteni lehet a hálózatban az aktív klór koncentráció térbeli egyenetlenségeit, azaz nem szükséges a betáplálási ponton olyan magas aktív klór tartalmat biztosítani, ha a pangó szakaszok előtt egy elektroklórozóval a szükséges szintre tudjuk emelni az aktív klór koncentrációját.

Ennek a megoldásnak az egyik előnye, hogy a hálózatba összességében betáplált klór mennyisége csökkenthető, az aktív klór hasznosulása javul és várhatóan a melléktermékek mennyisége is csökken. A 2. ábra szemlélteti ezt az alapelvet.



2. ábra: Koncentráció profil közbenső elektroklórozóval

Természetesen ahhoz, hogy ez a valóságban is kivitelezhető legyen az elektroklórozás helyének kiválasztáshoz igen pontosan ismernünk kell a fertőtlenítőszer koncentráció és a vízkor térbeli eloszlását a hálózaton. Ez hálózathidraulikai és vízminőségi modellezéssel lehetséges. .

1. Aktív klór és melléktermékek mennyiségének vizsgálata, rendelkezésre álló adatok

A klórt már 1847. óta (Bitton, 2014) hatékonyan használják az ivóvíz előállításánál, ezért koncentrációjának csökkenését leíró összefüggésekről rendelkezésre állnak adatok a szakirodalomban. A számítógépes vízminőségi modellezés során meg kell adni a vizsgálni kívánt vegyületek időbeli átalakulását leíró egyenleteket. A klór esetében az egyéb klórral reagáló vegyületektől függetlenül általában a klór fogyását szokás vizsgálni, úgy hogy a befolyásoló tényezők az egyenletben a sebességi állandó értékén keresztül jelennek meg. A klórfogyás sebessége a vízterben elsőrendű kinetikát követ (Rossman, 2000):

$$r(t) = \frac{dC(t)}{dt} = -K_b \cdot C(t)$$

$$C(t) = \int_0^t r(t) dt = C_0 \cdot e^{-K_b t}$$

Ahol r a klórfogyás sebessége, dimenziója tömeg/(térfogat·idő), C az aktív klór koncentrációja (mg/L), K_b a sebességi állandó (a klórfogyást elsőrendű reakcióként értelmezve dimenziója: idő⁻¹). K_b értéke széles határok között változhat a befolyásoló tényezőktől függően (vízhőmérséklet, redukáló anyagok mennyisége, turbulencia). A gyakorlatban a klór fogyását nem feltétlenül a fenti elsőrendű reakció írja le a legjobban, hanem törtrendű reakcióként is leírható. Egyes esetekben a törtrendű összefüggés jobban közelíti a mérési eredményeket. (Monteria et al., 2014)] Létezik ezen felül két komponensű, másodrendű kinetikát használó modell (2R modell). Ez két komponenst vesz figyelembe, gyorsan és a lassan redukáló frakciókat, annak ellenére, hogy ezeket nehéz a gyakorlatban elkülöníteni és kalibrációra felhasználni. (Fisher, 2011) A szilárd–folyadék határfelületen lejátszódó reakciók (például aktív klór reakciója a cső falát borító biofilmen) leírása bonyolultabb, hiszen figyelembe kell venni a diffúziót is, aminek segítségével a klór eljut a szilárd felületig.

A klórfogyás vizsgálatához a modellben egy egyszerű elsőrendű kinetika került felvételre, a klórfogyás sebességi állandójának $K_b = 0,0208 \text{ 1/h} = 0,5 \text{ 1/d}$ értékekkel lett beállítva. A trihalometán képződés modellezéshez a szakirodalomban fellelhető, egyik legegyszerűbb modellt használtuk fel. Ezek szerint a képződött trihalometán mennyisége egyenesen arányos az elfogyasztott klór mennyiségével, az alábbi egyenlet szerint (Kavanaugh et al., 1980 és Smith, 2007):

