

cikket 2015-ben publikáltuk. Számos kérdés fogalmazható meg ilyen módon, mint például a biológiában a DNS-szekvenálás, az elméleti részecskefizikában a rács-QCD és a kvantumkémia bizonyos problémái. Elkészítettünk egy prototípust a DNS-szekvenálás implementálására Terasic DE1-SoC boardon egy Cyclone V chip felhasználásával, amelyet a cancéni *ReConfigurable Computing and FPGA* konferencián mutattunk be 2014-ben. A hardver megvalósításában *Kiss Tivadar* volt segítségünkre.

Kutatási munkánk során mintegy húsz új tudományos eredmény, számos cikk és konferencián megtartott előadás született, például IEEE (2011), CHEP (2012), MACS (2012), IZEST (2012), Wigner-111 (2013), GPU Technology (2013). Részt vettünk az EGEE (Enabling Grid for E-Science) projektben (2009–2011). Az NA49/61-kollaboráció megbeszélését 2012-ben az ELTE-n bonyolítottuk le. Az NA61-kollaborációval 14 cikkünk jelent meg.

A 10 év során többször előfordult, hogy egyéb feladataink miatt munkánkat csak megszakításokkal tud-

tuk továbbvinni, de mindig úgy váltunk el, amint lehet, folytatjuk. Közös kutatómunkánk sajnos 2015 őszén megszakadt. Utolsó cikkünk 2015 decemberében jelent meg *Simple scalable nucleotic FPGA based short aligner for exhaustive rearch of substitution errors* címmel.

Gyuri és a diákság: a hallgatókkal kialakított munkakapcsolatát a közvetlenség jellemezte, a diákság számára „Veszter” volt. Mindenkivel nyitott, színes egyénisége a fiatalok érdeklődését is felkeltette. Rendszeresen új ötletekkel bombázta a hallgatókat, és aki képes volt vele tartani, azokkal időt nem kímélve foglalkozott. A kutatásban résztvevő diákoknak ösztöndíjat segített szerezni a CERN-ben és a GSI-ben, eleinte technical studentként, majd PhD-hallgatóként, végigkövette az egyes diákok sorsát az első eredményektől (TDK) a doktori fokozatig.

Gyuri iskolateremtő tevékenysége több generációnak adott lehetőséget, hogy eljuthassanak a tudományos élet különböző területeire, kipróbálhassák magukat és továbbvigyék ezt a szellemet, amit tőle örököltek.

RADIOAKTIVITÁS A LÉGKÖRBŐL

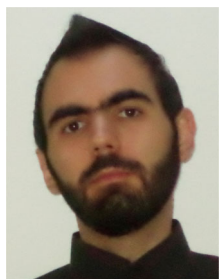
A csernobili baleset légköri viszonyainak újraszámítása

Nagy Attila, Horváth Ákos

Országos Meteorológiai Szolgálat
Siófoki Viharjelző Observatórium

Harminc évvel ezelőtt, 1986. április 26-án robbanástörtént az akkori Szovjetunió – ma Ukrajna – területén található Csernobil város melletti atomerőmű négyes blokkjában. Egy balul sikerült kísérlet során a reaktor instabillá és irányíthatatlanná vált, a fejlődő hő előbb

gőzrobbanást okozott, majd tűz keletkezett. A helyzetet súlyosbította, hogy az RBMK-1000 típusú reaktorban nagy mennyiségű grafitot használtak a láncreakció fenntartásához szükséges neutronlassításhoz. A több száz tonna grafit napokon keresztül magas hőmérsékleten égett, és május 6-ig több tonna anyag – köztük radioaktív elemek – került a légkörbe. A baleset lefolyásáról számos részletes leírás és elemzés készült, így hazai szakemberek is írtak röviddel a baleset után tanulmányokat [1, 2], illetve több kiadást megélt ismeretterjesztő könyvet az eseményről [3], továbbá áttekintő publikációk készültek a következményekről [4]. A súlyos szerencsétlenség kiváltója az ember volt, azonban a légkör is kivette részét a radioaktív anyagok terjedésében. Abban az időben az Országos Meteorológiai Szolgálat feladata volt a légköri radioaktivitás mérése, amelynek eredményei napjainkban is rendelkezésünkre állnak [5]. Ugyanakkor 30 év elteltével a meteorológia és a számítástechnika segítségével lehetőség nyílt arra, hogy a modern számítógépes modellek felhasználásával újraelemezzük az akkori időjárási helyzetet. Rendelkezésünkre állnak olyan terjedési modellek is, amelyekkel követni tudjuk a kibocsátott radioaktív anyagok mozgását, ülepe-



Nagy Attila 2010-ben szerzett az ELTE-n meteorológus diplomát. Azóta a Siófoki Viharjelző Observatórium munkatársa. Szakmai tevékenységei között leghangsúlyosabb a WRF mezoskálájú numerikus időjárás-előrejelzési modell fejlesztése, operatív alkalmazása a rövid- és ultrarövidtávú előrejelzési rendszerben és a számítások felügyelete az OMSZ szuperszámítógépén. A közeljövőben beadásra kerülő doktori értekezésének fő témája a modell viselkedésével kapcsolatos tapasztalatok rendszerezése.



Horváth Ákos 1984-ben végzett az ELTE meteorológus szakán, kandidátusi fokozatát 1992-ben szerezte meg. Szakmai területe a légköri mélykonvekció, szinoptikus és numerikus meteorológia, valamint az időjárási veszélyjelzés. Az Országos Meteorológiai Szolgálat Siófoki Viharjelző Observatóriumának vezetője.

A szerzők köszönetet mondanak *Sükösd Csabának* a munkához nyújtott segítségért.

dését és a szennyeződés mértékét. A számításokat összevetve az akkori mérésekkel komplex képet kaphatunk arról, hogy miként érte el a sugárzó anyag Magyarországot és hogyan alakult a légkör által szétterített radioaktív szennyeződés térségünkben.

