

Esszé a 21. századi hidrológiáról: eredmények, kihívások, lehetőségek

Szöllősi-Nagy András

Nemzeti Közzolgálati Egyetem, Víz- és Környezetpolitikai Tanszék, Budapest, Magyarország
Levelező szerző, e-mail: andras.szollosinagy@gmail.com

Beérkezett: 2025. május 23.; elfogadva: 2025. július 1.

Összefoglalás

A közlemény megkísérli áttekinteni a vízgazdálkodás jelenlegi főbb globális kihívásait, a hazai helyzetet, a főbb eredményeket, valamint az emergens kihívásokat és a lehetséges megoldások körvonalait. Azzal érvel, hogy a népességdinamikai előrejelzések és a várható klímaváltozás tükrében a jelenlegi vízgazdálkodási gyakorlat nem tartható fenn a 21. században, ezért a víz lesz századunk egyik legnagyobb, ha nem a legnagyobb kihívása – globálisan és várhatóan lokálisan is. Globális változás és adaptáció szükséges a vízgazdálkodás minden szintjén, az integrált vízgazdálkodástól kezdve az intézményes felépítésen át az oktatásig és a kutatásig. Ez a megállapítás egyaránt érvényes a fejlődő és az iparosodott országokra. Különösen érvényes Magyarország vonatkozásában, ahol az elmúlt évtizedek a dezintegrált vízgazdálkodás aggodalomra okot adó példájával szolgáltak.

Kulcsszavak: globális változások, vízgazdálkodási hatások, klímaváltozás, hidrológiai szélsőségek, nemstacionaritás, adaptív vízgazdálkodás

An essay on 21st century hydrology: Achievements, challenges, opportunities

András Szöllősi-Nagy

Ludovika University of Public Service, Faculty of Water Sciences,
Department of Water and Environmental Policy, Budapest, Hungary

Summary

The paper attempts to review current global challenges and opportunities in hydrology and water management, including local situations, the main achievements, as well as the emerging possible solutions. It argues that, in the light of population projections and projected climate change, current water management practices are not sustainable for the 21st century. Climate change, with its effects mainly on the hydrological cycle, poses additional new challenges for hydrological and meteorological services. If we really accept the integrating role of the hydrological cycle, and we have no other logical choice, then splitting it at any point is arbitrary as it violates the principle of integrity. The separation of the hydrological cycle into the atmospheric and terrestrial cycles is also arbitrary. It violates this principle even more if surface and groundwater quantity and quality data are treated separately at the institutional level, as they are now in many places. Data integration and open access are fundamental. Without the integration of water-related institutions, there is and will be no effective and sustainable water management. Therefore, water will be one of the greatest, if not the greatest, challenges of the century – globally and locally as well. Global as well as local adaptation are needed at all levels of water management, from integrated water management to institutional design, education and research. This applies to both developing and industrialized countries. This was particularly true for Hungary, where the past decades have provided worrying examples of disintegrated water management.

One thing one should remember is that water management is not primarily a technical issue, but a social one. If it is social, it is political, and more than that, it is ethical. If water is a social issue, then it is inevitable that our decision models should include coupled modelling of the possible response mechanisms of society. This is probably at least an order of magnitude more complex than the 2/3D local hydraulic calculations, as there is at least one order of magnitude more uncertainty (and risk) in social responses. Whether this can be successfully solved by agent-based behavioral modelling and whether it can be incorporated into the modelling of fluxes in environmental processes is the big question. AI, or machine learning, is expected to answer this challenge. It is also expected that AI will essentially

transform the whole and complex details of human condition, ranging from design standards and procedures to the use of earthmoving machinery and strategic planning at the watershed level. Hoping and making sure while the new disruptive technologies will indeed solve the problems we face and will not exacerbate them.

Keywords: global changes, water management impacts, climate change, hydrological extremes, non-stationarity, adaptive water management

Bevezetés – avagy a 20. század folytatása

Sokan úgy érvelnek, hogy ha az emberiségnek sikerül elkerülnie a 21. században a nukleáris holokausztot – ami mindenképp felett álló, legfontosabb közös feladatunk –, akkor a következő megoldandó kihíváshalmaz nagy valószínűséggel a vízzel lesz kapcsolatban: a vízhez kötődő szélsőségek kockázatának várható növekedésétől a közegészségügyi helyzeten át a nemzetközi vízgyűjtőkön kialakuló lehetséges konfliktusok és/vagy háborúk elkerüléséig. A cikkben megkíséreljük áttekinteni a honi vízgazdálkodásunk megkerülhetetlen peremfeltételeit jelentő főbb globális hidrológiai kihívásokat és meghajtókat, a hazai várható helyzetet és a lehetséges megoldások körvonalait. Kőrösi globális gondolatmenetét folytatva (lásd Kőrösi 2018) azzal érvelünk, hogy a népességdinamikai előrejelzések és a várható klímaváltozás tükrében a jelenlegi vízgazdálkodási gyakorlat a 21. században nem tartható fenn, ezért a víz lesz századunk egyik legnagyobb, ha nem a legnagyobb kihívása – globálisan és várhatóan lokálisan is.

