

BESZÉLGETÉS A KÖRNYEZET KÉT FONTOS KÖZEGÉRŐL – A VÍZRŐL ÉS A LEVEGŐRŐL

Beszélgetőpartnerek: Mészáros Ernő
és Somlyódy László

az MTA rendes tagjai

*Prológus: miről szól a beszélgetés,
tartalomjegyzék*

M. E.: Kedves Laci! Élettünkben számos tudományos és kevésbé tudományos megbeszélésen, konferencián vettünk részt. De nemcsak sokat ültünk, netán unatkoztunk együtt, hanem sok esetben meghallgattuk egymás előadásait, felszólásait. Ezekből egyre jobban kiviláglott az a közel sem forradalmi felismerés, hogy a Te területed, a vízburok, és az én kutatási közegem, a levegő folyamatai mennyire hasonlatosak. Ebből következik, hogy tanulmányozási módszereik sem térnek el nagyon egymástól. Azt hiszem, eljött az ideje, hogy erről kicsit részletesebben is elbeszélgessünk, és a beszélgetés lényegét papírra vessük – jó professzorként reménykedve abban, hogy amit mondunk, az másoknak is okulásul szolgál.

S. L.: Teljesen egyetértek. Talán csak annyit hozzátéve, hogy a két környezeti tartomány hasonlóságai mellett a különbségeket is említsük meg. Azt javaslom továbbá, hogy nagyjából előre állapodjunk meg, milyen témákról fogunk beszélni. Beszélgetésünk így

nem válik parttalanná. Megállapodásunk ilyen módon beszélgetésünknek mintegy a „tartalomjegyzékévé” válhat, ami, ha leírjuk, nagyon is kívánatos. Másik javaslatom, hogy tekintve a víz és a levegő összefüggését a bioszférával, az étellel, néhány bevezető szót erről is kellene szólni.

M. E.: Lássuk először, miről is fogunk beszélni. Tartalomjegyzék helyett:

A két közeg összetétele és néhány tulajdonsága: *Víz, levegő, élet • A körforgásokról • Oldott és szilárd anyagok*

Főbb szennyezők és problémák: *Főbb szennyezők • A globális felmelegedésről • A savasodásról • Az ózonnál és más anyagokról • A szerves- és tápanyagokról • Néhány érdekesség*

Áramlás és transzport, egyenletek: *Leíró egyenletek • Jellemző esetek*

Modellek: dilemmák és alkalmazások: *A modellalkotás • Az alkalmazás előfeltételei • Példa a transzportegyenlet numerikus megoldására • Modellezés és környezeti problémák*

Káosz

Éghajlati prognózis

Epilógus

A KÉT KÖZEG ÖSSZETÉTELE ÉS NÉHÁNY TULAJDONSÁGA

Víz, levegő, élet

M. E.: A Föld alapvető jellemzője, hogy rajta élet, bioszféra van. A bioszféra kialakulását a bolygó tulajdonságai, így Naptól való távolsága és nagysága tették lehetővé. Az említett tulajdonságok miatt a víz a felszínről nem szökött el, és bolygónk felszínének mintegy kétharmadát ma is víz borítja. A legvalószínűbb feltevés szerint, valamikor 3,8 milliárd évvel ezelőtt, az első egysejtű lények a sekélyebb vizekben jöttek létre. Életük fenntartásához nélkülözhetetlen energiát a nap sugárzás szolgáltatta, míg az anyagcseréjükhez szükséges elemeket (szén, oxigén, hidrogén) a vízből és az őslégkörből nyerték. A további fejlődés szempontjából hatalmas jelentőségű esemény volt, amikor 3,5 milliárd évvel ezelőtt egyes egysejtű baktériumok (cianobaktériumok) a szénhidrátok előállításához szükséges hidrogént a víz elbontásával nyerték. A fotoszintézisnek ez a ma is uralkodó módja felszabadította a víz oxigénjét, és egyúttal csökkentette a légköri szén-dioxid mennyiségét.

Az oxigén igen reakcióképes. A vízbe és az akkori oxigénmentes légkörbe jutva molekulái oxidáltak a különböző anyagokat (például: metán, redukált állapotú vasvegyületek), majd kb. kétmilliárd évvel ezelőtt megindult az oxigén felhalmozódása, és mennyisége kb. 300 millió évvel ezelőtt elérte a ma is megfigyelhető értéket. A víznek köszönhető légkörünk legfontosabb tulajdonsága, a jelentős koncentrációjú szabad oxigén jelenléte.

A megjelenésekor az oxigén az akkori egysejtűek nagy része számára mérgező volt. Egyesek közülük, főleg a sejttaggal rendelkező lények azonban „felismerték”, hogy az oxigén felhasználásával sokkal hatékonyab-

ban lehet szervezetüket működtetni, mint fotoszintézissel. Kialakult a légzés, ami új utakat nyitott az élet elburjánzásához. Számunkra, mai emberek számára, az oxigén és a víz nélkülözhetetlenek. Oxigén nélkül csupán néhány percig tudnánk életben maradni, de az oxigén a levegőben szinte korlátlan mennyiségben áll rendelkezésünkre. Az óceánok sós vizét nem tekintve, a víz mennyisége jóval korlátozottabb. Igaz, víz nélkül néhány napig is megvagyunk. Végül a tevékenységünkhöz és kényelmünkhöz szükséges energiát zömmel oxidációval, égéssel nyerjük.

A levegő a Naprendszer bolygóinak gázburkát tekintve különleges gázkeverék. Különleges, mivel egyik fő összetevője az oxigén, amely a többi bolygó légkörében gyakorlatilag nem fordul elő. De különleges-e a víz, amelyet mindannyian oly közösnek gondolunk tartunk?

S. L.: A kérdésfeltevés érdekes különbségre hívja fel a figyelmet: a levegő sokkomponensű keverék, míg a természetben egyébként nem létező tiszta víz egykomponensű vegyület. Ebből arra következtethetünk, hogy a közönségesnek gondolt víz sokkal egyszerűbb közeg, mint a levegő. De valóban így van-e? Az élet szempontjából mindkettő egyformán fontos: szén-dioxidot szolgáltatnak a fotoszintézishez, miközben kart-karba öltve, egymással sokoldalú kölcsönhatásban vannak. A víz azonban különleges már csak összes tömege miatt is: a földfelület leggyakoribb molekuláris vegyülete. Különleges azért is, mivel nélküle egyetlen állat vagy növény sem létezne a Földön. Különlegességének gyökere azonban a csodálatos és rendkívül specifikus molekulaszervezete. Emiatt kapja a víz a legkülönbözőbb jelzőket és jellemzéseket a folyadékok között: ellentmondásos, Janus-arcú, szfinx és így tovább.

A víz a létező legegyszerűbb és legkisebb aszimmetrikus molekula: a 16-os tömegszámú oxigénatomhoz két, egymással 105°-os szöget bezáró, 1-es tömegszámú hidrogénatom kapcsolódik. A nagy méretkülönbség miatt az oxigénatom magához vonzza a két hidrogénnek a kovalens kötésben részt vevő elektronját. Emiatt a vízmolekula erősen polarizált: az oxigénatom negatív, a hidrogének pozitív töltésűek. A szomszédos molekulák ellentétes töltéseinek vonzása a kovalens kötésnél gyengébb, ám jelentős energiájú hidrogénhidakat alakítanak ki. A hidrogénhidkötés teszi a vízmolekulát unikális kémiai szerkezetűvé.

Az ideális jégkristályban az oxigénatomok egy tetraéder középpontjában helyezkednek el, a négy csúcson a két kovalensen kötött és a két hidrogénhíddal kapcsolódó hidrogénatomot találjuk. A hőmérséklet emelkedése a molekulák kinetikus energiájának növekedését jelenti. A jég megolvadásakor a rendezett belső szerkezet részben felbomlik, a molekulák közelebb kerülnek egymáshoz. A térfogat csökken, a sűrűség növekszik (a jég sűrűsége kisebb, mint a vízé). Légköri nyomáson a sűrűség 4 °C-on a legnagyobb. A hőmérséklet növekedésével csökken az egymással asszociált vízmolekulák száma, a térfogat növekszik, a sűrűség csökken. A vízgőzben már nincsenek asszociált molekulák. A víz az egyetlen folyadék, amelynek a sűrűsége a hőmérséklet függvényében szélsőértékkel rendelkezik (ezt és ennek a következményeit hívjuk sűrűségi anomáliának, amiről később még biztosan szólunk). Szintén a specifikus molekulászerkezet az oka annak, hogy magas a víz olvadáspontja, olvadáshője, forráspontja, forrás- vagy párolgáshője, felületi feszültsége, viszkozitása, dielektromos állandója és oldóképessége, azonban igen alacsony a ve-

zetőképessége. A víz fajhője magasabb, mint az ammónia kivételével bármilyen más folyadéké. Felmelegedése és lehűlése ezért lassabb, mint más közegeké. Ez a magyarázata annak, hogy a víz hőmérséklete kisebb mértékben ingadozik, mint a szárazföldé: nagy vizek klímaki egyenlítő hatása közismert. Például az észak felé mozgó, meleg, lassan hűlő Golf-áramlat nélkül Nagy-Britannia sokkal hidegebb téllal szembesülne.

Mindezek, a többi folyadékétól eltérő tulajdonságok az élet és az élettani folyamatok szempontjából sokoldalú következményekkel járnak. A víz az egyetlen vegyület, ami a természetben mindhárom fázisban (szilárd, folyékony és vízgőz) előfordul (és a hasonló szerkezetű vegyületekkel szemben szobahőmérsékleten nem gáz halmazállapotú), így módon lehetővé teszi a víz, az anyagok és a hő körforgását a bioszférában. A víz kiváló hűtőanyag (de jó fűtőközeg is): ez fontos tulajdonság a földi éghajlat és a melegvérű állatok hőmérsékletének szabályozása szempontjából. A sűrűségi anomália miatt a víz felülről kezd befagyni. A jó hőszigetelő jég réteg megvédi az alatta levő víztömeget a lehűléstől és a megfagyástól, és biztosítja az élővilág áttelelését. De a jég tágulása okozza a kőzetek fizikai mállását is, ami a talajképződés első lépése. Ugyanez az anomália mély vizekben hőmérsékleti rétegződést alakít ki: a felülről felmelegedő víz (epilimnion) a lényegesen hidegebb hipolimnionon „lebeg”.

A nagy felületi feszültség miatt a kapillarisokban a víz más folyadékoknál magasabban emelkedik. Ezen a tulajdonságon alapul a magasabb rendű (edénynyalábos) növények nedvkeringése; ez teszi lehetővé, hogy a talajvíz nedvesen tartsa a felső, a növények számára elérhető talajrétegeket. A nagy viszkozitás jelentős felhajtóerőt jelent. A vízben élő

szervezeteknek nincs szükségük támasztó és merevítő rendszerekre, mint a szárazföldi élőlényeknek. Ugyanakkor persze a vízbéli mozgás lényegesen több energiát emészt fel.

Némi túlzással gyakran mondják, hogy a víz a legáltalánosabb oldószer: valóban több anyagot old, mint a többi közönséges folyadék. Ez biztosítja azoknak az ionoknak a megjelenését, amelyek elengedhetetlenek az élőlények számára. A víz az aszimmetrikus szerkezetű gázokat is jól oldja, ezekkel gyakran kémiai reakcióba lép. A légkör zömét alkotó szimmetrikus (apoláros) N₂- és O₂-gáz – szemben a polárosokkal – rosszul oldódik. Emiatt, az egészséges vízi élet előfeltételét képező oldott oxigén a légkörrel szemben gyakran csak szűkösen áll rendelkezésre. A sók ionokra disszociálnak a vízben, az anionokat és a kationokat hidrárburok veszi körül. A vízmolekulák a nagy, elektromosan töltött molekulák körül is hidrárburokká rendeződnek, ezeket a molekulákat kolloid „oldatban” tartják. Az élet azért alakulhatott ki az ősóceánokban, mert a víz a szükséges egyszerű molekulákat és azok polimerjeit egyaránt nagy koncentrációban tudta oldatban tartani. Ugyanakkor a víz nem, vagy rosszul oldja a töltéssel nem rendelkező, apoláros molekulákat. A sejtet apoláros, a víz számára átjárhatatlan lipidmolekulákból felépülő sejthártya burkolja. A víz és a vízben oldott anyagok csak a lipidrétegbe ágyazott poláros fehérjecsatornákon keresztül jutnak a környezetből a sejtbe és vissza. Az élő szervezetek lágy szöveteinek 85–95%-a víz. Az emberi testben 60–70% a megfelelő érték. A víz döntő szerepet játszik a környezettel zajló cserefolyamatokban: például agyunkon naponta több mint 1000 liter víz áramlik át, odaszállítva a működéséhez szükséges anyagokat, és eltávolítva a bomlástermékeket.

A körforgásokról

M. E.: Mindannyian tudjuk, hogy a levegő nemcsak oxigénből, hanem molekuláris nitrogénből, illetve jóval kisebb mennyiségben nemes gázokból, elsősorban argonból áll. Kevésbé közismert, hogy a légkörünk egy térfogatszázaléknál jóval kisebb mennyiségben, nyomokban számos más gázt tartalmaz. A nyomgázok közül legismertebb a víz. Kondenzációra képes, azaz gőz halmazállapotban van. Így biztosítja a felhő- és csapadékképződést, s ezáltal a vizet a szárazföldi ökoszisztémák számára. Koncentrációja annyira változó, hogy amikor a levegő összetételéről beszélünk, általában száraz levegőre gondolunk. A többi nyomgáz együttes koncentrációja a 0,04%-ot sem éri el. Jelenlétük mégis alapvető. Szabályozzák a napsugárzás és a Föld által kibocsátott hosszuhullámú sugárzás átvitelét, és ezen keresztül az éghajlatot. Egyik közismert képviselőjük az ózon, amely a légkör magasabb rétegeiben oxigénmolekulákból keletkezik, és kiszűri a napsugárzás spektrumából az élőlényekre halálos, nagyenergiájú ultraibolya sugarakat. Másik közismert példa a szerves anyagok bomlásából, kisebb mértékben a légzésből és vulkánizmusból származó szén-dioxid, amely a nyomgázok többségét teszi ki. Ez a gáz átengedi a Napból jövő rövidhullámú energiát, ugyanakkor elnyeli és kisugározza a földi hőszugárzást, azaz a levegőt a kertészetben használatos üvegházhoz teszi hasonlóvá. A szén-dioxid mennyisége bolygónk története során az éghajlatot alapvetően meghatározta, és meghatározta napjainkban is. Az üvegházhatást tovább fokozzák olyan, szintén biológiai eredetű nyomgázok, mint az oxigénmentes környezetben keletkező metán vagy a talajok nitrifikációs és denitrifikációs folyamatai során

felszabaduló dinitrogén-oxid. Az emberi tevékenység miatt a levegőben az említett gázok egyensúlya felborult, ennek következtében koncentrációjuk növekszik. Az üvegházhatás szempontjából, már csak a nagyobb koncentráció miatt is, a metán szerepe jelentősebb, mint a dinitrogén-oxidé. Ugyanakkor a teljes üvegházhatáshoz a metán és dinitrogén-oxid csak hozzájárul, mivel a szén-dioxid koncentrációja mindkét gáz légköri mennyiségét jelentősen meghaladja.

A levegőbe került gázok molekulái természetesen nem maradnak örökké a légkörben, hanem meghatározott, ún. nyelő folyamatok kivonják őket. A földtörténet során a természetes források és nyelők egyensúlyba kerültek, ami azt jelenti, hogy erősségük kiegyenlíti egymást, ezért a levegő összetétele nem változik. Minden anyag molekulái átlagosan meghatározott időt töltenek a levegőben. A tartózkodási idő alapvetően szabályozza adott vegyület koncentrációjának tér- és időbeli változékonyságát. Minél hosszabb a tartózkodási idő, az illető gáz a légáramlásokkal annál jobban elkeveredik. A légkör teljes keveredése egy-két éves időtartam alatt megy végbe. Tekintve, hogy az üvegházhatású gázok tartózkodási ideje ennél jóval hosszabb, a levegőben lényegében egyenletesen oszlanak el. Különösen hosszú, több mint száz év a dinitrogén-oxid tartózkodási ideje. Ez lehetővé teszi, hogy molekulái feljussanak a légkör kb. 15 km fölötti részeibe, ahol az ózon többsége helyezkedik el. Itt a napsugárzás hatására elbomlanak, és a bomlástermékek részt vesznek az ózon kivonásában.

A levegőbe a szárazföldi és vízi bioszférából, esetleg a vulkánokból olyan gázok is jutnak (például: kén- és nitrogén-oxidok, ammónia, szerves gázok), amelyek egymással reakcióba lépnek, illetve vízben jól oldódnak,

és csapadékhulláskor elhagyják a légkört. Ezek képezik a reaktív gázok csoportját, amelyek tartózkodási ideje általában néhány nap. Ezek a forrásoktól a légáramlások irányának és erősségének megfelelően távolodnak el. Légköri körforgalmuk alapvetően függ a víz légköri ciklusától, amely része a víz *hidrológiai körforgásának*. Hogyan is megy ez végbe egy kicsit pontosabban?

S. L.: Tekintsük először a *statikus képet* és a tárolt készleteket. A Föld teljes vízkészlete mintegy 1400 millió km³ (a felszín 71%-át víz borítja, de a víz a Föld tömegének csak mintegy 1%-át teszi ki). Ennek csupán 2,5%-a az emberi igények kielégítésére közvetlenül alkalmas édesvíz. Utóbbi háromnegyede jég formájában található (nagy része az Antarktiszon), és mint ilyen, nem hozzáférhető. Azaz valójában csupán 0,6%-kal gazdálkodhatunk, ami túlnyomóan a felszín alatt található. A hétköznapiakon a vizet többnyire a folyókkal és a tavakkal asszociáljuk, ezek részesedése csupán 0,014%. Első ránézésre még ez is bőségesen elegendő, hiszen a népesedést lényegesen meghaladó ütemben növekvő évi globális vízhasználat napjainkban is „csak” 6000 km³ körüli.

A különböző készletek közötti *dinamikus kapcsolatot* a hidrológiai körforgás teremti meg, ami a napenergia hatására, a hidroszféra nyitott rendszerében jön létre, kölcsönhatásban az atmoszférával és a litoszférával. Ezt kizárólag a szűk hőmérsékleti tartományon belüli fázisváltások teszik lehetővé: a víz fázisdiagramja és a bolygók hőmérséklet- és nyomás jellemzőinek relatív viszonya magyarázza, hogy jelenlegi ismereteink szerint folyékony víz valószínűleg csak a Földön található. A hidrológiai körforgás kulcseleme a felszíni vizek óriási energiaigényű párolgása (ez hőelvonással jár, és csökkenti a levegő-víz határ-

felület hőmérsékletét), amely jóval forráspont alatt (szublimáció formájában még szilárd halmazállapotban is) bekövetkezik (a levegő víztartalma már 20 °C-on is elérheti az 5%-ot).

Számos más anyag földi körforgásának hajtóereje a víz körforgása – a víz a legáltalánosabb szállító közeg. A nagy körforgás számos kicsiny ciklus eredője. A tengervíz 3,5%-a oldott anyag, túlnyomóan nátrium-klorid (a további főbb összetevők: kalcium, magnézium, bikarbonát, szulfát, klorid és szilícium, de nyomelemnyi mennyiségben aranyat is tartalmaz). Párolgás és a szárazföldi bioszféra transzspirációja révén évente 0,45 millió km³ megújuló víz lép vízgőz formájában a folytonos, nagy körforgásba (a nagyságrend érzékeltetése céljából jegyezzük meg, hogy ennek az egész Földet befedő, 1 méter vastag vízréteg vagy kétszáz ezer Balaton felel meg). A víz-molekulák az óceánból a légkörbe lépve hátrahagyják a sóikat és a bejutott szennyezőanyagok nagy részét. A folyamat nagyléptékű desztillálásként képzelhető el, amely eredményeként „tisztá” édesvíz jut a szárazföldre. Miután a lehulló csapadék nagy része közvetlenül az óceánba jut vissza, a ténylegesen hasznosítható, megújuló, dinamikus készlet a szárazföldi lefolyás eredménye, mindössze 40 000 km³ körüli, azaz kb. húsz ezer Balatonnyi.

A körforgás során a folyók a talajból és a kőzetekből anyagokat oldanak ki, amit a tengerekbe és óceánokba szállítanak. A tengerekben kicsapódó és kiüledő anyag emberi szempontból „elvész”. Háromezer év kell ahhoz, hogy a teljes vízkészletnek megfelelő térfogatú víz egyszer körbeforduljon (ennyi az óceánokban a víz átlagos „tartózkodási ideje”, de ugyanez a légkörben vagy a folyókban csupán egy-két hét). A csapadékból származó víz felszíni lefolyása a topográfiai viszonyok által meghatározott ún. vízgyűjtőterületeken történik, melyek a vízgazdálkodás természetes alapegységét képezik. A kisebb vízgyűjtők kifolyószelvénye nagyobb vízfolyásokba torkollik. Így épül fel a hidrológiai fa, a különböző rendű mellékfolyók és vízgyűjtők, egészen addig, amíg a főfolyó valamelyik tengerbe vagy óceánba nem szállítja a vizét.

A „sok víz” hiedelemmel szemben a dinamikus globális készlet napjainkban a vízigénynek (1000 m³/fő/év, aminek 70%-át az öntözés teszi ki) csupán mintegy hatszorosa. A trend a népesedés következtében roppant kedvezőtlen: a fajlagos készlet száz év alatt 27 000 m³/fő/év-ről csökkent mintegy 6000 m³/fő/év-re. Fizikai értelemben a sok, térben és időben erősen változó, kicsi körforgás az oka, hogy a vízzel kapcsolatos gondok földrészenként, térségenként, évenként és évszakonként változó módon jelentkeznek. Az alapvető gondot a roppant egyenlőtlen elosztás jelenti: vízhiányok, aszály és árvizek fordulnak elő. A vízzel ezért gazdálkodni kell, ami nem olcsó. Napjainkban a fejlődő világban gyakran a gazdasági okok miatti vízhiány, továbbá az ivóvízellátási és szennyvízelhelyezési gondok jelentik a legnagyobb kihívást. Ehhez adódik az éghajlatváltozás hidrológiai körforgást „gyorsító” hatása, ami a készletek területi átrendeződésében és a szélsőségek gyakoribbá válásában jelentkezik.