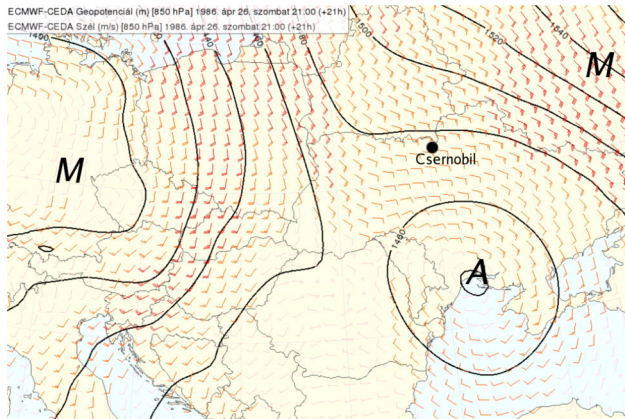
Magyarországi mérések

A baleset idején az Országos Meteorológiai Szolgálat feladatai közé tartozott a légköri radioaktivitás mérése. Az operatív gyakorlatban a mérés 3 különböző mintavételi eljárásból állt. Az első mérés a légköri aeroszolok radioaktív sugárzását határozta meg. A mérés során finom szűrőn keresztül egy légszivattyú segítségével levegőt szívattak át (36 köbmétert naponta), majd a szűrőt egy sugázmérő berendezésbe helyezték. A második mérés során egy adott felületű edényt helyeztek ki, amelybe desztillált vizet öntöttek. Megadott idő elteltével a vizet leöntötték egy edénybe, majd elpárologtatás után a megmaradt anyag radioaktivitását mérték meg. Ha az adott időszakban nem volt csapadék, akkor az így kapott minta a száraz ülepedés, ha volt csapadék, akkor a száraz és nedves ülepedés együttes sugárzását mutatta. A harmadik mérési módszer a csapadékmintavétel volt, amelynek során egy tartály fedele automatikusan kinyílt, ha eleredt az eső, tehát az így vett minta tisztán a csapadék során történő kimosódást, vagyis a nedves ülepedést reprezentálta. A radioaktivitás mérését az akkor rendszerben álló GAMMA NZ-305 típusú ólomtoronyban elhelyezett NK-350 mérőberendezéssel végezték el, amely a sugárzás béta-komponensét detektálta.

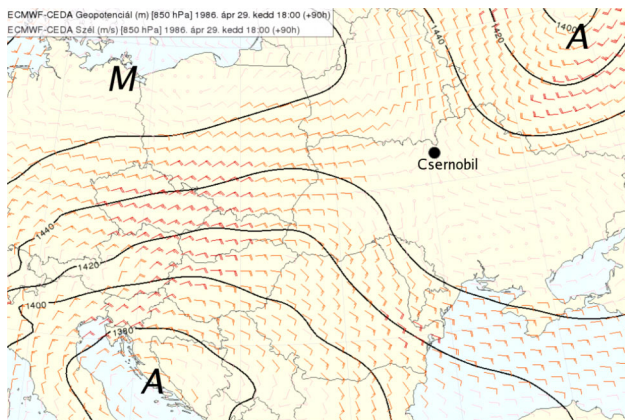
A három mintavétel (aeroszol, száraz, illetve nedves ülepedés) között nagyságrendi különbségek lehetnek. A zivatarok nagy területekről összegyűjtik a levegőt és a felhőben feláramló, majd lehulló esőcseppek valósággal átmossák a légkört, ezért is tapasztaljuk, hogy zivatarok után általában kitisztul a levegő. A zivatarból kihulló csapadékból ebből következően igen nagy koncentrációban jelent meg a radioaktív részecskék, és a nedves ülepedés okozta radioaktív szennyeződés térbeli változékonysága is rendkívül nagy volt. 1986. április végén Közép-Európában gyakoriak voltak a zivatarok.

A nagytérségű időjárási helyzet

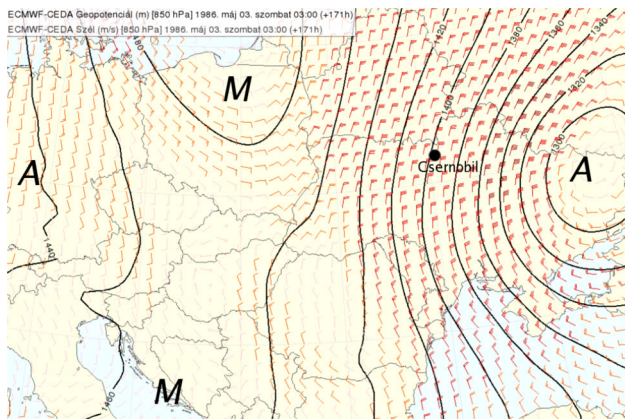
Az elmúlt években a nagy meteorológiai központok komoly erőfeszítéseket tettek arra, hogy a közelmúlt időjárási helyzetét a legmodernebb számítógépes modellek segítségével rekonstruálják. Mivel 1986-ban Európa és az akkori Szovjetunió területén rendszeres földfelszíni és rádiószondás mérések voltak, így az Európai Középtávú Előrejelző Központban (ECMWF) készült reanalízisek alapján pontosabb képet kaphatunk a baleset idején zajló légköri folyamatokról [6]. A reanalízisek tartalmazzák a horizontális és vertikális légmozgásokat is, így lehetőség van a légpályák újraszámolására.



1.a ábra. A légkör alsó 1500 m-ének időjárási helyzete az ECMWF analízis szerint 1986. április 26. 21 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa nyomásszint magasságát, a szélzászlók pedig ezen szint szélviszonyait mutatják.



1.b ábra. A légkör alsó 1500 m-ének időjárási helyzete az ECMWF analízis szerint 1986. április 28. 18 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa nyomásszint magasságát, a szélzászlók pedig ezen szint szélviszonyait mutatják.

