

# LÉGKÖRI KÁOSZ: AZ IDŐJÁRÁS-ELŐREJELZÉSEK BIZONYTALANSÁGÁNAK BIZONYOSSÁGA

Götz Gusztáv

a földrajztudomány doktora, az Országos Meteorológiai Szolgálat nyugalmazott elnökhelyettese

Bevezetés

A 20. század nagy természettudományi felfedezéseinek kétségtelenül egyike volt az a felismerés, hogy determinisztikus rendszerek is tanúsíthatnak irreguláris, látszólag véletlenszerű viselkedést. A háromszáz éves klasszikus mechanika az időbeli folyamatoknak csak három állandósuló formáját ismerte: a változatlan (stacionárius) állapotot, a periodikus állapotváltozást, valamint az egyidejűleg több, egymástól lineárisan független alapprofrendenciával jellemezhető kváziperiodikus állapotváltozást. Azután kiderült, hogy e három reguláris („jól viselkedő”) változás mellett létezik az említett negyedik forma is: az idő múlásával önmagát soha pontosan nem ismétlő, aperiodikus állapotváltozás: ez a nemlineáris rendszerekre jellemző „különös viselkedés” a *determinisztikus káosz* nevet kapta. Fény derült arra is, hogy a kaotikus viselkedés lehetősége meglepően széles körben áll fenn: folytonos idejű dinamikai rendszereknél már három szabadsági fok elegendő a káosz kialakulásához, míg diszkrét idejű leképezések esetében egyetlen szabadsági fokú rendszer viselkedése is lehet kaotikus, ha a leképezés nem invertálható (tehát a  $(k+1)$ -edik időponthoz tartozó  $x_{k+1}$  állapot két korábbi, egymástól eltérő  $x_k$  állapotból is létrejöhet).

A kaotikus viselkedés alapvető sajátossága a *kezdőfeltételekre mutatott érzékeny-*

*ség*. Tekintsünk két, egymáshoz közeli (méréseink pontatlansága miatt egyformán valószínű)  $x_1(0)$  és  $x_2(0)$  kezdeti állapotot, amelyek a fázis térben az idő múlásával a rendszert kormányzó determinisztikus egyenleteknek megfelelően változnak. Valamely  $t$  idő elteltével e két állapot eltérése  $|x_2(t) - x_1(t)| / |x_2(0) - x_1(0)| \sim \exp(\lambda t)$  lesz, ahol kaotikus rendszer esetében a Ljapunov-exponensnek nevezett kitevő  $\lambda > 0$ . A mérési pontosság korlátozott volta révén ez az exponenciális ütemű hibanövekedés eleve behatárolja a rendszer jövőbeli állapotának előrejelezhetőségét még abban az esetben is, ha a rendszer viselkedését tökéletesen tudjuk szimulálni.

A determinisztikus rendszerek előrejelezhetősége évszázadokon keresztül a tudomány egyik alapvető elve volt. E nézőpont korlátozott érvényességének felismerését az 1980-as évek végén sok neves kutató paradigmaváltásként értékelte. Kijelentették, a 20. század tudományát három dolog teszi majd emlékezetessé: a relativitáselmélet, a kvantummechanika és a káosz. Állították, hogy a relativitáselmélet végzett az abszolút tér és idő létezésének newtoni illúziójával, a kvantumelmélet megsemmisítette az ellenőrizhető mérési eljárás lehetőségének szintén newtoni álmát, a káoszelmélet pedig leszámolt a determinisztikus előrejelezhetőség laplace-i képzetével. Más tudósok sokkal visszafogottabban fogalmaztak,

mondván, hogy a káosz felismerése mindössze egy több évszázados tévedést korrigált, amely nem nyújt teljesen új világképet; új törvények felfedezése nem kapcsolódik hozzá, hanem csak az ismert törvények eddig el sem képzelt bonyolultságú megnyilvánulásával szembesít.

