

Szerves mikroszennyezők előfordulása az ivóvízbázisokban és az ivóvízben

A szerves mikroszennyezők potenciálisan megjelenhetnek azokban a vízbázisokban, amelyek az ivóvízellátást biztosítják. Mivel a ma széles körben alkalmazott víztisztítási technológiák egy része nem alkalmas a szerves mikroszennyezők hatékony visszatartására, a humán szervezetbe való jutásuk egyik lehetséges forrása az ivóvíz. Habár az ivóvíz az egyik legszigorúbban ellenőrzött élelmiszer Európában, a minőségét szabályzó rendeletek jelenleg még nem foglalkoznak megfelelő részletességgel a szerves mikroszennyezők kérdéskörével.

Az ivóvízbázisokat veszélyeztető szennyezőanyag-források gyakorlatilag megegyeznek a környezetet általában terhelő forrásokkal, azaz a környezetbe kikerült szennyező anyagok transzmisszió révén eljuthatnak a vízbázisokba is. A legjelentősebb források között az ipari és háztartási szennyvízkibocsátást, a mezőgazdaságot és az állattartást, a hulladékelhelyezést, valamint a közlekedés különféle formáit tartjuk. E szennyező anyagok transzportját az emissziós ponttól az ivóvízbázisok irányába részben környezeti paraméterek határozzák meg: meteorológiai, hidrológiai, földrajzi és geológiai körülmények. Másrészt viszont fontos tényező a víztermelésből adódó vízáramlás, az a mesterségesen keltett vízmozgás, amely a kitermelt víz utánpótlódása következtében alakul ki. E körülmények az egyes vízbázistípusok esetében jelentős eltérést mutatnak, ezért veszélyeztetettségüket mindenképpen célszerű különállóan vizsgálni.

Szerves mikroszennyezők előfordulása felszíni ivóvízbázisokban

Magyarországon 2019-ben összesen 19 felszíni vízbázist tartottunk nyilván, ami két nagyságrenddel kevesebb, mint a felszín alatti vízbázisok száma. Felszíni vízbázisok jellemzően tavak, folyók, tározók lehetnek, hazánkban mindháromra találunk példát. A felszíni vizek vízminőségi paramétereit tekintve jellemző a kolloid méretű szennyező anyagok és a vízben oldott vagy oldhatatlan állapotban lévő szennyezők, szerves mikroszennyezők jelenléte, amelyek kezelése a víztisztítási technológia külön lépcsőjét igényli, így megnövelve az ivóvíztisztítás költségeit. A hazai felszíni ivóvízbázisok vízminősége jónak mondható, a kitermelt nyersvízre épülő technológia fenntartható módon üzemeltethető. A felszíni vizet kezelő technológia egyik lépcsője a membránszűrés, amely megfelelő előkezelést követően alkalmas lehet a szerves mikroszennyezők koncentrációjának csökkentésére is.

A vízben nem oldódó, könnyű fajsúlyú (olajok és származékaik), illetve a víznél nagyobb fajsúlyú, kiüledő szennyező anyagok esetében a szennyező anyagok vertikális eloszlása, rétegződése meghatározó lehet a termelt nyersvíz szennyezettségét illetően, míg a vízben oldódó szennyező anyagok korlátozás nélkül kerülnek a nyersvízhálózatba.

Tekintve, hogy a kezelt és kezeletlen szennyvizek befogadói a legtöbb esetben felszíni vizek, a szerves mikroszennyezők közvetlen megjelenésével lehet számolni. A szennyezés transzmisszió útján is megjelenhet, így jelentős távolságot megtéve eljuthat az emberi tevékenység által közvetlenül nem befolyásolt területekre, ezáltal szinte minden felszíni vízbázisból kimutathatók. Szerves mikroszennyezők vonatkozásában a magyarországi felszíni vizek közül a Balatonról és a Duna

budapesti szakaszáról rendelkezünk a legtöbb adattal, ahol több esetben sikerült e szennyező anyagok jelenlétét kimutatni.

Egy 1999-ben zárult kutatás során a Balatonban és annak vízgyűjtőjén a 134 vizsgált gyógyszermaradványból 69 legalább egy alkalommal detektálható és mennyiségileg meghatározható volt. Többek között nem szteroid fájdalomcsillapítókat, antidepresszánsokat, szív- és érrendszeri gyógyszereket, kábítószerket mutattak ki. E szennyező anyagok stabil, állandó forrása a szennyvízkibocsátás volt, és az elégtelen szennyvízkezelést követően kerültek a befogadódba. Emellett egyértelműen kimutatható volt a turizmus hatása is, amely a rekreációs szerek (koffein) és egyes kábítószer koncentrációjának emelkedésében volt észlelhető a nyári hónapokban [80].