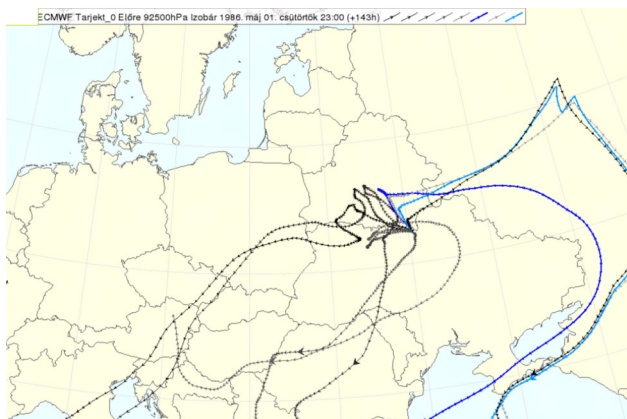


1.c ábra. A légkör alsó 1500 m-ének időjárási helyzete az ECMWF analízis szerint 1986. május 3. 00 UTC-kor. A folytonos vonalak a 850 hPa nyomásszint magasságát, a szélzászlók pedig ezen szint szélviszonyait mutatják.

Csernobil környékén 1986. április 26-án a Fekete-tenger fölött elhelyezkedő ciklon áramlási rendszerében délkeleti, majd déli szél fújt, amely a szennyező anyagot Skandinávia irányába szállította. (1.a–c ábrák). A ciklon térségében a légállapot labilis volt, tehát a nappali órákban kialakultak záporok és zivata-



2.a ábra. A csernobili baleset napján 3 óránként indított, az ECMWF reanalízis felhasználásával számított trajektóriák.



2.b ábra. A csernobili balesetet követő napon 3 óránként indított, az ECMWF reanalízis felhasználásával számított trajektóriák.

rok. Később ez a ciklon elvonult, majd 29-én a térség időjárását már egy mediterrán ciklon határozta meg, amelynek északi oldalán Ukrajna irányából egyenesen Közép-Európa felé áramlott a levegő. Ez az alacsony nyomású rendszer északkelet felé vonult és május 3-tól a ciklon hátoldalán tartós, északias áramlást hozott létre.

Az időjárási reanalízis segítségével a légpályák is megrajzolhatók. A 2.a ábrán a robbanást követő első 24 órában 3 óránként indított légpályákat rajzoltuk meg, feltételezve, hogy a robbanás és az égés miatt Csernobil fölött 1000-1500 m magasságig is eljutottak a szennyező anyagok. A légpályák közül vastagon kihúzott feketével (on-line verzióban késsel) jelöltük az első 24 óras kibocsátásból a térségünk közelében áthaladókat. Látható, hogy a radioaktív anyagok először Skandinávia irányába indultak el, majd onnan visszafordulva érkeztek a Kárpátok közelébe. A legelőször ideérő (vastagon kihúzott szürkével – on-line verzióban világoskékkel – jelölt) részecske északról visszafordulva, április 30-án közelítette meg Magyarországot északnyugati határait. Az ország belső területeire május 1-jén érkeztek meg a radioaktív anyagok. Mindez összhangban van azzal, hogy először 30-án, Szombathelyen ugrott meg az aeroszolokból mért sugárzás, majd május 1-jén a belső országrészekben is. A baleset második napján,

vagyis április 27-én kibocsátott részecskék elsősorban a déli országrészek fölött vonultak át és május 2-án értek térségünkbe (2.b ábra). Május 1-jén az ország több területén is kialakultak záporok, zivatarok és a nedves kimosódás miatt 10^5 Bq/m³ értéket is mértek. Május első napjaiban a keletre forduló áramlás már rövidebb úton szállította a radioaktív anyagokat Magyarországra fölé, azonban – mivel a zivatarok ekkor már főleg az Alpok térségében alakultak ki – az országban csak a száraz ülepedés során hullott ki sugárzó anyag.

A fenti trajektóriaszámítással csak hozzávetőlegesen lehet megbecsülni a szennyezőanyag-kihullást. A pontosabb becslésekhez a légköri folyamatok jóval részletesebb leírására és a terjedést pontosabban leíró eljárásokra van szükség.

Adatok, módszerek

A radioaktív szennyező anyagok terjedése, egy adott helyen vett koncentrációja, valamint száraz és nedves ülepedése két lépésben modellezhető. Először a légkör állapotát szükséges leírni a megfelelő tér- és időbeli felbontásban, ami az időjárási folyamatok megszerűsítését jelenti az erre kifejlesztett numerikus előrejelző modellek segítségével. A második lépésben a meghatározott légköri állapotot meghatározók felhasználásával egy terjedési modell segítségével lehetőség van a légkörbe emittált anyagok (gázok, aeroszolok) viselkedésének leírására. Jelen esetben eltekintünk a kémiai átalakulások követésétől, azonban figyelembe vesszük a radioaktív bomlás jelenségét, és a szennyező anyagok terjedésére és ülepedésére ezen feltétel mellett adunk becsléseket. A légkör állapotának meghatározásához a WRF numerikus előrejelzési modellt [7], a második lépés megvalósításához pedig a FLEX-PART terjedési modellt alkalmaztuk.

A WRF (Weather Research and Forecasting Model) modellt az Amerikai Egyesült Államok Nemzeti Légkör Kutatási Központjában (NCAR), valamint a Központi Előrejelző Intézetében (NCEP) és számos egyetem bevonásával fejlesztették ki. A WRF a mezoskálájú numerikus időjárás-előrejelző modellek új generációjának tagja, ami azt jelenti, hogy a méterestől az 1000 km-es karakterisztikus méretű meteorológiai folyamatok előrejelzésére egyaránt alkalmazható. Jelen esetben a numerikus kísérletek célja kettős: egyrészt nagy pontossággal leírni a nagytérségű időjárási helyzetet, azaz a szinoptikus skálájú folyamatokat (ciklonok, anticiklonok), másrészt a megnövelt horizontális felbontás lehetővé teszi a mezoskálájú (elsősorban konvektív) folyamatok – utólagos – előrejelzését is, amelyek, mint később látni fogjuk, a szennyező anyagok nedves ülepedésében komoly szerepet játszhattak. Mindehhez a modellt speciális beállításokkal (nagy térbeli felbontású számítási rács, a zivatarok leírására alkalmas nem hidrosztatikus dinamika, speciális felhőfizika stb.) kell futtatni, sőt – mivel a zivatarokra nagymértékben hatnak a talajfel-

szín és légkör közti kölcsönhatások – komplex talaj-modellt is kell alkalmazni. Ezen a ponton kell felhív-nunk a figyelmet arra, hogy a modelleredmények értékelése az időjárási jelenségek különböző méret-skáláján különböző szempontok alapján kell történ-jen. Ahogy haladunk az egyre kisebb, egyúttal rövi-debb életű folyamatok irányába, a számítások egyre több bizonytalansággal terheltek. Ez a hiba a hori-zontális rácsávolság csökkentésével és alapvető di-namikai beállításokkal mérsékelhető, de mindezek ellenére is bizonyos mérettartomány alatt új bizony-talanságok kezdik eluralni az eredményeket: például a háttér adatok véges felbontása (felszíni tulajdonsá-gok 1×1 km alatt már konstansok), vagy a turbulens áramlások egyre erősebb hatása. A konvekció keze-lése valahol éppen ezen a határon mozog, ezért az eredmények értékelésekor ezt a tényt még kicsit részletesebben is tárgyalni fogjuk.

