

IVÓVÍZHÁLÓZAT FEJLESZTÉSE INTELLIGENS ELEKTROKLÓROZÓ RENDSZER ÉS FERTŐTLENÍTŐSZER-ADAGOLÁS OPTIMALIZÁCIÓ ALKALMAZÁSÁVAL

BIBOK ATTILA, TÓTH ZSOLT

FŐVÁROSI VÍZMŰVEK ZRT.

SÁNDOR DÁNIEL BENJÁMIN, SZABÓ ANITA, KOVÁCS LILLA

INNO-WATER ZRT.

KONCSOS TAMÁS

BME, VÍZI KÖZMŰ ÉS KÖRNYEZETMÉRNÖKI TANSZÉK

Az ivóvízellátás az egyik legfontosabb alap-infrastruktúra az emberek életének és szociális tevékenységeinek biztosítására. Amennyiben az ivóvízbázis minősége szükségessé teszi, a víziközmű üzemeltetőnek és az ellátásért felelősnek törekednie kell a kitermelt víz minőségének javítására a megfelelő tisztítási technológia alkalmazásával. Ezzel párhuzamosan kezelni kell a hálózati vízminőségromlás kockázatát, mely a külső szennyezésekből és a víz-hálózatban előforduló anyagokkal való reakciókból ered.

A fertőtlenítés az egyik legfontosabb kezelési eljárás annak érdekében, hogy mikrobiológiai szempontból megőrizzük az ivóvíz biztonságát. Másrészt nagy figyelmet kapnak a fertőtlenítés melléktermékei, amelyek a fertőtlenítőszer és a vízben oldott anyagok reakciói során keletkeznek. Közismert tény, hogy néhány ilyen melléktermék karcinogén hatású. Mivel azonban a vízzel terjedő fertőzések rövid idő alatt kiterjedt károkat tudnak okozni, a mikrobiális biztonság érdekében történő fertőtlenítés mindig a legmagasabb prioritást kell, hogy élvezze.

A csapvízben lévő elegendő mennyiségű maradék klór biztosításával csökkenthető a mikrobiológiai fertőzés kockázata, a víztisztító teleptől egészen a felhasználóig. Ez a minimum érték szabad klórra jellemzően 0,05 mg/l. Jelenleg a vízelosztó rendszerekben a maradék fertőtlenítőszer szintjének fenntartására vonatkozó általános - a Fővárosi Vízművek Zrt. által is alkalmazott - gyakorlat a koncentrált fertőtlenítőszer (klór) adagolása a víztisztító telepek kibocsátási pontján, esetleg a hálózat néhány főbb pontján elhelyezkedő gépháznál. A betáplálási

ponton tartott magas (0,2-0,3 mg/l) klórdózis által a hálózat távolabbi pontjain is elegendő maradék klór koncentráció biztosítható, azonban a módszer számos hátránnyal is bír: a víztisztító telephez közel elhelyezkedő fogyasztókhoz magas fertőtlenítőszer tartalmú víz érkezik, ami íz és szag problémákat okozhat a lakosság számára, számolni kell a fertőtlenítési melléktermékek nagy arányú képződésével, valamint értelemszerűen a fertőtlenítés költségei is annál magasabbak, minél nagyobb dózisú fertőtlenítőszer alkalmazása szükséges.

A projekt céljai

A víztisztítás és ivóvízelosztás feladatkörében központi kérdés tehát a másodlagos szennyeződések és a hálózati vízminőségromlás megakadályozása, azaz a megfelelő fertőtlenítőszer-koncentráció megtartása a hálózat teljes területén, a fertőtlenítési melléktermékek képződésének minimalizálása, valamint a fogyasztók irányából érkező, a víz organoleptikus tulajdonságaira vonatkozó elvárásokkal szemben. A magyar-izraeli együttműködéssel, az Inno-Water Zrt., a Fővárosi Vízművek Zrt., a Nemzeti Közzolgálati Egyetem és a CQM részvételével a TÉT_15_IL program keretében megvalósuló SMARTCHLOR (OKOSKLÓR) projekt egy olyan intelligens klórozó berendezés és hálózatüzemeltetési rendszer kifejlesztését célozta meg, amely ezen problémákra keresi a megoldást.

A projekt problémafelvetései között szerepelt, hogy miként alakítható ki előnyösebb alternatívája a jelenlegi üzemeltetési gyakorlatban alkalmazott, az ivóvízhálózat betáplálási pontjain koncentrált,

nagy dózisú fertőtlenítőszer adagolásnak, melynek elve, hogy felesleges mennyiségben adja hozzá a rendszerhez a klórt annak érdekében, hogy a maradék klór tartalom a hálózat legtávolabbi pontján is elérje a hatóságilag előírt szintet. Következő kérdés volt az izraeli partner (CQM) által fejlesztett, elektroklórozás elvén alapuló berendezés alkalmazhatósága a budapesti ivóvízhálózatban: lehet-e reális alternatívája az elektroklórozás a biztonságtechnikai szempontból nem optimális klórgáz adagolásnak, illetve a biztonságosabbnak tekinthető, de szintén vegyszer szállítását és helyszíni tárolását igénylő hypo adagolásnak. További cél volt annak meghatározása, hogy milyen paraméterek alkalmazásával és hatásuk matematikai leírásával alakítható ki olyan klór-adagolási eljárás, mely az adott vízhálózat konkrét vízminőségi, hidraulikai, vízfogyasztási sajátosságaira optimalizált fertőtlenítést tesz lehetővé.

A projekt keretében új módszertant és klórozási rendszerkonceptiót fejlesztettünk, amit modelszámítások és különböző léptékű kísérletek eredményei alapján teszteltünk és finomhangoltunk együttműködésben az izraeli partnerrel. Egy olyan innovatív módszertant fejlesztettünk ki, amely figyelembe veszi a szolgáltatott ivóvíz vízminőségi paramétereit, mennyiségét, a víz várható tartózkodási idejét az egyes csőhálózati szakaszokon, a hálózathidraulikai viszonyokat, az üledékképződést és üledékmozgást, illetve a csőfalon lévő biofilmmel való reakciókat.