Bár a Duna hazai szakaszán ivóvíz-szolgáltatás céljára felszíni vízkivétel jelenleg nincs, a folyóval közvetlen kapcsolatban álló parti szűrészű vízbázisok miatt a Duna vízminősége mindenképpen meghatározó. Az elmúlt évtizedből származó kutatások a PPCP-vegyületcsoportból (gyógyszerek és kozmetikai termékek vegyületei) ofloxacin, ciprofloxacín, azithromycin, claritromycin jelenlétét mutatták ki, jellemzően 3–40 ng/l koncentrációban [81]. Egy 2017-ben zajlott átfogó kutatás párhuzamosan vizsgált egy Budapest feletti (Szentendrei-sziget) és alatti (Csepel-sziget) parti szűrészű vízbázissal közvetlen kapcsolatban álló Duna-szakaszt kifejezetten szerves mikroszennyezőkre fókuszálva. A vizsgált 36 vegyületből 30 jelenlétét lehetett kimutatni mindkét mintavételi ponton, 12 vegyület pedig a parti szűrészű kutak nyersvizében is megjelent [82].

Szerves mikroszennyezők előfordulása felszín alatti ivóvízbázisokban

Magyarországon a vízbázisok 97%-a felszín alatti vízbázis. A felszín alatti vízbázisoknál a víztest elhelyezkedése alapján megkülönböztetünk talajvizet, rétegvizet, parti szűrészű vizet és karsztvizet. A kitermelhető nyersvíz minőségét tekintve az egyes felszín alatti vízformák között jelentős eltérés mutatkozik. A felszín alatti vízbázisok közös jellemzője, hogy a felszíni környezettel nincsenek közvetlen kapcsolatban, de közvetett hatás révén a felszín felől különböző mértékben szennyeződhetnek a vízbázis típusától függően.

A talajvíz felett nem található vízzáró réteg, így a szennyezőanyagok a csapadékvízzel korlátlanul bemosódhatnak. Jellemző pontszerű szennyező források a rosszul kivitelezett vagy illegális hulladéklerakók, állattartó telepek, ipari létesítmények. A hazai talajvízbázisok szennyezettsége általánosnak mondható, általában többféle és magasabb koncentrációjú szennyező anyag mutatható ki bennük, mint a rétegvizekben. Ivóvíz előállítására jellemzően nem használják a talajvízbázisokat, a teljes felszín alatti víztermelés 3%-át teszik csak ki.

Szerves mikroszennyezők talajvízszennyezésére számos példát találunk, a művelt mezőgazdasági területek peszticidekkel, műtrágyákkal és adalékanyagaival történő diffúz szennyezése szinte általánosnak mondható, az ipar által okozott pontszerű szennyezőforrások leggyakrabban a korábbi évtizedekben szabálytalanul elhelyezett, elásott veszélyes hulladékok, gyártási melléktermékek lehetnek.

A Tiszapalkonyai Hőerőmű földalatti tüzelőolaj-tárolójának környékén a talajvízben jelentős mennyiségű policiklusos aromás szénhidrogén (PAH), többek között naftalin, pentaklórfenol és metil-terc-butil-éter (MTBE) jelenlétét lehet kimutatni. A szennyeződés a vizsgálatok eredményei alapján 25–30 éve keletkezhetett. Az ezredforduló után kísérlet történt az elszenyeződött terület kármentesítésére, de 2011-ben a PAH-ok koncentrációja (17,6 µg/l) még csaknem kilencszeresen haladta meg a vonatkozó határértéket [83].

A Budapesti Vegyiművek mintegy 10 hektáros Illatos úti telephelyén összesen 1300 tonna veszélyes hulladék szabálytalan tárolása miatt alakult ki jelentős talajvízszennyezés. A céget az ezredfordulót követően felszámolták, a kármentesítés nem fejeződött be. A hulladékot elszállították, de a terület talajvizében jelentős (egyes esetekben a határértéket több nagyságrenddel meghaladó) mennyiségben mérhető szennyező anyagok. Szerves mikroszennyezők közül a benzolszármazékok, mint a klórbenzol, a klórozott rovarirtó szerek, mint a diklór-difenil-triklóretán (DDT), a hexaklórociklohexán (HCH), valamint a fluorozott amino-benzotrifluorid fordul elő nagyobb koncentrációban. A szennyezés a talajvízben és a talajfelszínről a levegőbe kerülve kockázatot jelenthet az egykori üzem közelében élő lakosságra nézve [84].

