

TÖPRENGÉSEK A VÍZRŐL

– lépéskényszerben –

Somlyódy László

az MTA rendes tagja
BME Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék
somlyody@vkkt.bme.hu

Cianidszennyezés, rekord árvizek és a tiszai szabályozás újragondolása, belvízi elöntések, aszály és vízhiány, a Balaton vesztes vízvesztése és a sokak által követelt vízpótlás, éghajlatváltozás, a Rába habzása, a víz- és csatornadíjak égbe emelkedése, az ivóvízellátás és a szennyvíztisztítás ezermilliárd forint nagyságrendű fejlesztése jelentik az elmúlt évtized legfontosabb hazai vizes híreit. A nagyvilágból riasztó jelzésekről hallunk: vesztes vízhiány sokféle, az ivóvízellátás és szennyvízelhelyezés katasztrófális állapota, ijesztő csecsemőhalálozási ráták a vízzel terjedő fertőzések következtében a fejlődő világban, a vesztesen öregedő vízi infrastruktúra, változatos szennyezések minden mennyiségben, természeti katasztrófák, mint a Szumátra közeli cunami vagy a New Orleans-ra lecsapó Katrina hurrikán, az Aral-tóhoz hasonlóan eltűnő vizek, a több országot lefedő nemzetközi vízgyűjtők konfliktusai és az éghajlatváltozás feltételezett – ma már nem is olyan váratlan – hatásai.

Mára közhelynek tűnik, de a víz az egyik stratégiai fontosságú, korlátozottan rendelkezésre álló, sérülékeny és jelentős gazdasági értékkel felruházott erőforrás, az élet, az egészség fenntartója, a gazdasági fejlődés előfeltétele és a természeti szépség forrása. Az aggasztó jeleket látva sokan gondolják azt, hogy az

olajkorszakot követően a 21. század válságát a semmi mással nem helyettesíthető víz jeleníti majd. A hasonlóságot alátámasztja, hogy a becslések szerint a víz-„biznisz” napjainkban az olajénak mintegy a felét teszi ki. De valóban vízválság fenyeget? Miben jelentkezik a víz kihívása? Melyek a tágabb értelemben vett kiváltó okok? Miben segíthet a tudomány?

Készletek és igények

A Föld globális vízkészlete közel állandó. Megújuló erőforrásként évente mintegy félmillió km³ víz lép a folytonos, nagy körforgásba és szállít magával sokféle más anyagot is. A teljes vízkészlet mintegy 2,5 %-a édesvíz, ezen belül a hasznosítható hányad csupán 0,6 %. A globális vízigeny a megújuló készletnek töredéke, azaz az *első gondot* a térben és időben roppant egyenlőtlen elosztás jelenti. A kilencvenes évek végén a megújuló készlet fejenként átlagosan 6600 m³/év¹ volt (Cosgrove and Rijberman, 2000), vízhiányos területenként azonban ez az érték nem haladta meg a né-

¹ Összehasonlításként ez az érték Magyarországon átlagosan 10 000 m³/év/fő körüli, míg csupán 600 m³/év/fő, ha az országon belül keletkező készletet tekintjük. A területi változékonyságot vizsgálva a Duna-Tisza köze és a Tiszántúl lényegesen kedvezőtlenebb helyzetben van, mint a Dunántúl.

hány száz m³/év/fő-t. Vízgazdálkodási szempontból fizikailag kritikus helyzetről vagy „stresszről” akkor beszélünk, ha a fajlagos vízmennyiség 1000-1700 m³/év/fő-nél kevesebb és ugyanakkor a kihasználtság 40-60 % feletti. A legnagyobb vízhasználatot (70 %) az öntözés teszi ki. A háztartások átlagos fogyasztása 10 % alatti,² az iparé pedig 20 % körüli.

A *második gond* a globális népesedés változatlanul exponenciális növekedéséhez kötődik, amely túlzott mértékű termeléssel és fogyasztással párosul.³ Aligha gondolta volna bárki is a századfordulón, hogy a Föld népessége a millenniumig 5 milliárddal fog nőni, majd 2025-ig elérheti a 8 milliárdot (ezzel az átlagos fajlagos vízkészlet 4800 m³/év/fő körüli értékre csökkenhet). A szaporodás a fejlődő világot jellemzi és megatrendként fokozza a már ma is nagy társadalmi és gazdasági különbséget Észak és Dél között. A vízhasználatok a népességnövekedéshez viszonyítva közel kétszeres mértékben nőttek. Becslések szerint a növekedés 1980 és 2000 között 80 % körüli volt (Shiklomanov, 1999).

A Föld népessége különböző mértékben küszködik az elégtelen mennyiségű vízből adódó gondokkal. Az 1990-es évek elején a lakosságnak 4-6 %-a élt stressz alatt (de például gazdasági okok miatt mintegy 20 % nem jutott biztonságos ivóvízhez), elsősorban a Közép-Keleten és Észak-Afrikában (Kulshreshtha, 1993). Itt a fejenkénti készletek évente nem haladják meg a 200-300 m³-t (a legrosszabb helyzetben Egyiptom és az Egyesült Arab Emírátságok található). Az elemzések szerint a készletek és az igények eloszlásá-

² Ma a fejlett világban a napi lakossági vízfogyasztás 100 l/fő és 150 l/fő között található (a biológiai és a higiéniai minimum 2-5 l/fő/nap illetve 50-70 l/fő/nap).

³ Főemlős bakteriális szaporodási rátával? Melyek az ökológiai következmények?

nak egyenlőtlensége elsősorban az éghajlatváltozási hatások miatt növekszik, és 2025-re, a szegény afrikai és ázsiai térségekben a lakosság fele élhet inséges körülmények között (Kulshreshtha, 1993, Cosgrove and Rijberman, 2000). A készletek igen szűkösek Észak-Kínában és Dél-Ázsiában is, ahol az elmúlt fél évszázad változásai rendkívül kedvezőtlen trendet mutatnak. A tágabb térség fejlődése globális léptéken befolyásolhatja a vízdilemmát. A becslések bizonytalanok, azok nagymértékben függenek a különböző forgatókönyvek feltevéseitől, beleértve a gazdaság alakulását, az éghajlatváltozás készletekre és igényekre gyakorolt hatásait, valamint a technológiai fejlődést.