A mezoskálájú (korlátozott tartományú) modellezés-hez szükség van a kezdeti meteorológiai feltételek és számítás közben a számítási tartományon kívülről érkező meteorológiai információk lehető legponto-sabb megadására. Ezeket a kezdeti és peremfeltételeket a fentiekben említett ECMWF reanalízisekből származtattuk, amelyek három óránként biztosítják a nagytérségű időjárási folyamatok változásának be- vitelét a WRF-modell Kárpát-medencét lefedő tarto-mányába.

A nagy térbeli felbontással rendelkező WRF futtatá-si eredményei jelentik a kiindulási állapot, azaz az adott esetet meghatározó légköri állapot nagy felbon-tású ismerete nyit lehetőséget a légkörbe kibocsátott anyagok terjedésének leírására.

A radioaktív szennyezés légköri viselkedését a FLEX-PART („FLEXible PARTicle dispersion model”) modell írja le [8–10]. A modellt a 90-es évek végén kezdték fejleszteni a légszennyező anyagok hosszú- és középtá-vú terjedésének számítására. A számítások során a mo-dell figyelembe veszi a turbulens diffúzió jelenségét, a száraz és nedves ülepedést, továbbá a radioaktív bom-lást, de nem kezeli a kémiai átalakulásokat. A modell mind forward, mind backward módban futtatható. Az első esetben a kibocsátás utáni terjedést írjuk le, míg a második esetben visszafelé követjük a légáramlást, miáltal megkaphatjuk az észlelt szennyező anyag felté-telezhető forrását. Jelen tanulmányban forward módú futtatásokat végeztünk, tekintettel a kibocsátás térbeli meghatározottságára.

A terjedés számításának módszertana a Lagrange-i megközelítésmódra épül. Ez azt jelenti, hogy a külön-féle forrásokból kibocsátandó anyagot egyedi ré-szecskek sokaságaként tekinti és a modellbeli számí-tások nem egy térben rögzített rácshálózat pontjaira történnek (mint például a WRF-modellben), hanem az áthelyeződő részecskékre. Így az eredmény a részecs-kék trajektóriája lesz, azaz meghatározott időközön-ként megkapjuk a térben elfoglalt helyzetüket. A ki-bocsátási forrásokat a felhasználónak kell definiálnia: meg kell adnia a kibocsátás helyét, időbeli kezdetét és végét, a kibocsátandó tömeget és a részecskék

számát minden anyag típusra. A modell ezt a teljes tömeget arányosan elosztja az összes részecske kö-zött, amely aztán azok légkörben történő vándorlása során az ülepedési és esetleges bomlási folyamatok következtében csökkenhet. Az eredmények értékelé-séből kiderült, hogy a teljes időtartamra vonatkozó, mintegy 70 000 trajektória (részecskeszám) már jól jellemzi a pontforrásból induló anyaghalmoz későbbi térbeli eloszlását. Maga a trajektóriaszámítás alapve-tően két tényezőtől függ: a részecskék fizikai (kémiai) tulajdonságaitól és a légköri feltételektől. Az előbbie-k megadása a felhasználó feladata. Jellemezni kell az egyes anyagfajtákat molekuláris tömegükkel, a fele-zési idővel, valamint a nedves ülepedésük hatékony-ságát két paraméterrel kell beállítani. Aeroszolkok ese-tén a sűrűség és a részecskék méreteloszlás-függvé-nyének becslése is szükséges.

A FLEXPART-modell futtatása szintén jelentős szá-mítási igényt támaszt, tekintve, hogy a trajektóriák szá-mítása – a meteorológiai modellekhez hasonlóan – differenciálegyenletek (Langevin-egyenletek) numeri-kus megoldásával történik. Az előrejelzési időn belül, meghatározott hosszúságú időlépésekben állnak elő az egyes részecskék koordinátái és tömege, amelyek-ből egy adott térrészre vonatkoztatva anyagkoncent-ráció származtatható, illetve száraz és nedves ülepe-dés is meghatározható. A száraz ülepedés azt fejezi ki, hogy csapadékmentes területen mennyi kibocsátott anyag hullott ki a légkörből; ez elsősorban a részecs-kék méretétől, sűrűségétől függ. A nedves ülepedés jelenti a felhőkbe került anyag csapadékkal történő kimosódását. Ez egy bonyolult parametrizációs séma alapján áll elő, amelynek bizonyos paramétereit a felhasználó is megadhatja.

Kibocsátási adatok a terjedési modellhez

Jelen tanulmányban ötféle radioaktív izotóp terjedé-sét modelleztük, azokat, amelyek bizonyos szem-pontból a legnagyobb hatást gyakorolják a környe-zetre: vagy nagy tömegben kerültek a légkörbe, vagy tömegükhöz képest hosszú felezési idejükkel tűnnek ki a baleset során emittált több, mint 20-féle radio-aktív anyag közül. A számítások során a kibocsátást pontforrásként (azaz egy rácspontra történő emisz-szióként) értelmeztük. Az 1986. április 26. és 1986. május 6. közötti időszakra folyamatos, de naponként változó intenzitású emissziót adtunk meg a modell-nek, melynek részletesebb jellemzését az *1. táblázat-ban* találjuk [11].

