

4. Az ivóvíz-előállítás biológiai vonatkozásai

A vízszerezés, víztisztítás és vízhasználat során a vizekben előforduló élőlények előfordulását, minőségi és mennyiségi összetételét a víz fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai együttesen határozzák meg, amelyek a víz származásával, a vízkezelés módjával, a hálózat és a vízhasználat sajátásaival hozhatók összefüggésbe. A mikroorganizmusok – ugyanúgy, mint a többi élőlény – ott találhatók meg, ahol számukra az életfeltételek (hőmérséklet, tápanyag, víz stb.) adottak. A mélységi, a felszíni és felszín közeli vizekben, a folyók menti homok- és kavicsagyakban, a termelő kutakban, a nyersvizet és a tisztított vizet szállító vezetékekben, a tározó medencékben eltérőek az abiotikus tényezők (például az áramlási, hőmérsékleti és oxigénviszonyok, az ionösszetétel, a lebegőanyag-tartalom, a fényviszonyok), emiatt különböző élőlényközösségek számára biztosítanak életfeltételeket.

4.1. A nyersvíz biológiai tulajdonságai

A mélyfúrással hozzáférhető külső behatásoktól, szennyeződésektől *védett* rétegvizekben egészségügyi szempontból közömbös mikroorganizmusok élnek elsősorban. Ezeknek a többnyire anaerob, autotróf prokariota fajoknak az ökológiai igénye – a mélyben uralkodó körülményeknek megfelelően – más, mint a felszín közelében élő mikrobáké, például hókedvelők vagy nyomáskedvelők. A mélységi védett vizekben, mivel a felszínnel nincs kapcsolatuk, nem található szabad oxigén, viszont a felszínre kerülve a légköri levegővel érintkezve (tápanyagtartalmától függően) különböző mértékben beindulhatnak a biológiai folyamatok. Szervetlen tápanyagok esetén a fotoautotróf algák és a kemoautotrófok (szervesanyag-dúsulást okozva), szerves maradványok esetén a heterotrófok szaporodhatnak el. A felszíni eredetű és patogén baktériumok, valamint szennyező anyagok megjelenése a nyersvízben a védettség hiányát jelentik.

A felszín közeli vizek, a talajvizek környezeti hatásokból eredően szennyezettek, fizikai-kémiai, biológiai tulajdonságaik ivóvízként való felhasználásukat nehezíti. A vízben lévő szerves anyagokat a heterotróf baktériumok lebontják, és saját szervezetüket építik fel a bomlástermékekből. A mikrobák által nem lebontható xenobiotikumok (ezek többnyire szerves mikroszennyezők) nem megfelelő víztisztítási technológiát alkalmazva bejuthatnak az ivóvízbe is.

A *felszíni vizek* vannak legnagyobb mértékben kitéve az antropogén hatásoknak, emiatt a vízgyűjtőterület jellegétől függően ezek a legszennyezettebbek. A szennyezésként bejutó többlet növényi tápanyag megnövekedett biomaszákat, végső soron szervesanyag-terhelést okoz, ugyanúgy, mint a kívülről bejutó szerves anyagok. Az öntisztulás, mikrobiális lebontás során a víztest oxigéntartartalma csökken, súlyos szennyezés esetén kritikus oxigénhiány alakulhat ki, amely az élővilág drasztikus átalakulását, az aerob élőlények pusztulását okozza.

A *parti szűrősű* vizek a rétegvizeket követően a felszín alatti víznyerés jelentős hányadát adják, tehát hangsúlyozottan fontos szempont az, hogy minőségük a felszíni víz minőségének függvénye. A parti szűrősű víz homokos-kavicsos, természetes fizikai-kémiai-biológiai szűrést biztosító szűrőrétegen át jut a kutakba. A szűrő réteg szilárd felületén kialakult biofilm mikro-

organizmusai a folyóból oxigén tartalmú vizet kapnak, így a parti szűrés során az aerob lebontó folyamatok a jellemzőek.

A parti szűrésű kutak felszíni vízből való termelése a mindenkori vízállástól függ. Minél alacsonyabb a vízállás, annál nagyobb a valószínűsége, hogy a kutakban a talajvíz eredetű háttérvíz aránya megnő, ami a kitermelt vizek minőségére többnyire negatív hatással van a mikrobiális lebontás és megkötés hiánya miatt. Ezeknek a kevert vizeknek sok esetben a szervesanyag-terhelés mellett nagy lehet a vas- és mangántartalma is, amelyek mind az oxigéntartalom csökkenéséhez vezetnek.