Városiasodás, ivóvízellátás és szennyvízelhelyezés

A probléma – az elsősorban a fejlődő országokra jellemző – városiasodás miatt felerősödve jelentkezik (Varis and Somlyódy, 1997). Ez jelenti a *harmadik gondot*. A városi lakosság száma 1970 és 1990 között megduplázódott és 2025-re elérheti az 1975. évi teljes népességet, miközben a vidéken élők száma stabilizálódni látszik. A gyorsan növekvő városok (Afrikában és Ázsiában a városi népesség a következő 25 év során megkétszereződhet) infrastruktúrája átláthatatlan, alig tervezhető és képtelen követni az igényeket. A következmények a felszín alatti vizek túlzott mértékű kihasználása (Pekingben például 1950 óta a talajvízszint csökkenése 50 m körüli, ma mintegy 40 000 kút termeli ki egyre mélyebbről a vizet⁴) és elszennyeződése, a járványok nagy száma Afrikában és a Közép-Keleten, az

⁴ A megállapítás a nagy öntözési vízigeny miatt Kína sok területére érvényes. Másik példa a Közép-Kelet térsége, de említhetjük Indiát is, ahol szintén az öntözés vezetett nagyléptékű környezeti problémákhoz.

esővizek levezetésének hiánya és az árvizekkel szembeni kiszolgáltatottság (a városi elszívás és vidéki tasztítás másik gyakori oldala az elszegényedő vidék, a növekvő öntözés a városi táplálkozási igények teljesítése érdekében és a fokozódó szikesedés). Jelenleg több mint 1 milliárd ember él biztonságos ivóvízellátás, és 2.6 milliárd megfelelő szennyvízelvezetés nélkül (a *negyedik és az ötödik gond*, WHO, 2004). A fejlődő világ lakosságának a fele szenved különböző, vízzel terjedő betegségektől: évente közel kétmillió, öt évnél fiatalabb gyermek az áldozata az ivóvízellátás és a szennyvízelhelyezés megoldatlanságának (WHO and UNICEF, 2004). A WHO (2004) szerint Ázsiában, Dél-Amerikában és a Szub-Szaharai Afrikában a szennyvizek 65 %-a, 86 %-a, illetve 100 %-a marad tisztítatlan és ez az arány jelentősen nőni fog, hacsak az ENSZ millenniumi célkitűzéseit nem sikerül teljesíteni.

Járványok és meglepetések (1)

*Tífusz, kolera, hepatitisz és társai, a fejlett világban a múlt század második fele óta a vízellátás, csatornázás és szennyvíztisztítás által megoldottak hitt problémák (Somlyódy, 2002). Napjainkban, a harmadik világban 25 millióra tehető az évenkénti halálozások száma, az öt év alattiak elhalálozásának kétharmada pedig a vízzel terjedő járványoknak tudható be. A születési elhalálozás és a biztonságos ivóvízellátás szorosan összefügg: számos olyan fejlődő országban, ahol az ellátás csak 10 % és 40 % közötti (például Afganisztán, Angola, Etiópia, Banglades, India, Tanzánia) a mortalitás 12 % feletti. Az elmúlt évek során járványokról jelentettek több közeli országban is (Románia, Ukrajna stb.). Az Egyesült Államokban, 1993-ban, Milwaukee-ban a *Cryptosporidium* parazita által kiváltott járványt észlelték: több mint 400 000-en betegedtek meg és 54-en haltak meg. Az ehhez hasonló egysejtű*

parazitáknak más az életciklusa, mint a baktériumoknak, és spóráik nagyon ellenállók a tradicionális fertőtlenítési eljárással (klórozás) szemben. A felszín alatti vizekben is előfordulhatnak. Fertőzött élelmiszerek révén is terjednek a globalizálódó világpiacon. A Milwaukee-i eset alapvetően változtatta meg a szemléletünket az ivóvízellátásban: a járvány annak ellenére tört ki, hogy az összes előírást betartották. Rájöttünk, hogy az „teljes” biztonság nem létezik, és alapvető a kockázati szemlélet bevezetése. Tudjuk, mi minden lehet még a vízben?

Az ENSZ 2015-re – 1990-hez viszonyítva – a biztonságos vízellátásban és szennyvízelhelyezésben nem részesülő népesség felezését tűzi ki ambiciózus célként. A 2002-es értékelés azonban több mint aggasztó (WHO and UNICEF, 2004). A vízellátás globális lefedettsége ugyan 83 % (a fejlett világban gyakorlatilag 100 %), ugyanakkor azonban a népesség miatt 1,1 milliárd ember változatlanul ma sem részesül biztonságos ellátásban. A szennyvízelhelyezés fejlődése elmarad a 2002-es céltől (58 % a 62 %-kal szemben): a jelenlegi trend mellett 2015-ben legalább annyian élnek majd szolgáltatás nélkül, mint 1990-ben. A jövő nem tűnik túl biztatónak.

Szennyezési problémák

A főbb vízminőségi problémákat – az elmúlt 150 évre visszatekintve – a felismerésük időrendi sorrendjében sorolhatjuk fel: járványok és a patogén baktériumok és paraziták által előidézett megbetegedések (Keret 1), az oxigénháztartás felborulása a nagy szervesanyagterhelés következtében, a felmelegedett hűtővizek okozta hőszennyezés, a túlzott tápanyagfeldúsulás által kiváltott eutrofizálódás, a szerves és szerves perzisztens mikroorganizmok, amelyek alacsony, µg/l-nyi koncentrációban fejtik ki toxikus és esetenként rák-

keltő hatásukat (évente több ezer ilyen vegyület szintetizálnak és forgalmaznak), a felszín alatti vizek elszennyeződése (nitrát, szulfát, peszticidek, valamint a hulladéklerakókból származó különböző anyagok), a savasodás, az éghajlatváltozás és a globalizáció szerteragázó következményei.