A vízgazdálkodás minden szintjén globális változás és adaptáció szükséges, az integrált vízgazdálkodástól kezdve az intézményes felépítésein át az oktatásig és a kutatásig. Ez a megállapítás egyaránt érvényes a fejlődő és az iparosodott országokra, és sajnálatos módon különösen érvényes hazánkat illetően is, ahol az elmúlt közel három évtized a dezintegrált vízgazdálkodás aggodalomra okot adó példájával szolgált.

A 21. századi változások fő meghajtója: a népességnövekedés okozta globális kihívások

A 20. századi népességrobbanás következtében – amikor is a Föld népessége egy évszázad alatt 2 milliárdról 6 milliárdra háromszorozódott, miközben a vízkivételek mennyisége globálisan meghatszorozódott – kinyílt egy olyan olló, amely gátolja humán és környezeti rendszereink fenntarthatóságát (UNESCO 2018). Az egy főre jutó éves átlagos vízkészlet 1975 óta drámaian lecsökkent: a megközelítően 15 500 m³/fő/év világátlagról 5000 m³/fő/év átlag-vízmennyiségre. Hangsúlyozandó, hogy ez a szám globális átlagot jelent a jelenlegi 8,2 milliárdos lélekszámú emberiségre vetítve (<http://www.worldometers.info/world-population>), és igen nagy a szórás: Kanada 120 ezer m³/fő/év adatától hazánk 11 700 m³/fő/év egy főre jutó vízmennyiségén keresztül Jordánia 120 m³/fő/év értékéig. (Ez utóbbi nem mellelleg az el-

múlt évek során 70 m³/fő/évre csökkent a közel-keleti háborúk okozta migráció következtében.)

Hogy mennyire drámai a helyzet, azt talán egy sokkal szikár tény világítja meg a legjobban: beléptünk egy új korszakba, az antropocénba (Waters et al. 2016), amelynek során lényegesen megváltozott a víz körforgása, a hidrológiai ciklus is. Ma a Föld édesvízkészlete éppen annyi, mint amennyi a holocén klímaoptimum idején volt az 5000 és 9000 évvel ezelőtti periódusban. Az összes víz 97,5 százaléka tengerekben és óceánokban van. A maradék 2,5 százalék a Föld édesvízkészlete. Ennek körülbelül 60 százaléka szilárd halmazállapotú víz, azaz jég és hó az Északi-sarkon, az Antarktikán, a gleccserekben, a magashegyi állandó hótakaróban és a szibériai permafrosztban. A maradék 90 százaléka felszín alatti, nem megfagyott víz. Ami marad, az mindösszesen a 42 000 km³ könnyen hozzáférhető felszíni vízkészlet (Shiklomanov–Rodda 2003), amelynek 90 százaléka tavakban és tározókban, a maradék pedig folyókban és egyéb vízfolyásokban található.

A felhasználók számának fent említett növekedése az elsődleges oka a vízkészletek egy főre jutó radikális csökkenésének – és így a víz konfliktuspotenciálja növekedésének –, továbbá annak, hogy korunk vízgazdálkodási gyakorlata nem fenntartható, és sürgős paradigmaváltást tesz szükségessé. Ha folytatódnak az eddigi népesedési trendek – márpedig az ENSZ recens populációdinamikai előrebecslései szerint úgy tűnik, hogy ebben nem lesz nagy változás –, akkor száz év múlva a Földnek közel 11 milliárd lakója lesz. Ha folytatódik a népességnövekedés és a készlet(fel)használás/fogyasztás mostani üteme, akkor az emberiség addigra elérkezik a visszafordíthatatlanság tartományába, ahonnan már nincs visszatérés egy egyensúlyközeli tartományba, és ahol a rendszereink fenntarthatatlanná válnak. Vagyis száz éven belül várhatóan jelentősen degradálódnak – ha nem omlanak össze. Megjegyzendő, hogy a népességnövekedés üteme kimutathatóan lassul, és a logisztikus növekedéshez tart, vagyis egy a Föld eltartóképességét jelentő, említett 11 milliárdos felső határhoz, mivel a népesség a 22. század második évtizedéig még 4 milliárd emberrel fog nőni. A fejlődő országokban, elsősorban Ázsiában várható népességnövekedés – ahol már most is az emberiség 60 százaléka él a globális vízkészletek 36 százalékával – jelentősen növelheti a vízkészletekkel kapcsolatos regionális konfliktuspotenciált, mivel a 36 százalékos arány ugyanaz marad – a világ vízkészlete és globális térbeli eloszlása ugyanis közel változatlan –, a népesség azonban jelentő-

sen meg fog nőni, még ha nagyjából marad is a 60 százalékos ázsiai részaránynál.

Minderre mintegy „rarakódik” a klímaváltozás és annak hatásai. Ennek a változásnak nagyjából a fele planetáris eredetű, a másik fele pedig antropogén – azaz itt sem ússzuk meg az emberi beavatkozás negatív hatásait.

Ebben a kontextusban sorsdöntő kérdés, hogy a fenntarthatóság fogalma nem oximoron-e. Nem csak egy politikai termékről van-e szó, amit a gyakorlatban lehetetlen megvalósítani? Egyre inkább úgy tűnik, hogy a fenntarthatóság kihívása igenis valós gond, és az emberiség túlélésének talán egyetlen záloga.