Bárhogyan értékelünk, az tény, hogy a meteorológia – amelynek egyik legfontosabb gyakorlati feladata az időjárás előrejelzése – arra kényszerült, hogy teljesen új alapokra fektesse a prognosztikához történő elméleti hozzáállását. Az időjárás-előrejelzések hibáinak bizonyossága kötelező elvé tette, hogy *egyetlen prognózis sem tekinthető teljesnek a prognózis megbízhatóságának egyidejű prognosztizálása nélkül*. Más megfogalmazásban ez az elv azt jelenti, hogy időjárás-előrejelzéseket csak *valószínűségi formában* szabad kibocsátani. Az elv gyakorlati érvényesítésének technikája az ún. *ensemble prognosztika*: amikor egyetlen előrejelzés helyett az egyformán lehetséges kezdőfeltételek halmazából több előrejelzés *együttesét* készítjük el, és az eredmények szóródásának mértékéből következtetünk az adott léggöri állapot előrejelezhetőségére.

A káosz gyakran definiálják az alacsony dimenziójú rendszerek bonyolult állapotváltozásaként. Ezért mielőtt az ensemble prognosztika részleteire térünk, tisztáznunk kell: a léggör mint sok szabadsági fokú geofizikai folyadék *valóban* a kaotikus viselkedésű dinamikai rendszerek családjába tartozik-e?

*Kaotikus viselkedésű-e a léggör?*

A  $t \rightarrow \infty$  során aszimptotikusan beálló  $\mathbf{x}(t)$  állandósult viselkedés (végső állapot) különböző formáinak elemzése során feltételezzük, hogy  $\mathbf{x}(t)$  értéktartománya korlátos, az állapotváltozást definiáló dinamikai rendszer pedig vagy autonóm:  $d\mathbf{x}/dt = \mathbf{f}(\mathbf{x})$  vagy  $T$  periódusidővel periodikus nemautonóm:

$d\mathbf{x}/dt = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t)$  ahol  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, t+T)$ . Az állandósult viselkedés geometriájának ábrázolására az  $\mathbf{x}$  állapotvektor összetevői által kifeszített absztrakt tér, a fázistér (vagy állapottér) szolgál, amelyben egy pillanatnyi  $\mathbf{x}$  állapot pontként, az  $\mathbf{x}(t)$  állapotváltozás pedig folytonos idejű dinamikai rendszerek esetében görbeként, diszkrét idejű  $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{M}(\mathbf{x}_k)$  leképezéseknél diszkrét pontok sorozataként jelenik meg. Az idő múlásával e görbék vagy pontsorozatok (pályák) a fázistérnek egy meghatározott alterében elhelyezkedő vonzó halmazra, az ún. attraktorra húzódnak rá, majd örökre azon maradnak. Jól viselkedő rendszereknél ezek a halmazok hagyományos euklideszi alakzatok: stacionárius állapotok esetében egyensúlyi pontok (ún. fixpontok), periodikus állapotváltozásoknál zárt görbék (ún. határciklusok),  $q$  számú alappfrekvenciával jellemezhető kváziperiodikus viselkedésnél pedig egy  $q$ -dimenziós törús felületére ráfonódó görbék. Ezzel szemben a kaotikus rendszerek attraktorai különös, tört dimenziójú fraktál alakzatok: véges térre korlátozódó, végtelen hosszúságú, önmagukat fölé számtalanszor visszahajló, de önmagukat sehol nem érintő görbeseregek, „lehetővé téve”, hogy az állapotváltozás ne ismétlje magát. Mindezek a megállapítások olyan rendszerekre alapozódtak, amelyek mögött egyszerű törvények álltak, a dinamikai rendszerek szabadsági fokainak száma kevés (az  $\mathbf{x}$  állapotvektor dimenziója alacsony) volt. Lorenz (1963) például egy disszipatív determinisztikus rendszerben a kaotikus végső állapot lehetőségét elsőként a Rayleigh-Bénard-féle konvekció olyan egyszerű modelljével demonstrálta, amelyben az  $\mathbf{x}$  állapotvektornak mindössze három összetevője volt.