Vizsgálataink szerint (Somlyódy, 1995, Somlyódy and Varis, 2006) a főbb trendek az alábbiak:

- A problémák léptéke nő a lokálistól a globális irányába;
- Az üledék, a talaj és a talajvíz elszennyeződése következtében az ok-okozati hatások, továbbá a beavatkozások eredményei csak számottevő kísérlettel jelentkeznek;
- Adott helyen sok, egyidejű, eltérő jellegű és egymásra kölcsönösen ható problémát kell orvosolni;
- Folyamatosan számolnunk kell meglepetések felbukkanásával. Ilyen az említett *Cryptosporidium* járvány (első keretes szöveg), az éghajlatváltozás hatásai, a közlekedés javulása miatt a járványok nagymértékű és gyors potenciális terjedése a világban, az egészségügyi gondok megjelenése alga toxinok, szerves mikroorganizmok, szintetikus szteroidok, gyógyszermaradványok, természetes hormonok és kozmetikumok és más, a hormonháztartást befolyásoló anyagok miatt.⁵ Valójában a fejlett világ egyik legkomolyabb problémáját ezek, a gyakran alig detektálható ppt (parts per trillion) mennyiségben és ismeretlen összetételben előforduló nanoszennyezők okozhatják (második keretes szöveg). Egészségügyi és ökológiai

⁵ Itt említendő az óriási lehetőségeket rejtő nanotechnológiai módszerek velejárójaként a várhatóan növekvő mennyiségben környezetbe jutó nanorészecskék egyelőre ismeretlen hatása, amennyiben a kapcsolódó ipar nem jár el kellő elővigyázatossággal.

hatásaik feltáratlanok. Többségükre a hagyományos víz- és szennyvíztisztítási módszerek nem adekvátak, és gyakran élelmszeripari termékekben is hasonló anyagokat találhatunk, azaz az expozíciós utak ismeretlenek;

- A pontszerű szennyezések tisztítással történő szabályozásával világszerte a csapadék által a földről, városi burkolt útfelületekről lemosott ún. diffúz szennyezések váltak dominánsokká (például a Duna vízgyűjtő esetében a tápanyag-emissziók 70-80 %-a ilyen jellegű). A nem-pontszerű szennyezések kezelése alapvető szemléleti változást igényel, hiszen szabályozásuk nem lehetséges a földhasználat átgondolása, továbbá a bioszféra két másik elemének, a talajnak és a légkörnek a bevonása nélkül: a különböző anyagok vándorlását a hidrológiai körforgással együtt kell nyomon követni. A „hogyanra” még csak keressük a receptet.

Napjainkban (2)

Szintetikus szteroidokat (nemi hormonokat) széles körben alkalmaz a gyógyszeripar. Ezek ellenőrizetlen módon, jelentős mennyiségben jutnak a szennyvizekbe a fogamzásgátló tablettákat használó nők által kiürített szteroidokkal együtt. Újabban kimutatták, hogy a szintetikus szteroidokat a szennyvizet tisztító baktériumok aktiválhatják: angliai folyókban azt találták, hogy nagyobb városi szennyvíztelepek közelében a halak normális ivararánya jelentősen eltolódik a nőstények felé (a halaknál az ivari determináció nem feltétlenül genetikai, hanem hormonális). Azon színté még találgatni sem tudunk, hogy milyen lehet az ivóvizek szteroidtartalma és okozhatja-e az emberi genitális daganatok arányának növekedését. Nyugtalanító.

A fenti eszmefuttatásból kitűnik, hogy gyakran kissé pongyolán beszélünk a vízprob-

lémák *globális* jellegéről. Valójában a gondok két nagy osztályát célszerű megkülönböztetni. Az elsőbe tartoznak az üvegházhatású gázok mennyiségi és minőségi, valamint a globális közlekedés már említett hatásai. Szintén ide sorolhatók a globalizálódó élelmiszerkereskedelem határokön átnyúló következményei: az EU sok országában forgalmazott „mosolygós” és ízetlen paradicsom természetese például Portugáliában, Spanyolországban, vagy a marhahús előállítás Brazíliában és Argentínában vezethet vízhiányhoz (érdemes megjegyezni, hogy például 1 kg paradicsom, gabona és marhahús előállítása mintegy 0,3, 1-4, illetve 16 m³ vizet igényel – utóbbi negyedévnnyi ivóvízfogyasztásunkkal egyenértékű^{6,7}). A második, nagyobb csoport a globálisnál kisebb léptékű *univerzális* problémákat tartalmazza, amelyek a Földön – a helyi körülményektől is függően – alapvetően mindenütt hasonlóan fordulnak elő. Ez a sokszínűség teszi a vízdilemmát nehezzé: az nem kezelhető egyetlen egységes stratégiával.

A szennyezések hatásai jelentik a *hatodik problémát*: gátolják, megdrágítják vagy megakadályozzák a kívánatos vízhasználatokat. Veszélyeket és hosszabb távon jelentkező károkat idézhetnek elő.

Szélsőségek és éghajlatváltozás

A *hetedik pofont* az árvizek és aszályok képezik. Szélsőséges események, a hidrológiai körforgás változékonyságának a következményei, amelyet az éghajlat- és a területhasználat válto-

zásai (*harmadik keretes szöveg*) számottevően befolyásolhatnak. Az árvizek a természeti katasztrófák kategóriájába tartoznak. Komoly kockázati tényezőt jelentenek és óriási gazdasági veszteséghez vezethetnek. Az aszályok egyrészt növelik a vízigényeket, másrészt a vízhiány miatt korlátozzák a vízhasználatokat, elsősorban az öntözést. A károk számottevőek lehetnek a mezőgazdaságban, az energia-termelésben, a turizmusban és más szektorokban. Mindkettő a többi vízgazdálkodási és környezeti gonddal együtt jelentkezik.