A globális hatásokat pedig nem lehet feltartóztatni a határokon. Így tehát el kell fogadnunk, hogy a lokális problémáknak globális peremfeltételeik vannak – és megfordítva. A fenntartható fejlődés és azon belül a fenntartható vízgazdálkodás tehát az emberiség és kultúrája fennmaradásának központi eleme. A víz köti össze a fenntartható fejlődés tizenhét célját – ha ugyanis a vizet (és a szennyvizekhez kapcsolódó szanitációt) kivesszük a rendszerből, akkor az összeomlik. A célok nem lesznek elérhetők. A globális vízválság nem azt jelenti, hogy „kifut” alólunk a víz, hiszen a hidrológiai körfolyamat szorgosan dolgozik ennek elkerülésén. A válság ott van, hogy az intézményeinkkel miként kormányozzuk a vizeinket. Milyen jogi keretet hozunk létre, és az milyen hatékonyan működik? Hogyan üzemeltetjük hidrometeorológiai észlelőrendszereinket, miként tesszük nyíltan hozzáférhetővé a vízzel mint közkinccsel kapcsolatos mérései adatainkat a köz számára? Mennyire támogatja a tudományos kutatás a kormányzati döntéseket – és megfordítva? Egyáltalán van-e nemzeti és regionális interdiszciplináris vízgazdálkodási kutatóintézet? Miként képezzük a szakmai utánpótlást? Integrált vízgazdálkodást hozunk-e létre, vagy önös politikai szándékok és lobbik mentén dezintegráljuk a rendszereinket? Vajon létezik-e a lokális problémák halmazából összeálló globális vízválság – és megfordítva? A válasz egy sereg nagyon is releváns további kérdésben rejlik.

Tényleg globális vízválság lesz?

Nem válság-e az már most is, ha globálisan naponta hat-ezer gyerek hal meg vízzel kapcsolatos betegségekben? Hogy évente 6–8 millió embertársunk hal meg vízzel kapcsolatos katasztrófákban és betegségekben? Hogy a szubszaharai afrikai betegségek 90 százaléka vízeredetű és a rossz vízminőség eredménye? Hogy a szubszaharai kórházak betegeinek fele a víz, illetve az egészséges víz hiánya miatt van ott? Hogy harminc év alatt az egy főre jutó víz mennyisége drámaian lepadt? Hogy harmincöt év múlva több, mint kilencmilliárd ember lesz a Földön, akiknek víz kell, csatornázás és szennyvízkezelés? Hogy ma több embertársunknak nincs hozzáférése a minimális szanitációhoz, mint tizenhét éve, az ENSZ Millenniumi Fejlesztési Céljainak (Millennium Development Goals, MDG) megfogalmazásakor? Hogy ez összesen

2,6 milliárd ember? Hogy a világ szennyvizeinek 85 százaléka tisztítás nélkül kerül a befogadóba, már ma is mérhető genetikai változásokat okozva a mikrofaunában? Hogy az elmúlt harminc évben az édesvízi élőlények száma megfeleződött?

Lehetne, és kell is folytatni a kérdések sorát, mert ezek az emberiség jövőjét jelentik (*UN World Water Development Report 2018*). Az ENSZ tizenhét Fenntartható Fejlődési Célja (Sustainable Development Goals, SDG-k) az ENSZ Közgyűlése által államfői szinten elfogadott vízió, amely egy keretrendszerben foglalja össze az emberiség számára 2030-ra elérendő célokat a fenntarthatóság érdekében, tehát annak érdekében, hogy elkerüljük rendszereink irreverzibilis változásait.

2015-ben az SDG-k közül a két legfontosabb a szegénység és az éhínség felszámolása volt 2030-ig, pontosabban egy alacsony szintű korlát alá szorításuk. Ez a két fő cél hihetetlenül ambiciózus volt, ugyanakkor – a világ-gazdaság évezred eleji optimista állapotát és a reziliens gazdaság akkori meglétét, ugyanakkor elfogadhatatlannul aszimmetrikus megoszlását tekintve – nem tűnt elérhetetlennek. Ma már tudjuk, hogy a fenntartható fejlődési célok 2030-ra nem valósulnak meg. Mindenesetre a víz az, ami összeköti a maradék tizenhat célt, mert ha a vízgazdálkodást (SDG-6) kivesszük az SDG-rendszerből, akkor az menthetetlenül összeomlik. Ezért lett a fenntartható vízgazdálkodás századunk egyik legnagyobb, ha nem a legnagyobb kihívása.

A második fő meghajtó: a klímaváltozás és hatása a hidrológiai ciklusra

A klímaváltozás hidrológiai ciklusra gyakorolt fő hatása nagy valószínűséggel az lesz, hogy a víz globális körforgása felgyorsul (*Szöllősi-Nagy 2018a*). Ennek számos súlyos következménye várható, nevezetesen egységnyi idő alatt több szélsőséges hidrológiai esemény következik majd be. Voltaképpen mi is történik?