A jelen tanulmány elsősorban a fejlesztett eljárás, algoritmusrendszer módszertanával foglalkozik, nem tér ki a projekt keretein belül elvégzett minden laboratóriumi vagy félüzemi kísérlet

ismertetésére, az alkalmazott elektoklórozó berendezés működésének, illetve az ezzel kapcsolatos kísérletek bemutatására, a kidolgozott egyenletek, és ezek matematikai hátterének részletezésére.

Az alkalmazott, illetve a projekt során kifejlesztett módszertan

A SMARTCHLOR projekt végrehajtásának első lépéseként szükségünk volt az aktív klór koncentráció hálózatban történő csökkenését leginkább befolyásoló vízminőségi paraméterek, hálózati sajátosságok, környezeti körülmények azonosítására. A projekt első szakaszában részletes szakirodalmi kutatást végeztünk a rendelkezésre álló nemzetközi és hazai szakirodalmi eredmények, publikációk felhasználásával. A kutatás legfőbb célja a beadagolt szabad aktív klór koncentrációjának hálózatban történő változásait leíró módszertan meghatározásához szükséges alapismeretek összegyűjtése volt, azaz az aktív klór koncentráció változását befolyásoló legfontosabb vízminőségi paraméterek és környezeti körülmények meghatározása. A szakirodalmi adatok alapján arra a megállapításra jutottunk, hogy a hálózati klórfogyásra legnagyobb hatást a vízminőségi paraméterek közül a víz vas-, mangán- és ammóniumtartalma, a hálózati üledék, a környezeti paraméterek közül a pH, hőmérséklet, légtérrel való kapcsolat, a víztér nyugalma gyakorolják.

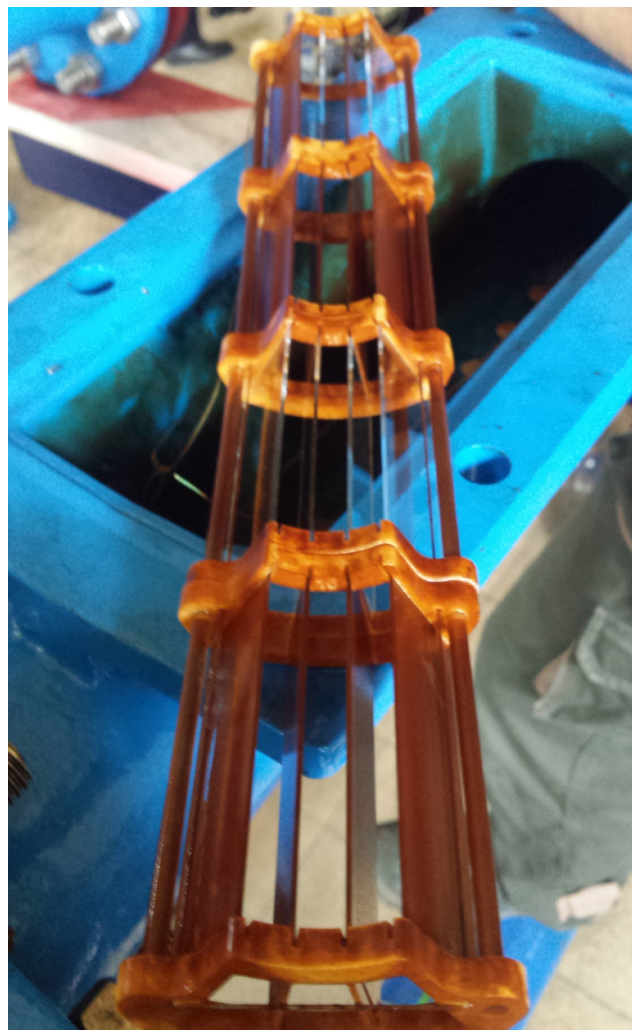
A kifejlesztett számítási módszertanunk alapja, hogy az ivóvízben előforduló, a szakirodalmi adatok alapján a hálózati klórfogyásra

legnagyobb hatást gyakorló különböző komponensek klórreakcióinak pontos ismeretében, és ezek kinetikai leírását követően számíthatóvá válik a víz összetételének függvényében a klórfogyás. Annak érdekében, hogy összefüggéseket határozzunk meg a fenti paraméterek és a klórfogyás között, laboratóriumi kísérletsorozatot hajtottunk végre. Többek között vizsgáltuk azt, hogy különböző külső, fizikai körülmények mellett hogyan alakul a klórfogyás sebessége. Ezen tartamhatás vizsgálatok során az aktív klór fogyásának időbeli vizsgálatára került sor különböző kísérleti paraméterek mellett. Vizsgáltuk a párolgás által okozott klór koncentráció változást, a nyugvó- és rázatott közeg hatását, a pH és a hőmérséklet befolyását a klórfogyásra, illetve azt, hogy hogyan alakul a klórfogyás desztillált vízben, illetve csapvízben. A tartamhatás kísérletek mellett célzottan meghatározott szervesetlen szennyezők (vas, mangán és ammónium) klórreakcióit vizsgáltuk, végül az üledék szervesanyag tartalmának klórfogyásra gyakorolt hatását tártuk fel. A vizsgálatok során előre meghatározott időközönként különböző koncentrációjú ammónium, vas, mangán, illetve üledék minták aktív klór tartalmát vizsgáltuk annak érdekében, hogy nyomon tudjuk követni a klórfogyás időbeli lefutását.