Az éghajlatváltozás hazai hatásairól (3)

Az Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC) 2007. évi jelentése szerint 90 %-os valószínűséggel állítható, hogy megéjük az emberi hatások által előidézett éghajlatváltozást. A European Environmental Agency húsz feletti indikátor elemzése alapján jut hasonló következtetésre. Valójában a víz jelenti az éghajlatváltozás által legerősebben befolyásolt erőforrást és szektort. Az éghajlatban várható, de bizonytalanul előrejelezhető változások igen meglephetik a hosszú távra szóló vízgazdálkodási tervek kidolgozását. A vizsgálatok szerint Magyarország klímája valószínűleg mediterrán irányba fog eltolódní, magasabb átlaghőmérséklettel, kevesebb nyári csapadékkal, ennek nyomán kisebb felszíni lefolyással és felszín alatti vizeket tápláló beszivárgással, és növekvő szélsőségekkel. Az egyik fontos következmény tehát, hogy kevesebb víz áll majd rendelkezésre az igények kielégítésére, különösen az öntözés számára. A tél végi, tavaszi árvizek hamarabb és az intenzívebb olvadás miatt növekvő csúcsokkal érkehetnek. A tavak vízforgalma átalakul, és várhatóan csökken a felületük, növekszik a tartózkodási idő és a sótartalom. Az oxigén- és a tápanyagháztartás ugyancsak kedvezőtlenül változhat. A szárazföldi ökoszisztémákban növekedhet a szárazságtűrő fajok aránya. Stratégiai szempontból az éghajlatváltozás hatásai olyan „külső”, kedvezőtlen elemek, amelyek a meglévő

problémákra szuperponálódnak, különösen a Tisza völgyében, ahol már eddig is gyakran jelentkeztek vízhiányos időszakok. Ezért a jövőben több figyelmet kell fordítani a várható hatások elemzésére, és célszerű rugalmas, különböző változatokat tartalmazó terveket készíteni.

Víz és változás

A biztosítótársaságok 1988 és 1997 között a Földön mintegy 6000 természeti katasztrófát regisztráltak, amelyek 35 %-a volt árvíz kétszáz ezer feletti áldozattal (az érintett lakosok száma 2 milliárd feletti). A károkat 300 milliárd dollárra teszik. A 20. század utolsó évtizedét húsz országban jellemezte rekord árvíz, így Ausztráliában, Bangladesben, Indiában, Kanadában, Kínában, Szomáliában, az USA-ban és sok európai országban. Az öreg kontinensen mintegy 100 jelentős árvíz pusztított. 4000 halálesetről tudunk. A szélsőséges események száma – úgy tűnik – gyarapszik. Ezt az elmúlt évek közép-kelet-európai eseményei is alátámasztják, de például 2003-ban sok latin-amerikai ország szenvedett árvízről és/vagy aszálytól. Nyugat-Ázsiában hét éves aszályt rendkívül csapadékos időszak követett 2002-ben és 2003-ban, és okozott súlyos árvizeket.

Az éghajlatváltozás sokoldalú kihívást jelent. Hidrológiai elemzések szerint (Shiklomanov, 1999) nagyobb változásokat idéz elő a szélsőségekben, mint az átlagokban és a szezonális változásokban. Más szóval, a növekvő legnagyobb árvizek és a szaporodó, súlyos aszályok egymást nem kizárva fordulhatnak elő. Ugyanakkor a biztonságosan felhasználható készletek mennyisége csökken és kihasználtságuk is kedvezőtlenül változik. Ezek komoly gazdasági és ökológiai következményekkel járnak, és az árvízi szabályozás, a tározás és az öntözés együttes újrarendelését igényli.

Az éghajlatváltozás bizonytalanságainak kezelése átfogó kutatásokat igényel. Azonban a gyakorlati feladatok megoldása aligha várhat ezek kikristályosodott eredményeire: elkerülhetetlenek a bizonytalansági és érzékenységi elemzések. Ezekhez alapvető a jó indikátorok kiválasztása, amelyek kis változásokra nagy érzékenységgel válaszolnak. Ilyen például a folyók esetében a legnagyobb vízszintek és vízhozamok változása, vagy az árvízi kitérttség, tavak esetében pedig a természetes vízkészlet (csapadék + hozzáfolyás - párolgás) változása, amelyet a Balaton vízpótlásának vizsgálatánál használtunk sikerrel (*negyedik keretes szöveg*), egyúttal módszertani receptet is nyújtva.

A Balaton vízpótlása: tenni vagy nem tenni? (4)

2000 és 2003 között négy rendkívül aszályos év követte egymást. A rendszeres megfigyelések megkezdése óta 2001-ben először vált a tó természetes vízkészletváltozása (TVK) negatívvá, ami a következő két évben megismétlődött. A tó átlagos készletének közel egyharmadát veszítette el. A kellemetlen jelek magukban foglalták a strandok degradálódását, a makrofitonok és a mederhez kötött algák elszaporodását a partközeli sávban és a kikötők navigációs nehézségeit. Kiváló okként felmerült az éghajlatváltozás valószínű hatása, és általános aggodalom volt megfigyelhető. Sokan vízpótlást javasoltak a Rábából vagy más vízgyűjtőről. Az elvégzett sokoldalú elemzések három pillére épültek (Somlyódy, 2005, Somlyódy and Honti, 2005): (a) megfelelés az EU egységes vízpótlásának, az ún. Víz Keretirányelvnek (VKI), (b) az elővigyázatosság elvének alkalmazása és (c) az éghajlatváltozás potenciális hatásának figyelembevétele forgatókönyvek segítségével. A következtetések a vízpótlás elvetését javasolták, mivel (i) a tó ökológiai állapota a nyílt vízen és a parti sávban egyaránt jó maradt, (ii) a tó pozitív vízmérlege és a kifejlesztett sztochasztikus

⁶ Házi feladat lehet az ökológiai lábnyom mintájára a „családi vízgyűjtőterület” becslése, ami a csapadékból lefolyás révén a közvetett vízfogyasztás fedezéséhez szükséges (hazai viszonyok között 1 kg marhahús mintegy 100 m²-rel egyenértékű).