Elég egyszerűen demonstrálható, hogy a víz körforgása a globális felmelegedés hatására felgyorsul – rögtön hozzátéve, hogy a következőkben leírt verbális modell a primitívségig leegyszerűsített modell, hiszen nem veszi figyelembe a klímarendszer számos komplexitását, a belső visszacsatolásokat, a nemlinearitást és a rendszer kaotikus, valamint véletlenszerű viselkedését. Tehát a Földet érő, majd onnan kifelé irányuló radiáció egy része – amely korábban voltaképpen az űrbe távozott – az üvegházhatás eredményeként „visszapattan” az atmoszférába, aminek következtében nő a légkör átlaghőmérséklete. Ez már kimért és igazolt jelenség, nem spekuláció. A megnövekedett hőmérséklet hatására megnő az evapotranspiráció (a párolgás a szabad talaj- és vízfelszínekről és a növényzetről), aminek következtében megnő a felhőképződés valószínűsége. Több felhőből több csapadék keletkezhet, aminek hatására egységnyi idő alatt megnövekszik a lefolyás. A megnövekedett lefolyásból tovább nő a párolgás – és így tovább, tehát a víz körfogá-

sa várhatóan felgyorsul. Ha ez így van, akkor egységnyi idő alatt több szélsőséges hidrológiai esemény fordul elő. Tehát csakugyan megnő az árvizek gyakorisága és mértéke. A folytonossági feltételnek azonban minden körülmények között fenn kell állnia – ma éppen annyi édesvíz van a Földön, mint a holocén klímaoptimum idején –, ami csak úgy történhet meg, ha az aszályok időtartama és kiterjedése is növekszik.

Újfént hangsúlyozni kell azonban, hogy az atmoszferikus és hidrológiai folyamatok ennél a primitív modellnél lényegesen bonyolultabbak a jelzett seregnyi visszacsatolás, erős nemlinearitás, káosz és sztochaszticitás miatt – éppen ez az oka annak, hogy a sok nagy léptékű szimulációs klímamodell számos esetben némileg eltérő eredményekre vezet(het), bár a főbb tendenciák azonosításában nincs kontraverzió. A csapadékeloszlás idő- és térbeli változásával a felszín alatti vizek utánpótlódása is jelentős mértékben változhat, tehát a klímaingadozás és -változás az egész hidrológiai ciklusra kihat.

Megnő tehát az árvizek gyakorisága és mértéke. Erre az utóbbi időben szomorú példákat láttunk a németországi Rajna-vidék-Pfalz térségében az Ahr folyó soha nem tapasztalt 2021. nyári katasztrofális árvizeitől a Rinya-patak korábban nem észlelt villámárvizéig és a 2024. őszi barcelonai pusztító Dana villámárvizig.

Mára mindhárom elem – vagyis az árvizek, illetve az aszályok gyakoriságának növekedése és mértéke, ugyanakkor a konstans vízmennyiség – experimentális evidencia. Ezt szintén tapasztalhattuk az utóbbi időkben. A klímaváltozás hatása szuperponálódik az antropogén hatásokra, bár részben maga is antropogén eredetű, azaz várhatóan tovább növeli a hidrológiai események bizonytalanságát, ezáltal a vízgazdálkodás kockázati tényezőit is. Az elkövetkező harminc év közel 30 százalékos globális népességnövekedése, vagyis a több, mint kilencmilliárdos emberiség várhatóan nagyságrendekkel nagyobb változást okoz majd a hidrológiai ciklusban és a vízzel való gazdálkodásban, mint az ugyanezen időszak alatt várható klímaváltozás. Vörösmarty és társai húsz évvel ezelőtti globális szimulációs vizsgálataik alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a matematikai statisztika variációs tényezőjével mért változás 2050-re a globális hidrológiai ciklus működésében a két fő tényező hatásának olyan megoszlását mutatja, amely szerint a várható változás nagyjából 80 százaléka a népességváltozás, míg 20 százaléka a klímaváltozás hatásából adódik – azzal a szcenárió-alapfeltevéssel élve, hogy a népességváltozás az ENSZ előrejelzéseit követi, míg a szén-dioxid-kibocsátás kétszeresére nő (Vörösmarty et al. 2000). Ezt az állítást az elmúlt húsz év eddigi történései igazolni látszanak.

A víz a klímaváltozás hatásainak elsődleges közege – akár a termikus expanzió következtében várható tengerszint-emelkedésről, akár a hidrológiai ciklus szárazföldi részéről legyen szó, ideértve a gyorsuló ütemben olvadó gleccserek és a permafroszt szerepét is. Sajnálatos módon azonban éppen a hidrológiai ciklus – a klíma-

rendszer talán legérzékenyebb és legkevésbé értett része – kapja a legkisebb figyelmet a klímaváltozással kapcsolatos politikai vitákban és a kutatásban egyaránt. Az emberiség túlélése szempontjából központi, szó szerint létkérdés megoldásának, valamint a víz általi és a vízzel való gazdálkodáson keresztüli adaptációnak a fontosságát nem lehet eléggé hangsúlyozni.