4.2. A víztisztítás biológiai folyamatai

Az ivóvíz előállítás során, mivel nem steril folyamatról van szó, minden technológiai pontnál számításba kell venni az élőlények, elsősorban a mikroorganizmusok biológiai folyamatait. Mivel a nyersvíz és a tisztított víz is tartalmaz szerves és szervetlen anyagokat, mind az autotróf, mind a heterotróf mikroorganizmusok is elszaporodhatnak bennük.

Ahogy az erdő fajai, a tó élőlényei vagy a tápszatona baktériumközösségének tagjai táplálék-hálózatot alkotnak, ugyanúgy az ivóvízhálózatban megjelenő mikroorganizmusok is közösséget alkotnak. A mikroba közösségek tagjai között is vannak autotróf termelők (hasonlóan, mint a növények a társulásokban), amelyek szaporodásához csak szervetlen anyagok szükségesek és heterotróf fogyasztók (mint a ragadozók, lebontók, paraziták), amelyek szervesanyagot igényelnek.

Számos baktériumfaj anyagcseretermékeivel, bomlástermékeivel más fajok megtelepedését, túlélését teszi lehetővé, sok fajnak van szimbiontája, amellyel együtt gyorsabban szaporodnak, mintha külön-külön élnének. A nem patogén fajok pedig segíthetik a patogének túlélését és megtelepedését. Egyes humán patogén baktériumfajok más mikroorganizmusokban képesek túlélni és a hálózatban fennmaradni.

Mivel a víz okozta megbetegedések körülbelül 5%-a kémiai eredetű (például arzén, nitrit, egyéb toxinok), viszont 95%-a biológiai eredetű, emiatt a technológia során jelentkező biológiai folyamatok ok-okozati összefüggéseinek megértése kulcsfontosságú.

A magyarországi víztisztítási technológiára nem jellemző, hogy célirányosan biológiai folyamatokat alkalmazzanak, viszont a víz minőségétől függően különböző mértékben spontán biológiai folyamatok jelen lehetnek a telepeken. Az egyes technológiai folyamatok különböző biológiai vonatkozású következményeket eredményeznek (4.1. táblázat).

A felszíni vizek szervesanyag-tartalmának csökkentésére alkalmazzák a talajvízdúsítást, amely ugyanazon az elven alapul, mint a parti szűrés. Magyarországon például a borsodsziráki vízmű területén 25 talajvízdúsító ágy biztosítja egy 1200 × 250 m-es területen a Bódva kitermelt vizének tisztítását.

A *talajvízdúsítás* és a *parti szűrés* is természetes *lassú szűrésű folyamat*, amely során a talaj részecskéin kialakult biofilmréteg aktivitásának köszönhetően a felszíni víz szervesanyag-tartalma csökken, ezáltal organoleptikus tulajdonságai javulnak. A víztisztító telepeken a lassú szűrés során a homokágyak is számos baktérium számára kedvező életfeltételeket biztosítanak, a homokszemcsék felületén a baktériumok meg tudnak tapadni és elszaporodnak. A fő biokémiai folyamatok a szervesanyag eltávolítása, lebontása heterotróf mikroorganizmusok által, valamint a biológiai ammóniummentesítés, amely során az ammóniumionokat aerob autotróf nitrifikáló baktériumok oxidálják nitritté, majd nitráttá (3.5.1. fejezet).

4.1. táblázat: Az ivóvíz előállítása során alkalmazott körülmények, technológiák hatása a biológiai folyamatokra (a szerző szerkesztése)

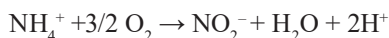
Alkalmazott technológiák, eszközök, körülmények	Beavatkozás célja/eredménye
– talajvízdúsítás	– szerves anyag eltávolítása
– szűrők szemcsés töltettel (lassú- és gyorszűrők)	– nitrogénformák eltávolítása (nitrifikáción alapuló ammónium eltávolítás)
– BAC (Biological Activated Carbon)	
– fertőtlenítés	– mikrobák eltávolítása (elpusztítása)
– maradék klór a hálózatban	– mikrobák számának kontroll alatt tartása
– alacsony hőmérséklet	– biofilm kialakulásának gátlása, visszaszorítása
– N-formák eltávolítása	(patogének megtelepedésének, szaporodásának megakadályozása, biokorrózió megelőzése)
– szerves anyag eltávolítása	

A lassúszűrőben a szűrési sebesség általában 0,1–0,3 m/h a nyersvíz minőségétől függően (összehasonlításképpen: a gyors szűrés során alkalmazott szűrési sebesség: 5–10 m/h). Mivel a tápanyagok (legyen az szerves vagy szervetlen) nagy része beépül a baktériumokba, a kialakult baktériumtömeg (biofilm) gátolja a víz áramlását, és a szűrőréteg nem tölti be funkcióját. Emiatt a felső 1-2 cm vastag, eltömődött, biológiailag aktív réteget (úgynevezett Schmutzdecke-t) időszakonként el kell távolítani. Ezután pár nap szükséges, amíg a megfelelő baktériumközösség újra kialakul, ez alatt az idő alatt alacsonyabb (kevesebb, mint 0,1 m/h) szűrési sebességről kezdve fokozatosan kell a szűrési sebességet emelni. Az ez idő alatt képződött szűrletet hulladékként el kell vezetni, vagy a többi lassú szűrő elé visszavezetni. A gyorszűrők esetében is alacsony a szűrés hatékonysága közvetlenül a szűrőréteg tisztítása után.