⁷ A sokat vitatott bioetanol előállításához a növénytermesztés igényén túl 1-enként 2 l többletvíz szükséges.

vízháztartási modell alapján igazolható volt, hogy a tó egy-két éven belül még éghajlatváltozás esetén is feltöltődik és (iii) a vízpótlás számos megengedhetetlen ökológiai kockázattal járna. A vizsgálatok rámutattak arra, hogy a kérdéses aszályos időszak mintegy 200 évenként egyszer fordulhat elő, azonban a feltételezett éghajlatváltozási forgatókönyv esetén – miután a hatások a TVK mindhárom elemét kedvezőtlenül befolyásolják – az esemény akár 30-40 évenként is bekövetkezhet. A kutatások egyúttal javasolták a vízszintszabályozási rend felülvizsgálatát és a Sió csatorna levezető kapacitásának növelését medertisztítás révén, azért, hogy az alacsony vízállások elkerülése érdekében hosszabb ideig tarthassanak magasabb vízszinteket (a felülvizsgálatra mindmáig nem került sor). A megfigyelések igazolták a számításokat: 2005 elejéig a feltöltődés a becsült tartományon belül, közelítően a várható értéknek megfelelően következett be (Somlyódy, 2005). Hogyan cselekszünk, ha még alacsonyabb vízszintek alakulnak ki?

A döntésekhez integrált elemzésekre és okos döntéstámogató rendszerre van szükségünk. Ilyen például a Tisza új árvízszabályozási stratégiájának kidolgozására alkalmazott ARES 1.0 rendszer, amely többek között a hidrológia és hidrodinamika egy- és kétdimenziós fizikai egyenleteire, digitális topográfiai modellre, úrfelvételekre, távérzékelésre, térinformatikára és gazdasági elemzésekre épít (BME VKKT, 2003). Segítségükkel lehetővé válik nagyszámú alternatíva vizsgálata és az esetleges hibás döntések kockázatának mérlegelése, valamint robusztus, rugalmas és adaptív megoldások kijelölése.

Nemzetközi vizek és konfliktusok

A víz hagyományosan számos gazdasági, társadalmi és emberi konfliktus forrása. A víz lehet háborúk kiváltója és háborúk alatt mindig fontos stratégiai szerepet tölt be (az

iraki háború egyik legnehezebb logisztikai feladatát a sivatagban lévő felmillió katona vízellátása jelentette). A nemzetközi konfliktusok elsősorban a több országhoz tartozó vízgyűjtőkhöz kapcsolódnak. A Föld népességének a fele él ilyen területeken (Jordán, Gangesz, Nílus, Zambézi, Amazonas, Duna, Tigris–Eufrátesz, Rajna stb.): a vízgazdálkodás javítása az osztott vízgyűjtőkön a 21. század nyolcadik kihívása. Sok más területhez hasonlóan ennek sincsenek történelmileg kidolgozott, társadalmilag elfogadott hagyományai: a politikai, intézményi, pénzügyi és ellenőrzési feltételek nem állnak rendelkezésre, a nemzetközi szervezetek pedig tartózkodnak a konfrontációktól. A kérdéses területen Európa mutat talán számottevő előrelépést: a hivatkozott EU VKI (ötödik keretes szöveg) a vizek jó ökológiai állapotát tűzi ki egységes elvárási célként, vízgyűjtő-gazdálkodási tervek megvalósítása révén és a tervezés során a nemzetközi vizekre előírja az érintett országok egyeztetési kötelezettségét. A megvalósítás, úgy tűnik, erős politikai akarattal párosul.

Hab a Rábán (5)

A Rába Ausztria délkeleti, vizekben igen szegény részéről érkezik, ahol mind a hasznosítása, mind a terhelése intenzív: a vízgyűjtőjén 75 kommunális és 8 ipari szennyvíztelep található, az ipar-telepeken három helyen börtörtartás folyik. A folyó habzását először 2001-2002-ben, Szentgotthárdnál, és 140 km-rel lejjebb, Nicknél, valamint Ausztriában Fehring közelében figyelték meg. A rapszodikus jelenség széleskörű aggodalmat váltott ki, annál is inkább, mivel a szakemberek sem tudtak rá kielégítő magyarázatot adni. A 2005-ös magyar értelmezést, miszerint a habzásban a három börtörtartás lenne a ludas, az osztrák partner elhárította, de végül mégis elindított egy kutatási programot.

A habot a folyadékban diszpergált gáz hozza létre, ha abban habzásra hajlamos anyag található. A Rába esetében a „habverőt” a három bukólduzzasztó alatti gomolygó vízmozgás helyettesíti. A feltevések szerint a jelenséget esetünkben a szintetikus aromás szulfonátok, a mosószerek fontos összetevői idézik elő, amelyek csökkentik a víz felületi feszültségét. A Rábánál a naftalinszulfonát gyűjtőnevé, illetve azon belül a naftalindiszulfonát, biológiailag alig lebomló vegyület, az egyik legismertebb cserzőszer keveredett gyanúba. A bécsi Műegyetem kutatásai bizonyították a kapcsolatot az osztrák börtörtartás kibocsátása és a magyarországi habzás között, de ugyanakkor azt is, hogy a habzás nem írható egyetlen vegyület számlájára, hanem az sok anyag szinergikus hatásának az eredménye. Kimutatták azt is, hogy a habzás alacsony vízállások mellett (átlagosan az év 40 %-ában) mindaddig bekövetkezhet, amíg a „bűnös” vegyületek kibocsátását számottevően nem csökkentik. Technológiai szempontból a habképző anyagok eltávolításának egyik megoldása a szennyvíz speciális, többlépcsős fizikai-kémiai utótisztítása. Ezzel az eljárással, a 2007 nyarán elvégzett feldolgozó nagyléptékű kísérletek alapján a potenciális habzás időszaka évente néhány napra rövidülhet.

