

I. A dinamikus meteorológia története

I.1. A dinamikus meteorológia tárgya, tudományközi helyzete.....	1
I.1.1. A légköri mozgásrendszerek leírásában alkalmazott alapfeltételezések.....	3
I.2. A dinamikus meteorológia fejlődésének főbb szakaszai.....	4
I.2.1. Kezdetek.....	4
I.2.2. A Newton-féle mechanika alkalmazása a meteorológiában, a XVIII. század.....	5
I.2.3. A klasszikus termodinamika születése, a XIX. század.....	6
I.2.4. A légköri termodinamika fejlődése, a XX. század első fele.....	7
I.2.5. Az elméleti meteorológia nagy évszázada, a dinamikus meteorológia megszületése: 1850–1950.....	8
I.2.5.1. A ciklonok, anticiklonok kialakulásának és fejlődésének elmélete a XIX. század második felében.....	8
I.2.5.2. A légköri mozgások matematikai-fizikai leírása.....	9
I.2.5.3. A ciklonok, anticiklonok szerkezetének kutatása, a nyomási centrumok áthelyeződése.....	10
I.2.5.4. A modern dinamikus meteorológia születése, a Bergeni Iskola (1917–1926).....	11
I.2.5.4. Időjárás matematikai alapon – Az első sikertelen numerikus előrejelzés (Richardson, 1922).....	15
I.2.6. A dinamikus meteorológia helyzete, főbb kutatási irányai.....	22
I.3.1. Kezdetek.....	27
I.3.2. A hazai dinamikus meteorológia fénykora – a századfordulótól az 1930-as évekig.....	28
I.3.3. Az 1930-as évek közepétől az 1950-es évek közepéig.....	31
I.3.4. Az új meteorológus generáció, az 1960-as évektől a 80-as évek elejéig.....	32
I.3.5. A maiak.....	33
I.3.6. A hazai dinamikus meteorológia a nemzetközi publikációs tevékenység tükrében.....	34

I.1. A dinamikus meteorológia tárgya, tudományközi helyzete

A dinamikus meteorológia célja, hogy elméletileg leírja a különböző skálájú légköri mozgásrendszereket, és kutatási eredményeivel hozzájáruljon az időjárás-előrejelzések pontosabbá tételéhez. A kiindulási alap, a feladatnak megfelelő koordináta-rendszerben felírt légköri hidrotermodinamikai egyenletrendszer, amely kielégíti a megmaradási tételeket, mint a tömeg, energia és impulzus. A vizsgált folyamat jellege adja meg az egyenletek tér- és időbeli

felbontását, egyszerűsítését (skálaanalízis), illetve az alkalmazott energiakonzisztens becslési technikát.

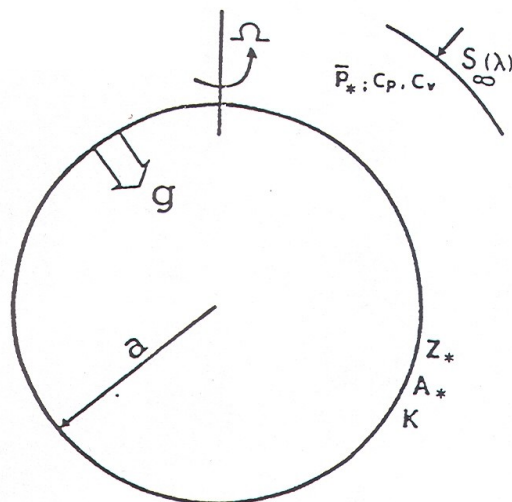
A dinamikus meteorológiában (Dynamical Meteorology, vagy Dynamic Meteorology (angolul), Der Dynamische Meteorologie (németül), Dinamicheskaja Meteorologija (oroszul)) kitüntetett szerepet kapnak a *troposzféra nagyszálajú folyamatai*. Nem része a dinamikus meteorológiának a légköri sugárzástan és a légköri hidrotermodinamikai egyenletrendszer megoldásával foglalkozó számszerű előrejelzés (numerikus prognosztika). A két tudományterület között azonban sok átfedés van. A numerikus prognosztika és a dinamikus meteorológia keretében egyaránt foglalkoznak a modell-inicializáció kérdéseivel, illetve a valószínűségi vagy sokasági (ensemble) előrejelzésekkel. Mára a felhőfizika is önálló tudományterületté vált.

A légköri turbulencia, a határréteg-folyamatok leírása, a légköri instabilitások, illetve energiaátalakulások elmélete szintén a dinamikus meteorológia tárgykörébe tartozik.