Az élet kialakulása óta a víz által szállított anyagok mennyisége csak kisebb mértékben függ attól, hogy a víz mit tud kioldani, és magával sodorni. Ennél fontosabb tényező a szárazföldi és vízi élővilág anyagcseréje, és a fontosabb elemek (például C, N, P) változó körforgása. A ma társadalmunk közvetlenül vagy közvetve olyan mennyiségű szennyezőanyagot juttat a vizekbe, hogy azt sem a kémiai

folyamatok, sem az élővilág nem képes feloldozni. A vízminőségi bajok szinte mindenütt robbanásszerűen jelentkeznek, sokféle – főként a fejlődő világban – a kezelés esélye nélkül. Néhány évtized alatt nagyságrenddel nőtt a szárazföldről a vizek felé irányuló irreverzibilis anyagáramlás.

M. E.: Befejezted?

S. L.: Alighanem fogsz még kérdezni.

Oldott és szilárd anyagok

M. E.: Mint említettem, a légkörben nyomokban számos gáz található. A nyomgázok kémiai reakciói a levegő jellegének megfelelően oxidációs folyamatokat jelentenek. A reakciók során sok esetben különböző gőzök (például kénsav, salétromsav) keletkeznek, amelyek a vízgőzzel együtt kondenzálódnak, és kicsiny, nanométeres nagyságú cseppecskéket képeznek, amelyek egymással egyesülve növekednek tovább. Erre a legáltalánosabb példa a kénsavcseppecskék keletkezése, amelyeket az ammóniagáz semlegesít. Ily módon ammónium-szulfát részecskék/oldatcseppek keletkeznek. Természetes körülmények között a szulfátrészecskék az óceáni bioszféra által kibocsátott kéntartalmú gázból, dimetil-szulfidból keletkeznek. Az óceánokból tehát nem csak vízgőz, hanem a vízgőz kondenzációját elősegítő részecskék is érkeznek a levegőbe.

Olyan aeroszolforrások is működnek (például erdőtüzek), amikor gőzök (például különböző szerves anyagok) vagy részecskék (például korom) közvetlenül szabadulnak fel. Másrészt a kémiai reakciók sokszor nem gázfázisban, hanem az elnyelt gázok között a felhőcseppekben mennek végbe. Ilyenkor a részecskék a felhők elpárolgása útján jutnak a levegőbe. Csapadék keletkezése esetén anyaguk a felszínre kerül. A részecskék mérete jóval nagyobb, mint a gázmolekuláké, ugyan-

akkor bizonyos ideig lebegő állapotban a levegőben maradnak: a légkör hatalmas diszperz rendszert, aeroszolt alkot. A gázreakciókkal, illetve kondenzációval általában 1 mikrométernél kisebb, gömb alakú részecskék keletkeznek. Ezeket közös néven finom részecskéknek nevezzük.

A levegőben az említett méretnél nagyobb, ún. durva részecskék is találhatóak. A durva részecskék a felszín mechanikus porlódása útján keletkeznek, amelyet a légáramlások váltanak ki. Kémiai összetételük természetesen a felszín jellegét tükrözi. Óceáni környezetben tengeri sóból (elsősorban nátriumklorid), míg szárazföldek fölött főleg az alumínium, a szilícium és a vas oxidjaiból épülnek fel. Ez utóbbi esetben formájuk szabálytalan. A durva részecskék közös jellemzője, hogy ülepedésük a levegőben közel sem elhanyagolható.

Az aeroszol részecskék fontos összetevői a levegőnek: számos légköri folyamat szabályozásában fontos szerepet játszanak. Befolyásolják a napsugárzás légköri terjedését, mivel anyaguktól, nagyságuktól és formájuktól függően szórják, kisebb mértékben nyelik el a sugarakat. Ily módon valamelyest csökkentik a felszínre elérő napenergiát, és meghatározzák azt a távolságot (látótávolság), ameddig ellátunk. Aeroszol részecskék nélkül a látótávolságot csupán a gázmolekulák szabályoznák. Értéke meghaladná a 300 km-t. Ha a részecskék a talajra, vizekre rakódnak, vagy belelegezük őket, akkor az élővilágra is hatással vannak. Legfontosabb szerepük azonban az, hogy lehetővé teszik a felhőképződést, mivel a vízgőz számára, elsősorban a vízben oldódó hányaduk kondenzációs magvakat szolgáltat. Aeroszol részecskék nélkül nem lennének felhők, így csapadék sem hullana. Másrészt az éghajlat is jóval melegebb lenne,

mivel a felhők szerkezetüktől függően a napsugárzást hatékonyan visszaverik.

Az aeroszol részecskék részben vízben oldódó (például ammónium-szulfát, nátrium-klorid), illetve oldhatatlan anyagokból épülnek fel. Ez lényeges különbség a környezeti vizekben lebegő részecskékhez képest, amelyek az adott kémiai környezetben túlnyomóan oldhatatlan vegyületekből állnak.

S. L.: Így van, a természetben található vizeknek szintén velejáruk a szilárd részecskék jelenléte. Változatos és szerteágazó világ tárul elénk, ami lefedi a finom kolloidokat és az akár hét-nyolc nagyságrenddel nagyobb hordalékot is. Folyók hordaléka erózió és mállás révén a vízgyűjtőről, a mederből és partról származik. Döntően ásványi anyag, de részét képezik a változatos szennyezőanyagok szilárd formái is. A klasszikus vízimérnöki gyakorlat megkülönbözteti a lebegtetett és a görgetett hordalékot, amelyek alatt kizárólag az ásványi anyagokat értik. A görgetett hordalék jellemzője, hogy kúszva vagy ugrálva szinte folyamatosan a mederfenéken halad, míg a lebegtetett hordalék a vízsebességgel közel azonos sebességgel, lebegve mozog. A hordalék szállítása energiát igényel, ami csökkenti a víz áramlási sebességét. A mozgásban, az erózióban és a meder morfológiai változásaiban (kimélyülés és feliszapolódás) döntő szerepet játszanak az energiaviszonyok. A kinetikus energia és a fenéksúsztató feszültség növekedése például árvek vagy sekély tavak esetén a potenciális energia növekedését és felkeveredést idéz elő, és ezzel nő a vízben a lebegtetett hordalék koncentrációja. Mindez függvénye a hordalék összetételének, ami a folyó hossza mentén, az esés függvényében jellegzetes változást mutat: felvízi szakaszon a durvább részecskék is képesek lebegésben maradni, míg az alvízi részeken csak az igen

finom frakciók. Ahogyan már utaltam rá, a hordalék nagyság szerinti eloszlása rendkívül széles tartományt fed le az 1–2 µm-nyi finom agyagtól a különböző durvaságú homokon és az akár 100–200 mm-es kavicsra át a méteres kőgörgöttegig. A lebegtetett hordalék felső határát általában a finom és a durva homok jelenti, ami legfeljebb 1,0 mm átmérőjű. Érzékeljük tehát, talán nem először és nem is utoljára, hogy a természetes víz – szemben a tiszta vízzel – bonyolult keverék, ami matematikai értelemben a változó meder adta peremen belül áramlik.

Vízminőségi szempontból oldott és szilárd, részecske formájú anyagot különböztünk meg. A kettő közötti határ távolról sem éles. A gyakorlat némileg önkényesen, konvencióként a 0,45 µm pórusméretű membránszűrőn fennmaradó frakciót lebegőanyagnak (az 50 µm feletti részecskék láthatók szabad szemmel), míg az azon átfolyót oldott anyagnak tekinti. Ahogyan már említettem, a víz kiváló oldószer, és sok szilárd anyagot, így szerves sókat képes oldatba vinni. Az édesvizek oldott szilárdanyag-tartalma 50 és 1000 mg/l között változik (a tengeré sokkal nagyobb, 35 g/l körüli – erről már volt szó). A nem, vagy nehezen oldható anyagok szilárd formában maradnak, a jellemző lebegőanyag koncentráció átlagos körülmények között 10–100 mg/l (de például a Sárga-folyóban több g/l). A szilárd részecskék lehetnek szervesek (agyag, vasoxid, kalcium-karbonát stb.), szervesek (természetes és mesterséges eredetűek), valamint élő vagy holt egysejtűek (vírus, baktérium, alga, protozoa stb.).

A lebegőanyag és a finom üledék gyakran kohezív tulajdonságú, ami nagyobb méretű, jobban ülepedő aggregátumok keletkezését eredményezi. Az 1 µm alatti részecskéket kolloidoknak hívjuk (1 nm-ig, ami a makromole-

lekulák jellemző mérete). A kolloid tartományban a nagy diffúzió miatt az ülepedés nem tud érvényesülni, ugyanakkor a nagy fajlagos felület következtében az oldott anyagok adszorpciója igen hatékony. Ez a magyarázata annak, hogy a lebegőanyag-tömegre vetített szennyezőanyag-koncentráció a frakció méretének csökkenésével általában nő.

A szilárd részecskék sokoldalúan és kiszámíthatatlanul alakítják a vizek minőségét. Sok mikroorganizmus patogén hatású, és veszélyes az emberi egészségre. A zavarosság – az összetételtől és a méreteloszlástól függően – a légkörhöz hasonlóan befolyásolja a fényelnyelést a vízben és az algák szaporodását. A nagy adszorpciós kapacitás szennyezők és tápanyagok (nehézfémek, humin anyagok, foszfor stb.) megkötését eredményezi: látszólag hozzá nem férhető szilárd formák jönnek létre. Azonban a szilárd szennyezőanyagok viselkedését alapvetően a kémiai környezet határozza meg (erre már utaltam): a gyakran ártalmatlannak gondolt részecskék transzport révén más környezetbe kerülve alakulhatnak át oldott, toxikus formába. Más esetekben, önmagában az adszorpciós kapacitás kimerülése eredményezi a tavak üledékében felhalmozott foszfor visszalépését a vízbe (ezt hívjuk belső terhelésnek).

A kolloidok a szilárd és oldott fázis között a látszólag „elhanyagolható méret” roppant fontos világát jelentik. A vízkezelés szempontjából ez a sokszínű világ azt jelenti, hogy a biztonságos ivóvízellátás érdekében igen széles skálán szükséges a részecskéket eltávolítanunk. Erre a célra a legtöbb esetben olyan folyamatokat hasznosítunk (szűrés különböző mérettartományokban, szétválasztás, ülepedés, dekrét stb.), amelyek a természetben is lejátszódnak. A különbség az, hogy igyekszünk jól szabályozott feltételeket biztosítani, nagyobb

koncentrációval (vagy biomasszával) dolgozunk a helykímélés érdekében, és sok folyamatot vegyszeradagolással valósítunk meg, vagy teszünk hatékonyabbá. Utóbbira jó példa az apró kolloidok eltávolítása: első lépésben vegyszeradagolással (fém só) destabilizáljuk a részecskéket, majd a másodikban valamilyen polimer adagolásával segítjük elő az egyesülésüket, amit most már követhet az ülepedés. Az eljárás teljesen hasonló a szennyvíztisztítás során is. A példa egyúttal jól szemlélteti a vízminőség-szabályozás technológiai vonulatát, amire még többször visszatérünk.

FŐBB SZENNYEZŐK ÉS PROBLÉMÁK

Főbb szennyezők

M. E.: Az ember élete a környezeti adottságoktól függ. Az utóbbi századokban azonban tevékenysége olyan méreteket öltött, hogy maga is környezete alakítójává vált. Így egyre inkább szennyezi a levegőt (a vizeket és a talajt), mivel az energia előállítása, az ipari és mezőgazdasági termelés, valamint a közlekedés és szállítás során a légkörbe egyre több gázt és aeroszol részecskét bocsát. Az ember tevékenysége során növeli a természetes forrásokból származó anyagok mennyiségét, sőt az is előfordul, hogy a levegőbe olyan vegyületeket juttat (például a magas légköri ózont befolyásoló freonok), amelyek a légkörben elő sem fordulnak. Ebből következik, hogy akaratlanul módosítja mindazokat a hatásokat, amelyeket a légköri összetevők kifejtenek. A légszennyeződés hatásai nagymértékben a tartózkodási időtől függenek. A rövid tartózkodási idejű anyagok hatása csupán a források, a városok és ipartelepek környezetében jelentkezik. Ez a lokális légszennyeződés közvetlenül befolyásolja az emberi egészséget,

mivel összetevőit a levegővel együtt belélegezzük. Másrészt károsítja az épületek, műemlékek és tereptárgyak állapotát. Végül az emberi tevékenységnek köszönhető aeroszol részecskék csökkentik a látótávolságot, és növelik a ködök előfordulási gyakoriságát. A 20–30 km-nél nagyobb léptékű, ún. regionális szennyeződés a szárazföldi és vízi ökoszisztémák természetes működését zavarja meg. Erre jó példa a savas légköri ülepedés (köznyelven savas eső), amely az erdőket és tavakat károsítja. Végül a több éves tartózkodási idejű gázok, mint a szén-dioxid és metán, az egész légkörben elkeverednek, és globális légszennyeződést hoznak létre. Ennek következménye a globális felmelegedés vagy az ózonlyuk.

S. L.: De mi is a már többször emlegetett tartózkodási idő? Egységes definícióval nem rendelkezünk. A légkörkutatókban a leegyszerűsített konvenció szerint az átlagos tartózkodási idő valamely adott térfogat osztva az időegység alatt kiáramló (vagy beáramló) levegő mennyiségével, ami nem más, mint az átlagos kiürítési (forgalmi) idő. A vízminőség-szabályozásban ezzel szemben a legelterjedtebben az átlagos feltöltési időt (τ) alkalmazták: $\tau = V/Q_{be}$, ahol V a vizsgált víztest (például tó vagy tározó) térfogata, Q_{be} pedig a beáramló víz hozama. Valójában azonban látnunk kell, hogy szabatosan a tartózkodási idő – a levegőben és a vízben egyaránt – statisztikai változó, ami jellemzi az áramlási teret, a holttereket, az örvényeket és a rövidzárokat, magyarul azt, hogy a részecskék mennyire eltérő módon áramolnak át a vizsgált térfogaton, miközben a szennyezőanyagok erősen eltérő reakciókon és átalakulásokon mennek keresztül. Azaz, ugyanahhoz az átlagos tartózkodási időhöz jelentősen eltérő eloszlások és környezeti állapotok tartozhatnak.

M. E.: A tartózkodási idő és a keveredés szoros összefüggése a levegőben eléggé nyilvánvaló. Biztosan így van ez folyók, tavak vagy tengerek esetén is. Általában, hogyan lehetne a szennyezést, a szennyeződést és a vízminőséget jellemezni?

S. L.: A válasz nem könnyű, és azt lépésenként kíséreltem megadni. Kémiailag tiszta vizet a természetben nem találunk (erre már korábban is utaltam), azt csak mesterséges úton (desztillálás vagy fordított ozmózis) lehet előállítani. Ahogyan már említettem, a természetes víz különös kémiai összetételű oldat, és egyúttal bonyolult keverék is, a vízi élővilág élettere. Azt is mondtuk, hogy helytől és időtől függően mindig tartalmaz oldott és szilárd, szerves és szervetlen, élő és holt anyagokat, ezek lehetnek természetes és mesterséges eredetűek. Eredetétől és összetételétől függően sok fajtáját ismerjük: csapadékvíz, felszíni víz, mélységi víz, tengervíz, karsztvíz, forrásvíz, hévíz, gyógyvíz, termálvíz, kemény és lágy víz stb.; a mindennapi életben is használt kifejezések. Szennyezésnek a természetes vizeket károsan befolyásoló, vízgyűjtőről emberi tevékenység eredményeként bejutó anyagokat tekintjük (időegység alatti értéke a terhelés vagy emisszió), amelyek a befogadók vízminőségének romlását idézik elő.

M. E.: De mi is a vízminőség?

S. L.: Az értelmezéshez érdemes a filozófiai alapokhoz fordulni: a minőség a „dolgok” lényegét jellemző tulajdonságok összessége, köznapi értelemben pedig az igény vagy a cél kielégítésének mértéke. Ennek tükrében a víz *lényegi tulajdonságait* a fontosabb szennyezőanyagok koncentrációival és az élővilág főbb ismérveivel jellemezzük, ezek összessége a vízminőség. Lehetőleg olyan indikátorokat választunk, amelyekre valamilyen (jó–rossz) skála állítható fel, és így az emberi használatok

(ivás, öntözés, fürdés stb.) és az élővilág igényeinek ismeretében a célok megfogalmazhatók. A *lényegi* tulajdonságok kiválasztása sokszor nehéz, nem mentes szubjektív elemektől, ezért azután a legtöbb esetben a vízminőség-szabályozás sajátja a bizonytalanságok jelenléte és a „puha” jelleg. A vízminősítés jelen módszerét az EU egységes vízstratégiája, az ún. *Víz Keretirányelv* határozza meg, ami az ökológiai állapotra helyezi a fő hangsúlyt.

S. L.: A terminológia ugye hasonló légszennyezések esetében is?

M. E.: A különbségek a részletekben jelentkeznek. A levegőminőség elnevezést elsősorban városok esetében használják, amikor a levegőnek az emberi egészségre gyakorolt hatását tanulmányozzák. Általánosabb a *légszennyeződés* kifejezés annak ellenére, hogy tulajdonképpen folyamatot jelöl. A pontosabb „légszennyezetség” ugyanis meglehetősen nehézkes. Mi is a légszennyeződés? Erre nem is olyan könnyű válaszolni. Gondoljunk csak arra, vajon légszennyeződés-e, ha a levegőbe vulkáni gázok vagy részecskék, illetve nagy mennyiségű tengeri só kerül. A probléma úgy oldható fel, ha légszennyezőnek csak az emberi tevékenység során keletkező anyagokat tekintjük. Még hozzátehetjük: szennyeződésről akkor beszélünk, ha a kibocsátott anyagok valamilyen szempontból (egészségügyi, savas ülepedés, ózonlyuk, éghajlatváltozás) káros hatást váltanak ki. Ehhez persze meg kell állapítanunk, hogy mekkora szennyeződési szintnél (koncentrációnál) jelentkeznek a káros hatások. Erre a célra a városokban a hatóságok egészségügyi határértékeket adnak meg (megengedhető maximális koncentráció), és a koncentrációkat ennek százalékában fejezik ki. A korrekt szabályozásnál azt is figyelembe vesszük, hogy adott koncentráció mennyi ideig figyelhető meg.

S. L.: Hasonló lehet a szabályozás baleseti szennyezésekre a víz esetében is.

M. E.: Akkor folytassuk is a vízszennyezés rejtjelmeivel.

S. L.: A természetes vizek élővilága igen változatos: például az édesvizekben több tízezer állat- és növényfaj található. Ezek közül a tápláléklánc alján található legkisebbek, a baktériumok, az algák (lebegő mikroszkopikus növények) stb. csupán néhány mikron (μm) nagyságúak (a vízmolekulánál alig nagyobb, oly sok bajt okozó vírusok nem élőlények, ezért nehéz felfedezni őket). Az alga lehet néhány 100 mikron nagyságú is: mérettartományuk két nagyságrendet, térfogatuk négy-öt nagyságrendet ölel fel. A vízi tápláléklánc legnagyobbjai, az édesvízi halak néhány méterese is lehetnek.

A biológiai produkció során az anyag – a szennyezésektől befolyásoltan – a termelés és a lebontás révén állandó körforgásban van. A körforgás során a különböző anyagok térben is áthelyeződnek, és kölcsönhatásba léphetnek az üledékkel, a talajjal és a légkörrrel. Az időben és térben változó fizikai, kémiai és biológiai folyamatok sokasága befolyásolja a vízminőség alakulását és az anyagok *biogeokémiai körforgását*.

A lejátszódó reakciók alapvetően függenek attól, hogy mekkora a víz tartózkodási ideje. Ahogy említettük, a tartózkodási idő a Földön néhány ezer év, amelyet a sarkvidéki jég, a gleccserek és az óceánok határoznak meg. Az édesvizeké ennél sokkal kisebb: a felszín alatti vizeké száz év, a tavaké év, a tározóké hónap, a folyóké pedig nap nagyságrendű (de például a felszín alatti vizek „tartózkodása” elérheti a tízezer évet is). Az üledék sokkal „lomhább”, mint a felette lévő víz: a felszín alatti vizekhez hasonlóan az akkumuláció jellemzi, és ezért a „vízgyűjtő történések” me-

móriájaként működik (gondoljunk a folyók deltáira). Hosszú ideig „emlékezik”, és adhatja le az évtizedek során túlzott mennyiségben felgyülemlett szennyezőanyagokat: sok „nem fenntarthatóan” használt (kírabolt) tó lassú vagy sikertelen rehabilitációjának ez az oka. Az élőlények elterjedését és viselkedését döntően befolyásolja a szaporodási és a tartózkodási idő viszonya: a baktériumok szaporodási ideje néhány óra (vagy kevesebb), az algaké néhány nap, míg a halaké legfeljebb néhány év. Hasonló megállapítás tehető a kémiai folyamatok relatív fontosságára is.

A szennyvíz fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai, fajszegény élővilága miatt számottevően eltér a természetes vizektől. Gyakorik benne a kórokozók. Ipari, háztartási és mezőgazdasági célokra „elhasznált” közeg, A különböző szerves és szervetlen szennyezők, és növényi tápanyagok nagy koncentrációban, „besűrűsödve” vannak jelen. A társadalom által használt bármely anyag előbb vagy utóbb kimutatható benne.

A természetes vizekbe jutó szennyvizek és szennyezések hatásai sokfélék lehetnek: elemek, anyagok és vegyületek túlzottan alacsony vagy magas koncentrációban, a kémiai és fizikai környezet módosulása, a biológiai körforgás és az ökoszisztéma torzulása, bizonyos élőlények eluralkodása és a biodiverzitás csökkenése, mérgezés, egészségkárosító hatások és így tovább (ezek gyakran egyszerre, egymást befolyásolva jelentkeznek). Mindezek gátolják, megdrágítják, vagy éppen megakadályozzák a vízhasználatokat, és súlyos, hosszabb távon jelentkező károkat okozhatnak. Jellemző példát jelentenek a mikroszennyezők és a Minamata-betegség.