A Rába-probléma két EU-tagállam ritka konfliktusa, amelyet a nemzeti és az európai jogszabályi keretek között kell megoldani, akkor is, ha a habzás olyannyira ritkán jelentkező jelenség, hogy szabályozására egyetlen ország sem rendezkedett még be. Mindezek a tényezők – a probléma szakmailag feltáratlan voltával együtt – közel öt éves tárgyalási patthelyzetet hoztak létre, miközben a Duna-konvenció operatív szervezete és az EU távolról sem akart az ügybe belekeveredni. Az osztrák fél – jogilag megalapozottan – arra hivatkozott, hogy mindvégig börtörtartás betartotta a hatályos környezeti előírásokat. A 2007-es áttöréshez végül politikai tényezők is hozzájárultak: a köztársasági elnök és a környezetvédelmi és vízügyi miniszter határozott fellépése, a mindkét oldalon aktivizálódó zöldegyesetek, de nyomott a latban a fokozódó negatív osztrák társadalmi

megítélés és a két legnagyobb börtörtartás környezeti hatásokra érzékenyebb menedzsment megjelenése is.

Hol tartunk ma? A kétoldali akciócsoport 2007. őszi zárójelentése cselekvési programot határozott meg. Ennek legfontosabb elemei a felületi feszültségre vonatkozó kibocsátási határérték már megtörtént, úttörő jogszabályi előírása börtörtartásra, az utótisztítás megvalósítása 2008 és 2010 között, a monitoring program kölcsönös fejlesztése, szigorú ellenőrzés, tájékoztatás és a határvízi folyó vízgyűjtő gazdálkodási tervének közös kidolgozása is. De azt is látni kell, hogy a kibocsátások számottevő csökkentéséig a habzás – a megelőző évekhez hasonlóan – mindennapos jelenség maradhat.

Van-e még tanulság? Sajnálatos módon nem most tapasztaljuk először, hogy országos jelentőségű vízgazdálkodási, ökológiai és környezeti kérdések esetében hiányzik az okos gazda. A természetes vizek habzása távolról sem feltárt jelenség, ezért elemi érdekiünk lett volna időben kutatási programot indítani, nem várva az osztrák fél kezdeményezésére. A kutatások finanszírozása azonban gyakorlatilag megoldatlan, a terepi mérések is igénylő tudás erodálódik. Ily módon a tervezés gyakran olyan bizonytalan adatokra támaszkodik, amelyek hosszabb távon kellemtelen meglepetésekkel szolgálhatnak. Habozni tehát nem érdemes.

Az irodalom mintegy 150 híres, vízhez kapcsolódó nemzeti és nemzetközi konfliktust tart nyilván. Ha csak az elmúlt néhány évtizedre szorítkozunk, és nem kívánunk Babilonig visszamenni, az események ijesztő gyarapodását figyelhetjük meg. 1950 és 1990 között 43 nagyobb konfliktust regisztráltak. Ez a szám az elmúlt 15 évben 74-re növekedett, miközben a háborús és a tárgyalásos esetek mellett (utóbbira példaként lásd a Rába esetét, ötödik keretes szöveg) új elemként megjelentek a terrorizmus különböző válfajai, beleértve a cyberterrorizmust is.

Az okokról

Eddig a víz nyolc kihívását tekintettük át következményként. De vajon melyek a tágabb értelemben vett kiváltó okok? A népesedést, a városiasodást és az éghajlatváltozást már hangsúlyoztuk. A felsorolást tömören folytatva (Somlyódy and Varis, 2006), a gazdasági fejletlenséget, a szegénységet, az élelmezési biztonságot, az oktatást és a kapacitást hiányt, a humánerőforrás-gondokat, a globalizációt és a regionális integráció kiegyensúlyozatlan hatásait, a korrupciót és az intézményi rendszer megannyi gyengeségeit említjük. Regionális és globális hatású eszközalást elsősorban az jelenthet, hogy az okok és a hatások a fejlődő világ térségeiben halmozottan jelentkeznek, hiszen például a szegénység, az élelmezés és a víz problémái gyakran „kéz a kézben” haladnak. Alapvető globális kihatással bírhat például Kína és India fejlődése is, beleértve az életszínvonal emelkedését, ami mindenütt a vízhasználatok növekedésével párosul. A sokak által már ma is fennállónak tekintett vízválság (Cosgrove and Rijsberman, 2000) kezelése tehát nem elsősorban technikai, hanem alapvetően társadalmi, gazdasági és politikai kérdés, és ennek megfelelő kezelést igényel. Az elemzések szerint a fejlesztési igények – amelyek alapvetően a harmadik világban jelentkeznek – 6000 milliárd dollár tehető: 30 éves felzárkózást feltételezve, kamatmentesen évi 200 milliárd dollár támogatásra lenne szükség (Cosgrove and Rijsberman, 2000). És az elmondottakból érzékeljük, a megoldás nem elsősorban pénz kérdése.

A tudomány és a technológia szerepe

Ugyan a kihívások kezelésében a tudomány és a technológia ritkán játszik megváltó sze-

repet, a problémák megoldásának megalapozásához a rohamléptékkel gyarapodó eredmények egyre jobban járulnak hozzá. Példa erre a membrántechnológia robbanásszerű fejlődése és a fordított ozmózis alkalmazásával a tengervíz sóalanításának elterjedése ivóvízellátás céljaira: az elmúlt két évtized során a költségek és az energiaigény mintegy harmadára-negyedére csökkentek (0,6-0,7 €/m³). Ma 100 millió ember nyer ily módon a hagyományossal versenyképes szolgáltatást. Egyre többen gondolják, hogy hosszabb távon a membrán- és más korszerű technológiák felhasználásával, a sóalanítással, a szennyvizek újrahasznosításával és a hasznos anyagok visszanyerésével megvalósíthatók a zárt víz- és anyagforgalmak (ez háztartási szinten a membrán „csipek” révén a fekete, a szürke és a sárga szennyvizek szétválasztott kezelését jelentené: az egyik végtermék nitrogénműtrágya), integráltan kezelhetők a mennyiségi és minőségi gondok, és a vízhiányról meg a többi vízbajról, mint megoldandó problémáról elfeledkezhetünk. A kulcs persze az, hogy ezeket az elveket és módszereket csak a fejlett világban alkalmazzuk, vagy jut belőlük a fejlődő világ számára is.