Laboratóriumi kísérleteink kiterjedtek az ivóvízhálózat csőfalain kialakult biofilmréteg klórfogyásra gyakorolt hatásának vizsgálatára is. A biofilm szerepének feltárása két különböző kísérletsorozat végrehajtásával történt meg. Az első kísérletsorozatban célunk a biofilmek klórfogyásra gyakorolt hatásának a vízcsövek anyagától és egyéb fizikai tulajdonságaitól

(érdesség, átmérő, csőben előforduló üledék stb.) függetlenül történő vizsgálata volt. A budapesti ivóvízhálózat elemeit szimuláló félüzemi berendezés, az ún. Hálózati Modell Berendezés (HMB) több csőszakaszába beépítésre került egy tárgylemeztartó eszköz, amelyben 76x26 mm-es üveg tárgylemezekre élő csőhálózatra jellemző áramlási viszonyokhoz és oldottanyag tartalomhoz alkalmazkodott biofilm rakódott le (1. ábra). Ezek a tárgylemezek az eltávolításukat megelőzően 1–5 évvel kerültek behelyezésre a vízművi berendezésbe, így a felületeiken képződött biofilmrétegek stabilnak tekinthetők, a kialakult szerkezetek a megvastagodások és a leválások ciklusai szempontjából egyensúlyi állapotúak. A tárgylemezek a csőszakaszokból eltávolítva egyszerűen vizsgálhatóak laboratóriumi környezetben, így lehetővé vált a biofilm – csőtulajdonságoktól független – klórfogyásra gyakorolt hatásának vizsgálata.

A második kísérletsorozat nem a szeparált biofilm, hanem a teljes csőanyag tulajdonságait, fertőtlenítőszer koncentrációra gyakorolt hatását volt hivatott feltárni. Tanulmányoztuk a budapesti „élő” ivóvízhálózatból származó csőszakaszok biofilmlerakódásainak klórfogyasztását. Ezeket a csőszakaszokat üzemzavarelhárítás (pl. csőtörés) esetén bontották ki a hálózathoz. Ezek kiemelését követő szállítása és a kísérleti berendezésbe beszerelést megelőző tárolása ivóvízben történt, így azok reprezentálják a valós hálózat mikroflóráját. Az élő bevonat klórfogyasztásának vizsgálatához a mintacsőszakaszokkal átfolyásos biofilm-reaktorokat építettünk, amelyekhez kétféle csőanyagot (azbesztcement, kemény polietilén) és háromféle csőméretet (NÁ 100 mm, NÁ 240 mm, NÁ 150

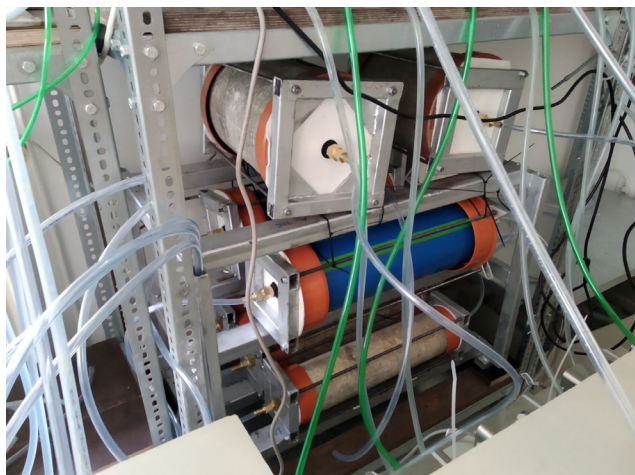


1. ábra – A Hálózati Modell Berendezésbe (HMB) beépített tárgylemeztartó eszköz

mm) használtunk fel (2. ábra). A kísérleti csőreaktorok felhasználásával kétféle elrendezés és mérési módszer szerint valósult meg az ivóvízhálózati csövek biofilmjeinek klórfogyasztás-vizsgálata. A többféle módszer alkalmazása lehetőséget nyújtott azok megbízhatóságának értékelésére is.

Folyamatos klórméréssel klórfogyasztási csúcsokat tudtunk vizsgálni, mintavételekkel pedig ezek ereszkedő szakaszait. Így ismert hibahatárral

tudtuk megállapítani az összefüggések feltárásához szükséges, valós áramlások melletti klórfogyás értékeket: egységnyi elkeveredési vízmennyiségre vonatkoztatott klórdózis alapján, egységnyi csőhossz és nedvesített csőfelület szerint, valamint egységnyi biofilmtömeg alapján.



2. ábra – A különböző alkalmazott reaktortípusok

A fentiek alapján kidolgoztunk egy olyan, új megközelítésű algoritmus-rendszert, amely alkalmas a hálózat különböző pontjain kialakuló aktív klór koncentráció számítására és előrejelzésére az ivóvíz szerves és szerves szennyezőanyag tartalmának, illetve a csőhálózat és a rajta kialakult biofilm tulajdonságainak ismeretében. A felépített egyenlet-rendszerrel a célunk egy komplex fertőtlenítési stratégia és a folyamatirányítási rendszer megalkotására, ehhez pedig szükséges, hogy a megalkotott algoritmust integráljuk a hálózathidraulikai modellbe, lehetővé téve ezzel az ivóvízhálózat bármely pontjára történő szabad aktív klór koncentráció számítását.

Budapest ivóvízhálózatának vezérelt modellje a Bentley Systems által fejlesztett WaterCad