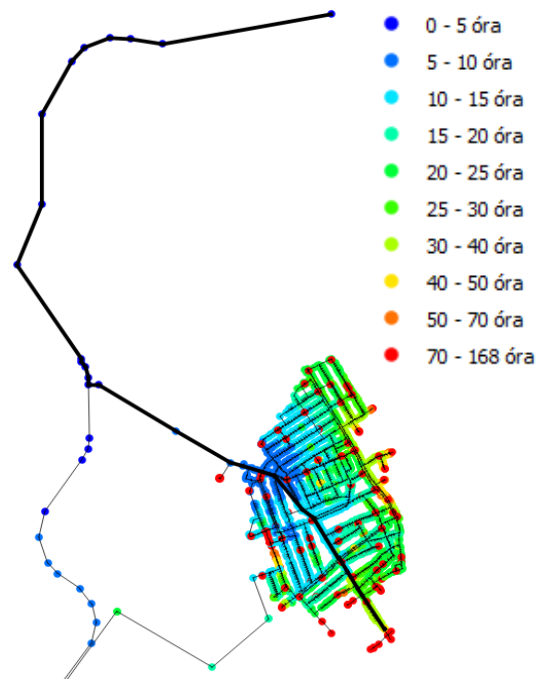
$$\Delta THM = D \cdot \Delta C_{Cl_2}$$

Ahol ΔC a klórkoncentráció csökkenése adott idő alatt, ΔTHM pedig a THM koncentráció növekedése, D pedig a konverziós tényező ($\mu\text{g THM} / \mu\text{g Cl}_2$). (Cristo et al., 2014) Ez természetesen egyszerűsítő, tapasztalati összefüggés, azonban arra alkalmas, hogy a THM képződés érzékenységét vizsgáljuk a vízminőségi modellek segítségével.

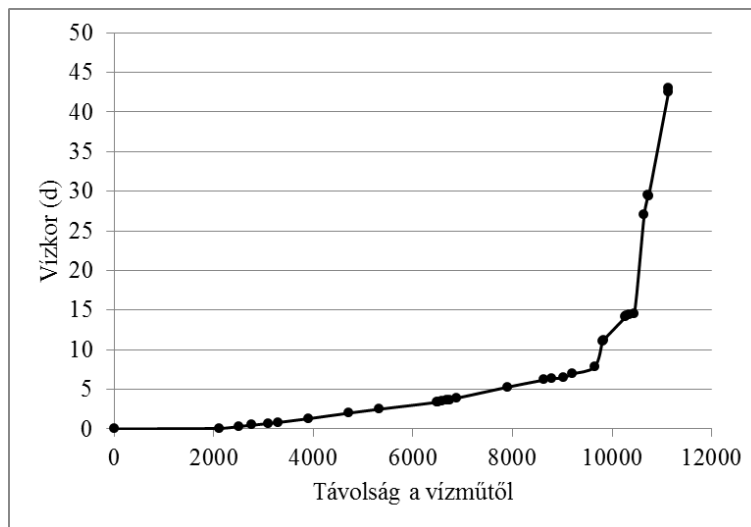
A vizsgálatokhoz egy korábban szakdolgozat keretében vizsgált település EPANET-ben elkészített hidraulikai modellje került felhasználásra. (Czakó, 2017) A modell bekötési vízmérőig tartó részletességű, tartalmazza a tűzcsapokat és közkifolyókat, 4362 csomópontból és 4426 összekötő élből (csőből) áll. A tűzcsapokon vízkivétel nincs, így ott a vízkor a modell futatási idejével egyezik meg (ezek a képen piros színnel jelennek meg). A 3. ábrán látható az elosztóhálózat és a jellemző vízkor.