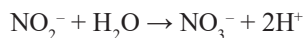
A fertőtlenítési eljárások oxidációs folyamatok, amelyek során a szerves makromolekulák kisebb szerves molekulákká alakulnak, így könnyen felvehető táplálék keletkezik a heterotróf baktériumok számára, ezért eltávolításuk az ózonizálást követően rendkívül fontos feladat. Ezt a célt szolgálja az aktívszén-adszorpció. Az ózonozást követő aktív szén adszorbenst a rajta kialakult biofilm miatt biológiailag aktivált szénnek nevezik (BAC – Biological Activated Carbon), amelyen elsősorban szervesanyag-eltávolítás (lebontás, mineralizáció) történik.

4.2.1. Nitrifikáció a vízelosztó hálózatban, biológiai ammóniumeltávolítás

A nitrifikáló baktériumok aerob kemolitotróf mikroorganizmusok, az ammónium, illetve nitrát átalakításával nyert energiával a szervetlen szén-dioxidot használják fel szénforrásként. A nitrifikáció két lépcsőben zajlik le. Első lépésként a víz ammóniumtartalmát az „ammóniumoxidáló baktériumok” (ammonia-oxidizing bacteria: AOB – például: *Nitrosomonas*, *Nitrospira*, *Nitrosococcus*, *Nitrosolobus*, *Nitrosovibrio*) nitríté oxidálják:



A második lépésben a keletkezett nitritet a „nitritoxidáló baktériumok” (nitrite-oxidizing bacteria: NOB – például: *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrospina*, *Nitrococcus*) nitráttá oxidálják:



A nitrit a hemoglobin oxigénszállító-képességét gátolja, a túlzott nitritfogyasztás methemoglobinémiát okoz, amely végeredményben fulladásos halálhoz vezethet (úgynevezett „kékhalál”). A magas nitríttartalom elsősorban csecsemőkre jelent veszélyt, mivel az ő hemoglobinjuk könnyebben köti meg a nitritet, illetve lebontó enzimrendszerük még fejletlen. Emiatt lényegesen alacsonyabb az ivóvízben a megengedhető maximális nitritkoncentráció (0,5 mg/L) a nitrátkoncentráció határértékénél (50 mg/L).

Mivel a tisztítás után is lejátszódhatnak nitrifikációs folyamatok, a hálózatba csak olyan ammóniumtartalmú vizet szabad vezetni, amelyből a hálózatban lejátszódó nitrifikációs folyamatok következtében sem keletkezik 0,5 mg/L-es értéket meghaladó nitríttartalom.

A 201/2011-es szabvány szerint 0,5 mg/l az ammóniumion határértéke ivóvízben. Mivel 1 mg NH_4^+ -N-ből 2,7 mg NO_2^- -N keletkezik, ahhoz hogy a hálózatban biztosan ne haladjon meg a nitríttartalom a 0,5 mg/l-es határértéket, a telepet elhagyó víz ammóniumkoncentrációja nem haladhatja meg a 0,2 mg/l értéket.

A nitrifikációs folyamatok optimális pH-tartománya 7 és 8 között van, de tág pH-tartományon belül képesek lejátszódni (6,5 pH–10 pH). Télen a nitrifikáció hatásfoka romlik, mivel a baktériumok hőmérséklet optimuma 15°C feletti. Az ammóniumoxidációt végző mikroorganizmusok (például *Nitrosomonas*) általában tágtűrésűek a nitritoxidációt végző (például *Nitrobakter*) mikroorganizmusokhoz képest, így a nitrifikáció megkezdése az első lépcsőnél, azaz a nitrit felhalmozódása a hálózatban reális veszélyt jelent. Amennyiben fertőtlenítőszerként klóraminokat alkalmaznak, a nitrifikálók elszaporodására számítani kell. Bár az autotróf baktériumok lassan szaporodnak, a hosszú tartózkodási idők és a meleg vízhőmérséklet is elősegíti szaporodásukat, ami további gondot okozhat.