Talajvíz esetében a legnagyobb veszélyt az jelenti, hogy egy pontszerű forrásból származó szennyezés a talajvíz mozgásának köszönhetően nagy területen terjedhet szét, ezáltal jelentősen megnehezítve az esetleges kármentesítést. Összességében elmondható, hogy ma Magyarországon a legtöbb ipari eredetű talajvízszennyezés a múlt század második felének átgondolatlan hulladékkezeléséből származik, az azóta eltelt évtizedek alatt pedig számos helyen jelentős mértékben megnövekedett a szennyezett területek mérete. A kármentesítés legtöbbször a szennyezőforrás közvetlen megszüntetésére irányul, a kiterjedt szennyezett terület mentesítése a legtöbb esetben nem kielégítő.

A rétegvíz két vízzáró réteg között elhelyezkedő víztest. Jellemzője, hogy a felszíni hatásoktól, szennyezésektől általában védett, de jelentősebb kitermelése esetén előfordulhat, hogy az utánpótlódás felszínhez közelebbi rétegekből történik, így könnyebben szennyeződhet. Jellemző természetes eredetű szennyezői a vas, mangán és arzén, problémát okozhat még a metán és a szén-dioxid jelenléte, valamint a nyersvíz magas hőmérséklete. Diffúz szennyezés általában nem jellemző rá, de az utánpótlódás jellegéből adódóan pontszerű szennyezések előfordulhatnak. Ivóvíz előállítására sokkal alkalmasabbak, mint a talajvízbázisok.

Általánosságban elmondható, hogy a nyomás alatti rétegvízre nagyobb védttség jellemző, mert a víz pozitív nyomása megakadályozza a réteg közvetlen szennyezését. A szennyezés általában a természetes és mesterségesen keltett vízmozgásokból adódik, amikor a réteg utánpótlódására egy szennyezett területről érkezik víz, amely a szekszárdi diklór-etilén-szennyezés esetében is történt.

A Szekszárd vízellátását biztosító rétegvízbázisban 1993-ban – elsősorban diklór-etilénből álló – klórozott alifás szénhidrogén-szennyeződést (CAH) észleltek, amelynek forrása a város keleti határán található ipartelep. A vízbázis kármentesítését kezdetben a termelés Sió-csatorna menti kutakra való átcsoportosításával és a szennyezett víz szivattyúzásával szándékoztak megoldani. Később derült ki, hogy a szennyezés a Sió-parti telepet mindezek ellenére is elérte [85]. Az ivóvízbázis területén alifás halogénezett szénhidrogén szennyezőket – triklóretilént, diklór-etilént, vinil-kloridot – mutattak ki. A részletes tényfeltárást követően vízkivétellel, és hidraulikus gáttal látták el a vízbázis területén lévő termelőkutak védelmét, és folytattak kármentesítést.

Az évek folyamán a triklóretilén és a vinil-klorid szennyezők mennyisége jelentősen csökkent, azonban a diklór-etilén-koncentráció kezdeti csökkenés után ismét növekedést mutatott. Feltételezhető, hogy a triklóretilén diklór-etilénné alakul át, ami megmagyarázhatja, hogy az egyik szennyező koncentrációja csökken, ugyanakkor a másik növekedik.

A kármentesítési tevékenységek sem rövid, sem pedig hosszú távon nem hoztak elfogadható eredményt, ezért a város vezetősége az üzemeltető javaslatára a város vízellátására 2015-ben egy új, parti szűrészű vízbázist jelölt ki a Duna partján, a régi vízbázis kitermelését pedig megszüntették. A kármentesítés jelentős anyagi ráfordítás mellett jelenleg is tart, és a tervek szerint 2023-ra fejeződik be.

A parti szűrésű víz felszíni víztest közvetlen közelében lévő felszín alatti vízbázis, amelyre jellemző, hogy a termelt víz utánpótlódása 50%-ot meghaladó mértékben a felszíni víz felől történő beszivárgásból származik. A termelhető nyersvíz minősége általában igen jó, akár az ivóvíz minőségi előírásainak is megfelelő lehet. Különlegessége abban rejlik, hogy a felszíni víz mederfalán szivárgó víz természetes tisztulási folyamaton megy keresztül. A szivárgás során mechanikai, fizikai-kémiai és biológiai folyamatok zajlanak, amelyek következtében többek között a felszíni víz lebegő- és szervesanyag-tartalma csökken jelentős mértékben, valamint mikrobiológiai paraméterei akár több nagyságrenddel is javulhatnak. A szivárgás során a mederágy adottságainak függvényében a folyó vize változó arányban keveredik a felszín alatti vízzel, így a víztermelő kútból kitermelhető nyersvíz tulajdonképpen e kettő keveréke. Bizonyos szempontból a felszíni és felszín alatti víztermelés közötti átmenetnek tekinthető, de egyértelműen a felszín alatti víz-szerzési módok közé sorolandó. Szennyezőanyag-tartalmát jelentősen befolyásolja a parti szűrt víz – háttérvíz arány, utóbbi jelentősebb mennyisége magasabb vas- és mangántartalmat jelent.