A több, mint kilencmilliárdos emberiség a közeljövőben tehát jelentős változást okoz majd a hidrológiai ciklusban és a vízzel való gazdálkodásban. Sokan ezért tartják fontosabbnak az adaptációs stratégiák kidolgozását a túlpolitizált, egyesek szerint barokkosan bonyolult diplomáciai mitigációs manővereknél. A megoldás is antropogén: az emberiség kezében van. Ezért kritikus fontosságú a Párizsi Klímaegállapodás (UNFCCC 2015) betartása. Ha az egyik legnagyobb üvegházgáz-kibocsátó állam kiszáll belőle, ennek következményeit a világ többi része nem tudja kompenzálni, és egy újabb lépést teszünk rendszereink összeomlása felé – kényszerből és mások immoralitása miatt, mert a hidrológiai ciklus sem ismer politikai határokat.

A klímaváltozással kapcsolatos kormányközi tárgyalások, mint például az említett párizsi klímacsúcs és a COP-sorozat (*Conference of the Parties*: a részes országok éves kormányközi konferenciasorozata), nem zajlanak gyorsan. Összetett és bonyolult folyamatról van szó, amelyben közel kétszáz ENSZ-tagország esetenként markánsan eltérő politikai és gazdasági érdekei között kell megtalálni a mindenki által elfogadható konszenzust. A dolog természetéből fakadóan ez időbe telik. Sok időbe. Valószínűleg sokan vannak, akik kudarcnak minősítik a klímacsúcsot – különösen azután, hogy az Egyesült Államok 2017 nyarán bejelentette, majd a második Trump-elnökséggel ismét belengette, hogy kiszáll az egyezményből. Vannak, akik sikeresnek minősítik a klímaegyezményt, vannak csalódottak, és vannak elégedettek is. Félő, hogy tudomásul kell vennünk: a világ mai állapota és feltételei mellett ennyit lehetett elérni. Ugyanakkor tovább kell menni a megkezdett úton – nincs más észszerű alternatíva.

A jövő nem olyan lesz, mint a múlt

A szélsőségek előfordulási valószínűségének növekedését eddigi módszereinkkel már nem tudjuk értelmezni. Klasszikus hidrológiai statisztikai módszereinkkel, a minta homogenitásának, függetlenségének és azonos eloszlásának feltételezésével – vagyis a stationaritás hipotézisével – nem tudjuk megmagyarázni, vajon mi az oka annak, hogy a százéves, azaz százévenként statisztikailag egyszer (bármikor) előforduló árvíz újabban miért jelentkezik szinte húszévenként.

A mértékadó árvízszinteket egyáltalán miként tudjuk értelmezni ebben a helyzetben, és hogyan lehet használható tervezési módszereket adni a gyakorló mérnökök kezébe? Miként tudjuk a nemstacionárius hidrológiai

jelenségekhez igazítani az eszközeinket – és nem megfordítva, az adatok mesterséges egyöntetűvé tételével, mint sokáig tettük, mert a kiugró adatokat hibának tekintettük. (Ebbe a hibába a 20. század eleji fizika is beleesett, mígnem rájött, hogy az elmélet rossz, nem az adat.)

A jövő nem olyan lesz, mint a múlt – vagyis a stacionaritás feltételezését fel kell adnunk, és más módszer után kell néznünk. Módszerünk hibás és javítandó, és ennek nem a hidrológiai körfolyamat különös viselkedése az oka. Nem vettük észre a változást. Nem vettük észre, hogy a stacionaritás feltételezése többé már nem helytálló (Milly *et al.* 2008). A mérnöki méretezéshez szükséges, a méretek megállapítását szolgáló, vagyis mértékadó helyzeteket mégis a változatlanóság feltételezésével becsüljük világszerte mind a mai napig – úgy, ahogyan a nemzeti szabványok a világon mindenütt előírják. Még akkor is, ha azzal áztatjuk magunkat, hogy százezer éves adatsorokat generálunk Monte Carlo-módszerrel, tehát igen hosszú periódust fedünk le – ami igaz is, csak éppen olyan adatsort generáltunk, amelynek statisztikai paraméterei definíciószerűen ugyanazok (ugyanazoknak kell lenniük), mint az észlelt idősoroké, mert ha nem, akkor sérül az anyagmegmaradás feltétele, és a Teremtőt szimuláljuk. A legjobb esetben is csak megtartottuk az észlelt idősorok információtartalmát, újat nem teremtettünk. És megmaradtunk a stacionaritás feltevésénél. Ez pedig jelentős rizikót rejt, akár az alul-, akár a felülméretezés kockázatát vonva maga után. A százéves (vagy T-éves) gyakoriságú mértékadó árvízszint többé már nem értelmezhető, hiszen – túl a Szöllősi-Nagy által közölt anekdotán (lásd Szöllősi-Nagy 2017) – példák egész sora igazolja, hogy a százévenként egyszer előforduló árvíz sokkal gyakrabban fordult (fordulhatott) elő. Ebből aztán számtalan kárrendezési jogi vita és konfliktus keletkezhet műtárgyaink üzemeltetése kapcsán.

Mi az oka a változásnak? A kivédhetetlen globális változások, amelyek peremfeltételként határozzák meg lehetséges lokális cselekvéseinket – és megfordítva. Ez tehát olyan kényszer, amely globális koordinációt kíván. Kulcskérdés, hogy mérnöki műtárgyaink méretezési alapelveit hozzáigazítsuk a nemstacionárius világhoz. Ez óriási kihívás, hiszen a nemzeti tervezési szabványok alapvető átalakítását teszi szükségessé.