szoftverben került felépítésre. Ez egy kalibrált és validált modell, folyamatosan frissülő terepi mérési adatokkal, mely alkalmas Budapest ivóvízhálózatán végzett hidraulikai és vízminőségi modellezési feladatok, számítások elvégzésére. A projekt során célunk volt, hogy a fejlesztett klórfogyást modellező algoritmus-rendszer egy vízminőségi számítási modulként beépíthetővé váljon a hálózati modellbe. A fejlesztett modul beépítésére az alkalmazott WaterCad szoftver azonban nem ideális, mivel - minden előnye ellenére - ez egy zárt forráskódú, licenz-köteles, nehezen bővíthető szoftver. A projekt célok megvalósítása érdekében a hálózati modellt az US EPA (United States Environmental Protection Agency) által létrehozott, nyomás alatt lévő vízhálózatok hidraulikai és vízminőség szempontból történő modellezésére alkalmas számítógépes szimulációs szoftverben, az EPANET-ben. A nyílt forráskódú szoftverhez tartozik egy kiegészítés, amely lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy saját kémiai/fizikai/biológiai reakcióegyenleteket építhessenek be a programba, így az EPANET-ben szinte korlátlan interakciós képességgel számtalan vegyület közötti kölcsönhatás modellezhető. A két szoftver különböző felépítése és működése következtében, annak érdekében, hogy a modell átültetése lehetővé váljon, bizonyos átalakításokat kellett elvégezni a modellen, ugyanis az EPANET nem támogatja a nyomásvezérelt frekvenciaváltós szivattyúk alkalmazását. Erre jelenleg nyílt forrású megoldó nem érhető el. A vízhozamok tekintetében az EPANET motor alkalmazása konzisztens eredményeket ad, azonban a nyomásviszonyok esetében az EPANET motorral számított eredmények nem megbízhatók, még

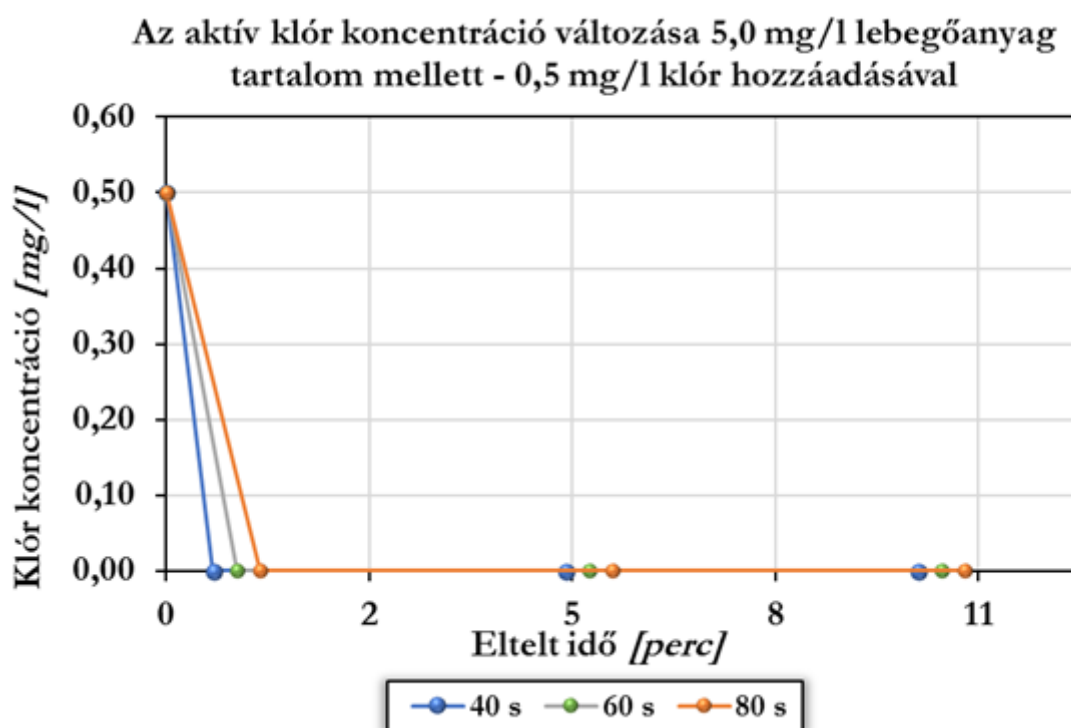
vezérléssel módosított szivattyúk esetén sem, hiszen az ún. affin görbéket nem képes követni a megoldó. Továbbá az EPANET nem támogatja a párhuzamosan kötött, frekvenciaváltós szivattyúkat tartalmazó ún. „Variable speed pump battery” (VSPB) elemet. A Fővárosi Vízművek Zrt. hálózatában több gépházban is találhatók ilyen gépek, főként a budai területeken, ahol nagy a minimális és maximális órai vízigény közt a különbség. Ezen kívül az EPANET csak a szigorúan monoton csökkenő jelleggörbéket támogatja, míg a WaterCAD elfogad nem szigorúan monoton csökkenő multipoint jelleggörbéket. A Fővárosi Vízművek Zrt-nél a szivattyú jelleggörbék felvétele a szivattyúk helyszíni bemérése alapján történik, mely görbéket rendszeresen frissíti a Víztermelési Osztály (VTO). Ezek a mért jelleggörbék nem feltétlenül szigorúan monoton csökkenők. Így a modell EPANET kompatibilis formába hozásának első lépéseként el kellett végezni azokat az átalakításokat a modellen, amelyek lehetővé teszik, hogy az EPANET számológatómotorja tudja kezelni a felépített modellt. Ehhez a mért, nem feltétlenül szigorúan monoton csökkenő szivattyú jelleggörbék javítására, manuális korrekciójára volt szükség. Bár ennek következtében a valóságtól eltérő jelleggörbét adunk meg a modellnek, jelentős hibát a számítás során ez nem indukál, mivel a változások mértéke csekély, továbbá a módosított tartományban a szivattyú csak rövid ideig működik. A megfelelő korrekciókat és átalakításokat követően az EPANET számológatómotor már képes lesz beolvasni és kezelni a megadott adatokat. A modellépítés záró lépéseként elvégeztük a modell kalibrációját, biztosítva, hogy az EPANET szoftverrel elvégzett hidraulikai számítások

folyamán az eltérő számológatómotor ellenére is ugyanazon eredményeket kapjuk, mint a már kalibrált modellel.