2017-ben a lengyelországi Warta folyón, a Poznań város vízellátását biztosító parti szűrésű kútcsoport által termelt nyersvízben vizsgáltak néhány kiválasztott szerves mikroszennyezőt. A kutatás egyértelmű összefüggést mutatott a mikroszennyezők koncentrációja és a kutak folyótól való távolsága, azaz a szivárgási úthossz között [86].

A parti szűrésű vízbázis esetében a veszélyeztetett szennyezőforrások eredete széles körű lehet. Egyrészt a háttér felől érkező felszín alatti, többnyire talajvíz diffúz és pontszerű szennyezőforrásokból regionális szennyezéseket tartalmazhat, másfelől a kapcsolódó felszíni víztest (hazánkban kivétel nélkül folyó) szennyezése akár több száz vagy ezer kilométer távolságról származhat.

A vízkezelésben általános érvényű megállapítás, hogy célszerű minél kevesebb lépcsőben, minél kevesebb technológiai egység üzemeltetésével elérni a kívánt vízminőséget, így a vízkezelés nulladik lépcsőjének tekinthető parti szűrés hatásfokának vizsgálata a klasszikus szennyező anyagok mellett a szerves mikroszennyezők eltávolítására nézve is indokolt. Bár számos kutatás támasztja alá, hogy a parti szűrés igen hatékony a szerves szennyezők csökkentésében, mégis kockázatot jelenthetnek az ivóvízellátásra, mert alacsony koncentrációban is jelentős minőségromlást okozhatnak. Jellemzően nehezen bontható, perzisztens vegyületekről van szó, amelyek a klasszikus, a parti szűrt víz utókezelésére kialakított technológiai lépcsőkkel – mint az oxidáció, mechanikai szűrés, fertőtlenítés – nem távolíthatók el megfelelő mértékben. Koncentrációjuk hatékony csökkentése általában membránszűréssel – ultraszűréssel, nanoszűréssel vagy fordított ozmózissal – történhet, amely viszonylag költséges megoldás, azonban a hatékony tisztítást a rendelkezésre álló berendezések kapacitása korlátozhatja, továbbá jelentős lehet a karbantartási igény. Ezt a technológiai lépcsőt alapesetben nem alkalmazzák parti szűrt nyersvíz kezelésére.

A karsztvíz egyes hegységek – hazánkban a Mecsek, a Bakony és az Északi-középhegység – területein előforduló felszín alatti vízforma, amely kitermelésre, vízkivételre általában kiváló minőségű és megfelelő mennyiségű. Megkülönböztetünk nyílt és zárt karsztot, előbbi érzékeny a külső szennyezésekre, utóbbi változó mértékben védett a felszín felől érkező szennyezésektől. A rétegvízhez hasonlóan a karsztvíznél is alacsony a diffúz szennyezés kockázata, a pontszerű szennyezőforrások a karszt nyílt/zárt tulajdonságainak, valamint mélységének függvényében veszélyeztethetik a víz minőségét.

A karsztos területeken elhelyezkedő vízbázisok általában a mészkő, esetleg dolomit kisebb-nagyobb repedéseiben, üregeiben helyezkednek el, ezért a felszín felől vízzáró réteg jellemző. A karsztvízbázisok a felszínnel legtöbbször kapcsolatban állnak, porózus vízvezető kőzetek kisebb-nagyobb repedésein keresztül érkezhethet víz a felszín felől. Mindemellett a más típusú