Míg a klímaváltozás lassú folyamat – az ipari forradalom óta kétszáz évnek kellett eltelnie ahhoz, hogy a hidrológiai ciklus antropogén okokra visszavezethető változása mérhető legyen, és kimutatható legyen a víz körforgásának felgyorsulása (intenzifikálása) következtében előálló nemstacionárius állapot –, addig az emberi tevékenység közvetlen hatása már néhány évtized alatt mérhető. A népesség növekedése következtében a század végéig drasztikusan csökkenni fog az egy főre jutó vízkészlet – ez nyilvánvalóan nem fenntartható, és súlyos konfliktusok forrása lehet nemzetközi és szubszuverén szinten egyaránt (Wolf 2007).

Létezik egyáltalán megoldás?

Igen, létezik megoldás. És az csak tőlünk függ. Persze nem lesz könnyű megtalálni a megfelelő megoldást, mert régi paradigmákat kell megváltoztatnunk. És nincsen egyetlen üdvöztető megoldás: egy megoldástartomány van, amelyen belül tudunk csak lép(eget)ni. Nem lesz könnyű az „egyenes csatorna-műtárgy-vasbeton szerkezet” klasszikus építőmérnöki paradigmából átevíkelnünk a *soft engineering* területére, ahol a természetközeli megoldásokban ökoszisztéma-szolgáltatások látnak el olyan funkciókat, amelyeket eddig csak műtárgyakkal véltünk elérhetőnek.

Nyilvánvalóan több víztározás kell a víz-, élelmiszer- és energiabiztonság eléréséhez. Több tározás pedig nyilván nem érhető el a duzzasztás és a gátak helyes funkciójának megértése nélkül, legyen szó intenzívebb öntözésről, vízátfutásról, az erőművek megfelelő szintű és mennyiségű hűtővíz-szolgáltatásáról vagy vízennergiáról. Hasonló a helyzet a nemzetközi folyami hajózást illetően is. Az elmúlt évek őszi kisvízei ugyan kiugróan alacsonyok voltak, de nem szingulárisak, mert több hasonló számíthatunk a jövőben. Duzzasztás és gátak nélkül nem tudjuk elérni vízrendszereink fenntartható működését, akármi legyen ezzel kapcsolatban a minimális tudományos ismereteket is nélkülöző politikusok álláspontja vagy a környezetvédelmi „mozgalmárok” véleménye.

Rendkívül fontos az igen érzékeny és nagyon sebezhető felszín alatti vizekkel való racionális és fenntartható gazdálkodás. Ha a különböző vízáadó rétegeket nagy mélységű kutakkal kötjük össze, mindenféle átgondolás, hidrogeológiai szakvélemény, mérés és monitoring nélkül, akkor a nem pontszerű szennyeződésekkel már teljesen elszennyeződött első vízáadó szennyeződéseit vezetjük át a lejjebb fekvő vízáadó rétegekbe, és fosztjuk meg ezáltal a jövő generációit a tiszta víztől. Több ez, mint politikai döntés egy szűk lobbis rövid távú érdekeit kielégítő. Ez már etikai kérdés. Mint ahogyan az egész fenntartható vízgazdálkodás is az, amelyben központi elemnek kell lennie az adaptív vízgazdálkodásnak és a rezilienciára törekvésnek.

Mostanra minden gondolkodó fő számára evidenciává vált, hogy a 21. század vagy a tudás társadalma lesz, vagy nem lesz 21. század. Ennek a felismerésnek az egyik gyakorlati hajtóereje valószínűleg az, hogy az 1990-es évek közepe táján voltaképpen ledőlt a digitális korlát, és az élet szinte minden területén beléptünk a digitális korbba. Mezoszinten szinte minden kiszámítható – mindez csak gépidő kérdése. És persze tudás kérdése. Így van ez a vízgazdálkodásban is. Jól működő digitális modellek selege (Vörösmarty *et al.* 2018) áll a hidrológus, a gyakorlati vízmérnök és a stratégiai vízügyi tervező rendelkezésére különböző szinteken: a lokálistól a regionálison át a globálisig. Példa erre lokális szinten a szennyvíztisztító telepek irányítástechnikája a szenzoroktól a szabályozó elemekig, a regionális vízellátó rendszerek távirányítással

történő optimális folyamatszabályozásától (osztott intelligenciájú folyamatirányító rendszerekkel) a globális hidrológiai körfolyamat biogeokémiai fluxusainak számításáig térinformatikai rendszerben, összekapcsolva az atmoszferikus és a szárazföldi részek elemeit. Ezekre korábban soha nem volt lehetőség – részint a számítási korlátok, részint a megfelelő és elégséges mennyiségű és minőségű adat hiánya miatt. Az utóbbit illetően is hihetetlen fejlődés tanúi lehettünk az elmúlt negyed évszázadban. A műholdak és a távérzékelési technikák ma már naponta egymilliárd gigabájt hidrológiailag releváns adatot továbbítanak a Földre terahertz sebességgel. Ez elég nagy szám: egy egyes után tizenennyolc nulla. Jó sok adat naponta.