A dinamikus meteorológiánál általánosabb a *geofizikai folyadékdinamika* (Geophysical Fluid Dynamics). Ez magába foglalja:

- a különböző skálájú légköri mozgásrendszerek leírását (klasszikus dinamikus meteorológia),
- más bolygók légköri folyamatainak dinamikai modellezését,
- a tengerek és az óceánok mozgásrendszereit,
- a szilárd Föld belsejében kialakuló mozgásformákat.

Az ELTE Meteorológiai Tanszék hagyományaira építve (Dési és Rákóczi, 1970; Götz és Rákóczi, 1981; Práger, 1982; Bodolai, 1984; Götz, 2001) a tankönyv a klasszikus dinamikus meteorológiai tárgyalásmódot követi, a német iskola (Koschnieder, 1933; Panchev, 1985 és Etling, 2008), illetve a klasszikus angol nyelvű dinamikus meteorológiai irodalomra (Hess, 1959 és Holton, 2004) támaszkodva. Az orosz szakirodalomból Lajthman, 1976; Matveev, 1984 és Belov et al., 1989 tanköveit forgattuk haszonnal. A kézirat elkészítése során az interneten elérhető oktatási anyagokat is felhasználtunk.



1. ábra. A főbb paraméterek, amelyek meghatározzák a légköri mozgásrendszerek szerkezetét, r_F a Föld sugara, g a nehézségi gyorsulás, Ω a Föld szögsebessége, $S_0(\lambda)$ a bejövő napsugárzás spektrális szerkezete, λ a hullámhossz, c_p, c_v az állandó nyomáson és térfogaton vett fajhő, p_* a sugárzáselnyelés profilja, z_* a felszíni érdesség (érdességi magasság), A_* az albedó, K a turbulens diffúziós együttható (Atkinson, 1981).

A *Dinamikus meteorológia* a légkör tudománya önálló tárggyal és kérdésfelvetéssel, vizsgálataiban, kutatási módszereiben azonban felhasználja:

- a folyadékdinamika,
- a termodinamika,
- a matematika (analízis, algebra),
- az alkalmazott matematika (numerikus módszerek)

szaktudományos eredményeit.

A dinamikus meteorológia *nem azonosítható* az elméleti folyadékdinamikával. Az alapegyenletek közösek. A vizsgált közeg, a turbulens légkör azonban sajátos. Az itt kialakuló mozgásrendszerek leírásában figyelembe kell venni:

- a Föld pályaelemeit, tengely körüli forgását, méretét,
- a légkör szerkezetét,
- a Napból érkező sugárzás eloszlását,
- a Föld felszínét mint a légköri folyamatok alsó határfeltételét.

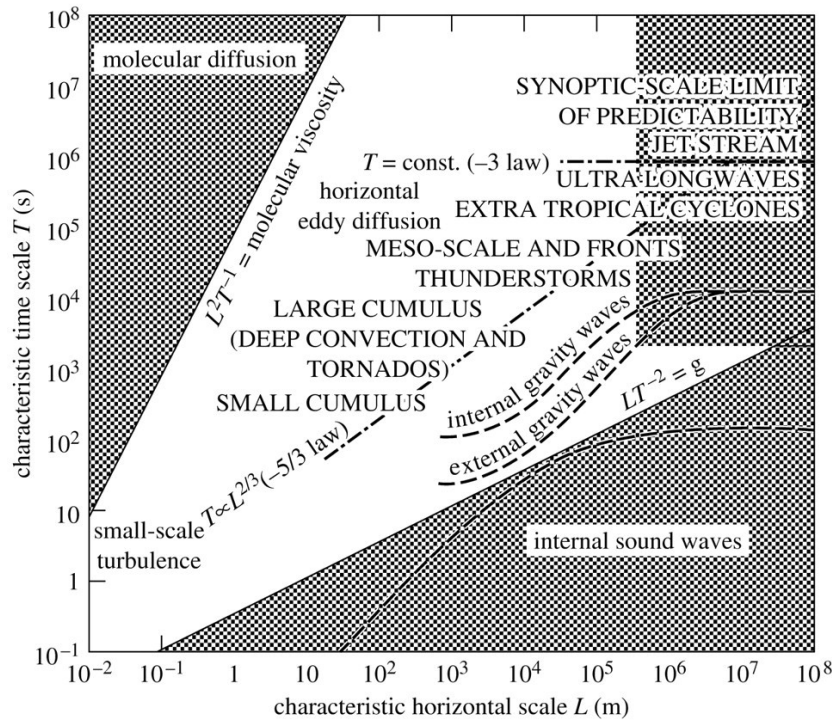
E sajátosságokat szemlélteti az 1. ábra.