Az EPANET bővítménye, az EPANET MSX lehetővé teszi, hogy az általunk fejlesztett algoritmus-rendszert egy külön modulként integráljuk a hálózati modellbe. Vízminőség-modellezési szempontból két fizikai fázist különít el: egy úgynevezett mobil „bulk” fázist és fix csőfelülethez köthető fázist. A bulk fázisú kémiai vagy biológiai komponensek transzport folyamatban vesznek részt, és a hálózatban a pillanatnyi vízsebességgel haladnak. A vezeték felszínéhez kapcsolódó modellezett komponensek nem mozdulnak el. Ez a rendszer alkalmas arra, hogy mind az általunk vizsgált szerves és szervetlen szennyezők (vas, ammónium, mangán, lebegőanyag), mint a csőfalon képződött biofilm aktív klór koncentrációra gyakorolt hatását leíró egyenleteket implementáljuk.

A laboratóriumi kísérletek egyik legfontosabb eredménye az volt, hogy a hálózatban jelen lévő szabad aktív klór koncentrációját legjelentősebb mértékben a hálózati üledék, pontosabban annak felkeveredése tudja befolyásolni. Az eredmények azt mutatták, hogy egy ilyen -az áramlási sebesség megemelkedéséből adódó - üledékfelkeveredés nagyon rövid időn belül (10 perc) a klórkoncentráció drasztikus lecsökkenését eredményezi. Ezért a hálózati klórfogyás modellezése során különös figyelmet kell szentelnünk az üledék viselkedésének (3. ábra). A fejlesztett vízminőségi számítási modell ezért kiegészítésre került egy üledéktranszportot és üledékképződést leíró modullal, melynek

üledék-transzport folyamatok leírására. Az előállt egyenletek szintén az EPANET MSX modulban kerültek implementációra, így a hidraulikai számításokkal lehetővé téve, hogy meghatározható legyen, hogy a hálózat mely pontján történhet felkeveredés, ezáltal a maradék klór koncentráció drasztikus lecsökkenése. Ennek a modulrészletnek a hálózat kritikus részeinek feltárásában van kiemelkedő jelentősége.



3. ábra -Az aktív klór korrigált koncentráció változása az Álmos utcában vett üledékmintában, 5,0 mg/l kezdeti lebegőanyag és 0,5 mg/l kezdeti klór koncentráció mellett (a különböző színű görbék a minták rázatási idejében térnek el)

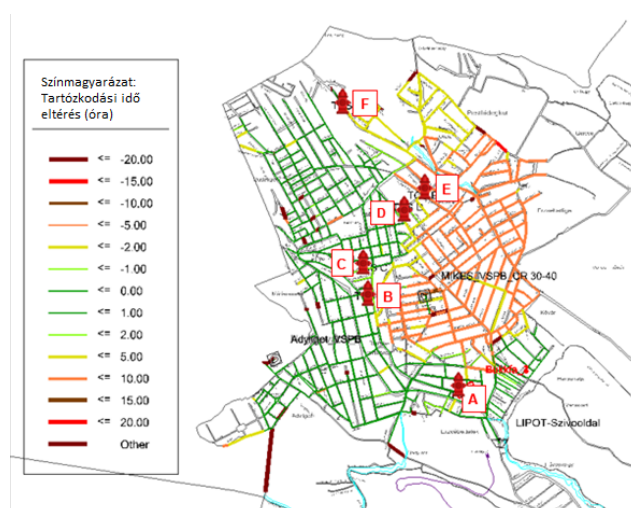
A fentiek alapján tehát kidolgoztunk egy modellt, amely áll egy üledékképződési és transzport modellből, mely leírja a vezetékekben felhalmozódó üledék mozgását, felkeveredését, kiülepedését, valamint egy vízminőségi modellből, mely leírja a klórkoncentráció változását az oldott vas, mangán és ammónium, valamint az üledék szervesanyagtartalmának függvényében, a két modellt pedig összekötöttük a hálózathidraulikai modellel. Ezután a számítási módszertan

kalibrációjára és validációjára volt szükség, melyeket a hálózaton elvégzett kampányszerű mérések tettek lehetővé.

Mivel a hálózat modellezését csak korlátozott számú mintavétel alapján tudjuk elvégezni, szükség volt olyan mintaterületek kijelölésére, ahol az átlagosan megfigyelhető tartózkodási idők jellemzők, illetve egyéb szempontból is reprezentatívnak tekinthető a részterület a hálózat