A globális léggör semmiképpen nem tartozik azok közé a kevés összetevőből álló rendszerek közé, amelyek elemzéséből a káosztudomány felépült. A világ nagy meteorológiai központjai az időjárás előrejel-

zéséhez mintegy 600 000 megfigyelés alapján, 12 óránként a háromdimenziós légkör  $10^7$  diszkrét pontjára interpolálva írják elő 6–8 állapotjelző kezdeti értékeit. Noha az állapotváltozásokat alapvetően a fizika megmaradási törvényei kormányozzák, a különböző skálájú folyamatok között kialakuló kölcsönhatások, valamint a felszíni geoszférák által kifejtett termikus és mechanikai kényszerek figyelembevételére arra vezet, hogy egy-egy 10 napra szóló számszerű előrejelzés elkészítése  $2 \times 10^{14}$  számú matematikai művelet elvégzését igényli. A légkör tehát nem alkot autonóm rendszert, sőt időfüggő termikus gerjesztése (például a naptevékenység vagy a vulkántevékenység révén) véletlenszerű összetevőt is tartalmaz. Ezért a légkörnek a valóságban is megfigyelhető időbeli viselkedése a részleteket tekintve szükségszerűen *lényegesen bonyolultabb a káosznál*.

Tél és Gruiz (2002) meghatározása szerint „... egyjelenséget *csak akkor tekinthetünk kaotikusnak, ha sikerült olyan egyszerű modellt is találni, amely a szabálytalan viselkedést kellő pontossággal visszaadja*”. Légköri káoszról éppen e kijelentés alapján, nevezetesen az alacsony dimenziójú autonóm dinamikai modellekkel végzett kísérletek eredményei nyomán beszélhetünk. Ezek a modellek a nagy prognosztikai modellek drasztikus egyszerűsítésével állnak elő: dimenziójukat a kutatók 100, sőt 10 alá redukálták. Ilyen modellekkel természetesen nem lehet az aktuális folyamatok részleteit hűen reprodukálni, ezzel szemben megbízhatóan szimulálhatók a légköri folyamatok *alapvető dinamikai jellemvonásai*: a legfontosabb energiaátalakulási és hőátviteli mechanizmusok, valamint a folyamatok aperiodikus jellege. Az elmúlt évtizedek során nagyon sok ilyen, az oksági összefüggések feltárására kiválóan alkalmas alacsonyrendű általános légköri modellt szerkesztettek. Mindegyikük azt tanúsította, hogy a

kontrollparaméterek értékeinek a térben differenciált hőközlés és a sűrűdésos disszipáció megfigyelt szintjét reprezentáló megválasztása esetén a rendszer kaotikusan viselkedik. Ez arra utal, hogy a véletlenszerű jelenségekkel is terhelt (a prognosztikai egyenletekben sztochasztikus tagok beépítésével kezelt) valóságos folyamatok mögött – meghatározó tényezőként – *a szigorú értelemben vett determinisztikus káosz áll*. Alátámasztani látszik ezt a megállapítást a nemlineáris dinamika egyik érdekes eljárása, amely lehetővé teszi, hogy az  $x$  állapotvektor egyetlen  $x$  összetevőjének hosszú idősora alapján következtetéseket vonjunk le a rendszer (számunkra ismeretlen) attraktorára vonatkozóan. Az 1980-as években az időjárási és éghajlati attraktorok keresésére számos kísérlet történt, és ezek közül több is arra az eredményre vezetett, hogy ezek a légköri attraktorok káoszra utaló fraktálok, dimenziójuk pedig 10 alatt van. Az eljárás (amelynek meteorológiai alkalmazhatóságát többen is vitatják) természetesen nem árul el semmit arról, hogy a rekonstruált attraktorhoz milyen alakú kormányzó egyenletek tartoznak, mindössze annyit sejtet, hogy a légkör dinamikája talán sokkal egyszerűbb annál, ahogyan azt a mai világrépünkhöz igazodva látjuk. És – *Teller Ede* gondolatát idézve – éppen ez adja a fizika szépségét: *„Az a szép, amikor valamiről, ami komplikáltnak tűnik, kiderül, hogy nagyon egyszerű. Ha induláskor hajlandók vagyunk elfogadni egy bizonyos komplexitást, magasabb szintre jutva egyszerűség lesz a jutalmunk.”* (Marx, 2000)