Ugyancsak a 3. ábrán került feltüntetésre az a nyomvonal, amely mentén az aktív klór koncentrációjának csökkenését és a THM koncentrációjának növekedését vizsgáltuk. A nyomvonal a vízműtől indul és olyan bekötési vízmérőben ér véget, ahol a vízkor 43 órára becsülhető, a vízműtől a vizsgált pontig megtett út hossza 11140 m. A nyomvonal ennek megfelelően először egy regionális távvezetéken halad keresztül, ahol az állandó egyirányú vízmozgás miatt a vízkor mindig minimális, majd a településre annak északnyugati részén lép be. Itt a vízkorok még mindig alacsonyak, azonban ahogy a nyomvonal a település végéhez közeledik, a végágaknál a vízkor drasztikusan megemelkedik, ahogyan azt a 3. ábrán is látható. Az ilyen típusú ábrák a térinformatika elemzésekben rejlő további lehetőségekre is felhívják a figyelmet, elsősorban a kockázat pontosabb értékeléséhez: a vízkorokat és a hozzá tartozó bekötési vízmérők adatait elemezve megállapítható lenne, hogy a településen belül a

lakosság hány százaléka érintett kedvezőtlenül az elosztóhálózaton belüli vízminőség változásokkal.



3. ábra: Vízkor és vízminőség hossz-szelvény nyomvonala



4. ábra: Vízkor a nyomvonal mentén a megtett távolság függvényében

A vízminőségi modellezéshez az EPANET programot és annak MSX (multi-species extension) kiterjesztését használtuk fel. A bementi adatokat a 4. ábra szemlélteti. Az ebben leírtak a következő egyenleteknek felelnek meg:

$$\frac{dCL2}{dt} = -K1 \cdot CL2$$

$$\frac{dCCL2}{dt} = K1 \cdot CL2$$

$$\frac{dTHM}{dt} = K2 \cdot CCL2$$

Ahol a CL2 változó az aktív klór koncentrációja ($\mu\text{g/L}$), a CCL2 az időegység alatt elfogyasztott klór mennyisége (gyakorlatilag megegyezik az elsőrendű reakció bal oldali tagjának ellentettjével). THM a képződött trihalometán koncentrációja, K2 pedig a korábban felírt egyenlet D állandója, amely megadja hogy egységnyi mennyiségű klór fogyása közben mennyis THM keletkezik értékét az irodalomban rendelkezésre álló adatok alapján $0,45 \mu\text{g/mg}$ -ra vettük fel. (Cristo et al., 2015)

```
[TITLE]
THM formation

[OPTIONS]
AREA_UNITS M2           ;Surface concentration is mass/m2
RATE_UNITS HR           ;Reaction rates are concentration/hour
SOLVER RK5              ;5-th order Runge-Kutta integrator
TIMESTEP 3600           ;300 sec (5 min) solution time step
RTOL 0.001              ;Relative concentration tolerance
ATOL 0.0001             ;Absolute concentration tolerance

[SPECIES]
BULK CL2 UG             ;Active chlorine
BULK CCL2 UG            ;Consumed active chlorine
BULK THM UG             ;THM
BULK AGE UG             ;vízkor

[COEFFICIENTS]
CONSTANT K1 0.0208      ;Chlorine decay rate
CONSTANT K2 0.045       ;THM yield coeff ug tHM / ug DCL2
CONSTANT K3 1           ;Age

[PIPES]
;Chlorine decay
RATE CL2 -K1*CL2
;Calculation of COnsumed Chlorine
RATE CCL2 K1*CL2
;THM formation
RATE THM K2*CCL2
;Age
RATE AGE K3

[TANKS]

[SOURCES]
;Initial conditions (= 0 if not specified here)
SETPOINT 3969 CL2 300

[QUALITY]
;Initial conditions (= 0 if not specified here)
NODE 4363 CL2 300 vagy 500

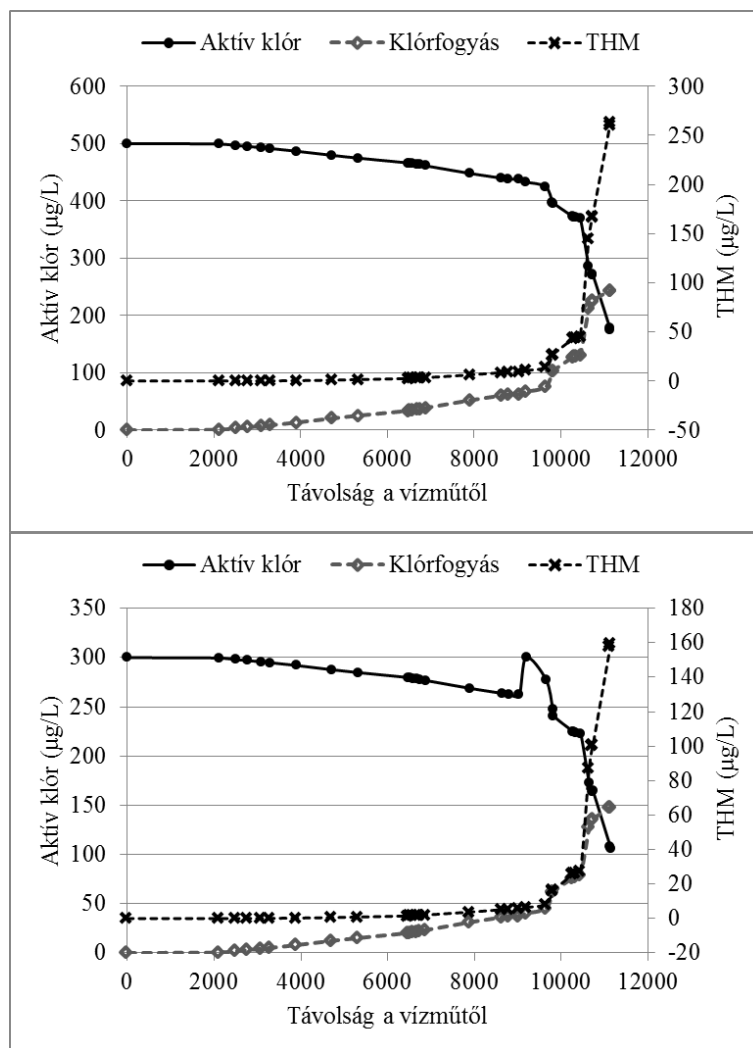
[REPORT]
NODES 4363 549 546 543 540 538 536 534 532 529 526 523 520 4079 4080 4081
4082 2408 4068 3969 3960 3895 4065 3769 3720 3718 3715 4097 3711 3710 3517 3516
SPECIE CL2 YES
SPECIE CCL2 YES
SPECIE THM YES
SPECIE AGE YES
```