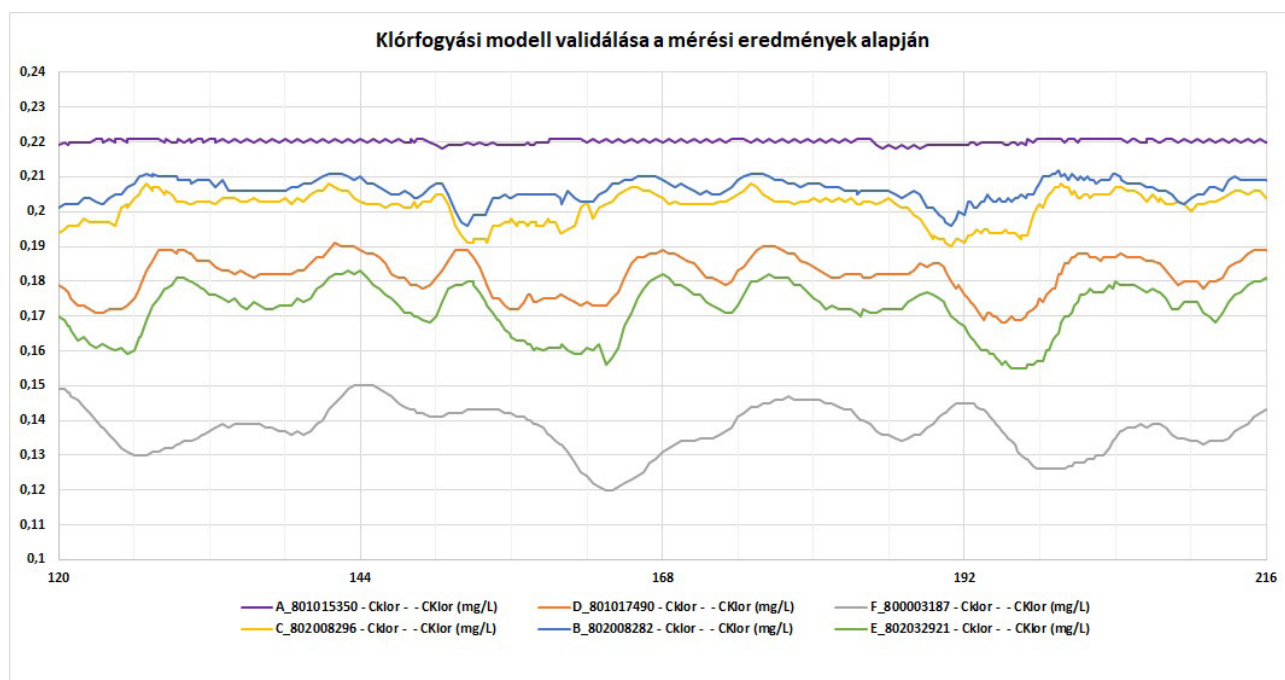
egészére vonatkozóan. A hidraulikai modell segítségével lehatároltuk azokat a mintaterületeket, ahol a hálózaton végzett mérések és vizsgálatok során kapott adatok értelmezhetők és a hálózati paraméterekkel összekapcsolhatók. A mintaterületek kiválasztásához ideális feltételekkel rendelkező, általunk kiválasztott zónák: Pest-szentlőrinc, Pesthidegkút és Szigetszentmiklós voltak. A mintaterületek hidraulikájának részletes megismerését lehetővé tevő modellfutattásokat végeztünk. Kidolgoztunk egy mintavételi programot minden mintaterületre, amely során a hálózat különböző pontjain jellemző aktív klór koncentrációk és vízminőségi paraméterek monitorozására került sor. A vizsgálat az alábbi lépésekből tevődött össze: a hálózat sajátosságainak ismeretében és a kiválasztott területen várható tartózkodási idők függvényében kidolgoztunk egy mintavételi stratégiát, amely alapján a kijelölt mintavételi pontokon ismert tartózkodási idejű víz mintázására volt lehetőség; ezt követően végrehajtottuk a mintavételt, a kijelölt pontokon megmértük az aktívklór koncentrációt, lefedve az előzetes számítások alapján releváns időtartamot, amibe várhatóan beleesik a vizsgált vízdugó érkezése az adott pontra; következő lépésben a mérési kampány után az utólagosan már rendelkezésünkre álló vízfogyasztási adatok alapján meghatározzuk a víz pontos tartózkodási idejét az egyes mintavételi pontokon, ezáltal minden mérési eredményünkhöz pontos tartózkodási időt tudtunk rendelni (4. ábra). Ezáltal pontos információt nyertünk arról, hogy a hálózat adott területén hogyan változott időben az aktív klór koncentrációja. Elvégeztük az adott területekre az EPANET szoftverben felépített modellel történő futtatásokat és az integrált

klórreakciókkal végzett számításokat, és a mért és számított eredmények összevetése által lehetővé vált a modul kalibrációja és validálása. Az 5. ábrán a különböző színű görbék az egyes tűzcsapoknál mért klórkonzentráció értékeket mutatják, míg a nekik megfelelő színű sávok a modell által (a sávok szélessége és színintenzitása által meghatározott mértékű hibával terhelt) számított értékeket ábrázolják.



4. ábra – A becsült és a tényleges vízkor értékek a mintavételi időszakban a pesthidegkúti mintaterületen

Az aktív klórkonzentrációt számító modul kifejlesztése mellett a projekt célja volt egy olyan módszertan kidolgozása, melynek alkalmazásával tetszőleges ivóvízhálózaton – jelen esetben a budapesti ivóvízhálózaton – beállítható egy optimális fertőtlenítőszer-adagolási rend, melynek eredményeképpen kevesebb fertőtlenítőszer (klórgáz, hypo, vagy elektroklórozás segítségével előállított fertőtlenítőszer) felhasználása szükséges, illetve a maradék fertőtlenítőszer eloszlása a hálózaton belül egyenletesebbé tehető.



5. ábra – A kalibrált modell validálásának eredményei

A kidolgozott módszer részét képezi az olyan területek feltárása, amelyek megtáplálásánál újabb adagolási pontok kialakításával jelentősen javítható a maradék fertőtlenítőszer-ellátottság, ezáltal a vízminőség. A budapesti ivóvízhálózat esetében az újonnan kijelölt fertőtlenítőszer-adagolási pontokat olyan gépházakhoz rendeltük, ahol az izraeli partner által fejlesztett, elektroklórozás elvén alapuló berendezés telepítése lehetséges.

A klóradagolás hálózati optimalizációjának és az újabb adagolási pont kijelölések módszertanának első lépéseként felosztottuk a hálózatot több fertőtlenítőszer adagolási lépcsőre, melyek mindegyikét külön vizsgáljuk. A felosztás elve az volt, hogy egy adott klórozási lépcsőn lévő betáplálás ne legyen hatással az előző klórozási lépcső területeire, így az adott szintekhez tartozó zónákra jellemző fertőtlenítőszer eloszlás egymástól függetlenül vizsgálható legyen. A budapesti

ivóvízhálózaton jelenleg 2 ilyen fertőtlenítési szint azonosítható, és a projekt során meghatároztunk egy 3. szintet, amely az utóklórozási pontok lehetséges telepítési helyeit tartalmazza. Második lépésként minden – jelenleg is működő – szinten (tehát az első és második lépcső esetén) megvizsgáltuk, mennyivel csökkenthető a jelenleg beadagolt fertőtlenítőszer mennyiség úgy, hogy az egyes zónákon ne romoljon a fertőtlenítés mértéke a referencia értékekhez képest. A fertőtlenítőszer-ellátottság mértékét különböző teljesítménymutatókkal (Key Performance Indicator, KPI) jellemeztük, és ezek összevetésével értékeltük az egyes scenáriókat. Összesen 9 különböző KPI-t alkalmaztunk, melyek a következők: a 0,05 mg/l alatti koncentrációval jellemezhető vezetékszszakok száma, átlagos klórkoncentráció, vezetékhosszra vonatkoztatott átlagos klórkoncentráció, vezetékterfogatára vonatkoztatott átlagos klórkoncentráció, klórkoncentrációt