A biológiai ammóniumeltávolítás előnye, hogy nincs melléktermék, nem kell vegyszereket adagolni, költségkímélő. Hátránya, hogy a folyamat nem szabályozható, nem megoldott az online monitoring, semmi sem garantálja, hogy a nitrifikációs folyamat nem reked meg a nitrítképződésnél, nincs a kezünkben megfelelő ellenőrzési és vezérlési módszer.

Magyarországon az ammónium eltávolítása a telepeken általában törésponti klórozással történik. Ahol biológiai folyamatokat tartalmaz a technológia, ott több helyen, a folyamatok szabályozásának hiánya miatt, nem mindig tudják a nitrítszintet határérték alatt tartani.

4.3. Másodlagos vízminőségromlás, a hálózatban lejátszódó biológiai folyamatok

A vízellátórendszer tulajdonságai lehetővé teszik, hogy bizonyos élőlények túléljenek és szaporodjanak benne. A hálózatba jutó tisztított ivóvízben lévő tápanyagokon a bejutó baktériumok el tudnak szaporodni, így a fogyasztónál megjelenő ivóvíz minősége gyakran lényegesen különbözik az ivóvíztisztító-telepet elhagyó víz minőségétől. A vízelosztó hálózatban lejátszódó folyamatokat és azok hatásait a szolgáltatott ivóvíz minőségére *másodlagos szennyezésnek* nevezzük. Az ivóvízhálózatok hazánkban több helyen túlméretezettek a lecsökkent vízfogyasztás miatt, így a tartózkodási idő jelentősen megnőtt, ami sok esetben a maradék fertőtlenítőszer elfogyásához vezet, még mielőtt a víz a fogyasztóhoz jutna, és ez teret ad a hálózatban lejátszódó mikrobiológiai folyamatoknak. A vízelosztó hálózatban végbemenő folyamatokat befolyásoló fő tényezők:

- a víztisztítási folyamatok hatékonysága;
- a tisztított víz minősége (kémiai, biológiai, fizikai tulajdonságok);
- a hálózat állapota (korrózió, a vezetékek falán kialakuló biofilm stb.);

- a csőcserek, felújítások során a higiéniai előírások betartása;
- tartózkodási idő a vízelosztó rendszerben.

A vízelosztó rendszerben jelen lévő mikrobiológiai folyamatok:

- szerves anyagok oxidációja;
- nitrifikáció (aerob közeg);
- szerves anyagok (például vas, mangán oxidációja – aerob közeg) oxidációja;
- szerves anyagok (például vas, szulfát – anaerob közeg) redukciója;
- mikrobiológiailag előidézett korrózió.

Az elosztó rendszerben a kemoautotróf szervezetek számára legjelentősebb szerves energiaforrások: kétvegyértékű vas, redukált kénvegyületek, hidrogéngáz, mangán, ammóniumion és nitrítion.

A folyamatok egy része olyan változásokat eredményez, ami nem jelent közvetlen egészségügyi kockázatot, csupán a víz élvezeti értékének romlásához vezet (kellemetlen íz, szín, illetve szag). Egyes mikrobiológiai folyamatok azonban egészségre káros termékek keletkezésével is járhatnak, illetve jelentős mértékben befolyásolhatják a hálózat állapotát.

4.3.1. Biofilmek kialakulása

A hálózatban előforduló mikrobák több mint 90%-a nem a tápanyagszegény (oligotróf) áramló vízben, hanem szilárd felületekhez tapadva, a csövek falán él. A kis tápanyag-koncentrációjú víz nagy sebességgel áramolva a rögzült élő szervezetek számára folyamatos tápanyag-utánpótlást biztosít. A vizes fázisban élő (planktonikus) baktériumok többsége a sejt falon kívül poliszacharidot és egyéb polimer molekulákat (glikoproteinek, glikolipidek, extracelluláris DNS) tartalmazó váladékot (EPS: extra cellular polymeric substance) termel. Mivel az EPS nagyon adszorptív felületű a kationokra nézve (különösen a többvegyértékű kationokra nézve, mint a kalcium, cink, vas), elősegíti a baktériumok meglepedését szilárd felületeken, még áramló vizekben is. A meglepedő (szesszilis) mikroorganizmusok egy vékony, eleinte pár mikrométer vastag réteget alakítanak ki a folyadék és szilárd fázis határán, amelyet biofilmnek nevezünk. A biofilm nagyobb tömegét az élő és elhalt mikroorganizmusok, a baktériumok által kiválasztott EPS (a biofilm szerves szén tartalmának körülbelül 50–90%-át tartalmazza), metabolitok, valamint szilárd, kitapadt részecskék adják. Mivel a biofilmek jó adszorbensek, az áramló vízből különféle szerves és szerves anyagokat adszorbeálnak, amelyek tovább erősítik a biofilm háromdimenziójú struktúráját.