Az alacsony dimenziójú modellekkel elvégzett numerikus kísérletek eredményei arra tanítanak meg bennünket, hogy az *időjárás* aperiodikus ingadozásainak nem szükségszerű feltétele a légkörre ható külső kényszerek szabálytalan váltakozása, de még az sem, hogy valamelyik külső kényszer egyáltalán megváltozzék. Ennek az ún. *szabad változékonyságnak* a során előfor-

dulnak szélsőséges időjárás események is, amikor a rendszer különös attraktorán bolyongó állapotpont a fázistér ritkábban látogatott tartományait keresi fel. Szabad változékonyság jellemzi a hosszabb időszakokra átlagolt léggöri állapotok (az *éghajlati állapotok*) ingadozásait is: az általános léggöri hétközi állapotok két fő metastabilis egyensúlyi helyzetének (a mérsékelt földrajzi szélességek zonális és meridionális áramlási képeinek) a váltakozását, az éghajlati állapotok évek és évtizedek közötti ingadozását, sőt a geológiai időskálákon jelentkező *klímaátmeneteket* is, amilyenek például a földtörténeti negyedidőszak eljegesedési és interglaciális szakaszai voltak. A klímaátmenetek ténye arra mutat, hogy az éghajlati rendszernek *több* attraktora létezik, a vonzási tartományait pedig – a numerikus kísérletek szerint – fraktál medencehatár választja el. Ezzel belép a klímadinamika problémakörébe az a jelenség, amelyet a nemlineáris rendszerek elméletében a *konzolidálódott végső állapot érzékenysége* neveznek: a medencehatár közelében nehéz eldönteni, hogy az állapotpont melyik attraktor vonzási tartományában helyezkedik el, és kis külső hatás is elegendő lehet, hogy az állapotpontot a medencehatár átlépésére kényszerítse. A közel periodikus jellegű glaciációs ciklusok esetében a feltételezések szerint ilyen indító szerephez juthattak a Föld orbitális paramétereinek periodikus változásai (Götz, 1995).

Az extrém időjárás események halmozódásának vagy az éghajlati idősorokban jelentkező, tartósabban egyirányú trendeknek oka tehát nem feltétlenül külső eredetű. Ennek a ténynek napjainkban különös aktualitást ad az *antropogén klímaátmenet* ma még megválaszolatlan dilemmája: vajon elkezdődött-e már az emberi tevékenység okozta globális felmelegedés, vagy az elmúlt évtizedekben megfigyelt tendenciák még beleférnek a szabad változékonyság keretei közé?

### *Ensemble előrejelzések*

Az elméleti alapok lefektetésével és az elektronikus számítástechnika kibontakozásával az időjárás objektív előrejelzésének feltételei a 20. század közepére teremtődtek meg. A nagytérű léggöri folyamatokat kormányzó parciális differenciálegyenletek numerikus integrálásával, *Neumann János* közreműködésével, 1950 tavaszán készült el az első négy 24 órára szóló számszerű prognózis. E sikert követően az előrejelzések elkészítésének százéves hagyományát – ami főként tapasztalati módszereken, az időjárás térképeken analizált léggöri képződmények (ciklonok, anticiklonok, frontok) áthelyeződésének szubjektív becslésén alapult – egyre nagyobb mértékben váltották fel a léggöri dinamikájára építő objektív eljárások. Az időjárás-előrejelzések ma már szinte a világon elsősorban hidrodinamikai modellek segítségével, a szubjektív elemek kizárásával készülnek.