M. E.: Mi is történt?

S. L.: Az ötvenes évek elején Japán egy kis falujában, Minamatában, sok lakos idegrend-

szeri elváltozásokat tapasztalt. A szerencsétlenebbeknél a gyenge szimptomákat erős reszketés, paralizis, esetenként halál követte. A vizsgálatok higanymérgezést mutattak ki. A Chisso vegyigyár éveken keresztül vezetett a magas higanytartalmú szennyezését (higany-szulfát formájában) a Minamata-öbölbe. A higany-szulfát a vízben rosszul oldódik, és a feltevés az volt, hogy az üledékben „örökre” eltemetődik. A vizsgálatok azonban kimutatták, hogy ez a vegyület még rosszabbul oldódó higany-szulfiddá redukálódott, amelyet az üledékben található baktériumok erősen toxikus metil-higany kationná alakítottak át. Utóbbi a vízben oldódva csak $\mu\text{g/l}$ koncentrációban volt jelen, de feldúsult a táplálékláncban: a halat és kagylót fogyasztó emberek szervezetébe veszélyesen sok mérgező anyag halmozódott fel. Több mint 3500-an betegedtek meg, és közel ötvenen haltak meg. Ezt követően vezették be a $\mu\text{g/l}$ koncentrációban is rendkívül veszélyes, ún. *mikroszennyezők* fogalmát és az Egészségügyi Világszervezet (WHO) elkészítette a veszélyes anyagok (nehézfémek, DDT, poliklórozott bifénilek – PCB, poliaromás szénhidrogének – PAH stb.) ún. „fekete” listáját. Ezek az anyagok, a tradicionális szennyezőkkel szemben nem (vagy csak nehezen) bomlanak a természetben, ezért kibocsátásukat igyekeznek tiltani.

Ma már nanoszennyezőkről is beszélünk, ide tartoznak a hormonháztartást befolyásoló szteroidok, gyógyszermaradványok, kozmetikumok és társaik, amelyek ng/l mennyiségben okozhatnak problémát. Ismereteink még eléggé korlátozottak, de bizonyosnak tűnik, hogy a szabályozás klasszikus eszközei aligha fognak sikerrel vezetni.

A vizekbe jutó anyagokat célszerű két fő csoportra osztani, úgymint természetazonos és természetidegen anyagokra. Előbbinek két

alcsoportja van: az elsőre az élőlényeknek egyenesen szükségük van (például foszfor és nitrogén). Egy határon túl azután persze már nem mindegyiknek „örülnek” (például Cu, Zn, Fe), vagy nem mindenki „örül” (például a halak számára a sok ammóniumion mérgező). A másodikat az élőlények ismerik, de sohasem „örülnek” neki (pl. a szteroidok).

A másik főcsoport a már hivatkozott szintetikus vegyületek (például Hg, Pb, azok a fémek, amelyeket a szervezet nonspecifikus utakon próbál semlegesíteni, és ha ez nem sikerül, halált okoznak). Az utóbbiak szabályozására használt toxikus határértékek „mesterséges” számok, amelyeket gondos állatkísérletekkel határoznak meg. Biztonsági tényezőkkel is beszorozzák, valójában azonban nemigen tudjuk, mi a hosszú távú hatás, akár az egyes ember életét, akár a genetikai állományunkat tekintve. Erről nem szívesen beszélünk. Legalább az jó, hogy van a „biztonságot” valamilyen mértékben szolgáló határérték.

A vízminőséget befolyásoló hatások változatossága követi a vízben lévő anyagok és élőlények sokszínűségét. Nagyjából felismerésük időrendi sorrendjében (a 19. század második felétől kezdve) a következők sorolhatók:

- járványokat és egyéb megbetegedéseket előidéző patogén baktériumok és paraziták,
- az oxigénháztartást könnyen felborító szerves anyagok (szén- és nitrogénvegyületek lebontása révén),
- felmelegedett hűtővizek hőszennyezése,
- eutrofizálódást kiváltó tápanyagok,
- szervesetlen és szerves toxikus mikro- és nanoszennyezők.

Ezekhez adhatjuk

- a felszín alatti vizek elszennyeződését (nitrát, vas, mangán, arzén, a hulladéklerakókból származó különböző szennyezők),

- a savasodást, és
- az éghajlatváltozást, valamint a globalizáció szerteágazó következményeit.

A felsorolás alapján több fontos trendet figyelhetünk meg. Először is, nő a problémák léptéke a lokálistól a regionálison át a globális irányába. Másodsorban, az üledék, a talaj és a talajvíz elszennyeződése miatt egyre fontosabbá válik a növekvő késleltetések szerepe a beavatkozások és a hatások jelentkezése között. Harmadsorban, egyre több problémát kell együttesen, egymással kölcsönhatásban kezelni, és végül, folyamatosan szembesülünk új, meglepő problémákkal, amelyeket többnyire az egyre alacsonyabb koncentrációk jellemeznek.

De hogyan is néz ki egy hasonló osztályozás a légszennyezés esetére? Melyek az élővilágra és az emberre gyakorolt hatások? Melyek a szabályozás eszközei? Az alkalmazott technológiák főbb fajtái?

M. E.: A kedvezőtlen hatások alapján a légszennyeződést hasonló módon osztjuk fel; megkülönböztetünk lokális, regionális és globális légszennyeződést. A városokra és ipartelepekre jellemző lokális légszennyeződést a forrásokból közvetlenül kikerülő szennyezőanyagok okozzák. Tipikusan ilyen az erőművekből, és általában a tüzelőanyagok felhasználásakor kibocsátott kén-dioxid. Ebbe a kategóriába tartozik még a közlekedésből származó szén-monoxid és nitrogén-monoxid, valamint az elemi szén (korom) és a különböző szerves gázok csoportja. Ezek az anyagok a levegőben sokszor még veszélyesebb, másodlagos vegyületekké oxidálódnak, így ózonná, különböző savakká, illetve aeroszol részecskékké (például kénsav, szerves anyagok). A lokális légszennyezőket a levegővel együtt belélegezzük, így szervezetünkben különböző, például légúti problémákat okozhatnak.

Ugyanakkor veszélyt jelentenek a növényzetre, a különböző építményekre, és a részecskék lecsökkenését lassítja. Ha a városi (ipartelepi) légszennyeződés jelentős, akkor légszennyeződési epizódokról beszélünk.

A 10–1000 km léptékű regionális légszennyeződést a lokális légszennyeződés „táplálja”. Különösen fontosak közülük a savas anyagok, amelyek elsősorban a csapadékvízben oldva a szárazföldi és vízi ökoszisztémákba kerülnek. Végül a globális légszennyeződést elsősorban a hosszú, többéves tartózkodási idővel rendelkező üvegházhatású gázok hozzák létre, amelyek éghajlatváltozást okozhatnak. A légszennyeződés elleni védekezés természetesen a kibocsátások csökkentésén alapul. Ipartelepeken és erőművekben ez történhet légtisztító berendezések alkalmazása útján, de a technológia célszerű megválasztása szintén eredményes lehet. Így az erőművekben jobb hatásfokú, speciális kazánokat alkalmazhatunk. A közlekedési légszennyeződés mérséklése történhet a belső égésű motorok teljesítményének fokozásával, illetve a szennyezőket a kipufogó gázokból kivonó katalizátorok segítségével. A technika fejlődése ellenére azonban nagyon nehéz az üvegházhatású szén-dioxid kibocsátásának csökkentése, ezért merül fel az alternatív erőforrások (megújuló erőforrások, bioenergia stb.) felhasználása. A kérdést tovább bonyolítja, hogy a globális légszennyeződést csak komoly nemzetközi összefogással lehet mérsékelni.

S. L.: Az elmondottakból egy alapvető különbség adódik a légszennyezés és a vízszennyezés között: előbbi térben szinte folyamatosan játszódik le, míg utóbbi részben vagy egészben elkülönült terekben (például tavak, tározók, felszín alatti vízbázisok), amelyeket folyók, csatornák, illetve maga a hidrológiai

körforgás kapcsol össze (a légkör bevonásával). Ezért azután a „globális” szó értelmezése a vízre messze nem olyan egyértelmű, mint a légkörre, és az igazából csak a hidrológiai körforgásra vonatkozhat. De lépünk tovább. Sokat hallunk manapság a globális felmelegedésről. De mi erről a kérdésről a vélemény a tudomány mai állása szerint?

A globális felmelegedésről

M. E.: A közvetett és közvetlen mérések szerint az ipari forradalom óta az üvegházhatású gázok légköri mennyisége folyamatosan emelkedik. A szén-dioxid koncentrációja az ipari forradalom előtt 280 ppm volt (1 ppm egység azt jelenti, hogy normál körülmények között 1 m³ levegőben 1 cm³ a szén-dioxid térfogata). A jelenlegi érték meghaladja a 370 ppm-et. Minden információ arra utal, hogy ilyen magas koncentráció az utóbbi egymillió évben sohasem fordult elő. Elfogadott nézet, hogy a trendet a trópusi erdők irtása, illetve, nagyobb mértékben, a fosszilis tüzelőanyagok felhasználása okozza. Az előrejelzések szerint a 21. században ez az emelkedés folytatódik. A másik fontos üvegházhatású gáz, a metán koncentrációja a 16. század óta kétszeresére emelkedett, és napjainkban eléri az 1,7 ppm értéket. Az emelkedés minden bizonnyal a rizsföldek területének, illetve a háziállatok számának növekedésével függ össze. Valamelyest nőtt a szintén üvegházhatású dinitrogén-oxid légköri mennyisége is, amelynek a koncentrációja ma már a 0,4 ppm-es értéket közelíti. Ez a műtrágyázás rovására írható, amely befolyásolja a talajban végbemenő mikrobiológiai folyamatokat.

A megfigyelések szerint a 19. század vége óta a Föld átlagos hőmérséklete is lényegében emelkedik. A tudomány nagy kérdése, hogy ez mennyire függ össze az emberi tevékenység

üvegházhatás-erősítő hatásával. A kérdésre azért nehéz válaszolni, mivel az éghajlat nagyon komplex elemegyüttes, számos tényezőtől függ, amelyek között bonyolult kölcsönhatások, visszacsatolási folyamatok zajlanak. Az emberi tevékenység és az éghajlat összefüggését a tudomány bonyolult modellekkel igyekszik meghatározni. Az eredmények alapján nagyon valószínű, hogy a hőmérsékletemelkedés az ember energiatermelésének következménye. Természetesen a modellekben számos bizonytalan tényező van. Ezek közül kettő a vízhez, pontosabban a víz körforgalmához, illetve a tengeráramlásokhoz kapcsolódik. Magasabb hőmérsékleten az óceánok hatékonyabban párolognak. Tekintve, hogy a vízgőz maga is üvegházhatású gáz, az intenzívebb párolgás a fölmelegedést tovább fokozza (pozitív visszacsatolás). Ha azonban a vízgőz kondenzálódik, a keletkező felhők hűtik az alattuk lévő légrétegeket, mivel visszaverik a Napból érkező energiát (negatív visszacsatolás). További nem eléggé tisztázott kérdés az éghajlat melegedésének és az óceánok áramlásának kapcsolata. Sokan azzal érvelnek, hogy a felmelegedés e kapcsolat hatására hűlésbe megy át, például azért, mert megszűnik a Golf-áramlás.

S. L.: Hogyan is van ez?

M. E.: Az északkeleti irányban hőt szállító áramlás vize ugyanis lassan párolog és hűl. Ezáltal sókoncentrációja növekszik, meghaladja a környezetét, és az Atlanti-óceán északi részén a töményebb víz a mélybe süllyed. Ezt a hatást fokozza a viszonylag kevés csapadék, amely hígíthatná a vizet. Ha tehát a globális felmelegedés miatt az Atlanti-óceán vizének hőmérséklete emelkedne, akkor megszűnhetne a leáramlás, azaz végső soron a vízáramlás. Ez viszont a környező szárazföldek éghajlatát jelentősen hűtené. Így nem

kizárt, hogy a melegedés végső soron komoly lehűlést váltana ki.

A tudomány sajnos nem tud arra választ adni, hogy ez pontosan mikor következne be. Az egyik legnagyobb hiányosság ezen a területen az, hogy a lassú változásokat leíró éghajlati modellek nem képesek a hirtelen változásokat előre jelezni.

Általában a globális felmelegedést leíró modellek sajnos több bizonytalanságot is tartalmaznak. Az egyik, talán legfontosabb problémát, mint említettük, az intenzívebb párolgás miatt a levegőbe kerülő víz sorsa jelenti.

A viták ellenére ma már a tudományos közösség egyetért abban, hogy a 19. század vége óta megfigyelt melegedést nagy valószínűséggel az emberi tevékenység okozza. Csak remélni lehet, hogy olyan nemzetközi egyezmények születnek, amelyek meggátolják, vagy legalábbis mérséklék a nem kívánt éghajlatváltozást.

S. L.: Az éghajlatváltozás természetesen a víz körforgalmát is befolyásolja, hozzájárul a készletek átrendeződéséhez és a szélsőségek felerősödéséhez. A rendelkezésre álló becslések szerint a jövő vízhiányos területeinek kialakulásában a népesedés hozzájárulása 70–80%, míg az éghajlatváltozása 20–30%.

A savasodásról

M. E.: Nagyvárosokban és ipartelek környékén a forrásokból kikerülő elsődleges szennyezőanyagok az oxigéntartalmú levegőben különböző sebességgel oxidálódnak. Mint már említettem, az energiatermelés legfontosabb elsődleges szennyezőanyaga (természetesen a globális hatású szén-dioxid mellett) a kén-dioxid, kisebb mértékben a nitrogén-monoxid, mivel a fosszilis tüzelőanyagok mindig tartalmaznak szerves kén- és

nitrogénvegyületeket, amelyek a tüzelésnél oxidokká alakulnak át. Másrészt magas hőmérsékleten a levegő nitrogénje és oxigénje nitrogén-monoxidot hoz létre. Ez történik a gépkocsik motorjaiban is. Másrészt a járművek működésük közben, a tökéletlen égés miatt, szén-monoxidot (és szén-dioxidot) és különböző szerves vegyületeket juttatnak a levegőbe. Különösen jelentős az aeroszol formájú szerves anyagok és az elemi szén kibocsátása dízelüzemű gépkocsik esetén.

Az elsődleges szennyezőanyagokból a légkörben másodlagos szennyezőanyagok keletkeznek, így a kén-dioxidból kénsav, a nitrogén-oxidokból salétromsav, a szerves vegyületekből szerves savak. A másodlagos szennyezőanyagok elsősorban (de nem kizárólag) regionális léptékben fejtik ki hatásukat, mivel kialakulásukhoz a forrásoktól távolodó levegőben időre van szükség. Tekintve, hogy jelentős mértékben savakból állnak, a felszínre ülepedve alkotják a savas esőnek nevezett jelenséget. Az ülepedés történhet csapadékmentes időben (száraz ülepedés), amikor a szállítást a felszín irányába a rendezetlen, turbulens mozgások végzik. Ha a nyomanyagokat a csapadékvíz juttatja a felszínre, akkor nedves ülepedésről beszélünk. A savak, elsősorban a legnagyobb koncentrációban előforduló kénsav, az ökoszisztémák működésében számos problémát okoznak. Hatásuk értelem szerűen a nem műtrágyázott területeken jelentkezik, mivel a műtrágyázott földeken a savasodást maguk a műtrágyák váltják ki. Így erdőben a savas ülepedés egyrészt kivonja a levelekből a tápanyagokat (például magnéziumot), másrészt a talajban elősegíti a savasodást, ami egyes fémeket vízben oldódó, a hajszálgökökre és a gyökerekkel együtt élő gombákra mérgező formára változtatja. Ily módon gátolja a víz és a tápanyagok felvéte-

lét. A légköri savas ülepedés nyilvánvalóan a tavak és víztározók életfolyamatait is befolyásolja. Általában, milyen hatással van a légköri ülepedés a felszíni vizekre?

S. L.: Először talán érdemes az elsődleges és másodlagos szennyezők fogalmára visszautalni. Ezt a vízminőségi gyakorlat alig használja. Például a nitrogén szerves, ammónium vagy nitrát nitrogénként kerülhet a vízbe. Nemkívánatos hatását sokféleképpen kifejtheti: a szerves N és ammónium N oxidálása (nitrifikáció) oxigénproblémákat okozhat, az ammóniumion toxikus hatású (különösen, ha oxigénhiánnyal együtt, szinergikusan lép fel), a magas nitráttartalmú víz fulladásos halált idézhet elő, különösen csecsemőknél, a magas összes N-szint pedig hozzájárul a vizek eutrofizálódásához. Mindezek ellenére egyik N-formát sem emeljük ki: természetes, hogy a vízben és a víz, a levegő és a talaj határfelületein keresztül az N és az anyagok váltakozó formában és váltakozó hatással állandó körforgásban vannak, ami az N esetében magába foglalja a nitrifikációt, az ammónifikációt, a denitrifikációt, az N-kötést és egyebet.

A kis kitérő után térjünk vissza a feltett kérdésre, ami a légköri ülepedésre és a felszíni vizekre vonatkozott. Ahogyan láttuk, a légkör és a víz közötti kölcsönhatás meghatározó eleme a hidrológiai körforgásnak. De szintén fontos része az elemek biogeokémiai körforgásának és a szennyezések vándorlásának is. Az egyik legismertebb, közvetlen hatás a savasodás, amiről ugyan már a 19. század második felében írtak, de igazából csak a 20. század hatvanas éveiben vált széles körben elterjedt problémává. Skandináv tudósok kimutatták, hogy a halak eltűnését tavaikban a több mint ezer kilométerről, Nagy-Britanniából származó savas ülepedés váltotta ki.

Hasonló esetek fordultak elő az USA és Kanada között, és máshol is. Igazából ez volt az első alkalom, hogy felismertük a határokon túlnyúló, nemzetközi szennyezés jelentőségét, ami azután például az EU keretei között hatékony emissziómonitorozási és -szabályozási stratégiához vezetett.

A száraz és nedves savas ülepedés hatása a hatvanas-hetvenes években sokfelé drámai volt, különösen hegyvidéki kis vízgyűjtővel rendelkező tavak esetében, ahol a kőzetek és a talaj kiegyenlítő pufferkapacitása nem tudott érvényesülni. Sok ilyen jellegű to savas-sága Kanadában akár a kétszázszorosára nőtt. A következmények szerteágazók. A savas eső táp- és toxikus fémeket (például Al³⁺) mos ki a talajból és az üledékből. Különösen nagy a hatása a lökészerű tavaszi hóolvadásnak, amely által előidézett terheléshez a vegetációs időszak kezdetén a normális körülmények között reprodukáló vízi élővilágnak nincsen ideje alkalmazkodni.

Erősen savas környezetet a vízi élővilág nem képes tolerálni. A halakon a hatások kétfélek. A közvetlen hatás abban jelentkezik, hogy azok nem képesek az élethez szükséges oxigént, sót, azon belül a lényeges ionokat, továbbá a tápelemeket felvenni. A közvetett hatást a visszaoldódott toxikus nehézfémek okozzák. A pH csökkenésével növekvő mértékben károsodik az élővilág. pH 5,6 körül az algaszaporodás gátlódik, és egyes fajok kipusztulnak. Még alacsonyabb pH esetén a nagyobb halak is eltűnnek. A pH 5 értéket már csak kevés hal éli túl, deformálódnak, és képtelenek szaporodni. A nagy kalcium- és magnéziumkarbonát-tartalmú talajok és vizek magas pufferkapacitása – ami szerencsére jellemző Magyarországra is – védi a vizeket a felsorolt bajoktól. Kanadában és Svédországban ezzel szemben sok tóvízhez a semle-

gesítés céljából mésztejet adagolnak, ami drága, és csupán időleges tüneti kezelést jelent a pH szabályozására.

A légköri ülepedés más elemek körforgását is befolyásolja. Sok tó esetében a száraz és a nedves ülepedés hozzájárul a tavak tápanyagterheléséhez. A Balaton – és sok más tó – esetében például az összes P és N terhelés mintegy 10–15%, illetve 20–30%-a ilyen eredetű. Valójában a légköri ülepedés nem pontszerű terhelést jelent, ami ugyan látszólag nem nagy, azonban nem, vagy aligha szabályozható.

A légkör és a víz közötti kölcsönhatás sokkal szerteágazóbb, mint amit a légköri ülepedés kifejez. A teljesség igénye nélkül említem a szerves szén heterotróf baktériumok által történő lebontását a természetben vagy a szennyvíztisztító telepeken, aminek egyik végterméke a légkör szén-dioxid tartalmát növelő üvegházhatású emisszió. A nitrátosodás szabályozásának és a denitrifikációnak az az alapja, hogy bizonyos körülmények között (kevés oxigén) a nitrát szolgáltatja a szükséges oxigént. Eredményként a nitrogén gáz formájában hagyja el a rendszert. Ezzel ellentétes folyamat, amikor például cianobaktériumok a légkörből nitrogént kötnek meg.

Látnunk kell tehát, hogy vizsgálatainkhoz még akkor is, ha csak a vízre vagyunk kíváncsiak, a bioszféra egészére szükséges anyagmérleget felállítanunk. Amikor a vizek „öntisztulásáról” beszélünk, és ezalatt a vízben mért anyagáram és/vagy koncentráció csökkenését értjük, tudjuk, hogy valójában a „hiányzó” anyag mennyisége a „víz”-rendszerből a háttérterületek valamelyikén távozik: az üledékbe ülepedés és adszorpció révén, vagy a légkörbe gáz formájában.

S. L.: De hogyan is állunk a savasodás európai léptékű monitorozásával és szabályozásával? Beszélhetünk-e sikertörténetről?

M. E.: A sikertörténet szó talán kicsit erős. Ugyanakkor el kell ismerni, hogy a savas ülepedés elleni küzdelem Európában és Észak-Amerikában jelentős sikereket hozott. Ezt illusztrálja, hogy Európában a savasodást meghatározó kén-dioxid teljes kibocsátása 1980-ban kénben kifejezve kerekén 28 millió tonna volt. 2000-re ez az érték a felére csökkent. Magyarországon még ennél is jelentősebb volt a csökkenés. Ugyanakkor az érvényes nemzetközi egyezmény csak 30%-os mérséklést irányzott elő. A savasodáshoz szintén hozzájáruló nitrogén-oxidok kibocsátását, az idevágó nemzetközi egyezménynek megfelelően, sikerült gyakorlatilag állandó szinten tartani annak ellenére, hogy a gépkocsik száma az említett időszakban jelentősen növekedett. Ez a gépkocsik hatékonyságának növekedését, illetve a katalizátorok alkalmazásának hatását tükrözi.