De hogyan dolgozzuk fel ezt az elképesztő mennyiségű adatot real-time, és hogyan kapcsoljuk össze a különböző szintű modelleket, amelyek kölcsönösen peremfeltételei egymásnak? Ráadásul egy sereg bizonytalanságot rejtenek magukban, így a laplace-i determinizmus csődöt mond, mert a hidrológiai ciklus nem egy 3D-s vízgép, amelynek működése kiszámítható a klasszikus determinisztikus hidrodinamika eszköztárával és rutin numerikus módszerekkel. A hidrológiai folyamatok – és a mátrix, amelyben történnek – heterogenitásából fakadó véletlenszerűsége és a léptékváltás fraktátermészete kizárja ezt az utat. Hogyan segítheti mégis a sok adat az operatív vízgazdálkodást? Miként lehet ebből az óriási napi adattömegből kiszűrni a jó döntés számára szükséges mintázatot? Az adatgyűjtési technikák fejlődésével – legyen szó az *in situ* intelligens szenzorokról vagy az említett távérzékeléssel nyert adatokról – párhuzamosan fejlődtek a nagy adathalmazok gyors feldolgozására képes adatfeldolgozási módszerek. A Big Data és az alakfelismerő algoritmusok a rekurzív tanulás elvét alkalmazva hihetetlen sebességgel szűrnek ki a különböző szintű bizonytalansággal terhelt adatokban rejlő mintázatot. A tanuló algoritmusok a mesterséges intelligencia (MI) tartományába tartoznak, és bár távolinak tűnhet, mégis közeli a lehetőség a gépi tanuláson alapuló digitális vízgazdálkodás diszciplínájának és gyakorlatának megteremtésére (Szöllősi-Nagy 2018b). Az MI alkalmazásával összekapcsolhatók lesznek a vízgazdálkodási döntések különböző szintjei a lokálistól a globálisig. Ezek a különböző szintű vízgazdálkodási gépek/modellek várhatóan egyfajta sajátos IoT-rendszert (Internet of Things) képeznek majd, lehetővé téve, hogy a lokális optimumok egy globális optimum részei legyenek, eközben kölcsönösen egymás peremfeltételei is. Válaszokat kaphatunk majd például olyan kérdésekre, hogy miként kell méretezni a műtárgyainkat egy olyan világban, ahol a stacionaritás feltétele – amelyen mérnök-generációk sora nőtt fel – első megközelítésben sem igaz. Mint jeleztük, ezekre a kérdésekre ugyanis sem a klasszikus hidrodinamika, sem a Monte Carlo-módszerű számpasszírozás nem ad jó választ. A kockázat viszont marad, szintje pedig ismeretlen.

Egy dolgot nem szabad elfelejtenünk: a vízgazdálkodás elsősorban nem műszaki kérdés, hanem társadalmi.

Ha pedig társadalmi, akkor politikai, sőt ennél is több: etikai. Ha a víz társadalmi kérdés, akkor viszont döntési modelljeinkben megkerülhetetlen a társadalom lehetséges válaszmechanizmusainak kapcsolt modellezése, ami vélhetően legalább egy nagyságrenddel bonyolultabb feladat, mint a 2/3D lokális hidraulikai számítás, mert a társadalmi válaszokban nagyságrendekkel több a bizonytalanság (és a kockázat). Hogy ezt sikerrel oldja-e meg az ágensalapú viselkedésmodellezés (Akbari-Grigg 2013), és beilleszthető-e ez a környezeti folyamatok fluxusainak modellezésébe, nos, ez az a nagy kérdés, amire várhatóan az MI, illetve a gépi tanulás ad majd választ. Az MI várhatóan lényegileg fogja átalakítani a humán kondíció egészét és részleteit, a tervezési szabványoktól és eljárásoktól a földmunkagépek használatán át a vízgyűjtőszintű stratégiai tervezésig.

Aki ezt nem fogja fel, az intellektuálisan menthetetlen, mert nem érti a 21. századot. Tanulnunk ugyanis állandóan kell. És persze a mesterséges intelligencia mellé természetes intelligencia is szükséges a döntéshozók részéről. Ez már keményebb dió – tetszőleges politikai rezsim fennállása esetén is (Somlyódy 2018). Az adaptáció képessége tanulás nélkül nem szerezhető meg egy egyre komplexebb és globálisan egyre inkább összehuzalozott világban.

Újabb adalék ez a magyar víztudomány intézmény-rendszere alapvető újjáépítésének szükségességéhez, a keletkezett vákuum és tudásszakadék megszüntetéséhez. Ma már világosan látszik, hogy a VITUKI megszüntetése nagy hiba volt. Hogy mi volt a valódi indíték, azt majd megválaszolja az idő. Mindenesetre sajnálatos tény, hogy az átfogó és koordinált magyar víztudományi kapacitás lényegében szétesett, illetve nagyrészt – esetenként kitűnő – egyetemi tanszéki tudományos műhelyekre atomizálódott. Víztudományunk mérhető nemzetközi hatása drasztikusan csökkent. Az egyetemi tanszékeken folyó kutatómunka nem helyettesíthette egy hosszú távú, átfogó, a kormányzati vízügyi politika és a gyakorlat igényeit prioritásnak tekintő, koherens nemzeti vízgazdálkodási tudományos kutatási program kidolgozását és végrehajtását.