A fejlesztés útja napjainkban három fő irányban jelölhető ki. Először állandó kutatómunkát igényel a valóságos folyamatok és a felszíni kölcsönhatások minél tökéletesebb matematikai leírása: a „modellfizika” javítása, a felbontóképesség növelése. Mivel a léggöri jelenségek a térbeli nagyságrendek igen széles skáláját ölelik fel, második irányként fontos feladat az előrejelzési modellel még felbontható folyamatok, valamint az ennél kisebb méretű fizikai folyamatok (a domborzati hatások, a planetáris határrétegben kialakuló folyamatok, a sugárzásátvitel, a felhőképződés, a hidrológiai ciklus) egymásra gyakorolt hatásának szimulálása. Például egy zivatarfelhő fejlődését a nagytérű léggöri állapot határozza meg, a zivatarfelhőben lezajló függőleges tömegátrendeződés pedig módosítja nagytérű környezetének állapotát. Az ilyen típusú módosításokat ún. parametrizációs eljárásokkal vesszük számításba, amelyek véletlenszerű

elemeket („sztochasztikus fizikát”) is tartalmaznak. Végül a harmadik fejlesztési irány az előrejelzés kezdeti feltételeinek adekvát, a prognosztikai modell dinamikájához igazított megadása: az inicializálás. A hatalmas költséggel kiépített globális meteorológiai megfigyelő rendszer a tér különböző pontjaiból és különböző időpontokból szolgáltat információt. Kezelésének legfejlettebb módszere az ún. négydimenziós variációs adatasszimiláció, amelynek számítási igényére jellemző, hogy pár évvel ezelőtt egymagában meghaladta volna sok fejlett meteorológiai központ teljes számítógépes kapacitását.

Am minden erőfeszítés ellenére a *kezdeti feltételek abszolút pontos meghatározása irreális absztrakció*, a kis hibák exponenciális ütemű növekedése pedig azt eredményezi, hogy még egy fizikailag tökéletes modellel sem tudnánk a 2–4 hétnél távolabbi jövőre a légkör állapotát egy „vakprognózisnál” pontosabban előre megadni: a beválás átlagosan nem lenne jobb, mint egy véletlenszerűen kiválasztott állapot előrejelzésésként történő értelmezése. Következésképpen az időjárás-előrejelzések nem lehetnek kategorikusak, azokat – anélkül, hogy tagadnánk a jövőbeli állapotok determinált voltát – valószínűségi formában kell előállítani. Ennek az elvnek a szemléletében született meg – és vált pontosan tíz esztendővel ezelőtt az európai és az amerikai hivatalos előrejelzések operatív gyakorlatává – az *ensemble prognosztika*. Nevét onnan nyerte, hogy (a korábbiakkal ellentétben) nem egyetlen, a legjobbnak vélt kezdeti feltételből számított előrejelzés készül, hanem emellett a „kontroll előrejelzés” mellett még több párhuzamos előrejelzés *együttese* is, amelyek mindegyike ennek a „legjobb” kezdeti feltételnek a hibahatáron belüli módosításaiból (tehát ugyancsak lehetséges kezdőállapotokból) indul ki.

A kutatókat napjainkban is foglalkoztató kérdés, hogy miként történjen a módosított kezdeti feltételek együttesének kiválasz-