vízbázisokhoz hasonlóan a víztermelés következtében kialakuló vízáramlás okozhat vízforgalmat különböző rétegek, víztartók között. Mikroszennyezők tekintetében a karsztvízbázis szennyeződésére is találunk hazai példát. A szennyeződések gyakran a hibás ipari hulladékkezelés okozza. Veszprém és környéke karsztosodott területen fekszik, ahol az ivóvízellátás részben karsztvízbázisokon alapul. A több mint fél évszázadon keresztül üzemelő, de 2009-ben megszűnt Bakony Művek Rt. telephelyén kiterjedt talaj-, talajvíz- és karsztvízszennyezés mutatható ki. A határértéket jelentősen meghaladó kadmium-, bárium-, króm- és nikkelszennyezés mellett policiklikus aromás szénhidrogén (PAH-vegyületek) jelenléte mérhető a felszín alatti vízrétegekben. A karsztvízből a szerves mikroszennyezők csoportjából diklór-etilén, kloroform, triklóretilén, valamint tetraklóretilén mutatható ki. A kimutatható aromás szénhidrogének közül a rákkeltő hatású benzol mennyisége 2000-szerese a határértéknek. A feltárás szerint a szennyezés mintegy 130 hektár kiterjedésű. 2001 és 2005 között a szennyező technológiát megszüntették, valamint a szennyezett talaj egy részét kitermelték és elszállították, ez a lépés azonban a karsztvízréteg szennyeződésének mértékét érdemben nem javította [87].

Mikroszennyezők jelenlétének vizsgálata budapesti vízbázisokon

Egy 2016 és 2019 között zajló nemzetközi projekt keretében végzett kutatásban a Fővárosi Vízművek a parti szűrés ultrafiltrációval, nanofiltrációval, valamint fordított ozmózissal történő kombinálhatóságát vizsgálta. A kutatás során egyéb paraméterek mellett szerves mikroszennyezők koncentrációját is figyelemmel kísérték két üzemelő vízbázison, a Szentendrei-szigeten található északi vízbázis, valamint a Csepel-szigeten Ráckeve és Szigetszentmiklós között elhelyezkedő déli vízbázis kútjaiban. A két vízbázis között elhelyezkedésük mellett lényeges különbség a kutak medertől való távolsága, amely a Csepel-szigeti vízbázis esetében nagyobb. A kutatásban 36 mikroszennyezőt vizsgáltak, két felszínivíz-mintavételi ponton és két kútban. Az eredményeket összehasonlítva az egyes szerves mikroszennyezőkre megállapítható az eltávolítás hatásfoka. A vizsgált mikroszennyezők közül tizenkettőt csak a Dunából vett vízmintákban sikerült kimutatni, a parti szűrt vízből nem. 12 vegyület kimutatható volt a felszíni és a szűrt vízmintákban egyaránt. Ezek koncentrációjának változása a parti szűrés folyamatában tág határok között mozgott.

A metazaklór növényvédő szer esetében a szentendrei-szigeti vízbázison 78%-os eltávolítási hatásfokot sikerült kimutatni, míg ezen vegyület koncentrációja a Csepel-szigeti vízbázison csak 12%-kal csökkent. A legnagyobb mértékben (69% és 43%) a benzotriazol koncentrációját sikerült csökkenteni, míg legkisebb arányban a szulfametoxazol nevű antibiotikum-hatóanyag koncentrációja csökkent. A műanyagipar által széleskörűen használt biszfenol-A koncentrációja egyes esetekben a kutakban nagyobb koncentrációban volt kimutatható, mint a felszíni vízben. A kutatás megállapította, hogy a szerves mikroszennyezők elsősorban anoxikus körülmények között távolíthatók el parti szűréssel jelentősebb mértékben. Egyes mikroszennyezők, mint a szulfametoxazol vagy a diklofenák eltávolítása hosszabb szivárgási utat igényel, így ezen vegyületek koncentrációjának csökkentésében a Csepel-szigeti vízbázis hatékonyabbnak bizonyult [82].

A parti szűrővíz vízbázisok a hazai ivóvízellátás valamivel több mint harmadát biztosítják, ezért kiemelt figyelmet kell rájuk fordítani. Eddigi kutatások eredményei alapján a parti szűrés folyamata egyes szerves mikroszennyezők eltávolításában hatékonynak mondható, más szennyezők azonban jelentősebb koncentrációcsökkenés nélkül érhetik el a vízbázis kútjait. Általános érvényű megállapítás, hogy a parti szűrt víz utókezelésére tervezett ivóvíztisztító technológiák

nem alkalmasak szerves mikroszennyezők eltávolítására, ehhez egy külön lépcső (membrán- vagy aktív-szén-szűrés) beépítése szükséges.

Az eddigi kutatási eredmények azt tükrözik, hogy a felszíni vízbázisok szennyeződése esetében a szerves mikroszennyezők koncentrációjának csökkenésével lehet számolni. Több természetes folyamat a mikroszennyezők bomlását idézi elő. A fotokémiai átalakulás napfény jelenlétében zajlik le, amely a természetes vizek felső rétegét érinti, de a felszíni víztestekre általában jellemző turbulens vízmozgás, átkeveredés is elősegíti a folyamatot. A biodegradáció hasonlóan csökkentő tényező, amely oxikus körülmények között hatékonyabban zajlik le. E körülmények azonban a felszín alatti víztestek esetében – fény és oxigén hiányában – nem állnak fenn, jellemző az állandó, anoxikus környezet, így a felszín alatti vízbázisok szennyeződése tartósan fennállhat. A parti szűrésű vízbázisok hatékonyak mondhatók egyes, a felszíni víz felől érkező szerves mikroszennyezők bontásában, de a háttérvíz szennyezettsége hosszú távon is kockázatot jelenthet.