A baktériumok szaporodásához a csővezeték belső felületén kialakuló biofilm ideális környezetet szolgáltat. A baktériumok szaporodását befolyásoló főbb tényezők:

- a víz hőmérséklete;
- a víz pH-ja;
- a fertőtlenítőszer koncentrációja;
- a biológiai lebontható, oldott szerves szén (BDOC) koncentrációja;
- a cső kémiai összetétele: az ivóvízzel kontaktusban lévő egyes anyagokból biológiai lebontható vegyületek szabadulnak fel, amelyek az ivóvízbe kerülnek, illetve a biofilmképződést is serkentetik;
- a csőfal morfológiai sajátosságai, így annak érdessége, stabilitása (például a korrodált vascsövek a baktériumok számára rögzülési helyeket biztosítanak).

A biofilm dinamikus rendszer, folyamatos megkötődés, érés, leválás és elhalás jellemzi. Az EPS-mátrixba beágyazódott mikrobák a fertőtlenítőszerrel szemben ellenállóak, így előfordulhat, hogy a vízelosztó rendszerben a megnövelt fertőtlenítőszer-koncentráció a tisztítótelepen való fertőtlenítésnél kevésbé hatékony a mikroorganizmusok szaporodásának gátlására. Bizonyos fertőtlenítőszer reakcióba lépnek a biofilm anyagával, és elfogynak, mire a biofilmben található élő mikroorganizmusok közelébe jutnának, másrészt a biofilmben élő baktériumok populációi ellenállóbbá válnak a fertőtlenítőszerrel szemben.

- A hálózatban kialakuló biofilmnek közvetett kellemetlen hatásai is vannak a szolgáltatott ivóvíz minőségére: elősegíti a patogén mikroorganizmusok megjelenését a hálózatban;
- a tápláléklánc „kiindulópontjaként” a magasabb rendű (akár már szabad szemmel is látható) szervezetek szaporodását elősegíti (például férgek);
- a biofilm mikrobiális tevékenysége a vezetékek korrózióját okozhatja;
- az időszakosan leszakadó biofilm jelentősen növeli a víz zavarosságát;
- a nitrifikáló mikroorganizmusok megjelenésével nitrit halmozódhat fel a szállított ivóvízben;
- bizonyos baktériumpopulációk kellemetlen íz- és szagvegyületeket produkálnak.

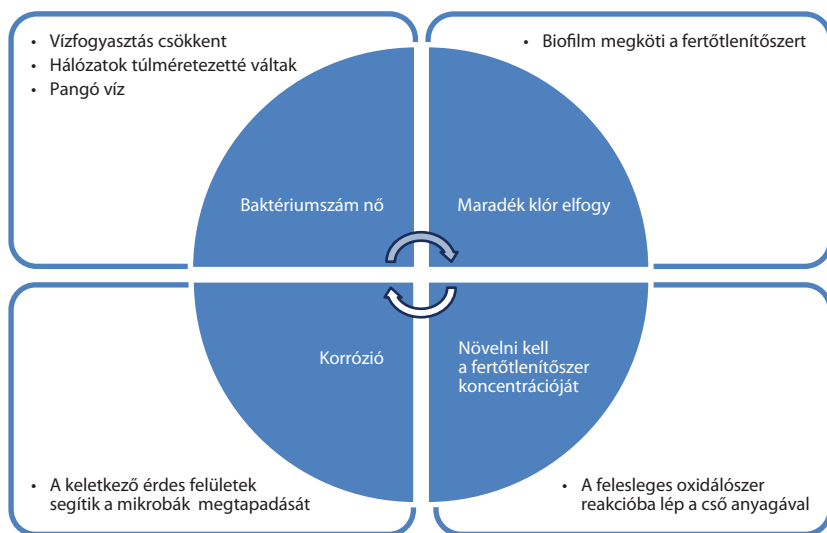
A víz ózonos oxidációja során képződő kis molekulájú szerves anyagok biológiailag könnyen lebonthatók, így előfordulásuk segíti a biofilm létrejöttét a vízelosztó rendszerben. A klórral és ultraibolya (UV-) sugárzással történő fertőtlenítések is oxidatív folyamatok, amelyek szintén fokozzák a könnyen felvehető szerves anyagok képződését, így nagy kiindulási szervesanyag-tartalom esetén hozzájárulnak a biofilm kialakulásához.