tása. Az egyik, mégpedig a legegyszerűbb eljárás a legjobbnak ítélt kiinduló állapot *véletlen perturbálása*. Ennek a technikának a követése eredményezi az ún. Monte Carlo-előrejelzéseket, mivel ez az eljárás áll a legközelebb a Monte Carlo-módszer eredeti jelentéséhez. A válogatásnak ez a módja azonban nem feltétlenül hatékony, aminek a következő magyarázata van. A hibák kaotikus rendszerekre jellemző exponenciális növekedésének oka az állandóan jelen levő dinamikai instabilitás, és a fázistérben 10 és 100 közé tehető azoknak az irányoknak az  $N$  számossága, amelyekben ennek az instabilitásnak a különböző formái lényeges hatással vannak a nagytérségű légköri folyamatok fejlődésére. Ugyanakkor a globális prognosztikai modellek dimenziója,  $n = 10^6 - 10^7$  (erre az  $n \gg N$  választásra a nemlineáris kölcsönhatások, a domborzati és más fizikai kényszerek adekvát leírása, továbbá a lokális megfigyelési adatok nagyobb interpolálási hibáktól mentes asszimilálása érdekében van szükség). Mármost felettébb valószínűtlen az, hogy ebben a  $10^6 - 10^7$ -dimenziós fázistérben néhány, véletlenszerűen kiválasztott perturbációnak lényeges vetülete esik a 10–100 instabilis irányra. Előfordulhat, hogy a véletlen perturbációk többsége stabilis irányokban képeződik le, ezért gyorsan csillapodik, és ezáltal az előrejelzések együttesének a bizonytalanságot jellemző szóródása irreálisan kicsi lesz.

Az instabilis fázistérbeli irányokba mutató, és ezért a leggyorsabban (optimális ütemben) növekedő perturbációk (hibák) kijelölésének ma két módszere ismert. Az egyiket az Egyesült Államok nemzeti időjárási szolgálatánál dolgozták ki; ennek lényege az, hogy a kontroll előrejelzés kezdeti feltételét véletlenszerűen perturbálják, majd ezeknek a perturbációknak a viselkedését több napon át figyelik. Ilyenformán 3-4 nap elteltével természetes úton szelektálódnak a leginkább életképes perturbációk – mondhatjuk azt is,

hogy az eljárás „kitenyészti” az optimális hibákat, ezért arra a *breeding módszer* néven szokás hivatkozni (Tóth és Kálnay, 1997).

Az Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ (az ECMWF, amelynek produktumai az Országos Meteorológiai Szolgálat 12–48 órás és 3–10 napos prognózisainak is egyik alapjául szolgálnak) a lineáris algebraát alkalmazva azonosítja az optimálisan viselkedő hibákat (Molteni *et al.*, 1996). A Központban a referencia előrejelzés fázistérbeli nemlineáris  $\mathbf{x}(t)$  pályájára érintőlegesen egy kis kezdeti  $\mathbf{y}(t_0)$  perturbáció időbeli fejlődését a linearizálással nyert  $\mathbf{y}(t) = \mathbf{A}(t, t_0)\mathbf{y}(t_0)$  egyenlet segítségével írják le, ahol az  $\mathbf{A}$  tangens operátor a perturbációnak az  $\mathbf{x}(t_0)$  ponthoz tartozó lineáris vektortérét az  $\mathbf{x}(t)$  ponthoz tartozó lineáris vektortérre képezi le. A perturbációk növekedése az  $\mathbf{A}$  operátor *szinguláris szerkezetéhez* kapcsolódik: előállítva az  $\mathbf{A}$  operátor  $\mathbf{A}^*$  adjungáltját, az  $\mathbf{A}^*\mathbf{A}$  operátorszorzatnak a legnagyobb sajátértékekhez tartozó sajátvektorai (tehát az  $\mathbf{A}$  operátor szinguláris vektorai) azok, amelyek a maximális növekedés fázistérbeli irányait kijelölik.