A kibocsátások mértékének csökkenését követi a csapadékvíz pH-jának lassú emelkedése, mint azt, külföldi megfigyelések mellett, a magyar vizsgálatok is alátámasztják.

Az ózonnól és más anyagokról

S. L.: Köztudomású, hogy az ózon az egyik legfontosabb légköri nyomanyag. Az ózon elsősorban a magasabb légkörben keletkezik. De keletkezik-e ózon a talajközeli, szennyezett levegőben?

M. E.: A lokális és regionális légszennyeződés legfontosabb anyaga az ózon. Ózon, mint már szó volt róla, elsősorban a légkör magasabb rétegeiben, az ún. sztratoszférában keletkezik. A Napból jövő ultraibolya sugárzás hatására ugyanis a molekuláris oxigén elbomlik, és a keletkező oxigénatomok molekuláris oxigénnel háromatomos oxigénmódosulatot, ózont képeznek. Az ózon további ultraibolya sugárzást nyel el, így a felszínközeli

levegőbe, a troposzférába 0,3 mikrométernél kisebb hullámhosszú, nagyenergiájú sugárzás nem jut el (nagy szerencsénkre). Az ultraibolya napsugarak elnyelése miatt a levegő felmelegszik, és mintegy 12–50 km-es légrétegben létrejön a sztratoszféra, amelyben a hőmérséklet gyengén növekszik a magassággal. Ez azért meglepő, mert a troposzférának nevezett alsó légkör a hőt a talajból kapja, ezért a magassággal a hőmérséklet csökken. Előfordulhat, hogy a troposzféra egy-egy vékonyabb rétegében a hőmérséklet a magassággal növekszik, ilyenkor inverzióról beszélünk. Az inverzióknak a légszennyező anyagok felhalmozásában nagy szerepük van, mint erre a későbbiekben még visszatérünk.

A sztratoszférában az ózon keletkezése meglehetősen egyszerű. Ugyanakkor a kémiai kivonása meglehetősen bonyolult folyamat, mivel benne nem csak az oxigén módosulatai vesznek részt, mint azt kezdetben gondolták. Meghatározó szerepet kapnak a troposzférából érkező nyomanyagok, így elsősorban a dinitrogén-oxid, amely a sztratoszférában nitrogén-oxidokká (így nitrogén-monoxidá) alakul át. Az emberi tevékenység növeli az ózonkivonó nyomanyagok koncentrációját. Erre közismert példát jelent a freonok (halogénezett szénhidrogének) csoportja, amelyek az erős ultraibolya sugárzás hatására a sztratoszférában elbomlanak, és klórt hoznak létre. A freonok (pontosabban a származékaik) ózonelbontó hatása speciális meteorológiai feltételek mellett igen jelentős lehet. Erre a tavaszi antarktisi *ózonlyuk* szolgáltat példát, amikor a 20–25 km-es rétegben az ózon csaknem teljesen elbomlik. Szerencsére a freonok gyártását és felhasználását a nemzetközi egyezmények jelentősen visszaszorították.

A sztratoszférában az oxigénmolekulák az ultraibolya sugárzás hatására bomlanak el.

Ilyen sugarak, mint említettem a troposzférát nem érik el. Hogyan keletkeznek akkor a troposzférában a szennyezett levegőre annyira jellemző ózonmolekulák? A folyamat első lépése, hogy a forrásokból (például nagyvárosokban járművekből) származó nitrogén-monoxid nitrogén-dioxidá oxidálódik. Ennek előfeltétele, hogy a levegőben megfelelő szénhidrogének legyenek. Ez a feltétel nagy gépkocsiforgalmú környezetben mindig teljesül. Ilyenkor olyan két oxigént tartalmazó szerves gyökök képződnek, amelyek egyik oxigénjüket a nitrogén-monoxidnak gyorsan leadják. A kipufogógázokkal szintén felszabaduló szén-monoxid viszont oxigén leadására kész szerves gyököket hoz létre. A nitrogén-monoxid a felszín közeli levegőt még éppen elérő 0,4 mikrométer hullámhosszú sugárzás hatására fotokémiailag (a napsugárzás hatására) nitrogén-monoxidra és oxigénatomokra bomlik el, ami az ózonképződés elengedhetetlen feltétele.

A kémiai mechanizmus során tehát ózon képződik. A folyamat különösen azért érdekes, mivel az elindításához is ózonra van szükség. Az ózon bomlásából származó atomos oxigén ugyanis a vízgőzzel hidroxil szabad gyököket képez. A szabad gyökök igen reakcióképesek, mivel a külső elektronpályájukon páratlan az elektronok száma. Ezek a gyökök reakcióba lépnek a szénhidrogénekkel, ami a reakciólánc első lépése. Általában a hidroxilgyökök kémiai reakciókkal számos anyagot vonnak ki a levegőből, így metánt és szén-monoxidot is. Ezért a levegő kéményseprőinek is nevezik őket.

Szemben a magas légköri ózonnal (jó ózon) a talajközeli ózon nagyobb koncentrációban veszélyes anyag (rossz ózon). Közvetlenül érintkezünk vele. Izgatja az emberek nyálkahártyáját, károsan hat a növényekre, és

számos anyagot (például gumicsövek) elroncsol. Van-e valamilyen szerepe az ózonnak a vízburokban?

S. L.: A kérdés meglepő, a válasz pedig látszólag egyszerű: az ózonkoncentráció a felszíni vizekben annyira alacsony, hogy azt nem is mérik. Mi is a jelenség oka? Három tényezőt említek. Az ózon nagyméretű apoláros molekula, ennek következtében vízben csak nehezen oldódik. Telítési koncentrációját a Henry-féle törvény határozza meg, azonban értéke 20 °C-on mindössze 0,24 mg/l, azaz az oxigénre vonatkozó értéknek csupán mintegy negyvenede. Ez az első ok. A második az, hogy a felszíni vizek tényleges ózonkoncentrációját a légkör talajközeli (rossz) ózonkínálata határozza meg, ami a nagyobb városok közvetlen környezetét leszámítva szerencsére vékonyka. A harmadik ok egyszerűen az, hogy az ózon a vízben roppant instabil: mintegy tíz lépésből álló láncreakció során gyökökre esik szét, aminek indító lépéseként az ózon a hidroxidionnal reagál. A folyamat kémiaija majdnem annyira bonyolult, mint a légkörben lejátszódóé. Nagymértékben függ a hőmérséklettől, a pH-tól és a természetes és/vagy szennyezett vizekben található szerves és szervesetlen anyagoktól. Ezek az anyagok a reakció megindítójaként, gyorsítójaként vagy gátlójaként működhetnek. Például a hidrogénperoxid és a humin anyagok gerjesztő hatásúak (az UV sugárzás szintén), míg a karbonát- és bikarbonátionok megszakítják a láncreakciót.

Ugyan az ózon az elhanyagolható koncentrációja miatt a természetes vizekben különösebb szerepet nem játszik (reaktív és toxikus volta miatt az élővilág szempontjából nagy baj lenne, ha nem így lenne), a víztisztítás aligha lenne elképzelhető nélküle. Pontosan a fokozott reakcióképességét kihasznál-

va, alkalmazzák fertőtlenítésre, szerves anyagok és peszticidok lebontására, vas, mangán és szulfidok oxidálására vagy éppen a vizek színtelen, szagtalan és íztelen). Ellentétben a természettel, jól szabályozott folyamatokat valósítanak meg, hiszen alapvetően ez határozza meg, hogy az ózon a kezelendő vegyületekkel közvetlenül, molekuláris formában vagy a láncreakció tudatosan kiszemelt lépésében keletkezett gyökök révén, közvetlenül lép-e reakcióba. A célzott fizikai és kémiai feltételek megvalósítása az összes víz- és szennyvíztisztításban alkalmazott technológia fontos sajátossága.

Az ózonnal történő hatékony fertőtlenítés a hetvenes években kezdett elterjedni, amikor meglepődve jöttek rá arra, hogy a „megbízható”, olcsó és széles körben használt klórozás egészségre káros melléktermékeket is eredményezhet. Későbbi felismerés, hogy bizonyos körülmények között a drágább és energiaigényes ózonkezelés is kedvezőtlen hatással bírhat (más esetekben azonban éppen az ózon kedvező gátló hatása érvényesülhet). Jó tehát óvatosnak lenni: az ún. nyers víz összetételének ismeretében a megfelelő technológia kiválasztása mindig komoly szakmai tudást igényel.

M. E.: A légszennyező anyagok kémiai folyamatainak fontos csoportját képezik azok a reakciók, amelyek kondenzációra képes gőzöket hoznak létre. Ily módon az emberi tevékenység a légköri aeroszolt is alapvetően befolyásolja. Növeli a szulfát (kénsav és ammónium-szulfát) és nitrát (salétromsav, ammónium-nitrát), valamint a széntartalmú (szerves és elemi szén) részecskék koncentrációját. A fűtésen és közlekedésen kívül – elsősorban trópusi vidékeken – a kiirtott bio-

massza (fák, bokrok) eltüzelése szintén hozzájárul a széntartalmú részecskék mennyiségének növekedéséhez. Ebből következik, hogy az ember az aeroszol részecskék számának megváltoztatásával közvetlenül (a napsugárzás gyengítése), vagy közvetve (a felhőtakaró kiterjedésének növelése) hozzájárul az éghajlat módosításához. Rövid tartózkodási idejük (mintegy 5–10 nap) miatt az aeroszol részecskék hűtő hatása elsősorban regionális léptékben jelentkezik, szemben az ember okozta üvegházhatással. Másrészt az aeroszol fázisú szennyeződés a látótávolság csökkenéséhez vezet, ami nemcsak a városi közlekedést nehezíti, hanem regionális léptékben mérsékli egy adott táj turisztikai értékét is.

A részecske formájú szennyeződések nagyon fontosak az emberi egészség szempontjából is. Különösen, ha figyelembe vesszük, hogy az emberi tevékenység (kohászat, energiatermelés, közlekedés) a levegőbe különböző fémeket (például ólom, kadmium, nikkel, vanádium) is juttat, amelyek belekeverve kis koncentrációban is komoly károsodást okozhatnak. A fémtartalmú kicsiny részecskék a légkörben viszonylag messzire eljutnak, és fokozzák adott régió fölött a nedves ülepedés környezeti veszélyeit.

Az utóbbi évek kutatásainak egyik fontos eredménye annak kimutatása, hogy az aeroszol hatását a szerves anyagok jelentős mértékben meghatározzák. Mi a szerepük a szerves anyagoknak a víz szennyeződésében, és hogyan befolyásolja a vízszennyeződés a különböző vízi ökoszisztémák tápanyagellátását?

A szerves- és tápanyagokról

S. L.: A szerves anyagok okozta szennyezés a vízminőség-szabályozás bölcsője. A kiindulópontot a civilizáció egyik legjelentősebb innovációja, az angol WC jelentette, ami a 19.

század második felében a megfelelő kapacitású csatornák kiépítésével együtt biztosította azt, hogy a háztartási szennyezéseket és a drámai járványokat (kolera, tífusz stb.) okozó kórokozókat az ivóvíztől elválasztva távolítsuk el, azaz a vizet szállítóközegként használjuk, miközben azt tudatosan elszennyezzük. Az árnyoldal a felszíni vizek megnövekedett szervesanyag-terhelése: a Temze, az Ohio és számos egyéb folyó vált szennyvízcsatornává, amelyet a lebontó baktériumok tevékenysége következtében oxigénhiányos állapot, halpusztulás, elviselhetetlen bűz és az élővilág torzulása jellemez.

Némi időt igényelt a felismerés, hogy a halpusztulás oka a tisztátalan szennyvizek bevezetése a vizekbe. A „fejlesztési feladat” a megbízható szennyvíztisztítási technológiák megteremtése volt. A századfordulóra megszületett a biológiai és a kémiai tisztítás. Az ún. eleveniszapos eljárás lényege, hogy a műtárgyakban – a természetes folyamatból kiindulva – nagy mennyiségben szaporítunk el szervesanyagbontó és -nitrifikáló baktériumokat, miközben mesterségesen oxigént viszünk be a rendszerbe. A végeredmény kettős: a légkörbe távozó, üvegházhatású szén-dioxid és a természetbarát iszap (amennyiben azt az ipari előtisztítás hiánya nem gátolja meg). Az iszap sorsa kulcskérdés: okos és fenntartható megoldás a mezőgazdasági elhelyezés, a biogáz előállítás; a másik végletet pedig a hulladéklerakó vagy a visszavezetés jelenti a folyóba. A kémiai kezelés lényege kicsapatás és ülepítés, ami a kezdeti időkben kezelhetetlenül sok iszapot eredményezett. Ezért először túlnyomóan a biológiai eljárások terjedtek el.

A húszas évekre a szervesanyag-lebontás jelensége viszonylag jól feltártta vált. H. W. Streeter és Earle B. Phelps 1924-ben publikálta a jelenség korszakos matematikai leírását,

ami a vízminőségi modellezés megalapozó, úttörő lépésének tekinthető.

Mire az oxigénháztartási gondokat megoldottuk, „bezöldültek” a tavak. A baj neve eutrofizálódás, a nem fenntartható fejlődés következménye. Nem csupán esztétikai probléma, hanem ökológiai is, számos veszélyforrással, mint a toxinképző kéalgák megjelenése. A túlzott tápanyag-feldúsulás jelenségét már az 1910-es években ismerték. Később megállapították, hogy a szabályozás szempontjából fontos, ún. limitáló szerepet a foszfor játssza. Ennek ellenére a szennyvíztisztítással foglalkozók évtizedeken keresztül csak a szerves szén eltávolítására és a nitrifikációra összpontosítottak, anélkül, hogy a P felkeltette volna a figyelmüket.

A történet azonban folytatódik. Ma szinte az összes nagy európai folyó az eutrofizálódás jeleit mutatja. Ettől szenvednek a beltengerek, a Balti- és a Fekete-tenger is. Két nehézséggel állunk szemben: (a) a terhelések nagyobbik hányada mezőgazdasági nem pontszerű eredetű és (b) a vizsgálatok szerint az édesvízi tavakkal szemben nem a P az algaszaporodást korlátozó tényező, hanem az N vagy a kettő együtt. Egyértelmű az igény az N eltávolítására is a szennyvizekből. A megoldást a biológiai denitrifikációban találják meg, amelyet a többi folyamattal párosítanak. A beltengerek megóvása és a sikeres technológiai fejlesztések vezetnek az EU új települési szennyvíztisztítási irányelvéhez, amely az ún. érzékeny térségekben, a nagy városokra előírja a C, P és N együttes eltávolítását. A tápanyag-eltávolítás, a költségek és a helyigény csökkentése számos új kihívást jelentett, amelyre a tudományos-műszaki fejlesztés sokrétű választ adott. A korábban egyszerű, mérnöki „ökol-szabályok” alapján tervezett eleveniszapos szennyvíztisztító telepeken lejátszódó folya-

matok biotechnológiai (mikrobiológiai, biokémiai és ökológiai) kutatások alapján ma már sokkal jobban feltártak. A C-, N- és P-eltávolítás érdekében tudatosan hoznak létre az eltérő tulajdonságú baktériumok elszaporodását célzottan biztosító tereket (amelyeket az oxigén- és a nitrátellátottság mértékével jellemezhetünk), a helykímélés céljából gyakran ugyanabban a bioreaktorban. Bevezetik a szennyvíz eddig gyűjtőparaméterekkel jellemzett alkotórészeinek részletesebb frakcionálását, a különböző léptékű reaktorkísérleteket és az eleveniszapos folyamatok reaktorkinetikai modellezését. Matematikai modellezés révén vizsgálják a befogadók vízminőségére gyakorolt hatásokat is, újabban különös tekintettel a költséghatékony integrált stratégiák kialakítására. A biológiai eljárásokat egyre gyakrabban párosítják kémiai módszerekkel a hagyományos P-eltávolítás mellett, a kapacitás növelése, a biológiai tisztítási lépés tehermentesítése, a nitrifikáció hatékonyságának növelése és számos egyéb ok miatt. Anyagtudományi és kolloidkémiai kutatások alapján nagy hangsúlyt fektetnek a visszafogott adagolást lehetővé tevő, optimális vegyszer-kombináció kifejlesztésére.

Néhány érdekesség

M. E.: Korábban említetted a víz sűrűségi anomáliáját. Mi ez kissé részletesebben?

S. L.: A víz az egyetlen, unikális folyadék, amelynek a sűrűsége a hőmérséklet függvényében 4 °C-nál maximummal rendelkezik. A következmények alapvetően meghatározzák a mély tavak hőrétegzettségét és életét. Mi is történik? A mérsékelt égövön a nyár felmelegíti a fedőréteget (*epilimnion*), ami szinte úszik a hidegebb alsó rétegen (ezt *hipolimnionnak* hívjuk, az alján a hőmérséklet 4 °C körüli). A felmelegedéssel nő a hőmérséklet-

és sűrűségkülönbség, ami megakadályozza a két réteg elkeveredését. Ez a „termikus ellenállás”. A fedőréteget a fény behatolása és az elsődleges termelés jellemzi, a hipolimnion pedig a kiüledő szerves- és a tóba jutó egyéb anyagok „bugyra”. Ősszel az epilimnion erősen lehűl, eléri a 4 °C-ot, sűrűsége meghaladja az alsó réteget, következképpen „alábugylik”. Ez az őszi átfordulás vagy cirkuláció. Amennyiben a hipolimnion túlzottan sok szerves anyagot tárol, a két réteg átkeveredése vezethet meglepetésszerű oxigénhiányos állapothoz és halpusztuláshoz.

A víz befagyása inverz rétegzettséget hoz létre: közvetlenül a jég alatt „könnyű” hideg víz található, míg a legmelegebb 4 °C-os víz legalul helyezkedik el. Tavasszal bekövetkezik a második átfordulás: a 4 °C-ra felmelegedő „nehéz” víz újból alászáll. A mérsékelt égövi mély tavak élete évről-évre szinte szabályosan ismétlődik, különösen, ha nagy a rétegzettség stabilitása, amit a fedőréteg vastagsága és a mélység menti hőmérsékletkülönbség határoz meg. Az átfordulások száma (0, 1 vagy 2) természetesen függ a tó földrajzi elhelyezkedésétől: a trópusi tavakban cirkuláció ritkán jön létre. A sekély tavakban tartós rétegzettség nem alakul ki: a szél által bevitt kinetikus energia elégséges a nehezebb alsó réteg „felemeléséhez”. Egyúttal ez a sekély tó közvetett definíciója is.

S. L.: Stabilitásról és inverzióról beszélünk a légkör esetében is. Hasonló jelenségről van szó?

M. E.: A troposzférában az átlagos hőmérsékleti gradiens (egységnyi magasságkülönbségre jutó hőmérsékletváltozás) 0,65 °C/100 m értékkel egyenlő. Az átlagérték körül azonban jelentős ingadozás figyelhető meg. Így előfordulhat, hogy a gradiens meghaladja az 1°/100 m-t. Az ilyen helyzetek azért fontosak,

mivel a felszálló, adiabatikusan (hőcseremen-tesen) hűlő levegő ilyen mértékben változtatja a hőmérsékletét. Ha a ténylegesen mért hőmérsékleti gradiens meghaladja az adiabatikus értéket, akkor az emelkedő levegő mele-gebb, mint a környezete. Mindaddig emel-kezik, amíg hőmérséklete (sűrűsége) egyen-lő nem lesz a környező levegő hőmérsékleté-vel. Ilyenkor azt mondjuk, hogy az adott légrétegben a levegő labilis állapotú. A labilis légállapot a felhőképződés feltétele. Emelke-dés során ugyanis a levegő nedvessége telítet-té válhat, ami kondenzációt eredményez. Másrészt a labilis légállapot kedvez a légszenny-yező anyagok függőleges keveredésének is.

A labilitás kialakulásának egyik lehetséges változata, amikor napsütéses, elsősorban nyári napokon a felmelegedett felszín mele-gíti a vele kapcsolatban lévő légréteget, amely a kisebb sűrűsége miatt emelkedni kezd. A meteorológiában ezt *szabad konvekciónak* (feláramlásnak) nevezzük. Gyakori jelenség, hogy az áramló levegőt hegység vagy időjár-ási front készíti feláramlásra. Így jön létre a *kényszerkonvekció*.

Az is előfordul, hogy a hőmérsékleti gra-diens kisebb, mint a megadott átlagérték. Az sem kizárt, hogy a troposzféra egy-egy rétegé-ben vagy a felszínen a magassággal átmeneti-leg nem változik vagy emelkedik a hőmér-séklet (*izotermia*, illetve *inverzió*). Ilyenkor nincsenek függőleges mozgások és elkevered-és, a csóva vékony csík marad, és a légszenny-yeződések feldúsulásával kell számolnunk. Talajközeli inverzió kialakulásának legkézen-fekvőbb módja, hogy a talajközeli levegő kisugárzás miatt éjszaka lehűl, vagy egy me-dencében a hideg levegő megreked. Erre jó példa a Kárpát-medencében télen kialakuló hidegpárna, amely ködös, nagy légszenny-zezőséggel járó helyzetet eredményez. Ráadá-

sul ezekben az időjárási helyzetekben a hori-zontális légmozgás is jelentéktelen, ami to-vább fokozza a nagy légszennyezettségű (és nedvességtartalmú) levegő megrekedését. Ilyenkor rendelkeznek el szmogriadót.

Visszautalok rá, hogy a levegőben a leg-jelentősebb és legkiterjedtebb inverziós réteg a sztratoszféra, amely mint egy fedő lezárja a rendezett függőleges mozgásokat, és a tropo-szférával általában csak diffúzióval keveredik. A levegő szempontjából tehát a vertikális hőmérsékleti, illetve az ezzel egyenértékű sűrűségbeli változások a függőleges légmoz-gások meghatározói.

S. L.: A víz sűrűségéről már beszéltünk. Mekkora a levegőé?

M. E.: A víz sűrűségét mindnyájan jól ismerjük (1 g/cm^3). Kevesebben tudjuk, hogy a levegő sűrűsége ($1,23 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$) normál állapotban mintegy ezrede a víz sűrűségének, ami a ma használatos SI-egységek szerint köbméterenként kerekén 1 kg-t jelent. A levegő anyag, így súllyal nehezedik ránk, nyo-mása van. A légnyomás a tengerszinten 1013 hPa -al egyenlő. Tudjuk, hogy a légnyomás mérése a meteorológiában nagyon fontos, hiszen eloszlása határozza meg a légáramlások jellegét, ezen keresztül az időjárás változásait, illetve a nyom- és légszennyező anyagok transzportját.