4.3.2. Biokorrózió a vízelosztó hálózatban

A vízvezetékben kétféle korróziós folyamat van jelen: a kémiai korrózió és a mikrobiológiai korrózió. A kémiai korróziót a különféle fertőtlenítőszer oxidáló hatása, alacsony pH-érték (például nitrifikáló baktériumok, savtermelő baktériumok, gombák tevékenysége pH-csökkenést eredményez), magas agresszív szén-dioxid-tartalom, illetve magas oldottoxigén-tartalom okozhatja. A biofilmben előforduló mikroorganizmusok okozzák a biológiai korróziót. A két típusú korróziós folyamat és kezelésük szoros összefüggésben van.

A csökkent vízfogyasztás, a megnövekedett tartózkodási idő a maradék fertőtlenítőszer-koncentráció fogyáshoz vezet, aminek következtében a vezetékekben a mikrobiológiai korróziós folyamatok túlsúlyba juthatnak. A hálózatban a maradék klórkoncentráció magasabb koncentrációja megakadályozza a baktériumok szaporodását, ugyanakkor a klór a vasat közvetlenül oxidálhatja (4.1. ábra).

Az ivóvízvezetékek mikrobiológiai korróziójához leginkább a vas, valamint az elemi kén és különböző oxidációs formáit hasznosító baktériumok járulnak hozzá. Mindkét csoportba tartoznak oxidáló és redukáló mikroorganizmusok. A *Gallionella* vasoxidáló baktérium a redukált állapotú vasat (Fe^{2+}) oxidálja (Fe^{3+}) oldhatatlan csapadékot képezve, míg a *Leptothrix* a ferri vas (Fe^{3+}) redukcióját végzi. A kénoxidálók például *Thiobacillus*, *Beggiatoa* az elemi ként és egyéb redukált kénformákat oxidálnak, amelynek eredményeként korrozív szulfát ($\text{S}^{2-} + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_4^{2-}$), illetve kénsav ($\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$) keletkezik, ezáltal csökken a környezet pH-ja. A kén- és szulfátredukáló baktériumok szervesanyag-oxidálás mellett kén-hidrogént hoznak létre (kénből, szulfátból, szulfidból vagy tioszulfátból), ami nagyon kellemetlen szagú, igen korrozív gáz, vassal nehezen oldódó, sötét színű csapadékot képez (FeS).



4.1. ábra: A vízhálózatban kialakuló biokorrózió kapcsolatrendszere (a szerző szerkesztése)

4.4. Patogének a vízelosztó hálózatban

A fertőtlenítés elsődleges célja a patogén szervezetek eltávolítása, a biofilm kialakulásának megakadályozása, illetve kordában tartása, ami nemcsak a patogének túlélését, esetleges szaporodását teszi lehetővé, hanem korróziót is okozhat. A szigorú fertőtlenítési előírások betartása ellenére sem mentes az ivóvíz a mikroorganizmusoktól, az ivóvíz nem steril. A sterilitás nem is lehet reális cél, de a potenciálisan betegséget okozó mikroorganizmusok rendszerbe kerülésének megakadályozása az egyik legfontosabb cél kell, hogy legyen az ivóvíz-szolgáltatók számára. Az ivóvízből számos különböző mikroorganizmust, vírust, baktériumot, egysejtű eukariótákat, férgekkel izoláltak. Azokat a mikroorganizmusokat, amelyek a szervezetbe jutva betegséget okoznak, patogéneknek nevezzük, például *Escherichia coli*, *Campylobacter*, *Salmonella*. Egyes mikroorganizmusok az egészséges emberre ártalmatlanok, de gyermekeket, a legyengült időseket, illetve a gyengébb immunrendszerű embereket megbetegítik, ezeket oportunistáknak nevezzük, ilyen például a tüdőgyulladást okozó *Legionella pneumophila* és *Pseudomonas aeruginosa*.

A baktériumok alkotják a biofilmtársulás zömét. A jelenlegi szabvány szerinti mérések során a biomassza mennyiségének és összetételének meghatározására heterotróf csíraszám meghatározást (heterotroph plate count – HPC) alkalmazunk, amely az aerob és fakultatívan anaerob, baktériumokat képes kimutatni. Ezek a mikrobák a szén és az energiát szerves vegyületekből nyerik (heterotrófok). Származásuk és az általuk okozott közegészségügyi kockázat szintje tulajdonképpen ismeretlen. Az ivóvíz biológiai minőségvizsgálata során elsősorban az összes coliform baktérium mennyiségét mérjük. A coliformok heterotróf baktériumok, amelyek rendszerint nagy tömegben vannak jelen emberi és/vagy állati fekáliával szennyezett vizekben, de fekáliamentes környezetben (mint a víz, talaj és növénytakaró) is megtalálhatóak. Többségük betegséget nem okoz. A coliformok az ivóvíz minőségének elsődleges mikrobiológiai indikátorai: az összes coliform csíraszám a vizsgált víz higiéniai állapotáról ad általános információt.