jellemző 90%-os terjedelem, kialakuló koncentrációk időbeli szórása, kialakuló koncentrációk térbeli szórása, kialakuló koncentrációk időbeli relatív szórása, kialakuló koncentrációk térbeli relatív szórása. A teljesítménymutatók alapján nemcsak a fertőtlenítőszer adagolás csökkentésének mértékét tudtuk meghatározni, hanem láthatóvá vált az is, hogy mely pontokon van szükség további fertőtlenítőszer-adagolásra, azaz a 3. klórozási lépcső részét képező utóklórozási pontok telepítésére annak érdekében, hogy az összes beadagolt fertőtlenítőszer mennyisége

kisebb és egyenletesebb legyen, illetve a kritikus területeken vízminőségjavulás is elérhető legyen. A harmadik lépés tehát ezen területek beazonosítása, az utóklórozási pontok kijelölése, és az ezeken a pontokon adagolandó fertőtlenítőszer-mennyiségek kiszámítása volt. A modellel kapott KPI-értékek alapján az I. és II. szinten tartandó szabadaktívklór koncentrációkat az 1. táblázat foglaljuk össze. Ebben sárga és narancssárga színnel jelöltük a jelenleg nem létező, III. lépcsős utófertőtlenítésre javasolt klóradagolási pontokat.

Betáplálás	Zóna neve	Optimális kezdeti klór koncentráció adott zónára [mg/l szabad aktív klór]	Optimális betáplálás II. szint alapján [mg/l szabad aktív klór]	Optimális betáplálás III. szint alapján [mg/l szabad aktív klór]	Csökkenés [mg/l szabad aktív klór]
Káposztásmegyer, Csepel, Békásmegyer	Budai és Pesti alapzóna	0,28		0,28	0,02
Budaörs	Dayka	0,24	0,30	0,24	0,06
	Gazdagrét	0,22			
	Törökugrató	0,30			
Keletpesti felső (Rákosszentmihály, Kőbánya, Gilice)	Keletpesti felső	0,26	0,28	0,26	0,04
	Rákoshegy	0,28			
	Rákoscsaba	0,28			
	Mátyásföld	0,26			
Krisztina	Sashegy	0,30	0,30	0,28	0,02
	Diána	0,22			
	Lipóti	0,24			
	Vári	0,28			
	Svábhegy alsó	0,28			
	vábhegy felső	0,28			
	Svábhegy torony	0,28			
	János-hegy	0,28			
	Pesthidegkút	0,30			
	Budakeszi	0,30			
Budaújlak	Csatárka	0,26	0,26	0,26	0,04
	Ruthén	0,24			
	Felsőjózsefhegy	0,20			

1. táblázat – Az első, második és a javasolt harmadik fertőtlenítési szintek javasolt klórkoncentrációkkal

A projekt végső célja volt, hogy ezeken a kijelölt utóklórozási pontokon a kifejlesztett klórreakció-számítási modul segítségével adaptívan – a vízhasználatához, vízminőség változáshoz igazodva – megfelelő időlépésenként meghatározzuk a szükséges fertőtlenítőszer dózist, ezáltal biztosítva a kiváló vízminőséget. A módszertan alkalmas arra, hogy egy meglévő komplex, számos fertőtlenítőszer-adagolási ponttal rendelkező, több zónából álló ivóvízellátó hálózat klóradozási ütemét észszerűvé és költséghatékonyá tegye, a lakosság számára jobb ízű, megfelelő és egyenletes minőségű ivóvizet biztosítson.

Eredmények, felhasználás

A projekt során kidolgozásra került egy módszertan, mellyel tetszőleges ivóvízhálózaton optimalizálható a fertőtlenítőszer adagolás. Az eljárás a hálózat egymástól hidraulikailag független területekre, szintekre történő felosztásán alapszik, ahol modellszámítások alapján meghatározható az egyes szinteken adagolandó optimális klórmennyiség, illetve kijelölhetők utóklórozási pontok. A módszer alkalmazásával a jelenleg általánosan alkalmazott gyakorlat helyett – miszerint az ivóvízhálózat betáplálásánál történik nagy dózisú fertőtlenítőszer adagolás úgy, hogy a hálózat távolabbi pontjain is elegendő maradjon – több ponton, de kisebb mennyiségű aktív klór adagolása valósul meg, ezzel egyenletesebbé téve a klór koncentrációját a hálózat egészén. A Fővárosi Vízművek Zrt. a kidolgozott módszertan és a projekt során elvégzett számítások alapján,

gazdaságossági számításokkal alátámasztva tervezi kialakítani a jövőben a fertőtlenítési rendjét. A kifejlesztett módszertanon alapuló új szolgáltatás felhasználásával a projekt partnerek más üzemeltetők számára is tudnak tanácsokat adni az optimális fertőtlenítési pontok kijelölésére és ez alapján költséghatékony, többszintű fertőtlenítési stratégia kialakítására akár magas tartózkodási idővel működő hálózatok esetén is. A módszertanhoz kapcsolódóan kifejlesztésre került a klór adagolására optimalizált hálózathidraulikai modell, és egy szintén innovatív vízfogyasztási (és vízkor-) előrejelzési módszertan.