Érdekes, és ez még kevésbé köztudott, hogy a levegő teljes tömegét (M) a meteoroló-gusok a nyomás (p) alapján számítják ki. A nyomás ugyanis a felületegységre ható nyo-móerő (Mg , ahol g a nehézségi gyorsulás: $9,81 \text{ ms}^{-2}$). Tekintve, hogy a Föld felszíne (A) $5,1 \times 10^{14} \text{ m}^2$, a $p = Mg/A$ formula segítségével egyszerűen adódik, hogy a légkör tömege $5,13 \times 10^{18} \text{ kg}$. Ez az érték önmagában nagynak tűnik. Ha azonban a Föld teljes tömegéhez ($5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$) hasonlítjuk, akkor elhanyagol-

ható érték. A földi életet lehetővé tevő, illetve az élet jelenlétének köszönhető levegő a boly-gó tömegének mindössze egymilliomod része.

Óhatatlanul felmerül a kérdés: láttuk már, hogy mekkora bolygónk teljes vízkészlete, és ezen belül a szárazföldi bioszféra számára nélkülözhetetlen édesvíz mennyisége, de mi a regionális helyzet, és melyek a trendek?

S. L.: Maradjunk még a globális helyzet-nél. A kérdés az, hogy a $6000 \text{ m}^3/\text{fő}/\text{év}$ készlet hozzáférhető-e? Erre a válaszom hatá-rozottan nemleges, számos ok miatt markáns csökkentő tényezők jelentkeznek. Vegyük sorra ezeket! Először, a megújuló készletek mintegy 20%-a távoli, „eldugott” területen található és aligha hozzáférhető – például az Amazonas óriási készlete. Másodsor, a fenn-maradó fele – a vízfolyás méretétől függően – árvizekkel és monszonnal érkezik, vagyis gyorsan lefolyik, és csak egy kis része haszno-sítható. Harmadsor, a készletek jelentős, de pontosan nem ismert hányada (legalább 30%-a) kiiktatódik az ökológiai vízigény és a legkülönbözőbb szennyezések következtében. Így a *megújuló, hozzáférhető és hasznosítható készlet* $2000 \text{ m}^3/\text{fő}/\text{év}$, azaz $1000 \text{ m}^3/\text{fő}/\text{év}$ igény mellett a globális kihasználtság nagy-ságrendileg 50%, ami nyugtalanítóan magas érték (összehasonlításképpen Magyarorszá-gon 8%, augusztusi kisvízre vetítve pedig mintegy 20%).

A globális helyzetkép tehát sötét. Ameny-nyiben a készletek és az igények területi elosz-lása egyenletes lenne, csak mérsékelten ag-gódnánk. Ez azonban nincsen így. A vízgaz-dálkodást nagy területi (és időbeli) változé-konyosság jellemzi, ami a népesség és a társa-dalmi-gazdasági fejlettségi szint mellett alapvetően az éghajlat területi változékony-ságából fakad: változik a párolgás, a csapadék, a hóesés, a hóolvadás, az árvizek és az aszályos

időszakok stb. A megújuló készleteket a hid-rológiai körforgás részeként végső soron a csapadék és a párolgás együttesen határozza meg, ami pótolja a vízáadó rétegek készleteit, és biztosítja a felszíni és felszín alatti lefolyást. A csapadék a párolgással együtt területileg erősen változik: Egyiptomban például ritkán tapasztalni esőt, de lefolyástérképeket tanul-mányozva feltűnő az Észak-Kína – Délkelet-Ázsia – Közel-Kelet – Észak-Afrika sáv, vala-mint Kalifornia és Ausztrália: az évi lefolyás sokféle csupán $10 \text{ mm}/\text{év}$ körüli (Magyaror-szágon az átlag $50 \text{ mm}/\text{év}$, de az Alföld egyes térségeiben alig több $10 \text{ mm}/\text{évnél}$). Így első-sorban ezeken a területeken számíthatunk a készletek szűkösségére. Az eredmények ezt igazolják is: a vízben legszegényebb harminc ország itt található (például Kuvait, Arab Emirátusok, Katar, Líbia, Szaúd-Arábia, Jor-dánia, Jemen, Izrael, Algéria, Tunézia, Egyip-tom, Ciprus stb.), a Közép-Keleten a készle-tek többnyire $100 \text{ m}^3/\text{fő}/\text{nap}$ alattiak. Más-képpen jellemezve, az arab világban a Föld népességének 5%-ára a készletek 1%-a jut, míg Kanada a másik véglet: a globális készletek 20%-ához a népesség csupán 0,2%-a tartozik.

M. E.: Hány embert érint a vízhiány vagy a fizikai stressz?

S. L.: Megbízható válaszunk nincsen. Ennek oka egyszerűen az adathiány: hiába kiemelt téma a víz a különböző fórumokon és az ENSZ-en belül is, nem üzemel megbíz-ható globális és regionális monitoringrendszer, az egyes országok adatszolgáltatása pedig hiányos. A meglévő információ is elégséges azonban a trendek érzékelésére. Az elem-zések szerint 1990-ben a népesség 4–5%-a élt fizikailag vízhiányos területen. Ez az érték 2025-re, 40–50%-ra növekedhet, alapvetően a fejlődő világban, elsősorban a népesség gyarapodása, másodsorban pedig az éghajla-

ti hatások miatt. Utóbbi területileg átrendezi a készleteket: leegyszerűsítve csökkenti azokat, ahol eddig hiányosak voltak, és fordítva. Az igények is kedvezőtlenül módosulnak: a hőmérséklet emelkedése miatt növekednek az öntözésre berendezkedett területeken. Az igények más okok miatt is átrendeződhetnek: a városiasodás és a megvárosok elzaporodása, a migráció, a középosztály gazdaságtól függő területi fejlődése és így tovább.

M. E.: Mintha hallottam volna a vízlábnyomról. Ez nyilván az ökológiai lábnyom mintájára született, amely köztudottan annak a területnek a nagysága, amely képes adott népség eltartására.

S. L.: A felismerés, hogy a termékekbe közvetve nagy mennyiségű „víz épül be”, vezetett a *vízlábnyom* fogalmához (konyhai példák a vízigényre l/kg-ban: rizs – 3000, búza – 1500, marhahús – 16 000, csirke – 4000, tej – 200). A vízlábnyom az a térfogatban kifejezett, egy főre eső vízmennyiség, amennyit valamilyen termék előállításához és/vagy szolgáltatás elvégzéséhez évente felhasználunk. Egy ország esetében a vetítési alap az ország összes terméke és szolgáltatása. A lábnyom globális átlaga a jelenlegi becslések szerint 1240 m³/fő/év. Az érték az USA-ban a legnagyobb (2480 m³/fő/év, ami mérhetetlen pazarlásra utal), Kínában 700 m³/fő/év, míg Magyarországon némileg az átlag alatt van. Nehéz végiggondolni, melyek lennének a regionális és globális következményei, ha Kína megduplázná – az egyébként növekvő – lábnyomértékét, hiszen a jövedelmek nőnek, a középosztály erősödik, a fogyasztás általában és az élelmiszer-fogyasztás különösen nő, ami fokozza a vízigényeket.

M. E.: Áruul még el, mi a virtuális víz?

S. L.: A fogalom még nincsen két évtizedes. A felismerés az, hogy a globális kereske-

delem – elsősorban a mezőgazdaság területén – a termékekbe beépülve óriási mennyiségű virtuális vizet szállít a határokon keresztül. A hatás egyaránt lehet pozitív és negatív. Pozitív, amennyiben az áruk vízből területről vízhiányosra történő exportjáról van szó, és negatív a fordított esetben. Jelenleg a teljes virtuális vízkészlet évente a vízfogyasztás 40%-át teszi ki, ami évente nyolcszáz Balatonnak felel meg. A mezőgazdaság területén legnagyobb bruttó vízimportőr az India–Kína térség, miközben az export is nagy. Nyugat-Európára a régió belüli kereskedelem a jellemző, a negyven Balatonnyi import pedig Dél-Amerikából és Észak-Afrikából származik. A legnagyobb exportőr az USA.

ÁRAMLÁS ÉS TRANSZPORT: EGYENLETEK

Leíró egyenletek

M. E.: A légkörben és a vizekben bonyolult áramlások és transzportfolyamatok alakulnak ki, amelyek ismerete alapvető ahhoz, hogy megértsük környezetünk viselkedését, és meg tudjuk oldani a gyakorlatban felmerülő feladatokat, a meteorológiai és hidrológiai előrejelzéstől kezdve a levegő- és vízminőség szabályozásáig. Milyen törvényszerűségekre tudunk támaszkodni?

S. L.: A válasz rövid: az anyag- és az energiamegmaradásra, vagy másképpen a kontinuitásra és Newton második törvényére, amelyet mindannyian jól ismerünk.

M. E.: Ezek egyszerűek és közérthetők, a levezetett egyenletek mégis igen bonyolultak. Mi ennek az oka?

S. L.: Az elsődleges magyarázat az, hogy valamely fluidumban (víz vagy levegő) – szemben a szilárd testekkel – a sebesség és a nyomás térben és időben egyaránt változik.

Ezt Newton második törvényében ($P = m a$, ha az m tömeg állandó) az erő (P) és a gyorsulás (a) kifejtésénél egyaránt figyelembe kell venni.

M. E.: Talán kezdjük az erőkkel.

S. L.: Helyes a többes szám használata, hiszen a fluidumra – térben és időben változó mértékben – több erő hat. Ezek (i) a nyomáskülönbségből származó (nyomási gradiens) erő, ami az izobárokra merőleges, (ii) a függőleges gravitációs erő, (iii) a Föld forgási tengelyére és az áramlási sebességre merőleges, a Földdel együtt mozgó koordináta-rendszerben a vízszintes síkban érvényesülő Coriolis-féle eltérítő erő (ami valamely forgórendszerben elmozduló tömegre hat), (iv) a görbült pályájú mozgás esetén a jól ismert centrifugális erő és a (v) a sebességgel ellentétes irányú súrlódási erő. A felsorolt öt erővel a tehetetlenségi erő tart dinamikus egyensúlyt, ami közismerten arányos a gyorsulással.

M. E.: Az erőket értem. És a gyorsulás?

S. L.: Képzeljünk el a vizsgált tér tetszőleges pontjában egy folyadékreszcscskét, amelynek az x irányú sebességösszetevője (a három irány – x , y , z – egyikében) v_x . Kicsiny Δt idő alatt ez Δv_x értékkel módosul. A változás – és így a gyorsulás – két részből tevődik össze: (i) a rögzített pontban a sebesség időben megváltozik (ezt az idő szerinti differenciálhányados fejezi ki) és (ii) eközben a reszcscske másik pontba helyeződik át, ahol már a kiinduláskor is eltérő volt a sebesség (ami a sebesség gradiensétől, azaz az x , y és z szerinti differenciálhányadosoktól függ). Ezeket rendre *lokális* és *konvektív* gyorsulásnak nevezzük, amelyeknek általános esetben mindhárom irányban vannak összetevői (megjegyzem, a meteorológiában advekczióról beszélnek, a konvekció szót a feláramlásra alkalmazzák). A jelenség bonyolult voltát mutatja,

hogy – szemben a merev testekkel – valamely síkáramlásba elhelyezett téglalap alakú vízszál négyféle elmozdulást végezhet: eltolódhat, elfordulhat, megnyúlhat és eltorzulhat.

A lokális gyorsulás zérustól különböző, ha az áramlás időben változó (nem permanens vagy instacionér), míg a konvektív gyorsulás akkor észleljük, ha a fluidum sebessége (a nagysága és/vagy az iránya) a térben változik. A kétféle gyorsulás kifejtése miatt Newton második törvényéből a sebesség három összetevőjére három mozgásegyenlet (matematikailag nehezen kezelhető, másodrendű, nemlineáris parciális differenciálegyenletek) adódik. Súrlódásmentes közegre ez a nevezetes Euler-egyenlet, míg súrlódásos közegre a Navier–Stokes- vagy a Reynolds-egyenlet.

S. L.: Már itt meg tudnád világítani, mi az alapja az időjárás előrejelzésének?

M. E.: Persze. Sokan felteszik a kérdést, hogyan lehetséges a várható időjárást kiszámítani, *számszerűen előre jelezni*. Természetesen a Navier–Stokes-egyenletek alapján. A modell ugyan bonyolult (és csak nagyteljesítményű számítógépeken lehet futtatni őket), azonban az elv egyszerű. De talán folytasd Te az árvízi előrejelzés példáján.

S. L.: Ez azért könnyű, mivel az árvíz folyókban alapvetően hosszirányban vonul le: a probléma egydimenziós. Ha a sebesség U , az árvíz valamilyen C állapota (például a vízállás) az x koordinátával jellemzett szelvényben, a $t + \Delta t$ *jövőbeni* pillanatban azonos lesz a $\Delta x = U \Delta t$ távolságra lévő felvízi szelvényben, a t -vel jellemzett *jelenben*, azaz $C(t + \Delta t, x) = C(t, x - U \Delta t)$. A hullám tehát egyszerűen csak áthelyeződik (a valóságban a jelenség azért bonyolultabb).

M. E.: Az időjárás esetében is hasonló a helyzet, azzal a különbséggel, hogy az időbeli változások a sebesség jelenlegi térbeli válto-

zásaihoz kapcsolódnak. Ez azt jelenti, hogy a vizsgált (A) régió *holnapi* prognózisát nagyban annak a (B) „testvér” régióinak a *mai* állapota határozza meg, ahonnan a levegő majd megérkezik (A)-ba. A felvázolt módon jelenleg tíz napra készülnek előrejelzések, persze az időelőnnnyel a megbízhatóság nagymértékben csökken. Az időjárás előrejelzése az árvízi előrejelzés alapja is: a legfontosabb bemeneti adatot, a csapadékot szolgáltatja.

A tényleges megoldáshoz szükséges gyorsulás a ható erőktől függ. Ezek egyike a nyomási gradiens erő. A levegőt a különböző pontokban mért légnyomás különbségei mozgatják. Minél nagyobb a távolságegységre jutó változás, a gradiens, annál nagyobb a mozgóerő. A mozgó levegő a Föld forgása miatt eltérül, mivel az áramlást a felszínhez rögzített koordináta-rendszerben vizsgáljuk. Ezért megjelenik az eltérítő erő. Végül a felszín közelében hat a súrlódás. Az erők nem tartalmazzák az időt, de lehetővé teszik a sebesség időbeli változásának kiszámítását. Ez az egyenletek idő szerinti numerikus integrálásával történik: leegyszerűsítve a sebességváltozást úgy kapjuk, hogy a fent felsorolt hatóerőket a választott időlépcsővel szorozzuk meg.

S. L.: A Navier–Stokes-egyenlet(ek) levezetésénél a sebességet és a gyorsulást a hely és az idő függvényében szemléltük, amit Euler-féle tárgyalásmódnak nevezünk. Ettől eltérő felfogású a Lagrange-i írásmód, ami a szilárd testek mozgásának kezeléséhez hasonlóan a folyadék-részek pályáját és sebességét határozza meg az idő függvényében. A Lagrange-i megközelítés – ahogyan majd látni fogjuk – a transzportegyenlet megoldásánál vezet előnyökhöz, ezért elsősorban itt nyer alkalmazást.

M. E.: Milyen egyszerű egyensúlyi vagy specifikus esetei vannak a Navier–Stokes-egyenletnek?

S. L.: Kevés erő jelenlétében beszélhetünk ilyenekről. Ha például a sebesség zérus, továbbá csak a nyomási gradiens erő függőleges, z irányú komponense és a gravitációs erő hat a fluidumra, a hidrosztatika nevezetes egyenletét nyerjük. De például a légkörben és sekély vizekben a függőleges irányú gyorsulás gyakran kicsiny, és ilyenkor a megfelelő komponens egyenlet is a hidrosztatikai alakot veszi fel. A másik példát a légkör magasabb régiója jelenti, ahol a súrlódás elhanyagolható. Ilyenkor – párhuzamos izobárok esetén – a nyomási gradiens erő és a Coriolis-erő tart egyensúlyt, amiből az ún. geosztrofikus szél sebessége vezethető le. Görbült izobárok esetén a centrifugális erőt is figyelembe kell venni, ami a gradiens szél kialakulását eredményezi. Erről részletesebben beszélünk még.

M. E.: Az áramlások fontos tulajdonsága a súrlódás, és gyakran beszélünk a *turbulenciáról* is. Hogyan jellemezzük a Navier–Stokes-egyenletben a súrlódást, és mit jelent a turbulencia bűvös szava?

S. L.: Egyik kimagasló tudású professzorom kedvenc mondása volt, hogy a turbulenciát az elmúlt évszázad során ezek kutatták, mégsem tudjuk, hogy mi is az. Van benne valami. Mondják, hogy a turbulencia rendezetlenség, instabilitás, kis és nagy örvények sokasága, amik elviszik az energiát, azaz ellenállást keltenek.

Valós közeg áramlásába a súrlódás hatására csúsztató feszültségek ébrednek. Az ilyen áramlások két nagy családját különböztetjük meg. A lamináris (réteges vagy rendezett) áramlás jellemzője, hogy az áramvonalak egymással párhuzamosak. A sebesség erre merőlegesen változik, amivel arányos csúsztató feszültség ébred. Az arányosságot a viszkozitási tényező – fontos anyagjellemző – fejezi ki.

A turbulens vagy gomolygó áramlásban a sebesség az idő függvényében a helyi középérték körül véletlen jelleggel ingadozik: ez a pulzáció. Jelenléte a vizsgált helyen az egymást követően áthaladó, különböző méretű és intenzitású örvényekkel magyarázható. A sebesség nagysága és iránya egyaránt ingadozik, a mozgás maga pedig a turbulencia intenzitásának növekedésével (ezt például a relatív szórással jellemezhetjük) egyre kaotikusabb jellegűvé válik. A turbulencia előidézője lehet az érdes meder, a mederváltozások, műtárnyak, sarkantyúk, hídpillérek, a sűrűségkülönbség, a szél stb. vagy a különböző sebességű folyadékok keveredése. Ezeket kötött, illetve szabad turbulenciának nevezzük. A légkörben és a vizekben mindkettő fontos szerepet játszik. A falak közelében kialakuló határreteg nem homogén: elméletileg az alsó, vékony lamináris réteg felett alakul ki a sokkal fontosabb turbulens zóna.

S. L.: Jellemeznéd a légköri turbulenciát?

M. E.: A légköri áramlások szinte mindig turbulensek. Az örvényekben, amelyek mérete millimétertől akár száz méterig is terjedhet, a szél sebessége és iránya gyorsan változik, azaz széllökések jönnek létre. A turbulencia egyik formája egyenetlen felszín (pl. városok, hegységek) fölött keletkezik (ezt mechanikus turbulenciának hívjuk). Kiváltásának másik oka a szélnyírás, amely olyan légrétegekben lép föl, ahol a szél iránya és sebessége gyorsan változik (dinamikus turbulencia). Végül a hőmérséklet-különbségek miatt emelkedő levegőben termikus turbulencia jön létre. A turbulencia alapvető szerepet játszik az impulzus, a hő, a nedvesség és a szennyezőanyagok szállításában. Különösen fontos a hatása az alsó kb. 10 m-es légrétegben, ahol a nyomóanyagokat a koncentrációkülönbségek miatt fellépő turbulens diffúzió keveri össze.

M. E.: Ugyanaz a mozgásegyenlet alkalmazható lamináris és turbulens áramlásra?

S. L.: Igen, azzal a különbséggel, hogy a turbulens esetben az egyenlet a turbulencia időléptékére vonatkozó átlagokat írja le. Ez azonban komoly tartalmi különbséget takar. A viszkozitást az örvény-viszkozitási tényező helyettesíti, ami a gomolygás impulzuscserejéből adódó turbulens csúsztató vagy nyíró feszültséget jellemzi (érdemes észrevenni a statisztikai hátteret: valójában a sebesség-összetevők keresztkorrelációi jelennek meg). Ha erre – lamináris áramláshoz hasonlóan – gradiens típusú feltevéssel élünk, a turbulens áramlásra vonatkozó mozgásegyenletet kapjuk, amit megkülönböztettként gyakran Reynolds-egyenletnek hívunk. Ennek alakja matematikai szempontból változatlan, azonban az örvényviszkozitási tényező már nem anyagjellemző, hanem a perem és az áramlás függvénye. A legtöbb esetben a hely és irány szerint változik (inhomogén és anizotrop). A természetben – néhány kivételtől eltekintve – a kinematikusnál nagyságrendekkel nagyobb örvényviszkozitási tényező játsza a meghatározó szerepet. Becslésére a gyakorlat szélcsatorna-vizsgálatokat, helyszíni méréseket és empirikus összefüggéseket alkalmaz. Ugyanakkor meghatározása a turbulenciakutatás központi kérdéses is jelenti. Az elmúlt két évtized igéretes eredményeket hozott a turbulenciamodellek alkalmazása területén folyókra és tavakra. Ezek az örvényviszkozitási tényezőket például a turbulens kinetikus energia és a disszipáció függvényében számítják.

A turbulenciával megint lényeges kérdéshez érkeztünk. A rendezett és rendezetlen mozgásoknak nemcsak az a szerepük, hogy a levegőt és a vizet egyik helyről a másikra szállítják. Az áramló fluidum (levegő és víz) „magával viszi” a fizikai (például hőmérséklet)

és kémiai (nyomanyagok koncentrációja) tulajdonságait, így meghatározza a szennyezőanyagok transzportját. Milyen elven, elveken alapul a vízben és levegőben a szennyezőanyagok szállítása?

M. E.: A légkörben az anyagok transzportját hasonlóan jellemezzük, mint vizek esetén; ugyan több tulajdonságban jelentős eltérések lehetnek (a víz például ezerszer nehezebb, mint az összenyomható levegő). A transzportot jellemző összefüggéseket a gyakorlatban a szennyeződések terjedésének számszerű leírására használják. A modellek a szennyező forrásokat és a tér különböző pontjain kialakuló koncentrációkat kapcsolják össze. Javasolom, hogy erre a fontos kérdésre a későbbiekben még térjünk vissza.