A *fekális coliformok* az összes coliformok alcsoportját képezik, elsősorban melegvérű állatok és az ember bélcsatornájában találhatóak meg, ezért a fekális szennyeződés pontosabb indikátorainak számítanak, mint az összes coliform csíraszám. Az uralkodó fekális coliform az *Escherichia coli* (*E. coli*). Az *E. coli* a vízi környezetben rendszerint rövid ideig képes a túlélésre, jelenléte az ivóvízben friss fekális szennyeződésre utal. A ritkán előforduló fekális coliform fajok (spp.) az elosztórendszerben: *Enterobacter cloacae*, *Klebsiella spp.*, *Citrobacter freundii*, *Enterobacter agglomerans*.

Általánosan feltételezik, hogy az elegendő koncentrációjú maradék fertőtlenítőszer a patogének ellen védelmet nyújt. Ezen megállapítás azonban két tényező miatt meglehetősen bizonytalan: 1. A szesszilis mikrobák a planktonikus formákkal szemben túlélési előnyökkel rendelkeznek, a maradék fertőtlenítőszer ellenére is. 2. A hagyományos tenyésztési módszerek közismerten alulbecsülik a hálózatlan található mikrobák diverzitását, továbbá a célorganizmusok nem vonhatók tenyésztésbe, amikor a vízelosztó rendszer viszonylag kedvezőtlen környezete miatt olyan fiziológiai változásokon (sérülés és éhezés) mennek át, ami gátolja a szaporodásukat, ennek ellenére jelen vannak a rendszerben, így a hagyományos módszerrel szintén alábecsült a számuk.

4.5. A hidrodinamika és a biológiai folyamatok kapcsolata

A vízmozgás jellege nagyban befolyásolja a vízkezelési technológia hatásfokát, illetve a vízosztás során nemcsak magának az elosztórendszernek az energiaviszonyait határozza meg, hanem az esetlegesen fellépő biológiai aktivitásra is hat. A technológiai lépcsők reaktorokban, medencékben valósulnak meg, ezért ezzel a területtel a műtárgy-hidraulika, míg a vízelosztó rendszer vízmozgásával a hálózathidraulika foglalkozik.

4.5.1. Áramlás a tisztítási technológia műtárgyaiban

A reaktor, amelyben az adott fizikai/kémiai/biológiai folyamat megvalósul, áramlás szempontjából szinte sosem tekinthető ideálisnak, vagyis a legritkább esetben tudjuk biztosítani, hogy minden egyes reaktorelem egyenletes terhelést kapjon, és homogén sebességteret hozzon létre. Gyakran szembesülünk azzal, hogy egyes, a reaktorba belépő vízcsoomag hamarabb távozik, mint a többi (hidraulikai rövidzárlat), vagy éppen sokkal többet tartózkodik a reaktortéren belül, mint az átlagos tartózkodási idő (pangó térrész, holttér). A hidraulikai rövidzárlaton kijutó fluidum a rövid tartózkodási ideje miatt nem megy teljes körűen keresztül az adott technológiai lépéseken (például részleges kiüledés, részleges flokkuláció vagy fertőtlenítés). A pangó zónákban viszont nagyon gyakran nem kívánatos biológiai folyamatok indulhatnak be, hiszen a hosszú tartózkodási idő miatt a fertőtlenítő hatás megszűnik. Általában a konvektív anyagtranszporttól távol eső térrészekről van szó, azaz az alacsony sebességű zónákban a mikroorganizmus szaporulat növekedése várható.

4.5.2. Az áramlás hatása a vízelosztó hálózatban kialakuló biofilmre

A vízelosztó hálózat egyes nagy vízkorral és kis vízsebességgel rendelkező részein a cső belső falán biofilm jöhet létre. A biofilm vastagságát számos tényező befolyásolja; például a vízse-

besség, nyíróerők, szubsztrát vagy fertőtlenítőszer jelenléte. Permanens biofilmeknél (a biofilm tömege időben állandósult) a biofilm és a főáramlás között dinamikus egyensúly áll be, amelyet a leválási ráta befolyásol. A leválás többfajtaképpen történhet; kismértékű leválás részecskeütkezés (abrázió), folyadékáram nyírásával (erózió), nagymértékű leválás kimosódással vagy predátorok által. A folyadékáram nyírása abból ered, hogy a fal közelében lamináris határreteg alakul ki közel zérus sebességgel, a főáramlás pedig turbulens. A két rész között elhelyezkedő átmeneti rétegben nagy a sebességgradiens. Ebből következik, hogy az itt lévő biofilm rétegeire eltérő erőhatás lép fel, és a külső rétegek leválhatnak. Ha ilyen rendszerben mégis kialakul a biofilm, akkor az áramlásból származó nyíróerő nem tudja leküzdeni a biofilm mátrixának stabilitását. A leválás hidrodinamikai okból akkor lép fel, ha hirtelen sebességváltozás történik a rendszerben, amelyet okozhat hirtelen megnövekedett sebesség, de a folyásirány megváltozása is.