A projekt keretei között kifejlesztettünk egy olyan adaptív, intelligens algoritmusrendszert, amely figyelembe veszi a hálózati víz vízminőségi tulajdonságait, a hálózati üledék képződését, kiülepedését, mozgását, a csőfalon lévő biofilm klórkonzentrációra való hatását, valamint a víz várható tartózkodási idejét. A fejlesztett programmodul bemeneti adatai lehetnek akár on-line mért vízminőségi paraméterek is, a fejlesztett algoritmusok pedig képezhetik egy PLC program számítási motorját, ezáltal a klóradozás közvetlen helyszíni vezérlését valósítva meg. Az algoritmus alkalmazásával elvégezhető a szabad aktív klór koncentrációjának gyakorlati beállítása konkrét adagolási pontokon. Ezáltal a fertőtlenítés reagálni tud a hálózatban kialakuló lokális problémákra, valamint minimalizálhatók a betáplálási klórkonzentrációk úgy, hogy a szolgáltatás színvonala fenntartható legyen. Az algoritmusokat implementáló szoftver jelenleg szabadalmi eljárás alatt áll, és a későbbiekben termékként értékesíthető.

A projekt eredményeket több hazai és nemzetközi fórumon is bemutattuk, különösen élénk érdeklődés mutatkozott a fejlesztések iránt a kínai vízipari szereplők részéről. Az Inno-Water Zrt. és partnercége, a NeWater Kft. a jelenlegi projektől független fejlesztéseinek piacképességét is erősíti a mostani projekt eredmények Kínában történő bemutatása (lásd az Inno-Water Zrt. „A tiszta, egészséges vízi környezet megteremtésének lehetőségei Kínában” c., KKM/8321-3/2018/Adm. sz. és a NeWater Kft. „Innovatív biofilm hordozó hidrogél alkalmazásának vizsgálata kínai szennyvíztisztító telepen” c., KKM/10891-3/2019/Adm. sz. vízdiplomáciai projektek).

A fejlesztett technológia, és különösen az alkalmazott elektroklórozó berendezés további vizsgálata, valamint az „élő” hálózatba történő integrálása érdekében az Inno Water Zrt. és a Fővárosi Vízművek Zrt. közreműködésével új K+F projekt indult, amelynek fő célja a berendezés engedélyeztetésének és az ivóvízhálózatba történő beépíthetőségének vizsgálata.

A 2020-ban lezárult, hároméves projekt során fejlesztett rendszer legfőbb eredményei között említhető, hogy a klórozási pontok és dózisok összehangolt szabályozásával optimalizálja a hálózatban jelen lévő aktív klór koncentrációját, a vízelosztó hálózat valamennyi szakaszán és pontján a stabil és egyenletes klórkoncentrációt biztosít. Az optimalizáció hatására csökken az összességében és egy ponton (hálózat kezdetén) beadagolásra kerülő fertőtlenítőszer mennyiség, ami ezáltal csökkenti az ivóvíz klórozása során keletkező fertőtlenítési melléktermékekkel járó közegészségügyi

kockázatokat, tehát növeli a vízbiztonságot. A csökkentett klórdózisok következtében jelentős mértékben javulhatnak az ivóvíz íz-érzékszervi tulajdonságai, hiszen megszűnik a betáplálási pontok közelében – hálózat elején, nagyobb gépházak után – jelentkező magas klórtartalom, így a lakosság számára is attraktívabbá válik a csapvíz fogyasztása. A kevesebb beadagolt fertőtlenítőszer nem utolsósorban a vízművek üzemeltetési költségeinek csökkentését eredményezi, ami vonzóvá teszi az eljárás és módszertan széleskörű alkalmazását nagyvárosok vagy regionális rendszerek számára. A hálózat teljes kiterjedésében egységesen elegendő szintű fertőtlenítőszer koncentráció biztosításával a módszer alkalmazása hozzájárul a mikrobiológiai kockázatok csökkentéséhez, ami a jelenlegi pandémiás időkben a közműszolgáltató cégek számára a korábbiaknál is hangsúlyosabb feladattá lépett elő. További előnyként említhető, hogy az elektroklórozó berendezések telepítésével jobb munkavédelmi és balesetvédelmi körülmények érhetők el, növeli a stabilitást és a vízbiztonságot vészhelyzetekben (szabotázs, természeti katasztrófák), hiszen nem igényli veszélyes (és belterületen nem tárolható) klórgáz, sem más vegyszer (hypo) tárolását, szállítását, ugyanis az elektroklórozó berendezésnek sóra van szüksége alapanyagként. Az adaptív eljárásnak köszönhetően a fertőtlenítő rendszer alkalmazkodni képes a vízmennyiségi és a vízminőségi változásokhoz, ide értve a napi és szezonális ingadozásokat, a klimatikus változásokat, a parti szűrőű vízbázisok változó vízminőségét.

Köszönetnyilvánítás

A TÉT_15_IL-1-2016-0013 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a MAGYAR-IZRAELI IPARI KUTATÁS-FEJLESZTÉSI CO-FUNDING EGYÜTTMŰKÖDÉSI PÁLYÁZATI PROGRAM (TÉT_15_IL) finanszírozásában valósult meg.

SZERZŐK:



Bibok Attila a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyemen Építőmérnöki karán végzett Infrastruktúra Építőmérnök mester szakon 2015-ben. Ezt követően a Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskolában folytatta tanulmányait, mely mellett a Fővárosi Vízművek műszaki-fejlesztési mérnökeként kamatoztatta hálózathidraulikai ismereteit 2020 végéig. Ez idő alatt a hálózathidraulika modellezés és a vízellátó rendszerek mindennapi üzemeltetési gyakorlata közti kapcsolat fejlesztésén dolgozott számos, sikeres nemzetközi fejlesztési projekt mellett.



Tóth Zsolt építőmérnöki diplomát szerzett 2003-ban a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetemen, vízellátás-csatornázás és környezetmérnöki szakirányon. Az MTA Kihelyezett Kutatóhelyek Irodája támogatásával a BMGE Víziközmű és Környezetmérnöki Karán tudományos segédmunkatársként dolgozott 2003-2006 között, majd a Fővárosi Vízműveknél helyezkedett el műszaki fejlesztési mérnökként. 2015-ben a Mérnökszolgálati osztály osztályvezető-helyettese, 2017-től pedig osztályvezetője lett.