A szennyvíztisztításban a reaktortechnika, a bio- és nanotechnológia teszi lehetővé (*hatodik keretes szöveg*), hogy „célzott” baktériumok és vegyszerek specifikus kémiai környezetben, matematikai modellekkel és korszerű üzemirányításra alapozva a korábban ismertnél sokkal hatékonyabban végezzék el feladatukat. Ígéretes nanotechnológiai kutatások folynak az USA-ban speciális szennyezők (TCE, PCB, As, ólom, higany stb.) eltávolítására, igen alacsony koncentrációk elérésére, a fertőtlenítés intenzifikálására, nanomembránok energiafogyasztásának csökkentésére és így tovább.

Intelligens iszaptelek a biológiai szennyvíztisztításban (6)

A hagyományos biológiai szennyvíztisztítás – többnyire nagy betonreaktorokban – olyan környezetet kisérel meg létrehozni, ami a szervesanyagok lebontását és átalakítását végző baktériumok elszaporodását eredményezi. A folyamatok jelentős részben spontán módon játszódnak le. A IASON kutatás (Intelligent Activated Sludge Operated by Nanotechnology) célkitűzése intelligens hidrogélek segítségével olyan mikroszkopikus méretű reaktorok létrehozása volt, amelyek segítségével több technológiai folyamat, például a szimultán nitrifikáció és denitrifikáció egyetlen levegőztetett reaktortérben, az aeroblanoxikus funkciók elválasztása nélkül, irányított módon valósítható meg. A betelepítési tesztek során több mint 60 különböző géltípust vizsgáltunk és kidolgoztuk a mikroszkopikus reaktorok (hidrogél felületeken immobilizált szennyvíz mikroorganizmusok biofilm szerkezetben) létrehozásához szükséges feltételeket. Kiválasztottuk a biofilmek kialakításához alkalmas hidrogél-szerkezetet, teszteltük a különböző beoltási eljárásokat, optimalizáltuk a gélfeszítés bakteriális betelepítésének stratégiáit, fénymikroszkópos vizsgálatokkal és mikrobiológiai aktivitásmérések segítségével követtük a biofilmek kifejlődését különböző mikroorganizmuskultúrák (autotróf, heterotróf és heterotróf denitrifikáló szervezetek) esetében. A környezeti tényezők függvényében vizsgáltuk a reaktorok szervesanyag és hidraulikai terhelhetőségét és környezetstressz-toleranciáját. A néhány tízcentiméter átmérőjű gélek felületén olyan kettős biofilmet alakítottunk ki, aminek az alsóbb rétegében a diffúzió limitáltsága révén anoxikus zóna alakul ki. Itt a nitrát szolgál elektron akceptorként a denitrifikáló szervezetek számára, miközben a biofilm felső (a külső környezet felé eső) részein aerob körülmények dominálnak, kedvezve ezzel az oxidatív, nitrifikációs folyamatoknak. A biofilmen belüli anoxikus zóna kialakításához a reaktorban lévő

oldott oxigénszint finom szabályozására is szükség volt. A projekt folytatásaként újabb gélekkel mikroszennyező anyagok, gyógyszermaradványok és hormonszermaradványok felgyorsított biodegradációját vizsgáljuk majd. (<http://www.vkkt.bme.hu/iason/index.html>). Egy nagy kockázatú kutatás első eredményei.

A mérés technika fejlődése lehetővé teszi a pontosság növelését, a korábban elképzelhetetlennek tartott kis mennyiségek meghatározását, az idő- és térbeli mintavételezés és a monitorozás finomítását a hidrológiában, hidraulikában, a vízkémiában, a limnológiában (*hetedik keretes szöveg*) stb. egyaránt. A távérzékelés és a térinformatikai rendszerek új lehetőségeket nyitnak a „mikroszintű” ismeretek „makroszkopikus” kiterjesztésére tavakra, folyókra, térségekre és vízgyűjtőkre. A hardver és a szoftver fejlődése a számítógépes alkalmazások és az új módszerek sokaságát eredményezi. A globalitás kezelésében fontosak lehetnek az interdiszciplináris, forráskönyveken alapuló elemzések és az ehhez szükséges új módszerek. Egyúttal ezek a korábbiakénál lényegesen korszerűbb tervezéshez vezethetnek a mérnöki gyakorlatban.

A késleltetett fluoreszcencia és az algapopuláció modellezése (7)

A fotoszintetizáló szervezetek megvilágítás közben és fényről sötétbe helyezés után is fényt bocsátanak ki (fluoreszkálnak), ami felhasználható a növény fotoszintetikus jellemzőinek becslésére. Az ún. „direkt” fluoreszcencia azon fotonok energiájából keletkezik, melyek a növény fényt befogó antenáin elnyelődtek, de a fotoszintézist végző berendezésbe már nem jutottak be. A sötétbe helyezés után mintegy 10-100 másodpercig érzékelhető „késleltetett” fluoreszcencia ugyanakkor a fotoszintézist meghajtó fény leállása után

a fotoszintetikus berendezésben meginduló ellen-áramlás terméke, amely ugyan sokkal gyengébb fénykibocsátást eredményez, azonban a késleltetett fluoreszcencia kapcsolata a fotoszintetikus berendezés jellemzőivel jóval szorosabb, mint a direkt fluoreszcenciánál, és ezen tulajdonság miatt könnyen használható az algatársulások vizsgálatához.