Az áramlási körülmények között a nyírásen kívül a lokális turbulenciát kell még megemlíteni. A biofilm felülete és a turbulens főáramlás között itt is lamináris határreteg képződik (ugyanúgy, mint biofilm nélkül a csőfal és az áramlás között). Ezen határreteg a tápanyagtranszport szempontjából ellenállásként jelentkezik, vagyis minél vastagabb, annál nagyobb hajtóerő tudja a szubsztrátot a biofilmbe juttatni. A főáramlás turbulenciája azonban a határreteg-vastagságot csökkenti, ezáltal az anyagtranszportot támogatja.

Fejezetzáró kérdések

1. Melyek azok a tényezők, amelyek az élőlények előfordulását elsődlegesen befolyásolják a különböző típusú vízbázisoknál?
2. Ismertesse a víztisztítási folyamatok jelentősebb mikrobiológiai folyamatait!
3. Mi a biofilm kialakulásának jelentősége a víztisztítás során?
4. Mely baktériumcsoportot használják az ivóvíz biológiai vízminőségének vizsgálatára?
5. Hogyan hatnak az áramlási viszonyok a biofilm kialakulására?

Ajánlott irodalom

- Ashbolt NJ. Microbial contamination of drinking water and human health from community water systems. Curr Envir Health Rep. 2015 Mar;2(1):95–106. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40572-014-0037-5>
- Barna Zs, Bánfi R, Horváth JK, Kádár M, Szax A, Vargha M. Legionella előfordulása különböző eredetű hálózati vízmintákban. Egészségtudomány. 2011; LV.(2):63–76.
- Barna Zs. Legionella kolonizáció terjedése és diverzitása épített vízrendszerekben. [Doktori értekezés]. Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem Környezettudományi Doktori Iskola; 2016.
- Cabral JPS. Water Microbiology. Bacterial Pathogens and Water. Int. J. Environ. Res. Public Health. 2010 Oct; 7(10):3657–3703. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph7103657>
- Hegedűs J. Ivóvízbiológia. Budapest ivó- és iparivíz ellátásával kapcsolatos biológiai tárgyú cikkeinek gyűjteményes kiadása. Környezetügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató 6. Budapest: Környezetgazdálkodási Intézet; 1999. 144 p.
- Hegedűs J. Parazitológia az ivóvízellátásban. Környezetügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató 9. Budapest: Környezetgazdálkodási Intézet; 2000. 63 p.
- Laky D. Víztisztítás. Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem; 2007.

- Mátrai I, Vadkerti E. Tározók ökológiai állapotfelmérése. In: Szlávik L, Gampel T, Szigeti E szerkesztők. A Magyar Hidrológiai Társaság által rendezett XXXIII. Országos Vándorgyűlés dolgozatai. Budapest: Magyar Hidrológiai Társaság (MHT); 2015.
- Karches T. Numerikus hidraulikai modellezés a szennyvíztisztítás szolgálatában, MASZESZ HÍRCSATORNA. 2012 január–február: 3–7.
- Némedi L. A mikrobiológiai kockázat jellemzése a vízi környezet és a vízi közművek területein. Budapest: Magyar Víziközmű Szövetség; 2006. 164 p.
- Öllős G. Vízellátás-csatornázás közegészségügyi ismeretei. Budapest: Vízügyi Múzeum, Levéltár és Könyvgyűjtemény; 2001. 755 p.
- Öllős G. Vízminőségváltozás a vízelosztó rendszerben. Budapest: Közlekedési Dokumentációs Kft.; 2008. 358 p.
- Salamon E. Ivóvízhálózatok hidraulikai modellezése, a modellezés határai, Vízmű Panoráma. 2017;25(5): 10–17.
- Sárvári A. Környezetegészségtan. [Internet]. Debrecen: Debreceni Egyetem; 2011. [letöltve 2020. 11. 06] Elérhető: www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0019_1A_Kornyezetegeszsegtan/index.html
- Szilágyi F, Orbán V. szerkesztők. Alkalmazott hidrobiológia. Budapest: Magyar Víziközmű Szövetség; 2007. 624 p.
- Vadkerti E. A szennyezett felszíni víz öntisztulási folyamatai. In: Mátrai I szerkesztő. Vízből. Baja: Eötvös József Főiskola; 2015.
- Vadkerti E. Ivóvízellátó rendszerek biológiája. Baja: Eötvös József Főiskola; 2015.