A FLEXPART-modellben az egyes radioaktív ele-mek fizikai és kémiai tulajdonságainak beállítása so-rán figyelembe vettük többek között, hogy a plutó-nium jóval nagyobb sűrűségű a többi elemnél és első-sorban üzemanyag-részecskékhöz tapadva került ki a légkörbe, így ezeket eltérő méreteloszlás-függvénnyel írta le a modell. A jód esetében pedig elsősorban gáz halmazállapotú emisszióról volt szó, így a FLEXPART-nak ezt is kezelnie kellett amellet, hogy ezen elem

1. táblázat

Fontosabb, kibocsátott izotópok jellemzői

radioaktív izotóp	kibocsátott aktivitás (PBq)	kibocsátott tömeg (kg)	felezési idő
Cs-137	85	26,6	30 év
Sr-90	10	1,9	28 év
I-131	1760	0,3	8 nap
Ce-144	116	1,0	285 nap
Pu-239	0,03	13,3	24 400 év

felezési ideje összemérhető azzal a 10 napos időtartammal, amelyre a számításokat végeztük.

A légköri állapot követéséhez a WRF-modellből 15 perces időbeli sűrűséggel állítottunk elő a 3 dimenziós légkör pillanatnyi állapotát leíró adatállományokat. A kapott eredmények – másképp fogalmazva, a leskálázás – sikeressége általános értelemben sok tényezőtől függ, egy-egy konkrét esetben általában megelégszünk bizonyos, a helyzetet karakterisztikusan jellemző állapotváltozók helyes előrejelzésével. Jelen vizsgálatban a nagytérségű időjárási helyzet alakulása a WRF-ben nagyon hasonlónak adódott a már bemutatott ECMWF reanalízisekhez. A bizonytalanság inkább abban volt, hogy a szinoptikus skálájú kényszerek milyen mezoskálájú folyamatokat fognak létrehozni a modellben. A felhasznált analízisek elemzése és az akkori mérések alapján ugyanis a vizsgált régióban több helyen és több alkalommal fordulhatott elő konvektív csapadékhullás. A tanulmány egyik célja éppen az, hogy a konvektív csapadék figyelembevételével pontosabb becslést adjon az ülepedésre, amihez a jelenlegi globális skálájú modellek felbontása még nem elégséges.

Az eredmények mérésekkel történő összevetése azt mutatta, hogy a WRF *területi átlagban* sikeresen jelezte előre az egyes csapadékos periódusokat, illetve azok konvektív voltát azzal együtt, hogy a *modellezett csapadékösszeg egy adott állomás fölött és adott rövid időintervallumban akár lényegesen is eltérhet a mértől*. Ez a konvekció rendkívüli érzékenységből adódik. Éppen ezért adott pontra nézve az ezen adatokból számított ülepedés is jelentős hibát hordozhat, így az eredmények értékelését első lépésben területi átlagban és hosszabb időszakra (nap) érdemes elvégezni.

A terjedési modellszámítások eredményei: szennyezőanyag-terjedés

A FLEXPART terjedési modell szerint a radioaktív szennyezés a reaktorbaleset utáni első két napon északi, északnyugati irányban kezdett haladni, nem túlságosan magas légrétegekbe eljutva. A radioaktív anyagok légköri koncentrációja maximális értékét a kibocsátási pont közvetlen közelében április 27-én érte el, ami például a Cs-137 izotóp esetén 100 m-es magasságban csaknem 0,7 ppt-nek adódott.

A szennyező anyag vertikális irányú eloszlására a konvektív folyamatok voltak a legnagyobb hatással az által, hogy tulajdonképpen percek alatt elkeverték a troposzféra teljes vertikumában a radioaktív részecskéket. Emiatt azután a kezdeti, nagytérségű mozgások által kialakított egyenletesen emelkedő vagy éppen süllyedő részecskehalmozatok gyorsan különböző áramlási viszonyokkal rendelkező légrétegekbe kerülnek. Így például már 26-án kimutatható volt radioaktivitás Délnyugat-Ukrajnában is, annak ellenére, hogy a vezető áramlás ekkor még egyértelműen északi, északnyugati irányba vitte a felhőt. A konvekció, különösen az időszak első felében, a közép-kelet-európai régióban nagy területen volt az időjárás meghatározója, ami egyébként a legnagyobb bizonytalanságot is jelenti az előrejelzésekben. A későbbiekben azonban – a jelentősebb vertikális mozgások hiányában – már főként kisebb magasságokban maradtak a radioaktív elemeket szállító légelemek, ezért *az Ukrajnától távol eső területeken megjelenő szennyeződés elsősorban az első néhány nap emissziójából származhatott*.

A radioaktív részecske-koncentráció alakulására hazánk térségében is meghatározók voltak a megjelenő szervezettebb zivatarrendszerek. Április 29-én, a katasztrófa utáni harmadik napon ért hazánk fölé az első nagyobb radioaktivitással bíró légtömeg, amely éppen a délkeletről északnyugat felé mozgó zivatarokkal találkozott. Ennek hatására nyugati határainknál, illetve Ausztriában jelentős mennyiségű szennyező anyag mosódott ki az intenzív csapadékkal, a felhő maradék része pedig nyugat felé húzódott. Ezt szemlélteti a 3. és 4. színes *ábra* az első belső borítón. Ez után, május 1-jére már a Kárpát-medence fölött is nagy koncentrációban volt jelen radioaktív aeroszol, ami ezúttal keleti irányból közelítette az országot. A nagy számban kialakuló záporok, zivatarok hatására jelentős mennyiség ki is ülepedett, ennek térbeli eloszlása azonban rendkívül szeszélyes volt, mert itt már nem szervezett zivatarrendszerekről volt szó. Május 2-től a csapadéktevékenység csökkenésével csökkent a kiülepedés is, ezáltal egyenletesebbé, egyben magasabbá is vált a radioaktív elemek légköri koncentrációja. Harmadika után dél, délkelet felől érkezett további szennyezett levegő, különösen a Dunántúl fölé, de a nedves ülepedés újfent inkább a délnyugati, nyugati szomszédainknál volt jelentős. Ötödikétől azután keletiesre fordult az uralkodó áramlás, amivel még további szennyezés érkezett, de egyre csökkenő koncentrációban. Ezen a ponton egy másik szempontból kell felhívunk a figyelmet a meteorológiai modellszámítások bizonytalanságára. Nevezetesen a nagytérségű áramlásba ágyazódott rövid hullámok, illetve az össze- és szétáramlási zónák helyzetében előfordulhatnak néhány 10, esetleg 100 km-es eltérések, valamint egy-két óras különbségek a valósághoz képest. Emiatt ugyanilyen nagyságrendű hibákkal lehet számolni a szennyezőanyag-felhő helyzetében is, ami – mint látni fogjuk a következő szakaszban – közvetetten kihatással van az ülepedésre is.