Szerves mikroszennyezők eltávolítása az ivóvíztisztítás során

Az ivóvíztisztítás egy jellemzően többlépcsős technológiai folyamat, amely folyamán a nyersvízben található, emberi fogyasztásra alkalmatlan, vagy az emberi egészséget károsító vegyületeket a vízből elválasztják és visszatartják. A technológiai lépcsők fizikai, kémiai és biológiai folyamatokon alapulnak.

Derítés

A vízben előforduló kolloid méretű szennyező anyagok negatív töltésüknek köszönhetően a vízből spontán nem, vagy csak nagyon hosszú idő alatt ülepedhetnek ki. E szennyező anyagok jellemzően szerves molekulák, amelyek eltávolítása derítéssel történik. A derítés folyamata három lépésből áll:

- koaguláció (kicsapatas);
- flokkuláció (pelyhesítés);
- szedimentáció (ülepítés).

A kémiai koaguláció eléréséhez a vízhez derítőszert [leggyakrabban alumínium(III)-szulfátot és a vas(III)-szulfátot] és segéd-derítőszert adagolnak. Hatásukra a szuszpendált részecskék elektrosztatikus állapota megváltozik, destabilizálódnak, a közöttük lévő taszítóerő csökken, illetve megszűnik, egymáshoz kapcsolódnak.

A flokkuláció során a koagulálódott részecskék nagyobb méretű csoportokká, pelyhekké állnak össze. A pelyheképződés a segéd-derítőszerek (például polielektrolitok) alkalmazásával felgyorsítható, a folyamat hatékonysága növelhető, így a mikropelyhek nagyobb méretű, jól ülepedhető pelyhekké (makropelyhek) kapcsolódnak össze, ezáltal gyorsabb és hatékonyabb szilárd-folyadék elválasztást tesznek lehetővé.

A koaguláció alkalmas lehet egyes szerves mikroszennyezők eltávolítására, koncentrációjának csökkentésére [88]. Diklofenák esetében vas(III)-klorid alkalmazásával 20% körüli eltávolítást sikerült elérni, míg a polialumínium-klorid adagolása nem hozott eredményt. Szulfametoxazol eltávolításában pedig épp az utóbbi bizonyult hatékonynak, közel 50%-os eltávolítás volt tapasztalható, szemben a vas(III)-klorid és az alumínium(III)-szulfát 10% körüli hatékonyságával.

A koaguláció hatékonysága a szerves mikroszennyezők eltávolításában függ az adagolt derítőszer fajtájától, dózistól valamint a pH-tól. Összességében elmondható, hogy a legtöbb szerves mikroszennyező eltávolításának esetében a koaguláció hatásfoka alacsony, általában 50% alatti. Egyes egyéb eltávolítási mechanizmusok (adszorpció, fotolízis) koagulációval történő kombinálása növelheti a szerves mikroszennyezők eltávolításának hatékonyságát.

Adszorpció: aktív szén alkalmazása

Az adszorpció egy tisztán fizikai jelenségeken alapuló folyamat, amely során egyes komponensek az adszorbens felületén megkötődnek. Ha kémiai folyamatok is szerepet játszanak, akkor kemisorpcióról beszélünk. Az adszorbens anyagok jellemzője, hogy tömegükhöz képest nagy fajlagos felülettel rendelkeznek. A vízkezelésben leggyakrabban alkalmazott, elterjedt adszorbens az aktív szén.

Apoláros, szerves vegyületek megkötésére alkalmas. A gyakorlatban két változatban találkozhatunk vele, granulált aktív szén (GAC) és por alakú aktív szén (PAC) formájában. Az aktív szenet általános víztisztításban a törésponti klórozásból származó klóraminok, THM, valamint kellemetlen íz- és szaganyagok eltávolítására alkalmazzák. A víztisztítás során megemelt PAC-dózis a kezdeti koncentrációtól függetlenül csökkentette egyes szerves mikroszennyezők koncentrációját [18].