4. ábra: MSX kiterjesztés bemenő adatai

A vízminőségi modellezés során kétféle modell futtatása történt meg. Az első változatban 0,5 mg/L aktív klór koncentrációval kerül betáplálásra a víz egyetlen ponton, a vízműnél. Ennek felel meg a [QUALITY] szakasz „NODE 4363 CL2 300,„ sora, amikor az 500 µg/L érték szerepel benne. A második üzemállapotban a vizsgált nyomvonalon 9190 m távolságban levő pontra egy elektroklórozót feltételeztünk, amely a csomópontból kifolyó vízben az aktív klórtartalmat 0,3 mg/L értéken tartja („SETPOINT 3969 CL2 300” sor) és a vízműnél is csak 0,3 mg/L a betáplált víz aktív klórtartalma.

2. Eredmények

A kétféle megoldás futtatási eredményeit az 5. ábra mutatja be. Az alsó grafikonon látható, hogy a végágon előálló magas vízkor miatt hiába emeltük fel az aktív klórtartalmat ismét 0,3 mg/L-re, a végpontban 0,1 mg/L értékre csökkent, szemben a kezdőponton történő klórozással, amikor 0,2 mg/L-ig csökkent csak le az érték. Ehhez persze az is hozzátartozik, hogy az első esetben a 9190 m-nél az aktív klórkoncentráció 0,43 mg/L volt, míg a második esetben éppen 0,1 mg/L-el alacsonyabb.