M. E.: A mozgásegyenlet elégséges az áramlástani feladatok megoldásához?

S. L.: Természetesen nem, hiszen a nyomás (vagy a vízmélység) is ismeretlen. A negyedik egyenletet a kontinuitás jelenti, ami azt fejezi ki, hogy adott térfogatelem tömegének időbeli megváltozását a be- és kiáramló fluidum tömegének különbsége határozza meg. Ha a közeg összenyomható, mint a levegő, akkor újabb változóként megjelenik a sűrűség (a víz sűrűsége is változhat például a felmelegedett hűtővizek befogadókba történő visszavezetése következtében – hőszennyezés – vagy tengeröblökben az édes- és a tengervíz keveredése miatt). Meghatározására a vonatkozó anyagtörvényt (levegő esetében az általános gáztörvényt) hívhatjuk segítségül.

M. E.: Akkor még nem szóltunk a szennyezőanyagokról.

S. L.: Erre szolgál a transzportegyenlet, ami szintén az anyagmegmaradáson alapul, csak most a kérdéses szennyezőanyag tömegéről beszélünk, amit a koncentrációjával fejezünk ki. Ebben az esetben is azonos alakú

egyenletet alkalmazunk lamináris és turbulens áramlásra. Feltételezzük, hogy a turbulencia a molekulák véletlen bolyongásához hasonlóan a koncentrációt kiegyenlítő szerepet játszik, és az ingadozásokból adódó többletfluxus Fick második törvényéhez hasonlóan jellemezhető. Azaz a diffúziós tényezőt a több nagyságrenddel nagyobb turbulens diffúzió tényezője helyettesíti. Ez az örvényviszkózitási tényezőkhöz hasonlóan a sebességtér függvénye, általános esetben nem homogén és nem izotróp.

Az transzportegyenlet a sebességtér ismeretében oldható meg. Azt fejezi ki, hogy a koncentráció időbeli megváltozása az advekció (ahogyan már arra utaltunk, a vízimérnöki gyakorlatban konvekció) és a diffúzió együttes eredménye. Az egyenlet szerint az advekció Δt idő alatt a szennyezőanyag v sebességvektor irányába történő $\Delta r = v \Delta t$ translációját idézi elő, miközben sík áramlás esetén valamely kis geometriai alakzat (például egy kör) megtartja az alakját. A Fick-törvénnyel leírt molekuláris diffúzió a kör átmérőjét növeli (a diffúzió tényezője anyagjellemző és a legtöbb esetben állandó), míg a jóval intenzívebb és a természetben domináns turbulens diffúzió a véletlen hatások és az anizotropia eredményeként szabálytalan foltot hoz létre. Ezeket a hatásokat figyelhetjük meg kémények gomolygó füstszálóinak viselkedésén: valamely szennyezőanyag terjedésének a fő irányát a szélesebbvektorral jellemzett advekció határozza meg, miközben az a turbulens diffúzió hatására – közelítően a Gauss-eloszlást követve – egyre jobban elkeveredik a környező légtérrel, és kiterjed (hasonló a helyzet folyókban szennyvízbevezetések alatt, azzal a különbséggel, hogy sekély vizekben a függőleges irányú kiegyenlítő hatás – elkeveredés – gyorsan bekövetkezik).

M. E.: Azt hiszem, most már mindent értünk.

S. L.: Meglátjuk. Kikapcsolódásként vegyünk néhány példát.

Jellemző esetek

M. E.: Ha a levegő függőleges irányba mozog, akkor természetesen a nehézségi erőt figyelembe kell vennünk. A vertikális mozgásnak a felhőképződésben van jelentősége, de fontos szerepet játszik a nyomanyagok elkeveredésében is. Ha feltételezzük, hogy a függőleges mozgás gyorsulása zérus, akkor a mozgásegyenletből egy fontos, egyszerű összefüggés adódik. Ez az ún. *hidrosztatika* egyenlete, amely megadja, hogy egységnyi magasságkülönbségre mekkora nyomásváltozás esik. Segítségével fontos feladatot oldhatunk meg: kiszámíthatjuk, hogy különböző magasságokon mekkora a levegő nyomása. Ily módon a különböző magasságokban mért légnyomást adott vonatkoztatási szintre (általában a tengerszintre) számíthatjuk át. Gondolom, ez az egyenlet a vizek tanulmányozásában is alapvető összefüggés. Általában felmerül a kérdés, hogy a nehézségi erőnek milyen szerep jut a vizek – és azon belül folyók – áramlásának leírásában.

S. L.: A téreörök alapvető szerepet játszanak a szabadfelszíni áramlások kialakításában. Nem véletlen, hogy a tehetetlenségi erő és a nehézségi erő hányadosa a Froude-szám, a vizek áramlásának egyik meghatározó dimenzió nélküli mennyisége. Ha a Froude-szám kicsiny, az áramlás lassú és/vagy a vízmélység nagy. A felszín megzavarása révén keletkező hullámok az áramlással együtt és azzal szemben is haladnak. $Fr = 1$ a kritikus állapotra utal: a víz sebessége megegyezik a sekélyvízi hullám terjedési sebességével (határsebesség). E felett a kinetikus energia dominál, a folya-

dék gyorsabb, mint a hullám, ezért a zavarások csak az áramlás irányába terjednek.

A hidrosztatika gyakorlati jelentősége napjainkban elsősorban a sekély vizek áramlásának leírásában jelentkezik. Ezekre jellemző, hogy a mélység több nagyságrenddel kisebb, mint a vízszintes kiterjedés, és a nyomás mélységmenti változása jó közelítéssel megegyezik a nyugalmi állapotban mérttel (a dinamikus nyomás elhanyagolható). Ez lehetővé teszi a matematikai probléma egyszerűsítését és mélység menti integrálást követően a kétdimenziós írásmód alkalmazását.

M. E.: Vegyünk egy másik esetet. A sűrűlódási réteg fölött, amelynek vastagsága a meteorológiai viszonyok és a felszín tulajdonságainak függvénye (átlagosan kb. 1 km), az áramló levegőre két erő hat, a gradiens (nyomási) erő és az eltérítő, Coriolis-erő. Adott légtér fogat a gradiens erő miatt lép mozgásba, tegyük fel, hogy északi irányba. Hat rá az eltérítő erő is, amely az északi félgömbön a felszínhez képest a mozgó levegőt jobbra téríti. Az eltérítő erő a szélesebbesre merőleges, és nagysága függ a földrajzi szélességtől. Az Egyenlítőn értéke zérus, és a sarkok körzetében maximális. Az eltérített levegő mindaddig jobbra fordul, amíg a gradiens erő és az eltérítő erő egyensúlyba nem kerül. Ilyenkor a szélirány párhuzamos az azonos nyomású helyeket összekötő vonalakkal, az izobárokkal. Az a paradox helyzet alakul ki, hogy a szél nem az izobárokra merőlegesen, hanem azokkal párhuzamosan fúj. A meteorológusok az ilyen szelet *geosztrofikus szélnek* nevezik. Ha együtt mozgunk az áramlással, akkor az alacsonyabb nyomás a bal kezünk felé helyezkedik el. Az izobárok tehát kijelölik a szélirányt, míg sűrűségük (gradiensük) a szélesebbesét. Természetesen, ha az izobárok görbültek, akkor a centrifugális erőt is figyelembe kell vennünk.

A légköri sűrűlódási rétegben természetesen minden bonyolultabb, mint a felette lévő szabad légkörben. A sűrűlódás egyrészt lefékeli a szelet. Másrészt az irányát úgy módosítja, hogy a szél szöveget zár be az izobárokkal, és az alacsony nyomású terület felé fúj. Mindez azt eredményezi, hogy a magasság növekedésekor a szélesség növekszik, iránya egyre inkább jobbra fordul, és felveszi a geostrofikus szél irányát. Ezt a szélváltást a neves svéd tudósról Ekman-spirálnak nevezzük. Teljesülhetnek-e áramló vízben a geostrofikus feltételek? Van-e az itt leírthoz hasonló áramlás felszíni vizekben, amikor a maximális sebesség a felszínen található?

S. L.: Miután a leíró egyenletek gyakorlatilag azonosak, a hasonlóság valószínű. A kérdés az, hogy a felszíni vizekre jellemző nagy sűrűség, geometria és morfológia, továbbá a peremfeltételek lehetővé teszik-e a légkörnek megfelelő jelenségek kialakulását. Gyors válaszom az, hogy ezek folyókban és tavakban nem jönnek létre (a fogalmak nem is igen ismertek az édesvizek területén), ugyan a legnagyobb sebesség a legtöbbször valóban a szabad felszín közelében figyelhető meg. A magyarázat egyrészt a sűrűlódás és a tehetetlenségi erő domináns szerepe a határreteg jellegű áramlásban, másrészt pedig az, hogy az Ekman-spirál kifejlődéséhez szükséges nagy vízszintes kiterjedés és nagy mélység nem áll rendelkezésre. Intuíciónk tehát azt sugallja, hogy az óceánok, a tengerek (és esetleg a legnagyobb tavak) területén vizsgálódjunk.

Ilyen vizekben valóban előfordul geostrofikus áramlás és az Ekman-spirál. Geostrofikus esetben a vízrészecskék az izobárok mentén mozognak, az északi féltekén a jobb oldalukon nagyobb nyomással. A maximális sebességet a szélró, a Coriolis-erő és a sűrűlódásból származó erő egyensúlya eredményezi.

Az óceán felső vízrétegét közvetlenül a szélró, az alatta lévőket pedig a sűrűlódás hajítja. Az egymás alatti rétegek egyre csökkenő sebességgel mozognak, mégpedig a Coriolis-erő elterelő hatása miatt szöveget bezárva a felettük lévő réteggel (az északi félgömbön – ÉFG – jobbra, a délin fordítva), amíg a sűrűlódás el nem hal. A rétegek átlagos áramlási iránya az ÉFG-én, az uralkodó szélirányhoz viszonyítva elméletileg 90 fok (jobbra mutat), a szabad felszínen pedig ennek fele. A légkörhöz hasonlóan az egymás alatti sebességvektorok végpontjai karcsúsodó, 100–150 m mély spirált alkotnak, amit a vízrészecskék mozgása is követ. Ez az Ekman-spirál, amit a nyílt óceánon főként jég alatt figyeltek meg, a szabad felszín közelében ugyanis a turbulencia napi ingadozása és a hullámok destabilizálják a bűvös képződményt. A part közelében más a helyzet, a vízrétegek mozgásukban fizikailag korlátozottak. Ezért a széliránytól való elterelés is módosul, a gyakorlatban nem több mint 30 fok.

Ennél talán fontosabb, hogy az óceánok parti zónáiban a fenti erők – a partvonal és a sekély meder adta korlátok miatt – nem spirált, hanem felfelé és lefelé irányuló, a Coriolis-erő által elterelt mozgásokat indukálnak (Ekman-transzport). Feláramlásról akkor beszélünk, amikor a víz a felszínen a parttól távolodik, amit a kontinuitásból adódóan feláramló víz pótol. Ellenkező eset az, amikor az érkező vízrészecskék a partvonalnál „alábuknak”. A feláramlás a leggyakoribb Kalifornia és Északnyugat-Afrika mentén, északi szelek esetén. A déli féltekén a déli szelek eredményeznek feláramlást Chile, Peru és Délnyugat-Afrika partjainál. Fel- és leáramlás a nyílt vízben is bekövetkezhet, ha egy adott térségből a szél hatására víz távozik, illetve érkezik. A Coriolis-erő elterelő hatása az

Egyenlítő mindkét oldalán elfordítja az áramlás irányát. A nyugat felé irányuló felszíni áramlások északra fordulnak az északi oldalon és délre a déli oldalon: a felszíni vizek távolodnak az Egyenlítőtől, és feláramlások pótolják őket. Utóbbiak fontos szerepet játszanak a felszíni vízhőmérséklet (tágabb értelemben az időjárás és az éghajlat) és a biológiai produktivitás alakításában: hideg tápanyagban gazdag vizet hoznak a fényvel eláztatott zónába, elősegítve a kulcsfontosságú algaszaporodást, ami a tengeri tápláléklánc alapját jelenti. Ezek a zónák egyúttal halászati paradicsomot is jelentenek.

Érzékeljük, hogy az óceán áramlása, az Ekman-spirál, a fel- és leáramlások kialakulása stb. – visszacsatolásokkal – függvénye a légmozgásnak és a légköri Ekman-spiráloknak. Minden mindennel összefügg: ismételjük, elkerülhetetlen a levegő-víz leíró egyenletek szimultán megoldása. Ezt a tudomány és a technológia fejlődése egyre inkább lehetővé is teszi.

M. E.: A tavakban, így a Balatonban kialakulnak-e fel- és leáramlások?

S. L.: Persze. Valamely tó vízmozgása sok összetevőből áll: lengés, kilendülés, körözés, hullámozás stb. A magyar tenger – jellegzetes hosszúság, sekély tó – térségében az uralkodó szélirány északi, északnyugati, amelyet Szigliget és hegytársai alaposan elterelhetnek. A bevitt nyíróerő nem ritkán okoz hosszirányú lengéseket. Ekkor a tó egyik végében fel-, a másikban leáramlás következik be. A legnagyobb kilendülés mértéke megközelítheti az egy métert. Nyugalmi állapotban a nyíróerő függőleges komponensével a gravitációs erő tart egyensúlyt. Ekkor nagy léptékű körözések, örvények alakulnak ki. A szél csökkenésével/megszűntével a gravitáció ismét lengésbe hozza a szabad felszínt, az örvények kinyíl-

nak és Dunányi mennyiségű (!) víz áramlik át a tihanyi szoroson, nem ritkán a széllel szemben. A lengésidő hét óra körüli, az intenzív áramlás megfordul, miközben a lengés csillapodik. A jelenség az árapálymozgáshoz hasonlítható.

MODELLEK:

DILEMMÁK ÉS ALKALMAZÁSOK

A modellalkotás

M. E.: Sokat emlegettük már a modelleket. Mit is értünk alattuk?

S. L.: Ne kívánd, hogy definiáljam. A modell, amiről itt beszélünk, a vizsgált, valós rendszer egyszerűsített képe, ami közelítően helyesen írja le annak főbb sajátosságait. Esztünkben a rendszer főbb folyamatait az áramlás és a szennyezőanyag transzportja jelenti, amelyeket a kontinuitás és a mozgásegyenlet ír le. A célok például szolgálhatják a megértést, a tervezést, az előrejelzést és a döntéshozást. A modell komponensei a leíró egyenletek numerikus megoldása, a peremet előállító morfológiai (topográfiai) modell, a rendelkezésre álló különböző mérések, az emissziók és ezek forgatókönyvei, az értékelés módszerei (gazdasági, kockázati stb.) és így tovább. Azt javaslom, hogy a következőkben elsősorban a kulcsfontosságú transzport modellekkel foglalkozzunk. Többek között azt szeretném illusztrálni, hogy a látszólag jól definiált egyenletek ellenére a modellalkotás valójában művészet.

M. E.: Lássuk, hogy mire is gondolsz.

S. L.: A klasszikus transzportegyenlet, amelyről eddig beszéltünk, a környezetével reakcióba nem lépő, azzal azonos sűrűségű, nem ülepedő oldott, *konzervatív* anyagra vonatkozik. Sajnos a természetben ilyen ritkán található: az anyagok és szennyezők számos

fizikai, kémiai és biológiai átalakuláson, kölcsönhatáson mennek keresztül. Például a vizek szervesszén- és -nitrogén-terhelésének bonyolult bakteriális lebontása szén-dioxid- és nitrogéngáz távozásához vezet a szabad felszínen keresztül a légkörbe (azaz az anyagmegmaradás a vízre és a légkörre, továbbá több komponensre együttesen teljesül, oly módon, hogy a vízbeli történések befolyásolják a légkör állapotát is), miközben az oldott oxigén koncentrációja kedvezőtlenül csökken, hacsak azt a szabad felszínen keresztül diffúzió révén az oxigénbevitel ki nem egyenlíti. Ahogyan már érintettük, leegyszerűsítve ezt írja le az első vízminőségi modell, Streeter és Pheps munkája. A vízminőség-szabályozás alapvető célja az emissziók „optimális” mérséklése oly módon, hogy az élővilág számára alapvető oxigénszint sehol ne csökkenjen az előírt célállapot vagy határérték alá. Érzékeljük, hogy a megfogalmazás távolról sem egyszerű döntési vagy optimalizálási problémát takar, amelynek megfogalmazásánál a célfüggvényben megjelenhetnek a költségek, a kockázatok, a meghaladási valószínűségek, a bizonytalanságok és egyébek.

A példából leszűrhető következmények számosak. Sorolom: (a) Az anyagok körforgása miatt szinte mindig több (tíz) „állapotváltozóval” kell számolnunk, amelyek mindegyikére vonatkozik egy-egy egyenlet; (b) Ezek kiegészített, összefüggő, nemlineáris transzportegyenletek, amelyek megfelelő reakciókinetikai almodellel (vagy forrás- és nyelő tagokkal) veszik figyelembe az átalakulásokat (fenti példánkban a szerves szén lebontását) és a kölcsönhatásokat (az oldottoxigén-koncentráció változását). Az almodell paramétereire általában ismeretlenek, és mérések alapján, kalibrálás segítségével határozandók meg; (c) a leíró egyenletek megoldása az állapotválto-

zók számának növekedésével egyre bonyolultabbá válik; (d) ezzel egy időben, mivel a reakciók leírása gyakran nélkülözi a megalapozott elméleti tudást, nő a mérési és kísérleti igény.

M. E.: Azt hiszem, itt kardinális kérdéshez érkeztünk.

S. L.: Valóban így van, maga a modellszöveg válik kulcsfontosságú kérdéssé. A reakciók leírásában – szemben a mozgásegyenletek és a kontinuitás látszólag egzakt voltaival – többnyire hipotézisekkel dolgozunk, amelyeket a meglévő elméleti és a megszerelhető empirikus tudásunkra, továbbá az adatokra alapozunk. Súlyos kérdések merülnek fel: tudjuk-e igazolni kiválasztott hipotézisünket? Tudunk-e választani a lehetséges alternatív hipotézisek közül? Egyáltalán, jól definiált-e a rendszer, vagy az ellentétes, egymást kiegyenlítő folyamatok jelenléte miatt nem is lehetséges a modell struktúrájának az identifikációja, a modellparaméterek célmérésekre alapozott becslése (kalibrációja), majd ezt követően a modell független adatokra alapozott igazolása (validációja)? És, ha szerencsénk is van, mit jelent a múltbeli észlelésekre alapozott igazolása, amikor minket mindig a jövő, azaz a megváltozott rendszer érdekel? Tudatában vagyunk-e annak, hogy a reakciókinetika és az ökológia területén valójában még mindig a „múltra” illesztett, „buta” nulladrendű modellekkel dolgozunk? Hogy első- és másodrendű modellekkel, amelyek paramétereiket, vagy intelligensebben, az állapotváltozóikat is képesek lennének adaptív módon a megváltozott feltételekhez illeszteni, szinte egyáltalán nem rendelkezünk? Tudjuk-e, hogy melyek a fizikai transzport és a reakciókinetikai változások jellemző tér- és időbeli léptékei? Képesek vagyunk-e az identifikáció, kalibráció, validáció, bizonytalansá-

gi elemzések stb. matematikai módszereit alkalmazni a bonyolult leíró egyenletekre? Látjuk-e, hogy mindezek alapján egyszerű vagy összetett modelleket válasszunk? És alapvetően mi a különbség az előrejelzési képességekben?

M. E.: Jó sok kérdést tettél fel! Tudsz-e legalább részben válaszolni?

S. L.: Megpróbálok. Egyrészt, világosan jelentkeznek a kutatási igények. Másrészt, azt gondolom, az informatika előreszaladt a numerikus modellezés területén, amit a mérés-technika, az automatikus monitorozás, a távérzékelés, az úrfelvételek használata és társai késve követnek. „Nagyszerű” modellekkel rendelkezünk, de ezek az adatok oldaláról még nincsenek kielégítően feltöltve: paradox helyzet, hogy a vízben és a légkörben valamely adott feladatnál több százezer pontban határozzuk meg a leíró egyenletek numerikus megoldását, miközben – műszerezettség és finanszírozási okok miatt – csupán néhány pontban és nem feltétlenül kielégítő időbeli felbontásban vagyunk képesek észleléseket végezni. Itt nagyok a fejlesztési igények és az üzleti lehetőségek is. Végezetül és alapvetően, kiemelten fontos a kutató, az elemző vagy a mérnök szaktudása, intuíciója és innovatív gondolkodása. Szemben a gyakori hiedelemmel, a rendelkezésre álló bonyolult szoftverek semmit sem érnek mély szakmai ismeretek nélkül (sőt kellő hozzáértés és ellenőrzés hiányában „életveszélyesek” is lehetnek, hiszen azt a benyomást kelthetik, hogy „gombnyomásra” szolgáltatják a helyes eredményeket). A kérdést a másik oldalról megközelítve, az adatbázissal, GIS-sel és kiegészítő elemzési eszközökkel ellátott, rugalmas modellek és döntéstámogató rendszerek hihetetlen lehetőséget ajánlanak, hogy azokkal – mint a valóság közelítésével – kísérleteket végezzünk.

Tegyük ezt interaktív módon, nagyszámú változatot elemezve, a részfolyamatokat tanulmányozva, érzékenységi és bizonytalansági vizsgálatokat végezve, kikapogátva a megoldás valószínű környezetét. Itt jelentkezik azután az elemző felelőssége: ismerve a modellek, a különböző adatok, a paraméterek, a megoldások stb. pontatlanságait és bizonytalanságait, döntenie kell, mit is tekint elfogadhatónak, valószínűnek, meggyőzőnek, azaz megoldásnak. Másképpen, ezek a „korszerű logarítek” lehetővé teszik, hogy jobban, sokoldalúbban és megfelelő alázattal értsük meg a problémákat. A korszerű mérnök elképzelhetetlen ilyen eszközök nélkül. Az oktatás dilemmája, hogyan tanítsuk meg a mai „csipléceket” okosan, a mérnöketika íratlan szabályait betartva használni.