I.1.1. A légköri mozgásrendszerek leírásában alkalmazott alapfeltételezések

- A légköri mozgásrendszerek karakterisztikus sebessége (v) egy nagyságrenddel kisebb, mint a hangsebesség (c). Olyan folyamatokkal foglalkozunk, ahol a Mach-szám lényegesen kisebb egynél ($M = v/c \ll 1$). A légköri hidrotermodinamikai egyenletrendszer tartalmazza a horizontálisan és a vertikálisan terjedő hanghullámokat. Ezek a gyors terjedésű hullámok az egyenletrendszer egyszerűsítésével szűrhetők ki a modellekből (pl. összenyomhatatlan közeg a hanghullámok, vagy a sztatikus légkör a vertikálisan terjedő hanghullámok kiszűrésére). A nem kívánt hullámformák hatását a modellegyenletek megfelelő tér- és időbeli felbontásával is „kiszűrhetjük”.
- A mozgásrendszereket a forgó Földön vizsgáljuk, szférikus koordináta-rendszerben, ahol a gravitációs erőt, a nyomási gradiens erőt, a felszín közelében és a magaslégkörben a molekuláris viszkozitási erőt, valamint a tehetetlenségi erőket – a centrifugális erőt (amit beépítünk a gravitációs erőbe), a metrikus gyorsulásból származó kényszererőt és az eltérítő erőt (Coriolis-erőt) – továbbá a tömegegységre ható erők eredőjét, a gyorsulást is figyelembe kell venni.
- *A légköri mozgások turbulensek.* A turbulencia mérőszáma az ún. Reynolds-szám, ami a gyorsulás (v^2/l) és a molekuláris viszkozitási erő (ν/l^2) hányadosa. Elválasztja a lamináris és a turbulens áramlást. Eltekintve a felszín feletti néhány mm-es vastagságú rétegtől, illetve a magaslégkörtől (a sztratoszféra feletti légtértől), a Reynolds-szám mindenütt meghaladja a kritikus értéket. $Re = vl/\nu \geq Re_{krit} \sim 10^3$.
- A gyorsulás (v^2/l), a mozgó levegőrész impulzusának időbeli megváltozása, egyenesen arányosnak tekinthető a sebességváltozás négyzetével (v^2) és fordítottnak a karakterisztikus mérettel (l). A sebességváltozás és a sebesség azonos nagyságrendű. A molekuláris viszkozitási erő ν/l^2 az v kinematikai viszkozitási együttható, a v sebesség és az l karakterisztikus méret segítségével adható meg. A karakterisztikus méret mindig a vizsgált jelenségtől függ: ez lehet a molekulák szabad úthossza, a felszínközeli folyamatokban a felszíntől vett távolság, vagy pl. a nagyskálájú, 1000 km-es nagyságrendű

folyamatokban a vizsgált mozgásrendszer mérete. A légköri mozgásrendszerek multiskálájuk, 10^{-3} m és 10^7 m közöttiek; 10–11 nagyságrendet ívelnek át.

- A légkör inhomogén. A sűrűség közel exponenciálisan csökken a magassággal. A légköri mozgások leírásában figyelemmel kell lenni a gravitációs erőre. A mozgásrendszerek fejlődésében fontos a különböző sűrűségű közegeket elválasztó felületek (*határfelületek, szakadási felületek*) viselkedése, dinamikája.
- A légkörben lejátszódó nagyskálájú folyamatok ($L > 10^6$ m) kvázi-kétdimenziósak.



2. ábra. A légköri folyamatok nagyságrendje (Smagorinsky, 1974 alapján). Az ábrán t a karakterisztikus idő, L a karakterisztikus méret, g a nehézségi gyorsulás. Jól látható a különböző légköri hullámmozgások, illetve a molekuláris viszkozitás tartománya, továbbá a meteorológiai folyamatok tér- és időskálája. A pontozott terület (a bal oldali fenti és a jobb oldali lenti rész) a meteorológia számára „érdektelen” tartomány. Az idő- és a térskala közötti kapcsolatot a skálafüggő turbulens kinetikus energiaspektrum alapján adják meg.