2. táblázat

A kiülepedett radioaktív anyagok mért és a modellel számolt aktivitása négyzetméterenként a három legjelentősebb ülepedéssel jellemezhető napon		
település és időpont	mért aktivitás (Bq/m ²)	modellezett aktivitás (Bq/m ²)
Siófok		
1986. április 30.	441	4 346
1986. május 1.	2 040	20 550
1986. május 2.	4 760	74
Pécs		
1986. április 30.	101	72
1986. május 1.	50 266	15 061
1986. május 2.	17 850	36 757
Budapest		
1986. április 30.	6 300	3 965
1986. május 1.	17 000	26 027
1986. május 2.	19 300	0

A terjedési modellszámítások eredményei: száraz és nedves ülepedés a Kárpát-medence térségében

Az előző fejezet alapján a Kárpát-medence fölé a terjedési modell eredményei alapján az addigra már nagy területre diffundált szennyezőanyag-felhő április 28-ról április 29-re virradó éjszaka érkezett meg északi irányból, és a 29-ét követő három napon folyamatosan emelkedett a radioaktív aeroszolkok összegzett ülepedésének mértéke, május 1-jén produkálva a legnagyobb napi összeget. Május 2. és 4. között csökkenés figyelhető meg, majd 5-én ismét kis mértékű emelkedés mutatkozott. Ennek okait mind a nagytérségű, mind a helyi időjárási helyzetben kell keresnünk.

Az összes ülepedés időbeli menetéhez képest a száraz és a nedves kihullás aránya korántsem változott egyenletesen az időszak során. Az első napon a teljes depozíciónak még körülbelül 39%-a származott a száraz ülepedésből, míg május 1-jén a maximális napi összeg kevesebb, mint 9%-a, azaz *sokkal nagyobb szerepet kapott a csapadékképződés a légkörben tartózkodó szennyező anyagok kihullásában*. Ezt követően stabilabbá vált a légállapot, csökkent a csapadékhajlam, így ismét nőtt a száraz ülepedés aránya. Az, hogy a legnagyobb ülepedéskor meghatározó volt a nedves kihullás aránya, arra enged következtetni, hogy a radioaktív anyagok ülepedésének modellezésében döntő fontosságú a csapadék pontos előrejelzése, különös tekintettel a lokális skálán jelentkező konvektív folyamatokra: a záporokra és zivatarokra. A számítási eredmények alapján ugyanis, *ha a konvektív csapadékot nem jelezte volna előre az időjárási modell (hanem csak a nagytérségű, frontális csapadékképződés), akkor a vizsgált 10 napos időszakra összegezve a teljes ülepedésnek mintegy 85%-át elvesztettük volna a számítási eredményből!*

A teljes depozíció aktivitása az ország területén a vizsgált 10 napos időszak alatt 3621 Bq/m²-nek adódott.

Ez tömegegységben kifejezve azt jelenti, hogy *az erőműből összesen kibocsátott anyag körülbelül 0,02%-a hullott ki Magyarország térségében április 29. és május 5. között*. Ha pedig aktivitásban fejezzük ki ezt az arányt, akkor 0,06%-ot kapunk, ami az ukrán, fehér-orosz területek adataihoz képest csekély mennyiség.

Ami a kiülepedő szennyezés anyagi minőségét illeti, legnagyobb tömegben a Cs-137 izotóp ülepedett, míg aktivitásukat tekintve a legnagyobb veszélyt a Ce-144 és a Cs-137 jelentették. Hazánk területén a legkisebb tömegben a jód és a plutónium izotópjai ülepedtek ki, ez utóbbi mennyisége a számítási hibahatárt sem érte el.

Összehasonlítva eredményeinket a mérési adatokkal (2. táblázat) a legfeltűnőbb tény az, hogy a mérések igen változékony tér- és időbeli adatokat szolgáltatottak, ami szintén a szeszélyes eloszlású csapadéktevékenységhez fűződő erős kapcsolatra utal. Mivel a konvektív csapadék előrejelzése egy adott pontra nézve igen bizonytalan, így az összehasonlítás során a modellezett értéket nem feltétlenül a mérési pontnak megfelelő helyről, hanem egy olyan, ahhoz közeli rácsponttól számoltuk, ahol a modell szerint volt csapadékhullás. Ennek erősségében még így is jelentős eltéréseket kaptunk a valósághoz képest: volt, amikor alábecslést (például Siófokon vagy Budapesten, május 2-án), és volt, amikor jelentős fölébecslést.

A május 1-jére számított száraz és nedves ülepedés közti különbséget szemlélteti az 5.a–b színes ábra az első belső borítón. A száraz ülepedés jellemzően nagy területre kiterjedő, egyenletesen gyenge terhelést jelent, míg a nedves kihullás kis körzetekben okoz kiugróan magas aktivitásértékeket. A balesetet követő 10. napon (a számítások végén) a Cs-137 száraz és nedves ülepedését mutatja a 6. színes ábra az első belső borítón.

A hazai ülepedés becslésének pontosítása

Az előzőekben ismertetett modellezési rendszerben a radioaktív anyagok ülepedésének becslése alapvetően kétféle hibával is terhelt. Egyrészt a depozíció folyamatának parametrizációja a FLEXPART-modellben nyilvánvalóan egyfajta közelítésnek tekinthető, hiszen az alapvető fizikai (és kémiai) törvényszerűségek mellett sok empirikus összefüggés is szerepel benne. Másrészt a meteorológiai modell is visz bizonytalanságot a számításokba, ebben az esetben nem is csekély mértékben a csapadék-előrejelzés hibáján keresztül. Jelen tanulmány keretei között ez utóbbi hibaforrás mérséklésére vállalkozhattunk.