Az ECMWF-ben a referencia előrejelzés mellett ötven perturbált előrejelzést készítenek el, ami természetesen igen hatékony számítástechnikai háttérrel igényel. *Lewis F. Richardson*, aki nyolcvan évvel ezelőtt hosszú hónapokig tartó manuális számolással megalkotta az első számszerű előrejelzést, hatalmas, színházteremhez hasonlító időjárási központot képzelt el, amelyben egymást váltva 64 000 ember dolgozik kézi kalkulátorokkal, hogy az eseményeket az időjárás folyamatát megelőzve *előre* jelezze. „*A ködös jövő egy napján talán lehetséges lesz a számításokkal az időjárás haladásánál gyorsabban előre jutni. De ez álom...*” – írta. Richardson álma az elektronikus számítógépek megjelenésével még a tudós életében elindult a beteljesülés útján, majd felülmúlt minden korábbi elképzelést. Az

ECMWF legnagyobb, 100 processzoros számítógépe például egymagában  $288 \times 10^9$  lebegőpontos műveletet képes elvégezni másodpercenként. A központ az 50+1 ensemble előrejelzés szóródását az ábrázolás különböző szemléletes formáit alkalmazva térképeken és diagramokon juttatja el a tagállamok meteorológiai szolgálataihoz. Az alkalmazott meteorológiai kutatásoknak világszerte az egyik fontos témája most az, hogy miként lehet az objektív bizonytalanságot, a beválás várható valószínűségét a médiában közérthetően nyilvánosságra hozni. A jelenleg követett gyakorlat még az, hogy konkrét valószínűségi szintek közlése helyett a meteorológus a megfogalmazás módjával igyekszik érzékeltetni egy-egy időjárás-előrejelzés megbízhatóságát.

*Célzott megfigyelések: az ensemble előrejelzések tökéletesítésének lehetőségei*

A célzott megfigyelések végzésének gondolatát az a feltételezés motiválta, hogy az áramlási mezőben egy-egy szignifikáns alakzat (például egy trópusi vagy mérsékelt övi ciklon) kialakulásának, áthelyeződésének és életciklusának rövid távú (10 napon belüli) előrejelzése számottevően javítható járulékos speciális mérések végrehajtásával, a kezdeti állapot analízisének pontosításával.

A kérdést kissé közelebbről megvilágítva tekintsünk egy légköri képződményt, amely a  $t_0$  kezdeti időpont és egy későbbi  $t$  időpont között fejlődik, és amely a  $t$  időpontra a  $\Sigma_0$  földrajzi tartományba (az ún. *verifikációs tartományba*) helyeződik át. A *célzott (járulékos vagy adaptív) megfigyeléseket* a  $t_0$  időpontban azokban a  $\Sigma_0$  földrajzi tartományokban (az ún. *érzékenységi tartományokban* vagy *céltartományokban*) kell elvégezni, amelyek elhelyezkedése a légköri képződmények áthelyeződését meghatározó „vezető áramlás” irányától függ, továbbá ahol az analízis hibái valószínűleg jelentősek és gyors ütemben növeked-

nek. Az így nyert többletinformációtól elvárjuk, hogy megbízhatóbbá tegye a kezdeti feltételeket, és ennek eredményeként a  $\Sigma_t$  területen növekedjék a  $t$  időpontra szóló előrejelzés bevalási valószínűsége. A céltartományok kijelölésére szubjektív és objektív eljárásokat egyaránt kidolgoztak (Götz, 2001); az objektív eljárások egyike azon az adjungált módszeren alapszik, amely segítségével az ECMWF-ben a leggyorsabban növekedő kezdeti perturbációk kiválogatása is történik.

A rutinmegfigyelések járulékos összetevőit alkotják a többi között ejtőernyővel ellátott rádiószondákat indító repülőgépek és programozott útvonalakon haladó, pilóta nélküli repülőgépek, mobil rádiószondázó állomások (általában hajók), amelyekről csak akkor eresztenek fel műszeres ballonokat, ha az érzékenységi tartományban vannak, továbbá mesterséges holdakra telepített távérzékelő berendezések, amelyeket csak akkor kapcsolnak be, amikor a céltartományokra irányíthatók. Céltartományokként elsősorban az Atlanti-óceán és a Csendes-óceán északi részei jönnek számításba, mivel ezek a körzetek a leginkább adatszegény területek, továbbá mivel az e területek fölött gyakran képződő ciklonok és frontok a felső-troposzférikus vezető áramlás mentén kelet felé vonulva alapvetően meghatározzák Európa, illetve Észak-Amerika napokkal későbbi időjárását.