Egyszerű vagy bonyolult modell? Úgy vélem, a válasz: egyszerű és bonyolult. Az elemzést mindig célszerű kis adatigényű, kevés változós modellel kezdeni, ami gyors, nagyságrendi vizsgálatokat és a főbb, globális paraméterek rögzítését teszi lehetővé. Ezt többletadatokra és célirányos kísérletekre támaszkodva követhetik a részletesebb számítások, természetesen a probléma súlyától és a rendelkezésre álló finanszírozástól is függően.

M. E.: Akkor most már továbbléphetünk, és folytathatjuk a peremfeltételekkel?

S. L.: Lehet. Kiindulásként ismét a leíró egyenletekre hivatkozunk: ezek megoldása igényli a perem- továbbá az ismeretlen változókra a kezdeti és a peremfeltételek megadását. Természetes körülmények között – a léptéktől függően – a perem roppant szabálytalan, és nem mindig ismert kielégítő részletességgel. Például a lokális és városi légszennyezési modellekhez az utcák és az épületek topográfiáját szükséges megadni, de ma már a városi lefolyási modellek is finom felbon-

tással dolgoznak, ami az útborításra vonatkozik. Folyók és tavak esetében részletes morfológiai modelleket használunk, míg a több tízezer km² kiterjedésű vízgyűjtőkön a lefolyás számítását nem ritkán 50x50 m rácshálójú topográfiai modellekre alapozzuk. Problémát okozhat, hogy az idő függvényében maga a meder vagy a terep is változhat hordalékmozgás, erózió, felkeveredés és kiülepedés következtében.

A mozgás- és a transzportegyenlet peremfeltételei többfélék lehetnek. Határoló fal mentén fluidum nem lép be vagy ki: a normális irányú sebesség zérus. Ha anyagátadás sincsen, a Fick-törvény értelmében a koncentráció normális irányú gradiense is zérus. Más szakaszokon, illetve felületeken éppen a sebesség és a koncentráció definiálásával adhatjuk meg a hozzááramlást vagy kilépést, és azok időbeli változásait. Szabad felszínű áramlások esetén a felszínre vonatkozó kinematikai feltételt is szükséges előírni, ami biztosítja a kontinuitás betartását.

Gyakran egyszerűsített egyenleteket használunk. Ahogyan már említettük, sekély vizekre a mélység mentén integrálunk, és két-dimenziós összefüggésekkel dolgozunk. Ez befolyásolja a peremfeltételeket is: a szabad felszínnél és a mederfenéken ébredő csúsztató feszültségek a két mozgásegyenletben jelennek meg (a szabad felszíni csúsztatófeszültséget a szél idézi elő). Más esetekben vegyesen határozzuk meg a feltételeket. Például folyókra gyakran alkalmazzuk az egydimenziós, keresztiszelvény integrálagokra vonatkozó Saint Venant-egyenletrendszer. Ebben az al- és felvízi feltétel lehet a vízhozam (Q , m³/s), a vízmélység (H) vagy a mérésekből becsült $Q(H)$ görbe bármelyike.

Érdekességként jegyzem meg, hogy a hidrológia egyik alapkérdése éppen az ismer-

etlen alvízi peremfeltétel előrejelzése. Ezt a mai számítástechnikai lehetőségekkel úgy hidaljuk át, hogy a vizsgált folyószakaszt kiterjesztjük valamely „fix” pontig, amelynek a vízszintje állandó és/vagy ismert. Ez lehet egy tó, tározó vagy maga a befogadó tenger. Ha ezek egyike sem jelent kézenfekvő megközelítést, valamely távoli szelvény $Q(H)$ görbét adjuk meg.

A szemléletet tágítva ismét megjegyzem, hogy leíró egyenleteink és az elmondottak érvényesek a tisztítási technológiákra is (az eleveniszapos szennyvíztisztítás lebontási folyamatait hasonlóan írjuk le, mint a folyókban bekövetkező oldotttoxigén- és tápanyagkoncentráció-változásokat). A különbséget a magasabb koncentrációk és biomasszák, de főként a reaktorok szabályos pereme jelenti.

M. E.: Végezetül mit tudsz mondani a leíró egyenletek megoldásáról?

S. L.: Sokkal többet, mint harminc évvel ezelőtt, ami a számítástechnika és az informatika robbanásszerű fejlődésének tudható be. A mozgás- és transzportegyenlet analitikus vagy közelítő analitikus megoldása csak egészen egyszerű esetekre ismert (szabályos perem, állandó együtthatók stb.), és bonyolultabb feladatokra is csak ezeket kísérhettük meg alkalmazni. Egydimenziós permanens áramlásokra bevett gyakorlat volt a Navier–Stokes-egyenlet integrál alakjának használata (Bernoulli-egyenlet), míg a transzport esetében a levegőre és a vízre egyaránt a Gauss-típusú megközelítések terjedtek el. Ám ezeknél is gondot jelentettek már a térben változó sebességek (és vízmélységek) – amelyeket például mérésekből származtattunk – és a gradiensre vonatkozó peremfeltételek figyelembevétele. Ilyenkor szakaszonként analitikus megoldások összegzésével kíséreltünk meg elfogadható becsléseket nyerni.

A hardver és a szoftver soha korábban nem remélt mértékű fejlődése forradalmi változásokat hozott. Elterjedtek, és ma is egyre finomodnak a különböző numerikus módszerek, mint a véges differencia, a véges elem, a határelem és mások, továbbá az euleri és a lagrange-i írásmód kombinálása. Utóbbi esetben az áramlást euleri szemlélettel számoljuk, majd – elsősorban légszennyezési feladatoknál – a transzportegyenletet lagrange-i alapon oldjuk meg, különösen akkor, ha a diffúzió kicsiny: stacionárius esetben valamely fluidumdobozt Δt alatt az áramlási pálya mentén helyezünk át (advekción), majd egyszerűen a reakciók okozta változást számoljuk ki.

A numerikus módszerek külön „tudományt” képeznek, mivel több kívánalmat szükséges egy időben kielégíteni. Például a leggyakrabban alkalmazott véges differenciák módszere esetében olyan megoldási sémát és hálóméretet kell választani, ami biztosítja a megoldás konvergenciáját (a rácshálók méretének csökkentésével a megoldás tart az ismeretlen, pontos megoldáshoz), stabilitását (a számbábról származó kerekítési hibák korlátosak) és a pontosság szem előtt tartásával a gazdaságosságát, azaz a „kicsiny” számítási időt.

A fenti szempontok alapján ma már szinte feladattól függően dolgoznak ki „optimális” sémákat, gyakran változó méretű „multigríd” hálók alkalmazásával, amelyek segítségével – a végeselem-módszerhez hasonlóan – okosan vehetők figyelembe az eltérő mértékű térbeli változások: ahol ezek nagyok, sűrű rácspontkiosztással dolgozunk, míg máshol ritkítunk. Gyakran alkalmazzuk a részekre bontás módszerét, ami lehetővé teszi, hogy operátoronként (advekción vagy diffúzió) és irányonként (x , y és z) egymást követő lépésekben számoljunk, mindig a legkedvezőbb

numerikus sémát választva. Ez különösen fontos az advekción esetében, ami a számítások legkényesebb lépését képezi: a korábban említett, megfestett kör alakjának megtartása a fellépő hibák miatt az egyik legnehezebb feladat. A legnagyobb „veszélyt” az ún. numerikus diffúzió megjelenése jelenti: a véges differenciákkal történő közelítések a háló egy elemén belül általában közvetve teljes elkeveredést tételeznek fel, azaz valójában numerikus eredetű, formailag diffúziós jellegű hatások jelennek meg. A megoldás megválasztásánál alapvető, hogy a numerikus diffúzió tényezője lényegesen kisebb legyen, mint a fizikai diffúzió (a Lax–Wendroff-séma az egyik igen neves, diffúziómentes megoldás, aminek egyik megalkotója Lax Péter Wolf-díjas magyar származású matematikus). A numerikus diffúzió eltüntetése vagy mérséklése persze csak az egyik első fejlesztési lépés. Utána vizsgálnunk kell még a magasabb rendű (fázis és amplitúdó) hibákat ahhoz, hogy az advekción pontossági igényeinknek megfelelően leírhatjuk.

Napjainkban az ismert közelítő módszerekkel gyakran több százezer vagy millió rácspontban végzünk számításokat. A szükséges „gépidő” – feladattól függően – a valós időnél két-három nagyságrenddel kisebb. A számítási idő csökkentése több ok miatt fontos: (i) gyakran szezonokat, vegetációs időszakokat, éveket, évtizedeket szimulálunk; (ii) sokszor szeretnénk a meteorológiai és hidrológiai sztochasztikus hatásokat Monte Carlo-módszerrel, szintetikus előállított adatokkal elemezni, és (iii) a tervezés és stratégia fejlesztés elengedhetetlen eleme a forgatókönyvek és alternatívák vizsgálata.

M. E.: Tudnád-e osztályozni a rendelkezésre álló modelleket és döntéstámogató rendszereket?

S. L.: Az osztályozást röviden és részletesen végezhetjük el. Ha meglegszel az elsővel, az tudom mondani, hogy az osztályozást több szempont alapján végezhetjük el: a modellezés célkitűzése, a leíró egyenletek rész-halmaza, az egyszerűsítési lehetőségek, a reakciókinetikai modell felépítése (lineáris, nemlineáris) és az állapotváltozók száma (egy, több vagy sok), a perem alakja és a peremfeltételek, a megoldási és a kiegészítő módszerek köre (például formális kalibráció, bizonytalansági elemzés, optimalizáció és többszempontú elemzés), a felhasznált adatok jellege, az eredmények megjelenítése, az interaktivitás mértéke, a rendszer rugalmassága stb.

A célok szolgálhatják a tudományos megértést, sokféle előrejelzést (meteorológiai, hidrológiai, baleseti szennyezések levonulása stb.), befogadók szennyezési problémáinak megoldását, térségi környezetszabályozás kidolgozását, egyéb tervezéseket, operatív üzemirányítást, hosszú távú stratégiák kidolgozását és más. A víz esetében a következő modellekről beszélhetünk: hidrológiai, vízgőy-utó-lefolyási, árvízi, hidrodinamikai, transzport, vízminőségi, összekapcsolt hidrológiai–hidrodinamikai–vízminőségi, permanens és nempermanens, 1-, 2- és 3-dimenziós, determinisztikus, sztochasztikus és számos egyéb.

A felsorolásnál talán még fontosabb két tényezőt ismételni: (i) az automatikus mérések, a távérzékelés és az űrbeli megfigyelések eredményeként rendelkezésre álló nagy időbeli felbontású, továbbá térbeli és területi információk (topográfia, csapadékmező, vegetációs térkép stb.) hihetetlen új modellezési lehetőségeket biztosítanak és (ii) ezzel is összefüggésben, sok területen a hidrológiában és a meteorológiában, a korábbi empirikus összefüggéseket fokozatosan szorítják ki a fizikailag megalapozott egyenletek.

Az alkalmazás előfeltételei

S. L.: Sokat beszéltem, Te jössz. Az elmondottak tükrében fel tudnád-e idézni a korszerű meteorológia kialakulását, ami nélkül aligha léteznének ma alkalmazások?

M. E.: Az ember, amióta ráeszmélt környezetére, a légkör rövid távú (időjárás) és hosszú távú (éghajlat) állapotát állandóan igyekszik megfigyelni, sőt várható változásait előre jelezni. Ez nagyon is érthető erőfeszítés, hiszen tevékenységét (mezőgazdaság, vízgazdálkodás, hajózás stb.) az időjárás és éghajlat alapvetően meghatározta, és meghatározza napjainkban is. Túlzás nélkül mondhatjuk, hogy a múltban a meteorológia empirikus tudomány volt. Elődeink az ismereteket a levegőről megfigyelésekkel szerezték, és a megfigyelések eredményeit indukcióval próbálták általánosítani. A 18. századtól végzett laboratóriumi kísérletek, elsősorban a levegő összetételének megismerését segítették elő. A megfigyelések lényegesen különböznek a laboratóriumi kísérletektől. Megismételhetetlenek: ugyanaz a jelenség soha nem ismétlődik. Ebből következik, hogy a megfigyelések eredményeiből nem tudjuk pontosan megmondani, hogy mi is fog következni. Sokan ezért a meteorológiát a múltban nem is tartották „komoly” tudománynak.

S. L.: Hasonló a helyzet a hidrológia területén is. De folytasd, kérlek.

M. E.: Az elméleti meteorológia egészen a 19. század végéig meglehetősen bizonytalan lábakon állt. Tudomásom szerint az első dedukcióval kapott fontos eredmény a 19. században született, amikor az adiabatikus változások egyenletét, valamint a hőmérséklet és gőznyomás változásának összefüggését levezették a termodinamika általános törvényszerűségeiből. Ide sorolható az általános gáz-

egyenlet megalkotása is, amely az ideális gázok hőmérsékletének és nyomásának összefüggését adja meg. Ezeket a munkákat nem meteorológusok végezték, és az illető kutatóknak a légkör feltehetően eszükbe sem jutott. Mégis, ezek az eredmények lehetővé tették számos légköri feladat megoldását, többek között az emelkedő levegő hőmérséklet- és nyomásváltozásának számszerű leírását, illetve a felhőalap szintjének kiszámítását.

A mozgó levegő elmélete, az ún. dinamikus meteorológia elsősorban úgy fejlődött, hogy a légkörre alkalmazták az egyenleteket, amelyeket a dinamika nagyjai (Leonhard Euler, Gustave-Gaspard Coriolis, Claude-Louis Navier, George Gabriel Stokes) *Newton* második törvénye alapján a fluidumok mozgásának jellemzésére javasoltak. Fontos esemény volt az Euler által levezetett, a tömegmegmaradást leíró kontinuitási egyenlet légköri alkalmazása is.

A 20. században azután minden megváltozott. A dinamikus meteorológia olyan nagyot fejlődött, hogy a légkörtan minden más ágának alapjává vált. Az elméleti meteorológián alapul az időjárás számszerű előrejelzése, az éghajlatváltozások leírása vagy a nyomanyagok légköri terjedésének, szakszóval transzportjának kiszámítása. Mindez ma már *modellekkel* történik, amelyek tudásunk mértékének megfelelően közelítik a természetes folyamatokat. Napjainkban a *műholdak* és az időjárás *radarok* korában sokan megvannak győződve arról, hogy az időjárás előrejelzése a korszerű eszközökkel végzett légköri megfigyeléseknek köszönhető, amelyek követik a ciklonok és időjárás frontok vonulását, illetve a csapadékos zónákat. Ez azonban csak részben igaz. A 20. század közepén az igazi áttörést a modellszámítások végzése jelentette. Így azt mondhatjuk, hogy az elmé-

leti számítások legalább olyan fontosak, mint az empirikus megfigyelések. A modellszámítások és a megfigyelések természetesen feltételezik egymást. A számítógépes modellek futtatásához bemenő adatokra van szükség. Sőt, a kaoszelméletnek megfelelően, mint még beszélünk róla, igen pontos megfigyelési adatokra. Az előrejelzések sokszor úgy készülnek, hogy a számításokat a megfigyelések hibaintervallumán belül többször megismétlik. Az elmélet és a műszaki fejlesztés teljesen összemosisodik. Nem véletlen, hogy a számítógépek hasznosságát Neumann János, az Egyesült Államokba kivándorolt nagy matematikusunk, meteorológus munkatársai segítségével, légköri példákkal illusztrálta.

Képzeld el! Az időjárás folyamatok számszerű megoldásához szükséges egyenletek már a 20. század elején rendelkezésre álltak. Az időjárás azonban sokkal gyorsabban változott, mint amilyen gyorsan a számításokat el lehetett végezni. Így az első numerikus kísérlet, amelyben egy megszállott angol kutató, Lewis Fry Richardson próbálta kiszámítani a másnapi időjárást, évekig készült. Ennek ellenére a kapott eredmények rosszak voltak, mivel a buzgó angol az integrálásnál túl hosszú időlépcsőket használt. Amikor könyvében erről értekezett, azt a reményét fejezte ki, hogy egy nap talán gyorsabban lehet a számításokat elvégezni, mint ahogy az időjárás változik. Neumann János és munkatársai első számításainak üteme 1950-ben beérte az időjárás változásainak gyorsaságát. Az egynapos prognózis pontosan egy napig készült. Utána már nem volt megállás. Mind a számítógépes numerikus technikák, mind maguk a számítógépek hatalmasat fejlődtek. Napjainkban már több világcentrumban, így az angliai Bracknellben az időjárás „kiszámítása” rendszeresen folyik. Nyugodtan mond-

hatjuk, hogy a korszerű meteorológia kialakulásában a számítógépek, illetve a numerikus modellek meghatározó szerepet játszottak. Gondolom, hasonlóan történt a természetes vizek mozgásának leírása területén is.

S. L.: Erre egyszerű „igen” a válaszom. Három évtizeddel ezelőtt a Balatonban kialakuló szél keltette áramlást 1 km × 1 km-es hálóban számoltuk. Ma ez, mondjuk, 5 m × 5 m, vagy kevesebb. Az észak-amerikai Nagytavak áramlásának számítására 1980 körül az akkori legkorszerűbb számítógépet használták kizárólagosan, egy év szimulálása fél évet igényelt. Ma ugyanez interaktív üzemből csak percekbe telik. És az észlelések: harminc éve a Balaton alga-biomasszáját hetente, kéthetente mérték. Ma a domináns algafajok klorofill-a koncentrációját több mélységben szinte folyamatosan monitorozzuk.

És ismétlem, nem először, és valószínűleg nem is utoljára. A numerikus hidraulika és a CFD (Computational Fluid Dynamics) napjainkban forradalmi változáson megy keresztül. A vízmérnöki szakmában, turbulenciamodellel kiegészítve, több millió pontos morfológiai modellre támaszkodva, hihetetlenül összetett áramlásokat tudunk számítással nyomon követni, egyre inkább elfogadható pontossággal. A példák magukba foglalják a folyókat, a tavakat, a hordalékmozgást, a csatornahálózatokat, a tisztítási műtárgyakat, a vízminőséget. Ma már a vízgyűjtőn történő lefolyást is hasonló módon, fizikai modellekre építve számítjuk, automatizálva a vizsgált folyórendszer előállítását is. De a vízmérnöki szakma egyes részei (hidraulika, hidrobiológia, vízkémia, vízellátás-csatornázás stb.) is kezdenek „összeállni”. Például százéves a biológiai, eleveniszapos szennyvíztisztítás. Ma már az üzemirányítást a nyers szennyvizek összetételének ismeretében kiforrott, a szén,

a nitrogén és a foszfor körforgását a technológiai rendszerben leíró modellekkel, *online* végezzük. A tervezésekhez CFD-modellt is alkalmazunk. De a folyók oxigénháztartását leíró, első, kilencven éves Streeter–Phelps vízminőségi modell is óriásit fejlődött a korszerű számítás- és mérés technikával.

S. L.: Tudnál-e néhány szót mondani a léptékekről?

M. E.: A légköri folyamatok érdekessége, hogy nagyon különböző térbeli léptéken játszódnak le. Az új kémiai vegyületeket létrehozó kémiai reakcióknak, illetve a cseppek, kristályok keletkezéséhez vezető fázisváltásnak molekuláris a léptéke. A turbulens örvények átmérője néhány centiméter vagy méter. Az időjárás-változásokat hordozó mérsékelt övi ciklonok mérete a több ezer kilométert is elérheti. Ráadásul a különböző léptékű folyamatok sokszor egy időben zajlanak. Erre jó példa a felhő- és csapadékképződés, amelyet csepp-, illetve jégképződési, valamint dinamikai (a feláramlás jellege) mechanizmusok együttesen szabályoznak. Ráadásul a turbulencia befolyásolhatja a felhőelemek növekedését. Ebből következik, hogy a légkör tanulmányozása közel sem egyszerű folyamat. Megismeréséhez – ahogyan Te is hangsúlyoztad – egyebek között szükség van reakciókinetikai, kémiai termodinamikai (fázisváltás), kristálytani és áramlástani ismeretekre is. Ma már egészen más meteorológusnak lenni, mint abban az időben, amikor a kutatás éghajlati középértékek kiszámításából állt. Gondolom, valami hasonló a helyzet a hidrológia területén is.

S. L.: A léptékek kérdéséhez ismét a Balatont hívom példaként. A turbulencia térbeli és időléptéke néhányszor tíz centiméter és pár másodperc, de a hidrológiai átfolyásé közel 100 km és néhány év. A fotoszintézis

napi ciklus jellemzi, az algavirágzás bekövetkezéséhez néhány hét szükséges, az eutrofizálódás léptéke pedig évtized körüli. De képzeljük el, hogy a Duna megfigyelt tápanyagfeldúsulását 800 000 km² kiterjedésű vízgyűjtő terület történései határozzák meg.

A szakma fejlődése hasonló a meteorológiához. A hidrológia hosszú ideig az empirikus összefüggések gazdag tárháza volt. Ahogyan arra már többször utaltam, ma az „ökolószabályok” helyét egyre inkább átvették a fizikai alapú modellek, amelyek korszerű területi észlelésekre alapoznak: űrfelvételek, csapadékradar-képek, távérzékelés, részletes domborzati viszonyok és társaik.

Példa a transzportegyenlet numerikus megoldására

S. L.: Már beszéltünk a transzportegyenlet megoldásáról általában. Megvilágítanál specifikusan egy, a levegőre vonatkozó eljárást?