A fluoreszcencia mérése áttörést hozhat a vízben lebegő algák meghatározásában. A növények megvilágításából és a kibocsátott fény érzékeléséből áll, ezért könnyen automatizálható. Segítségével a hagyományos laboratóriumi eljárásokhoz képest még a helyszínen is igen nagy gyakorisággal (akár néhány percnél) vagyunk képesek megmérni a rendkívül fajgazdag algatársulások összetételét és összesített mennyiségét. Az automatizált mérési módszerekkel előállítható adatsorok feltárják a növényi planktontársulás rendkívül bonyolult működését és néha zavarbaejtően gyors változásait. A Balatonon végzett méréseink segítségével más módokon nem regisztrálható jelenségeket figyelünk meg az algatársulásban és a környezetben is (Istvánovics és mtsi., 2005). A késleltetett fluoreszcenciás mérések bebizonyították, hogy az algavirágzások a körülmények kedvező együttállása esetén rendkívüli gyorsasággal épülnek fel, majd a kedvezőtlen hatások, illetve a tápanyagkészlet kimerülése miatt hasonló sebességgel omlanak össze. A nagy időbeli sűrűségű adatsorokból az is kiderült, hogy a szokványos vízminőségi mérési gyakoriság (kétbetilhavi) messze nem elegendő ahhoz, hogy a néhány napos generációs idővel rendelkező algák társulását nyomon tudjuk követni. Ez a következtetés befolyásolja a vízminőség alakulását számoló modelleket is, amelyekben eddig feltételezték, hogy a mérések jól reprezentálják a valóságban lezajló folyamatokat. A modelleket szintén fel kell készíteni a korábban sejtettnél jóval hevesebb és helyenként kiszámíthatatlannak tűnő változásokra. A megjósolhatónak minősíthető biomasszacsúcsok leírására újfajta „küszöbmodell” fejlesztettünk ki, mely képes az apró környezeti változások nyomán bekövetkező nagymértékű algaszaporulat, illetve pusztulás

szimulációjára (Honti és mtsi., 2007). A küszöbmodell segítségével sikeresen modelleztük a Balaton fokozatos eutrofizálódását a hetvenes évektől kezdve, majd a vízminőség késleltetetten bekövetkező javulását a foszforterhelés csökkentésének eredményeként. Hittük volna egy évtizede?

Zárszó

Beszélhetünk vízválságról vagy sem? A válasz szubjektív megítélésünktől függően sokféle lehet. Néhány dolog azonban bizonyos. A nyolc „csapással” felvázolt helyzetkép és a trendek elemzése alapján optimisták aligha lehetünk. A kiváltó okok egyre jobban kívül esnek a vízgazdálkodás területéről: alapvetően társadalmi, gazdasági és politikai eredetűek, és ennek megfelelő kezelést igényelnek. Különösen súlyos a helyzet a fejlődő világban, ahol a sokrétű vízproblémák a szegénységgel, az élelmezési bajokkal, a demográfiai változásokkal, a kapacitáshiánnyal, a korrupcióval és a kormányzás gyengeségeivel együtt halmozottan jelentkeznek. A jövő bizonytalan és kérdések sokaságával találkozunk. Melyek lesznek például az éghajlatváltozás és a globalizáció hatásai? Vagy mi lesz a következménye Kína, India és a kapcsolódó térség fejlődésének? Látszólag a fejlett világban minden rendben van. De tényleg így van ez? Hiba lenne tévhitekben ringatni magunkat: a Föld túl picinnyé kezd válni ahhoz, hogy a „megúszás” reményében kívül maradjunk. Cselekedni kell, és ebben a fejlett világnak – beleértve saját magunkat is – vezető szerepet kell vállalnia. Az idő szorít.

Kulcsszavak: globális kihívás, vízhiány, városiasodás, ivóvíz és szennyvíz, szennyezések, szélsőségek, éghajlatváltozás, nemzetközi vizek, tudomány és technológia, Balaton, Rába, Tisza

IRODALOM

- BME VKKT (2003): Tudományos alapok az árvízvédelem és a megelőzés fejlesztéséhez a Tisza vízgyűjtőjén. A Vásárhelyi-terv továbbfejlesztése. Kutatási jelentés (kézirat). Budapest
- Cosgrove, J. W. and Rijsberman, F. (2000) World Water Vision: Making Water Everybody's Business, World Water Council, Earthscan Publications Ltd.
- Fleit, E., Somlyódy, L., Pöcze K. and Melicz Z. (2007) Intelligent Activated Sludge Operated by Nanotechnology - IASON. Presentation at 2007 IWA Leading Edge Technologies Conference, Singapore
- Honti M., V. Istvánovics and A. Osztoics (2007). Stability and change of phytoplankton communities in a highly dynamic environment – the case of large, shallow Lake Balaton (Hungary). *Hydrobiologia* 581
- Istvánovics V., Honti M., Osztoics A., H. M. Shafik, Padišák J., Y. Yacobi and W. Eckert (2005) On-line delayed fluorescence excitation spectroscopy, as a tool for continuous monitoring of phytoplankton dynamics and its application in shallow Lake Balaton (Hungary). *Freshwater Biology* 50
- Kulsreshtha, S. (1993) World Water Resources and Regional Vulnerability: Impact on Future Changes. Research Report RR-93-10, IIASA, Laxenburg, Austria
- Shiklomanov, I. A. 1999. World Water Resources: Modern Assessment and Outlook for the 21st Cen-

- tury. Prepared in the framework of IHP UNESCO, St. Peterburg. State Hydrological Institute, Federal Service of Russia for Hydrometeorology and Environment Monitoring
- Somlyódy, L. (1995): Water Quality Management: Can We Improve Integration to Face Future Problems? *Water Science and Technology*, Vol. 31., No. 8
- Somlyódy, L. szerk. (2002): A hazai vízgazdálkodás stratégiai kérdései. Magyar Tudományos Akadémia, Budapest
- Somlyódy, L. (2005) A Balaton vízpótlás szükségessége: tenni vagy nem tenni? *Vízügyi Közlemények* (különszám)
- Somlyódy, L. and Honti, M. (2005): Water transfer to Lake Balaton: to act or not to act? *Water Science and Technology*, Vol. 52. No. 6.
- Somlyódy, L. and Varis, O. (2006) Freshwater under pressure. *International Review for Environmental Strategies*, Vol. 6, No.2
- Varis, O. and Somlyódy, L. (1997) Global Urbanization and Urban Water: Can Sustainability Be Affordable? *Water Science and Technology*, Vol. 35, No.2
- WHO (2004) Inheriting the World: The Atlas of Children's Health and the Environment. Geneva
- WHO and UNICEF (2004) Meeting the MDG Drinking Water and Sanitation Target. A Mid-Term Assessment of Progress. WHO/UNICEF. New York