Az elmúlt öt esztendő során több nagyszabású célzott megfigyelési programra került sor. Közülük kiemelendő a Csendes-óceán téli viharainak felderítésére szolgáló *Winter Storm Reconnaissance* (WSR) program, amelyet az Egyesült Államok 1999 óta immár operatív rendszerességgel szervez meg januárban és februárban. A bennünket közelebbről érintő észak-atlanti térség időjárási frontjainak és ciklonpályáinak pontos elemzését az 1997. január-februári *Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment* (FASTEX) volt hivatott segíteni (Joly *et al.*,

1999). Az így szerzett járulékos megfigyelések hatását napjainkban tanulmányok hosszú sora értékeli. Mind a WSR, mind a FASTEX expedíciók méréseiből levonható következtetések általában pozitívak: a kezdeti feltételek pontosítása az esetek többségében kimutathatóan megbízhatóbb előrejelzések elkészítéséhez vezet. Ám, amint az minden fontos felismerés jellemzője: bővíti tudásunkat, ugyanakkor az új kérdések körét is tágítja. Esetünkben még alapos elemzést igényel, hogy a kezdeti feltételek előállítását végző bonyolult inicializálási eljárás melyik eleme sérül, amikor egy járulékos információ beépítése egy-egy alkalommal kifejezetten rontja a prognózis bevalását. Érdekes, de még nagyrészt megoldatlan probléma az is, milyen fizikai mechanizmus „viszi át” az információt a céltartományból a tőle akár több ezer kilométerre elhelyezkedő verifikációs tartományba (Szunyogh *et al.*, 2002).

Áttekintésünkben kitérünk, hogy a léggör kaotikus viselkedése nyomán az időjárási prognosztika gyakorlatának adekvát kezelése igen hatékony számítástechnikai háttérrel igényel. A kutatóközpontokban az inicializálási eljárásokért, a modellfizika javításáért és az ensemble előrejelzések módszertanáért felelős szakemberek között komoly versengés folyik az állandóan bővülő, de mégis mindig kevésnek bizonyuló számítási kapacitásból való nagyobb részesedésért. Az időjárás-előrejelzések eljárásainak további finomítása ma elsősorban anyagi kérdés, mint ahogyan kizárólag az illetékes döntéshozók elhatározásától függ az is, hogy térségünkben mikor válhat rendszeres gyakorlattá egy-egy veszélyesnek ígérkező időjárási helyzet prognózisának tökéletesítése a nagyon költséges célzott megfigyelések elvégzésével.

Kulcsszavak: *káosz, különös attraktor, kezdeti feltételekre mutatott érzékenység, előrejelezhetőség, ensemble előrejelzések, célzott megfigyelések*

**IRODALOM**

- Götz G. (1995). Az éghajlat szabad és kényszerített változásairól. *Magyar Tudomány* **102**, 1205-9
- Götz G. (2001). *Káosz és prognosztika*. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest
- Joly, A. *et al.* (1999). Overview of the field phase of the Fronts and Atlantic Storm-Track Experiment (FASTEX) project. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **125**, 3131-3163
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.* **20**, 130-141
- Marx Gy. (2000). *A marslakók érkezése*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 263
- Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T. N., and Petroliagis, T. (1996). The new ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **122**, 73-119
- Szunyogh, I., Toth, Z., Majumdar, S. J., and Persson, A. (2002). On the propagation of the effect of targeted observations: The 2000 Winter Storm Reconnaissance Program. *Mon. Wea. Rev.* **130**, 1144-1165
- Tél T. és Gruiz M. (2002). Mi a káosz? (És mi nem az) *Természet Világa* **133**, 296-298
- Toth, Z., and Kalnay, E. (1997). Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.* **125**, 3297-3319