A hidrofíl vegyületek (azaz a koffein, az acetaminofen, a szulfametoxazol és a szulfametazin) szorpciós együtthatói lineáris izotermához illeszkednek, míg a hidrofób vegyületek (azaz naproxén, diklofenák, 2,4-D, triklokarbán és atrazin) egy Freundlich-izotermához illeszkednek [89]. A hidrofób szennyező anyagok és a hidrofíl koffein eltávolítása független a pH-változástól, de az acetaminofent, a szulfametazint és a szulfametoxazolt elsősorban a PAC-kal végzett elektrosztatikus kölcsönhatás adszorbeálja, ezért a pH befolyásolta az eltávolításukat.

Felszíni vizek esetében alacsonyabb az aktív szenes adszorpció hatékonysága, ez a különbség különösen a hidrofób vegyületeknél volt szignifikáns. Felszíni vizek esetében az adszorpció hatékonyságának csökkenését az oldott szerves anyag (DOM, *dissolved organic material*) jelenléte okozta, amely könnyebben adszorbeálódik az aktív szénhez, mint a vizsgált szerves mikroszennyezők. Az alacsony hőmérséklet (5 °C) csökkentette a mikroszennyezők adszorpciójának hatékonyságát, és a hidrofób vegyületeket jobban befolyásolta, mint a hidrofíl vegyületeket.

Klórozás

Az ivóvízkezelés folyamata szinte kivétel nélkül fertőtlenítést is magában foglal, mint a klórozás, az ózonizálás (O_3) vagy az ultraibolya fénnel (UVC) történő csírátlantás a vízzel terjedő betegségek, patogén baktériumok terjedésének megakadályozása érdekében.

A klórozás széles körben elterjedt, napjainkban is alkalmazott fertőtlenítési eljárás. A klórozást elsősorban fertőtlenítésre használják, és nem kifejezetten a szerves szennyező anyag eltávolítására alkalmazott eljárás, de a szabad klór oxidáció révén lebonthatja a szerves szennyező anyagokat [88]. A klórozás költséghatékonyabb, mint más technológiák (például ózonálás és az UV-besugárzás), és viszonylag egyszerűen üzemeltethető technológia. Szerves mikroszennyezők eltávolításában azonban meglehetősen alacsony hatásfokú (<20% a szulfametoxazol, acetaminofen, koffein és ibuprofen esetében), a reakcióidő pedig viszonylag hosszú. A klórozás

további hátránya, hogy klórozási melléktermékek, például triklórmetán keletkezhet, amely káros az emberi egészségre.

Ózonozás

Az ózonnal való kezelés célja a fertőtlenítés és oxidálás, de oxidációs szerként alkalmas a szerves mikroszennyezők oxidálására is. Az ózonozás oxidálhatja a mikroszennyezőket akár ózonnal való közvetlen reakcióval, akár közvetett módon a hidroxilcsoportok képződése után [88].

Kombinált oxidációs folyamatok UV, Cl₂/UV, UV/O₃

Egyes kutatások eredményei arra utalnak, hogy a 253,7 nm hullámhosszúságú, az ivóvíztisztításban csírátlanításra használt UV-fény kombinálása egyes oxidációs eljárásokkal hatékony lehet a szerves mikroszennyezők eltávolításában. A kutatásokban az UV-fény hatékonyságát klórgázzal és ózonnal növelték.

Membrántechnológiák

A membrántechnológiákról, a membránszűrésről már írtunk *A szerves mikroszennyezők sorsa a szennyvíztisztítóknak* című fejezetben.

A mikroszűrés (MF) a 0,1–10 µm közötti mérettartományban használható, alkalmas vízben nem oldódó porok, pelyhek, valamint baktériumok, illetve a vírusok egy részének visszatartására. A szerves mikroszennyezők, főleg a vízben oldott állapotban előforduló szennyező anyagok visszatartására nem alkalmas.

Az utraszűrés (UF) mérettartománya 0,01–0,1 µm, a baktériumok és vírusok mellett makromolekulák visszatartására is alkalmas, így a szerves mikroszennyezők koncentrációját is csak bizonyos mértékig csökkenti.

A nanoszűrés (NF) fő alkalmazási területe a gyógyszer- és élelmiszeripar, valamint a vegyipar, megoldást jelent nagyobb molekulásúlyú oldott anyagok, többértékű anionok (foszfát, szulfát), szerves (szín-, szag-) anyagok, huminsavak, peszticidek visszatartására. Mérettartománya 0,001–0,01 µm, már alkalmazható nagyobb súlyú (200–400 Dalton) szerves molekulák visszatartására, így a vízben oldott állapotban lévő szerves mikroszennyezők egy részének eltávolítására is alkalmazható.