M. E.: Képzeljünk el egy dobozt a levegőben, amely a Föld felszínén helyezkedik el. Tételezzük fel, hogy a dobozban adott anyag egységesen oszlik el. Koncentrációjának megváltozását nyilvánvalóan az időegység alatt beáramló és kiáramló anyagmennyiség különbsége határozza meg. Az áramlást a rendezett (szél) és a rendezetlen (turbulens) mozgások biztosítják. Ha a doboz alján olyan források helyezkednek el, amelyekből a vizsgált anyag a dobozba kerülhet, akkor ez a koncentráció növekedéséhez vezet. Másrészt, a nyelők (például az ülepedés) a koncentráció csökkenését okozzák. Végül az esetleges kémiai reakciók csökkentik vagy növelik a koncentrációt attól függően, hogy a vizsgált anyag kiindulási vagy végterméke-e a folyamatoknak. Ha egyetlen dobozt tekintünk, akkor a modell nulladimenziós. Ha több dobozt teszünk egymásra a vertikális eloszlás

kiszámítása céljából, akkor egydimenziós modellről beszélünk. Ilyenkor az ülepedés, illetve kibocsátást természetesen csak a legalsó dobozban vesszük figyelembe. A nulladimenziós modellek alkalmasak például az igen hosszú (mintegy száz év) tartózkodási idejű gázok (például freonok) függőleges elkeveredésének leírására. Ha a dobozokat a magasság és az erre mérőleges vízszintes (például földrajzi szélesség) mentén helyezzük el, akkor a modell kétdimenziós. Ilyenkor feltételezzük, hogy a vízszintes keveredés teljes. Ez a feltétel a mintegy tízéves tartózkodási idejű üvegházhatású gázoknál (szén-dioxid, metán) teljesül. Kétdimenziós modellt azonban kisebb léptékű folyamatok leírására is használhatunk, például ha a felszínre helyezett dobozokkal egy város légszennyeződési folyamatait akarjuk jellemezni. Végül a modellt egy adott tér (pl. az egész troposzféra) esetén is alkalmazhatjuk. Ilyenkor a modell háromdimenziós, a dobozok száma nagy, a számítások elvégzése komoly számítógépet igényel. Különösen bonyolult a helyzet, ha sok kémiai folyamatot veszünk figyelembe. A nagy mennyiségű bemenő adat előállítását sem egyszerű feladat. Minden bizonnyal hasonló a helyzet a víz esetében is.

S. L.: A teljes elkeveredés feltételét tavakra vagy tószegmensekre alkalmazzuk, nagyságrendi vizsgálatoknál (zéródimenziós modellek). Részletes elemzéseknél legalább két dimenzióban követjük nyomon az áramlást és a transzportot is. Hosszú folyók vízminőségének változása vagy az árvízi levonulás jellegzetesen 1D feladat, de a hullámteret és egy esetleges gátszakadás hatását már 2D-ben számoljuk. Nagy folyók elkeveredési viszonyait három dimenzióban, turbulenciamodellel kiegészítve vizsgáljuk. Az adatigény valóban óriási lehet. Elő kell állítani a térbeli

peremet, erre szolgál a morfológiai modell. Feladattól függően szükséges a terhelések ismerete, továbbá a meteorológiai és hidrológiai hajtóerőké (csapadék, hőmérséklet, szélesség és irány, összes sugárzás, párolgás, a vegetáció jellemzői stb.). Végeterül fontos az interaktív kapcsolat az adatbázissal és az eredmények (képi) megjelenítésével. Ez vezet azután a szakértői és döntéstámogató rendszerekhez.

M. E.: A Balaton eutrofizálódását hogyan modellezték?

S. L.: Címszavakban: morfológiai modell, 2D sekély vízi hidrodinamikai modell, ami a szél keltette áramlást számítja több évre, 2D-transzportmodell, kiegészítve alternatív hipotéziseken alapuló P forgalmi-alga modellel. Utóbbi erősen nemlineáris (például a szaporodás és a limitálások leírása miatt) és a P frakciókon túl négy alga- „kompartimentet” tartalmaz. A modell rögzített hálóval és a véges differencia módszerével dolgozik. A nempermanens áramlás eredményeit Lagrange-i szimulációval is párosítottuk. Ezzel vizsgáltuk például a Zala-víz sorsát a tóban, vagy azt is, hogy a Keszthelyi-medence kékalga spórái milyen ütemben fertőzték el a többi medencét. A számítások meglepően rövid időt eredményeztek, ami nem hosszirányú konvekció, hanem körözésekből és lengésekből származó diszperzió következménye.

S. L.: Befejezésként még két megjegyzést szeretnék tenni. Az első: a tavi hidrodinamika területén itthon, a Műegyetem vizes társzűkületén is egyre ígéretesebb eredmények születnek a szélmező, a domborzatok, a hullámozás és a nádasok határteregre és áramlásra gyakorolt hatásának figyelembevételére.

A második: érdemes szem előtt tartani, hogy a reakciótagokkal kiegészített transzport modell kapcsolatot teremt a kibocsátások (E)

és a befogadó különböző helyein vett koncentrációk (C) között. A kapcsolatot az ún. átviteli tényező fejezi ki. A legtöbb gyakorlati problémára kimutatható, hogy C lineáris függvénye E-nek, ami azután viszonylag könnyen lehetővé teszi költségek hozzárendelését a lehetséges terheléscsökkentésekhez, és optimális stratégiák kidolgozását. Ez történt például a savasodás európai szabályozása során is. Erről mindjárt beszélünk is.

Modellezés és környezeti problémák

S. L.: Mind a levegő, mind a víz esetén a szennyezőanyagok transzportjának vizsgálata a környezetvédelem fontos kérdése. Feltehetően a két közegben szokásos vizsgálatok között sok hasonlóságot találunk.

M. E.: Levegő esetén gyakori, hogy a számításokat a már említett dobozokra végezzük el (doboz modell). Itt választhatunk felszínhez rögzített koordináta-rendszert (*Euler-féle közelítés*), amikor a dobozok helyzete rögzített. A másik megközelítésnél a dobozok a légáramlással együtt mozognak (*Lagrange-modellezés*). Az Euler-féle modellezés elvileg minden esetben alkalmazható. Sokkal nagyobb azonban a bemenő adatigénye és hosszabb a számítások időigénye, mint a Lagrange-féle eljárásnak. Ezért a gyakorlatban sokszor a Lagrange-közelítést választjuk. Az áramlási trajektóriákat a magaslégtér méréséből határozhatjuk meg, előrejelzés esetén viszont a mozgásegyenletekből számíthatjuk ki. A keveredési réteg magasságával rendelkező dobozok a kibocsátási mező fölött mozognak, és anyagnyereségük a kérdéses terület kibocsátásával egyenlő. A közelítést nagymértékben leegyszerűsíti, hogy a számításoknál a dobozok közötti keveredést nem vesszük figyelembe, ami első közelítésben sokszor megtehető. Adott anyag koncentrációja a

dobozokban a légköri ülepedés miatt csökken, és változik a kémiai reakciók miatt.

A nagyléptékű, kontinentális modellezésre fontos példa az EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme), amelyet az ENSZ kötelékébe tartozó Európai Gazdasági Bizottság hívott életre. A program keretében Lagrange-típusú modellezést alkalmaznak. Ehhez felhasználják az egyes országok által szolgáltatott kibocsátási értékeket, a mindenkori meteorológiai adatokat, valamint különböző levegőkémiai kutatások eredményeit. Az EMEP elsődleges célja az országhatárokon át terjedő légszennyeződés nyomon követése, ellenőrzése. Először a savasodás szempontjából fontos kénvegyületek eloszlását modellezték, majd kiterjesztették a tevékenységet a különböző nitrogénvegyületekre is. Számunkra a számítások legfontosabb eredménye, hogy Magyarországon a kénkibocsátás még mindig meghaladja az ülepedést, míg a nitrogén-oxidok mérlege gyakorlatilag egyensúlyban van. A másik fontos eredmény, hogy az ország területére ülepedő kénnek csak kb. a fele kerül magyar forrásokból a levegőbe, a többi kén külföldről érkezik hozzánk.

S. L.: Közvetlenül jegyzem meg: a víz területén ritkábban alkalmazunk Lagrange-i közelítést, mint Euleri eljárást. Ennek magyarázata a sebesség nagyfokú változása és a gyakran „szűk” tartomány. Ilyenkor a pályák számítása és a gyakori interpoláció komoly problémát okozhat, és numerikus stabilitási kérdéseket vet fel.

M. E.: Az EMEP azonban nem csak modellezésből áll. Tartozik hozzá egy kémiai megfigyelési hálózat is, amelynek méréseit a modellezés eredményeinek ellenőrzésére használják. A számítások megfigyelési adatok figyelembevételével indulnak, de mérések szolgálnak a kapott eredmények ellenőrzésé-

re is. A vizsgálatokból kiderül, hogy a modellek hosszabb (éves) időléptékben elfogadható információkat szolgáltatnak-e. Egyes helyzetekben a válasz nemleges: ez általában abból következik, hogy a kémiai reakciók sebességét, illetve a légköri ülepedés folyamatát nem megfelelően becsülték.

S. L.: A transzport modelleket a vízhez hasonlóan nyilván kisebb léptékű vizsgálatokhoz is használják. Hallhatnánk erről is néhány szót?

M. E.: Természetesen. Sajnos ilyenkor a talajhoz közeli légáramlást kell figyelembe vennünk, amelyet a domborzat és a tereptárgyak jelentősen módosíthatnak. Ez azt jelenti, hogy a felszín érdessége a szélmezőt jelentősen megváltoztatja. A fő probléma ebben az esetben magának a szélmezőnek a modellezése. Gondoljunk csak el! Az utcákban (szaknyelven „*kanyonokban*”) sokszor az épületek fölötti légáramlással ellentétes örvények alakulnak ki, amelyek matematikai leírása nem könnyű feladat. Igazából csak félempirikus modellek léteznek, amelyek felállítását mérési programok segítik. Ezekben az ún. utca-modellekben a házak magasságának és az utca szélességének aránya fontos szerepet játszik. Másrészt feltételezik, hogy az utca mentén mindkét irányban azonos viszonyok (például az autók kibocsátása) uralkodnak.

A kisléptékű modellezés speciális esete, amikor a felszínhez rögzített koordináta-rendszerben magas pontforrás (kémények) körüli légszennyeződés-eloszlást modellezzük. Feltételezzük, hogy a széllel párhuzamosan a légszennyeződést a rendezett áramlás szállítja, míg arra merőlegesen a turbulencia a statisztikus matematikából ismert normál eloszlásnak (Gauss-eloszlásnak) megfelelő koncentrációeloszlást alakít ki. Ebben az ún. *Gauss-féle modellben* számos más feltételezéssel is élnek,

így elhanyagolják a kémiai átalakulások és az üledés hatását. A modell ezért csak kicsi, maximum 10–20 km-es léptékben alkalmazható. Végül ebben a (stacionér) modell típusban az idő nem szerepel, így a szennyeződés előrejelzésére nem alkalmazható. A nehézségek ellenére a modell első közelítésben általában kielégítő eredményeket ad. Ennek ellenére a Gauss-modell alkalmazása egyre kevésbé általános, átadja a helyét a tudományosan megalapozottabb modelleknek.

Feltételezem, hogy az egyszerűbb, kevésbé pontos modellek a víz minőségének leírásában is egyre inkább elvesztik jelentőségüket.

S. L.: Szennyvízbevezetések elkeveredésének gyors becslésére még ma is alkalmazunk Gauss-típusú modellt és analitikus megoldást. Ezek az egyszerű esetek. De fontosabb problémáknál 2D- vagy 3D-modellel dolgozunk. A gyakorlatban – jobb kutatóhelyeken – rendelkezésre állnak a fontosabb részproblémák numerikus megoldásai, és adott feladatnál ezek szoftvereiből mint „lego”-elemekből állítjuk össze a modellrendszert.

KÁOSZ

M. E.: A légkör talán legérdekesebb tulajdonsága, hogy kaotikusan viselkedik. A levegő nemcsak komplex, hanem kaotikus rendszer is. Leegyszerűsítve, a komplexitás térbeli, a káosz időbeli rendellenességekre utal. A kaotikus viselkedés nem meglepő egy olyan rendszerben, amely számos (mondhatni számálhatatlan), egymástól nagymértékben független egyedből, molekulából áll. Gondoljunk csak el! Normál hőmérsékleten és nyomáson egy köbcéntiméter levegőben kereken 10^{19} , azaz tízmilliárdszor milliárd molekula van, amelyek állandóan szabálytalan hőmozgást végeznek, és folyamatosan ütköznek egymással. A levegőben végbemenő folyamatok ál-

landó kölcsönhatásban állnak egymással. Az ilyen rendszerek nemlineárisak, ami azt jelenti, hogy adott kezdeti változás nem arányos változásokat vált ki. Másik fontos ismerv, hogy a rendszer időbeli változása nagyon érzékeny a kezdeti állapotokra: a kezdeti adatok (kezdeti feltételek) kicsiny eltérései a kiindulási időponttól távolodva egyre jelentősebb eltéréseket eredményeznek. Ebből következik, hogy az időjárás előrejelzésének csak bizonyos időhatárig (7–10 nap) van értelme, mivel a kiindulási adatok mindig bizonyos hibával terheltek. Ezért az időjárás előrejelzését végző meteorológus a számításokat a kiinduló adatokat a mérési hibának megfelelően változtatva, többször végzi el. A kapott eredmények alapján valószínűségi előrejelzést végez. A káosz tulajdonsága, hogy a determinisztikus dinamikus egyenletek időbeli integrálása valószínűségi eredményeket ad.

A káoszelméletből következik: ugyanaz az időjárás kétszer sohasem fordul elő. Ha például a változók száma három (például légnyomás, hőmérséklet, szélesség), akkor az időbeli változásukat ábrázoló görbék a háromdimenziós térben sohasem metszik egymást. A számításokat hosszú időre elvégezve azt tapasztaljuk, hogy a görbe hurkot ír le, és sohasem hagyja el a tér meghatározott részét. Menete lepkeszárnyyszerű képződményt alkot. Ha a pontok a szárny egyik részéből a másikba kerülnek, akkor a görbe forgási iránya megváltozik. Az ilyen formációkat attraktoroknak nevezzük. Ez azt jelenti, hogy bár az időjárás kaotikus, az időjárás jellemző változók sohasem lépnek ki az attraktor által megszabott térből, más szavakkal a légkör állapota nem lehet tetszőleges. Ahogy a pontok pillanatnyi helyzete a változó időjárást, az attraktor az éghajlatot, a viszonylagos állandóságot jelenti. Az attraktor a rend a rendezet-

lenségben. Adott attraktor meghatározott éghajlati rendszert jelent. Az emberi tevékenység éghajlat-módosító hatása azért veszélyes, mivel előidézheti, hogy a jelenlegi attraktorból egy másikba lépünk át. Ez pedig az ember számára meglehetősen kellemetlen, netán végzetes lenne.

A káoszelmélet a meteorológiában, és számos más tudományágban forradalmi változásokat okozott. Így van a hidrológiában is?

S. L.: Úgy tűnik, késésben vagyunk. Nem sokat tudok mondani. Mintegy húsz évvel ezelőtt olvastam néhány cikket – kezdeti próbálkozásokat – az algaszaporodás determinisztikus, nemlineáris egyenletekkel történő sztochasztikus modellezéséről. Itthon a Műegyetemen is született újabban néhány érdekes értekezés, amelyek nyitott áramlási rendszerek esetére foglalkoztak térbeli káoszsal és fraktálgeometriával. Ha jól emlékszem, többek között azt találták, hogy a részecskék szálas fraktálszerűen gyűlhetnek össze, és hosszú időre csapdázódhatnak. Bonyolult eloszlásuk tökéletes keveredéshez vezet, ami lehetővé teszi például a versengő planktonpopulációk meglepő együttélését is.

A káoszsal szemben a víz területén a bizonytalansági elemzések terjedtek el széles körben, hiszen ismereteink, modelljeink, adataink mind hiányosak, közelítőek, hibával terheltek. Olyan eljárások a kelendőek, amelyek kellően robusztusak és a matematikai probléma jellegétől függetlenül alkalmazhatók. Ilyen például a Hornberger–Spear–Yung (HSY)-módszer. A kiindulópont – a gyakran hiányos adatok alapján – a rendszer viselkedésének definiálása. Például ismerjük a jellemző koncentrációk alsó és felső határát, szezonálisát stb. Ezután meghatározzuk az állapotváltozókat és alternatív hipotézisek alapján a reakciókinetikai egyenleteket. Fel-

tevéünk az, hogy a paraméterek fizikai alappal rendelkeznek, és ismerjük ezek tartományát. Véletlenszám-generátorral, többnyire egyenletes eloszlásból előállítunk egy paramétervektort, és ellenőrizzük, a szimuláció kielégíti-e a viselkedés definícióját. Ha igen, a paraméterkombinációt megtartjuk, ha nem, elvetjük. Az eljárást több ezerszer megismételve általában 1–2%-ban kapunk „igen” eredményt. A paraméterek keresztkorrelációjának vizsgálata a modell egyszerűsítéséhez vezethet. A végeredmény – az adott hipotézisre – a modellegyenletek, a paraméterek az eloszlásokkal, amelyek a tervezés célú használat során lehetővé teszik sztochasztikus jellegű szimulációk elvégzését. Így megkapjuk a várható érték trajektóriáját és az eloszlásokat is.

ÉGHAJLATI PROGNÓZIS

M. E.: A levegő állapotának időbeli változásait tartalmazó modelleknek egyre nagyobb a jelentőségük az éghajlat előrejelzésében is. Ilyen számításokkal igyekeznek a kutatók arra a kérdésre is választ találni, hogy milyen hatása lesz az emberi tevékenységnek (például az üvegházhatású gázok kibocsátásának) az éghajlat alakulására. Az időjárás előrejelzéséhez hasonlóan az alapvető összefüggéseket ebben az esetben is a mozgásegyenletek és a kontinuitási egyenlet szolgáltatják.

S. L.: Álljunk itt meg egy pillanatra. Azt hallottuk, hogy a levegő kaotikus viselkedése miatt az időjárást csak kb. tíz napra lehet elvárható megbízhatósággal előre jelezni, főleg a bemenő adatoktól való függőség miatt. Hogyan lehet akkor éghajlati előrejelzést végezni, amelynek időléptéke legalább tíz év, de akár száz év is lehet?

M. E.: A kérdés nagyon is indokolt. Az ilyen előrejelzést az teszi lehetővé, hogy az éghajlati rendszer egyes komponensei az

időjárásához képest összehasonlíthatatlanul lassabban változnak. Ennek ellenére ilyenkor is ajánlatos kissé megváltoztatott kezdeti feltételekkel több számítást, érzékenységvizsgálatot végezni. Az éghajlat (például a várható hőmérséklet- és csapadékeloszlás) előrejelzése két lépésben történik. Az első a várható emberi tevékenységének megbecslése, forgatókönyvek révén. Ez már önmagában is sok buktatót és bizonytalanságot rejt magában, hiszen például az üvegházhatású gázok kibocsátása a Föld gazdaságának alakulásától függ. A második lépés annak meghatározása, hogy a becslött emberi hatások az éghajlatra milyen hatást fognak gyakorolni. Itt is számos hibalehetőség adódhat. Ezek egyike, talán a legfontosabb, hogy az ún. *visszacatolási folyamatokat* igen nehéz előre látni, és figyelembe venni. Lehet ugyanis, hogy a kezdeti hatást egy másik folyamat felerősíti (pozitív visszacsatolás), esetleg gyengíti. A problémák ellenére nagyon valószínűnek látszik, hogy az elkövetkező mintegy száz évben – feltevéstől és forgatókönyvtől függően – a globális éghajlat egy-két fokot melegebben fog. A Kárpát-medence felmelegedése ennél várhatóan nagyobb lesz. Az éghajlati prognózisokra gyakran helyesen mondják, hogy ami biztos, az a bizonytalanságok döntő szerepe. A globális felmelegedésnek minden bizonnyal fontos következményei lesznek adott terület, ország vízgazdálkodásában is.

S. L.: Valóban ez várható. A század végéig – a feltevések szerint – a globális hőmérséklet 2–5 fokkal nőhet. A folyamat eredményeként változik a kisebb térségek, így hazánk éghajlata is. A globális és regionális modellek prognózisai alapján éghajlatunk mediterrán irányba tolódik el, melegebbé és szárazabbá válik. Kissé részletesebben, minden bizonnyal sok pofon vár ránk. A hőmérséklet (és a po-

tenciális párolgás) minden évszakban nő. Az évi csapadék némileg csökken, oly módon, hogy nő a téli–tavaszi és csökken a nyári–ősz felében. Várhatóan csökken a csapadékos napok száma, nő a nagy csapadékok gyakorisága és a száraz időszakok hossza. Gyakoribbá válnak az időjárási szélsőségek, nő a tartósságuk és intenzitásuk. Nő az árvízi kockázat. A vízfolyások nyári kisvízi készlete csökken, és a tavakban gyakoribbá válnak az alacsony vízállású időszakok (kisebb sekély tavak kiszáradhatnak). Az Alföld dinamikus (utánpótlódó) felszín alatti vízkészlete csökken. Egyes fajlagos vízigények (hűtővíz, növénytermesztés, halastavak) nőnek. Várhatóan nő a vízért való versengés, a konfliktusok erősödnek az Alföldön. A csökkenő kisvízhozamok miatt nő a nem éghajlati hatásokból (bemosódás, tisztítatlan szennyvizek) eredő vízminőségi kockázat. Csökken a vizek természetes öntisztuló képessége. Kedvezőtlenek az ökológiai hatások.

A felsorolás talán túl „katonásra” sikeredt. Olvasásánál ne felejtsük, az éghajlatváltozás területén egy dolog biztos, hogy nagyok a bizonytalanságok. Ezért mindenhová beszúrható valami olyasmi, hogy várható, potenciális, talán, minden bizonnyal, lehetséges stb.

EPILOGUS

S. L.: Ernő, miért is írtuk le a beszélgetésünket? Az *Opus*, ahogyan nevezted?

M. E.: Talán azért, amiért mindenki, aki leír valamit. Hogy talán valaki elolvassa. Netán tanul belőle. De ha ez a remény indoklatlan is, akkor azért, hogy saját magunk számára megörökítsük szakmai barátságunkat, amely évtizedekre nyúlik vissza.

S. L.: Régen ismerjük egymást. Valahogy mindig szerettem volna együtt dolgozni Veled. Ezt terveztük is, először vagy harminc

éve, de az alkalom nem akart összejönni. Azt is hozzáteszem, rokon szakterületen Te mindig előttem jártál, kutatóintézeti, egyetemi és akadémiai emberként egyaránt. Nyomon követtem pályádat, és talán tanultam is belőle. Most örülök, hogy elhatároztuk magunkat. Talán még folytatás is lesz.

M. E.: Köszönöm, amiket rólam mondtál. De nyilván csak azért történt így, mivel pár évvel idősebb vagyok Nálad. Minden-

esetre életünkben az emberi kapcsolatok, és az ezekkel járó jó beszélgetések jelentik a legnagyobb értéket. Számomra a mi kapcsolatunk ilyen érték. És az marad a jövőben is. Így beszélgetéseink is folytatódni fognak.

Kulcsszavak: *anyagforgalom, áramlás, körforgások, környezeti szennyeződés, környezeti problémák, levegőminőség, matematikai modellezés, modellalkotás, káosz, szennyezők, vízminőség*