A klímaváltozás, amelynek hatásai elsősorban a hidrológiai ciklust érintik, új kihívások elé állítja a magyar hidrológiai és meteorológiai szolgálatokat. Ha valóban elfogadjuk a hidrológiai ciklus integráló szerepét – márpedig nincs más logikus választásunk –, akkor annak bármely helyen való szétvágása önkényes, mert sérti az integritás elvét. A hidrológiai ciklus atmoszferikus és szárazföldi körforgásra történő szétválasztása is ilyen. Még inkább sérti ezt az alapelvet, ha a felszíni és felszín alatti vizek mennyiségi és minőségi adatait intézményi szinten is elkülönítve kezeljük, márpedig most ezt tesszük. Alapkérdés az adatok integrációja és az adatokhoz való nyílt hozzáférés. Azt is tudnunk kell, hogy a vízzel kapcsolatos intézmények kormányzati szintű integrálása nélkül nincs és nem lesz hatékony és fenntartható vízgazdálkodás a honban.

Epilógus

A VITUKI Európa egyik legjobb vízgazdálkodási kutatóintézete – volt. Megszüntetésé, de Boulay gróffal szólna, több volt, mint bűn: hiba volt.

Wittgenstein szerint a világ mindaz, aminek az esete fennáll – a hazai vízgazdálkodásban már csak egy új, a kormányzat szakpolitikai döntéseit segítő, integrált vízgazdálkodási kutatóintézet hiányzik ahhoz, hogy a hazai, vízzel foglalkozó társadalom (is) része lehessen a tudástársadalom nemzetközi világának.

Irodalomjegyzék

- Akhbari, M. & Grigg, N. S. (2013) A Framework for an Agent-Based Model to Manage Water Resources Conflicts. *Water Resource Management*, Vol. 27. No. 11. pp. 4039–4052. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0394-0>
- Kőrösi Cs. (2018) Sorsfordító a fejlődésben. 1. rész: Válaszút előtt a világ. *Hidrológiai Közöny*, Vol. 98. No. 4. pp. 4–8.
- Milly, P. C. D., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P. & Stouffer, R. J. (2008) Stationarity is Dead: Whither Water Management? *Science*, Vol. 319. No. 5863. pp. 573–574. <https://doi.org/10.1126/science.1151915>
- Shiklomanov, I. A. & Rodda, J. C. (2003) *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. UNESCO International Hydrology Series. Cambridge University Press, Cambridge.
- Somlyódy L. (2018) Most már csak dönteni kéne a legfelsőbb helyeken – Somlyódy László akadémikus természetes vizeink állapotáról. Barotányi Zoltán interjúja. *Magyar Narancs*, Vol. 30. No. 39. pp. 8–10.
- Szöllősi-Nagy A. (2017) Milyen (m)értéket ad a mértékadó? *Mérnök Újság*, 2017. december. p. 13.
- Szöllősi-Nagy A. (2018a) Sorsfordító a fejlődésben. 2. rész: Válaszút előtt a világ vízgazdálkodása. *Hidrológiai Közöny*, Vol. 98. No. 4. pp. 9–16.
- Szöllősi-Nagy A. (2018b) A digitális vízgazdálkodásról. *Mérnök Újság*, 2018. július. p. 11.
- UNESCO (2018) *UN World Water Development Report*. Paris. <https://www.unesco.org/en/wwap/wwdr/2018>
- UNFCCC (2015) *The Paris Agreement*. United Nations, New York. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>
- Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., Richard B. Lammer, R. B. (2000). *Global Water Resources: Vulnerability from Climate Change and Population Growth*, Science, Vol. 289, Issue 5477, pp. 284–288.
- Vörösmarty, C. J., Rodríguez Osuna, V., Cak, A. D., Green, P., Tessler, Z., Corsi, F., Bhaduri, A., Bunn, S., Gastelumendi, J., Harrison, I., Lawford, R., Marcotullio, P. J., McClain, M., McDonald, R., McIntyre, P., Palmer, M., Robarts, R., Szöllősi-Nagy, A. & Uhlenbrook, S. (2018) Ecosystem-based water security and the sustainable development goals. *Ecohydrology & Hydrobiology*, Vol. 18. No. 4. pp. 317–333. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.07.004>
- Waters, C. N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A. D., Poirier, C., Galuszka, A., Cearreta, A., Edgeworth, M., Ellis, E. C., Ellis, M., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J. R., Richter, D. deB., Steffen, W., Syvitski, J., Vidas, D., Wagemann, M., Williams, M., Zhisheng, A., Grinevald, J., Odada, E., Oreskes, N. & Wolfe, A. P. (2016) The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, Vol. 351. No. 6269. aad2622. <https://doi.org/10.1126/science.aad2622>
- Wolf, A. T. (2007) *Shared Waters: Conflict and Cooperation*. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 32. No. 1. pp. 241–269. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.041006.101434>