A leghatékonyabb szűrésre a fordított ozmózis (RO) folyamán kerül sor, amely a vízben oldott állapotban lévő, kis molekulásúlyú komponensek visszatartására is alkalmas, permeátuma ionmentesített víz. Mérettartománya 0,0001–0,001 µm. A fordított ozmózis folyamata során külső nyomás hatására a víz keresztüláramlik a membránon a magasabb koncentrációjú oldatból az alacsonyabb koncentrációjú oldat felé.

A fordított ozmózist elsősorban vízkezelésben alkalmazzák a víz sóalanítására, lágyítására, ionmentesítésére, elsősorban olyan területeken, ahol nagy tisztaságú víz előállítására van szükség. Köszönhetően a nagy szűrési hatékonyságának, a fordított ozmózis a szerves mikroszennyezők valamennyi változatának eltávolítására alkalmas. Több kutatás vizsgálta az egyes

membránszűrési technológiák hatékonyságát, és nem meglepő módon a fordított ozmózis hatásfoka a legnagyobb [82].

Mivel a membrántechnológiák közül az RO fajlagos energiaigénye a legnagyobb, a permeátum-koncentráció aránya pedig a legrosszabb, ha a körülmények lehetővé teszik, a kicsit alacsonyabb hatásfokú nanoszűrés jobb választás lehet.

Az ivóvízkezelésben alkalmazott technológiai folyamatok, mint a derítés, adszorpció, kombinált oxidációs eljárások, valamint a membránszűrés alkalmasak a szerves mikroszennyezők eltávolítására. Fontos azonban megjegyezni, hogy a különböző vegyületek eltávolítási hatásfoka jelentősen eltérhet, amit bizonyos esetekben a környezeti körülmények is jelentősen befolyásolhatnak. A témával kapcsolatos kutatások rámutattak, hogy a különböző eljárások kombinációi jelentősen növelhetik a szennyező anyagok visszatartásának hatásfokát. Fontos tényező a tisztítandó víz megfelelő előkezelése és az optimális környezeti körülmények, mint a hőmérséklet vagy a pH beállítása.

A szerves mikroszennyezők témaköre az ivóvíztisztítás területén is meglehetősen újdonságnak számít. Egyes kutatási eredmények szerint a szerves mikroszennyezők bizonyos körülmények között potenciális kockázatot jelentenek az ivóvízbázisokra, mivel bekerülhetnek a termelőuktaiba. A jelenleg elterjedt és legnagyobb arányban alkalmazott ivóvíztisztító technológiák nem a szerves mikroszennyezők eltávolítására lettek optimalizálva, egyes technológiák hatásfoka számszerűsíthető, ám ez a hatásfok az esetek egy részében nem kielégítő. Kísérletek eredményei azt tükrözik, hogy a technológiai folyamatok kombinációja, valamint olyan természetes folyamatok, mint a fotolízis vagy a biodegradáció alkalmazása jelentősen növelheti a szerves mikroszennyezők eltávolításának eredményességét. A kifejezetten szerves mikroszennyezők eltávolítására alkalmazható technológiák közül a membránszűrés a leghatékonyabb, amelyen belül a pórusméretet figyelembe véve a fordított ozmózis hatásfoka a legnagyobb. Ez utóbbi egyéb tulajdonságait – mint a permeátum-koncentráció arány vagy a fajlagos üzemeltetési költség – figyelembe véve a nanoszűrés vagy az ultraszűrés tűnik inkább hatékony és gazdaságos megoldásnak.

Fejezetzáró kérdések

1. Mi az oka annak, hogy a felszíni vízbázisok használatának aránya Magyarországon meglehetősen alacsony?
2. Milyen alapvető különbségek vannak az egyes felszín alatti víztípusok között?
3. Melyek a felszín alatti vízbázisok jellemző szennyező anyagai?
4. Milyen szennyezőforrások jellemzők felszíni, illetve felszín alatti vízbázisok esetében?
5. Miért jelenthet kockázatot a parti szűrésű vízbázisokra a felszíni víztest szennyezettsége?
6. Hogyan függ össze a szerves mikroszennyezők viselkedése és a szivárgási úthossz kapcsolata a parti szűrésű vízbázisok esetében?
7. Mely ivóvíztisztításban alkalmazott technológiák alkalmasak a szerves mikroszennyezők eltávolítására?
8. Miért érdemes egyes technológiákat kombináltan alkalmazni?
9. Milyen oxidációs eljárásokkal célszerű az UV-fényt kombináltan alkalmazni?
10. Hogyan működik az aktív szén mint adszorbens, és mennyire hatékony a szerves mikroszennyezők eltávolításában?
11. Milyen membrántechnológiák alkalmazhatók a szerves mikroszennyezők visszatartására?