A légköri állapot leírására alkalmazott WRF-modell – úgy, mint hasonló más modellek is – a különböző tér- és időskálájú folyamatokat egy adott felbontás és adott kezdeti és peremfeltételek mellett eltérő mértékű bizonytalansággal képes leírni. A jelenlegi 4 km-es horizontális felbontáson egy ciklon és annak frontjai kellőképpen reprezentáltak a rácshálón, így az azokból származó csapadékképződés előrejelzésében elvár-

ható a minél nagyobb tér- és időbeli pontosság is. Más a helyzet a rácsávolsággal összemérhető karakteristikával rendelkező konvektív folyamatokkal, amelyek modellezése már akkor sikeresnek mondható, ha például egy Dunántúlnak megfelelő területen a záporos, zivataros területek nagysága a modellben közelítőleg egyezik a konvekció valós kiterjedésével. Ebből az is következik, hogy csak egy adott földrajzi pontot és adott időpontot nézve nem várható el a valósággal való egyezés. Mivel az ülepedések mérése pontszerűen történik, ezért a depozíció becslése akkor lenne a meteorológiai modelltől kvázi független, ha legalább ezekben a pontokban az előrejelzett csapadékmennyiség térben és időben egyezne a mérésekkel. Ez, mint láttuk, önmagában nem lehetséges. A szóban forgó feladat természete egy korrekció alkalmazását kívánta a csapadémezőre nézve, amelynek lépéseit a következőkben vázoljuk fel.

A FLEXPART minden rácspontban – többek között – a meteorológiai modell csapadékösszegét is felhasználva becslül egy száraz és nedves ülepedési értéket. Mivel ez a közelítés egy széles tartományban monoton (növekvő) függvénykapcsolattal van reprezentálva, ezért van értelme annak, hogy a számított értékekből egy redukált ülepedést származtassunk úgy, hogy az eredeti csapadék helyett 1 mm-es mennyiséggel számolunk. A nedves kihullás becslése a következő képlettel történik:

$$W = A P_m^B f(RH), \quad (1)$$

ahol P_m modellezett csapadékösszeg, RH relatív nedvesség, A és B konstansok, f a relatív nedvesség függvénye.

Az eredeti modellszámításból ismeretes P és W , valamint a B konstans. Az A értéket viszont változóknak fogjuk tekinteni, ezért kifejezzük (1)-ből, majd a kapott alakot visszaírjuk a már redukált (1 mm csapadékra vonatkozó) ülepedés képletébe:

$$W_{red} = \frac{W}{P^B} 1^B f(RH) = \frac{W}{P^B} f(RH). \quad (2)$$

A (2) összefüggés alapján azt kapjuk meg, ha minden rácsponton 1 mm csapadék hullott volna, akkor mennyi lett volna a nedves ülepedés. Ezzel párhuzamosan előállítjuk az archív adatokból rendelkezésre álló, tényleges mérésekből a rácspontokra interpolált csapadékmezőt. Végül minden rácspontban (2) felhasználásával megkapjuk a módosított nedves kihullást (de most már a valós csapadékra vonatkozóan):

$$W_{új} = \frac{W_{red}}{P_r^B} f(RH). \quad (3)$$

A továbbiakban ezt a nedves ülepedést hasonlítjuk össze a mérésekkel.

A 3. táblázat a 2.-hoz képest nagyobb mértékű egyezést mutat, azzal együtt, hogy az ülepedés parametrizációjából származó hiba továbbra is jelen van. Emellett utalnunk kell az előző szakasz végén tett

3. táblázat

A kiülepedett radioaktív anyagok mért és a modell által számolt aktivitása négyzetméterenként 1986. május 1-jére, a legjelentősebb ülepedéssel jellemezhető napra

település	aktivitás (Bq/m ²)		
	mért	modellezett	újraszámított
Siófok	2 040	20 550	820
Pécs	50 266	15 061	47 058
Budapest	17 000	26 027	10 570

megjegyzésre is, nevezetesen a zivatarokénál nagyobb skálájú folyamatok előrejelzésének bizonytalanságára. Ha a rendelkezésünkre álló szórványos méréseket vesszük alapul, a koncentrált szennyezőanyag-felhő a modellezettnél kissé északabbra vonulhatott el, ami egy, a Keleti-Kárpátok fölötti divergens zóna áramlásmódosító hatása következtében történhetett. Lehetséges, hogy ezt a meteorológiai modell kissé délebbre helyezte. Többek között ez is lehet a magyarázata az alábecsült siófoki adatnak és a fölébecsült pécsi ülepedésnek. A legnagyobb ülepedést mutató május 1-jei összegzett nedves ülepedés országos eloszlását a 7. színes ábra a 24 óra alatt lehullott csapadék mennyiségét pedig a 8. színes ábra (mindkettő az első belső borítón) mutatja.

Összefoglalás

A tanulmányban a modern meteorológia eszközeivel vizsgáltuk a 30 éve történt csernobili baleset időjárás körülményeit és a kibocsátott szennyező anyagok terjedését. Megállapítható, hogy a zivatarok által okozott nedves ülepedés jelentős szerepet játszott a megnövekedett radioaktív sugárterhelésben. Azok a területek, ahol a szennyező anyag légköri jelenléte idején zivatarok voltak, a száraz ülepedéshez képest akár 3-5 nagyságrenddel is nagyobb dózist kaphattak. Így óriási szerencse, hogy az erőműhöz közeli Kijev csak kevés szennyezést kapott, míg távolabbi területeken volt jelentősebb a szennyezés. A zivatarok elsősorban a Kárpátok, majd az Alpok térségében jelentek meg, főként május elsején. A száraz ülepedés Magyarország területének nagyobb részén nem okozott rendkívül magas kihullást, és főként május 2-tól játszott szerepet, amikor tartósan keletiesre fordult az áramlás és stabilizálódott a légállapot. A csernobili baleset kapcsán jól látható, hogy az összetett légköri folyamatok milyen jelentős szerepet játszanak a szennyező anyagok tér- és időbeli eloszlásának alakulásában.