5. ábra: THM és aktív klór változása egy- és két ponton történő klórozásnál

A két eredményt összevetve megállapítható, hogy az első esetben az aktív klór koncentrációja mintegy 0,3 mg/L-el csökkent a végpontig, miközben a kezdeti koncentráció 0,5 mg/L volt. A második esetben ez a csökkenés csak 0,2 mg/L (0,3-ról 0,1-re), amihez hozzátartozik 0,05 mg/L koncentrációnövelés a kezdeti 0,3-hoz képest. Ez utóbbi koncentráció eléréséhez azonban figyelembe kell venni, hogy a hálózat közbenső pontján csak kisebb vízhozamban

történik a klór bevitele. A megtakarítás így konzervatívan 10-30%-ra becsülhető. Természetesen a teljes értékeléshez nem csak egy kiválasztott végpontot és útvonalat kellene vizsgálni hanem a hálózat egészét. Ez a rendelkezésre álló informatikai eszközökkel lehetséges és a különböző optimalizálási feladatoknak csak a kalibrációhoz rendelkezésre álló adatok és programozási képességek szabnak határt.

A THM mennyiségére kapott eredményeket vizsgálva megállapítható, hogy a több ponton történő klóradagolással és kisebb aktív klór koncentráció különbségekkel rendelkező hálózat esetében a végponton a THM koncentrációja mintegy 30%- kisebb (260 µg/L-hez képest csak 160 µg/L). Ez itt a modellben természetesen csak egy feltételezett adatokból nyert eredmény, de a csökkenési tendencia mindenképpen ígéretes.

3. Összefoglalás

A gazdaságosabb fertőtlenítőszer felhasználás és a melléktermék képződés szempontjából előnyösebb ha a hálózat több pontján történik a klóradagolás és a klórkoncentrációban kisebbek a térbeli egyenetlenségek. Az elektroklórozás, mint kis kompakt és jól automatizálható technológia ígéretes alternatíva az ilyen fertőtlenítési stratégia megvalósításához. A gyakorlati megvalósításig még számos akadályt kell leküzdeni, nem csak az az elektroklórozó eszközök fejlesztése terén, hanem a hálózathidraulikai és vízminőségi modellezés során is.

Köszönetnyilvánítás

A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap (ESZA) társfinanszírozásával valósul meg (a támogatási szerződés száma: EFOP-3.6.1-16-2016-00025, projekt címe: A vízgazdálkodási felsőoktatás erősítése az intelligens szakosodás keretében).

The Project is supported by the European Union and co-financed by the European Social Fund (grant agreement #: EFOP-3.6.1-16-2016-00025, project title: Strengthening higher education in water management through intelligent specialization).

Felhasznált irodalom

- BITTON, G.: Microbiology of drinking water distribution, Hoboken: John Wiley and Sons, 2014.
- ROSSMAN, L.A.: EPANET 2 Users manual, Cincinnati: U.S. Environmental protection Agency, 2000.
- MONTERIO, L.; FIGUEIREDO, D.; DIAS, S.; FREITAS, R.; COVAS, D.; MENAIA, J.; COELHO, S.T.: Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX; Periodica Engineering 70 (2014) 1192-1200. o.
- FISHER, I.; KASTL, G.; SATHASIVAN, A.: Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems; Water Research 45 (2011) 4896-4908. o.
- CRISTO, C. Di; LEOPARDI, A.; QUINTILIANI, C.; MARINIS, G. de, 2015. Drinking water vulnerability assessment after disinfection through chlorine. Procedia Engineering (2015) pp. 389 – 397
- M.C. KAVANAUGH, A.R. TRUSSEL, J. CROMER, R.R. TRUSSEL: An empirical kinetic model of trihalomethane formation: applications to meet the proposed THM standard, J. Am. Water Works Assoc., 72 (10) (1980), 578-582.
- C. SMITH: Chlorine residual as a predictor of trihalomethane values, Water Distribution Systems Analysis Symposium, 1-6. (2007)
- C. Di CRISTO, A. LEOPARDI, G. de MARINIS (2014), Assessing measurement uncertainty on trihalomethane prediction through kinetic models in water supply systems, Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA In Press.
- CZAKÓ, Dávid. 2017. Algyő vízellátó hálózatának hidraulikai vizsgálata. Baja : Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Víz tudományi Kar, Vízellátási és Környezetmérnöki Intézet, 2017.