Irodalom

1. A. András: Radiological Consequences of the Chernobyl Accident for Hungary. *Radiation Protection Dosimetry* 19/4 (1987) 239–245.
2. I. Fehér: Experience in Hungary on the radiological consequences of the Chernobyl accident. *Environmental International* 14 (1988) 113–135.

3. Szatmáry Zoltán, Aszódi Attila: *Csernobil. Tények, okok, biedelmek*. Typotex Kiadó, Budapest 2014.
4. V. Drozdovitch, A. Bouville, N. Chobanova, V. Filistovic, T. Ilus, M. Kovacic, I. Malatova, M. Moser, T. Nedveckaite, H. Völkle, E. Cardis: Radiation Exposure to the population of Europe following the Chernobyl accident. *Radiation Protection Dosimetry* 123/4 (2007) 515–528.
5. Országos Meteorológiai Szolgálat (szerk. Simon Antal): A csernobili atomerőmű balesetével kapcsolatos légköri radioaktivitás és meteorológiai mérések előzetes eredményei. *Meteorológiai Tanulmányok* 60 (1986).
6. P. D. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137/656 (2011) 553–828.
7. W. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, W. Wang: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Technical Note* NCAR/TN-475+STR, DOI: 10.5065/D68S4MVH (2008).
8. A. Stohl, M. Hittenberger, G. Wotawa: Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiment data. *Atmos. Environ.* 32 (1998) 4245–4264.
9. A. Stohl, D. J. Thomson: A density correction for Lagrangian particle dispersion models. *Bound.-Layer Meteorol.* 90 (1999) 155–167.
10. A. Stohl, C. Forster, A. Frank, P. Seibert, G. Wotawa: Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.* 5 (2005) 2461–2474, DOI: 10.5194/acp-5-2461-2005.
11. *Chernobyl. Assessment of Radiological and Health Impacts. 2002 Update of Chernobyl: Ten Years On*. Nuclear Energy Agency Organization for Economic Cooperation and Development (2002) <https://www.oecd-nea.org/rp/reports/2003/nea3508-chernobyl.pdf>

IN MEMORIAM...

CENTENÁRIUMI MEGEMLEKEZÉSEK 2016 – 2. RÉSZ

– száz éve született angolszász fizikusok

Radnai Gyula
ELTE, Fizikai Intézet

E megemlékező tanulmány első részében (*Fizikai Szemle* 2016/7–8) öt olyan tudósról volt szó, akik 100 éve haltak meg. Ezután olyanokkal foglalkozunk, akik 100 éve születtek. Először négy angolszász tudós életpályáját tekintjük át. Mindenek előtt azét az amerikai fizikusét, aki 1960-ban az *American Journal of Physics*, majd 1961-ben a *Scientific American* hasábjain emlékezett meg őszinte elismeréssel Eötvös Loránd gravitációs méréseiről. Előbbit a *Magyar Fizikai Folyóirat*, utóbbit a *Fizikai Szemle* közölte magyar fordításban. Ez utóbbiból idéznék most:

„A gravitációs gyorsulás állandó voltát sokszor ellenőrizték, a legtokéletesebbek ezen a téren a magyarországi Eötvös Loránd 1889 és 1908 közt végrehajtott rendkívüli pontosságú kísérletei. A kísérletek időpontja sok fizikust arra az elképzelésre készítetett, hogy Eötvös munkája döntő módon befolyásolta *Albert Einstein*t, aki 1908 és 1915 között állította fel az általános relativitás elméletét. A tény az, amint azt Einstein 1934-ben megírta, hogy neki nem volt komoly kétsége »a gravitációs gyorsulás állandó volta felől Eötvös csodálatra méltó

kísérletei eredményének az ismerete nélkül sem, melyeket – ha emlékezetem nem csal – csak később ismertem meg.« Mindazonáltal teljesen jogos azt mondani, hogy ha az Eötvös-kísérletek bármilyen negatív eredménnyel jártak volna, minden fizikus hallott volna néhány napon belül a megdöbbentő hírről, és az általános relativitáselmélet egész alapja megdőlt volna még az elmélet megszületése előtt. Ebből következik, hogy minden olyan kísérlet, amely a gravitációs gyorsulás állandó voltát az Eötvös-kísérletekénél nagyobb pontossággal bizonyítja, Einstein elmélete mellett szolgált alapvető bizonyítékot. Eötvös készüléke a gyorsulás állandó voltát $5 \cdot 10^{-7}$ százalék pontossággal határozta meg... Meglepő módon a modern technika teljes igénybevételével Eötvös eredményeinek pontosságát csak egy 50-es faktoral sikerült megjavítanunk. 10^{-8} százalékos pontossággal állíthatjuk, hogy a réz és az ólom gravitációs gyorsulása állandó. Reméljük, hogy a hamarosan megkezdendő új kísérletsorozatban a pontosságot még egy 10-es faktoral növelni tudjuk.» (*Fizikai Szemle* 1962/4)

Végül is három nagyságrenddel sikerült növelni Eötvös Budapesten elért mérési pontosságát Princetonban, több, mint fél évszázaddal később.

Kinek sikerült ez, ki volt ez a fizikus?

Eötvös gravitációs kísérleteinek amerikai csodálója: Robert H. Dicke (1916–1997)

A Missouri-beli Louis-ban született az Egyesült Államokban. Apja szabadalmi ügyintéző volt – akárcsak Albert Einstein a század elején. Egyetemi MSc-fokozatot



Radnai Gyula ny. egyetemi docens, a fizikai tudományok kandidátusa, matematika-fizika tanári szakon végzett 1962-ben. Az ELTE Kísérleti Fizika tanszékén kapcsolódott be a tanárképzésbe, a fizika hazai kultúrtörténetének kutatásába pedig *Simonyi Károly* ösztönzésére fogott a '70-es években. *Physics in Budapest* című – *Kunfalvi Rezsővel* közös – könyve, valamint a *Fizikai Szemle*ben és a *Természet Világában* megjelent számos, ma már az interneten is elérhető publikációja hitelesíti ezt a tevékenységét.