1.2. A dinamikus meteorológia fejlődésének főbb szakaszai

1.2.1. Kezdetek

A meteorológia tudománya az ókori alapok után a reneszánsz korban született újjá Európában. A megismerés alapja, s ez különösen igaz a meteorológiára, a mérés. A klasszikus meteorológiai műszerek a XVI–XVII. században születtek meg. A pontos, mai értelemben is megbízható mérőműszerek kialakulásához több évszázados fejlődés vezet, s ezt érdemes átgondolni, különösen a mai rohanó világban.

Nézzük például a szélmerést! Gondoljunk arra az útra, amit a mérés technika bejárt *Leonardo da Vinci* (1452–1519) nyomolapos szélmérőjétől (1500 körül) az első forgókanalas anemométeren át, amit *Robinson, Thomas Romney* (1792–1882) ír csillagász és fizikus készített 1846-ban, a szonikus anemométerekig. Ez utóbbi műszer az 1960-as évek terméke, s csak a XX. század utolsó évtizedében terjedt el a tudományos gyakorlatban, s napjainkban válik a standard meteorológiai mérések elfogadott eszközévé. A szonikus anemométer az alapja a direkt turbulens áramméréseknek. A legjobb műszerek már 200 Hz frekvenciával mérik a szélesség-komponenseket és a szonikus hőmérsékletet.

Negyed évezred telt el a hőmérséklet mérésében *Galilei, Galileo* (1564–1642) termoszkópjától (1592) a *Lord Kelvin* (sz. *Thomson, William*, 1824–1907) által megalkotott abszolút hőmérsékleti skáláig. Hasonlóan érdekes a légnyomás és a nedvességmérés története, vagy az 1940-es, illetve az 1960-as évektől kezdődő radar- illetve műholdas mérések fejlődése, a lézeres, vagy a mikrohullámú technika térhódítása.

Térjünk vissza a légköri modellek fejlődéséhez! A XVIII. század már az egycellás általános cirkulációs elmélet megszületésének az ideje. Ennek volt az egyik előfutára *Halley, Edmund* (1656–1742) aki „A három óceán monszon és passzát szelei” címmel tartott előadást az Angol Királyi Tudományos Akadémián 1686-ban. (*Ez Buda visszafoglalásának az éve a magyar történelemben, de Sárospatakon is ebben az évben kezdődött a természettan oktatása.*) Az első egycellás általános cirkulációs modellt *Hadley, George* (1685–1768) publikálta 1735-ben, ahol a passzát cirkuláció (kereskedelmi szelek) kialakulására is magyarázatot keresett. *Kant, Immanuel* (1724–1804) szintén foglalkozott a témakörrel.

A dinamikus meteorológia kialakulásában fontos dátum 1746. Ebben az évben a berlini Porosz Tudományos Akadémia pályázatának elméleti kérdése arról szólt, hogy milyen lenne az általános cirkuláció a Földön, ha azt óceán borítaná. Hogy lehet figyelembe venni a Föld forgásának, a Napnak és a Holdnak a hatását? A kérdést – amire a matematikai egyenleteken alapuló számításokat vártak – a berlini akadémia tagja *Euler, Leonhard* (1707–1783) tette fel. A cikkpályázatot *D’Alembert, Jeanle Road* (1717–1783) nyerte, aki egy kétrétegű sekélyvízmodellt konstruált az árapály jelenség matematikai leírására. Részt vett a pályázaton *Bernoulli, Daniel* (1700–1782) is. A légkört a Földdel együtt forgó „határréteggént” kezelte. Az alacsony szélességek vertikális mozgásait a Nap sugárzásával, a közeg sűrűségváltozásával hozta kapcsolatba. Először alkalmazta az impulzusmomentum-megmaradás elvét a zonális szélmező leírásában. E munkák megelőzték korukat, nem épültek be az akkori légkörtudományba. Az *Euler* által feltett kérdésre egyébként közel száz évvel később *Ferrel, William* (1817–1891) adta meg az elméleti választ a légköri és óceáni áramlásokról írt cikkben 1856-ban.

I.2.2. A Newton-féle mechanika alkalmazása a meteorológiában, a XVIII. század

Hogyan fejlődött a mechanika és a hidrodinamika *Newton, Isaac* (1643–1727) munkássága után? Kik alapozták meg a légköri folyamatok elméleti leírását?

Ez már a differenciálegyenletek kora. Kialakult a részecskékhez, illetve a kontinuum térbeli koordináta-rendszerhez kötött *Lagrange-* és *Euler-féle szemléletmód*.

A pontrendszerek mechanikai mozgásának leírásával – a korábban már említett – francia fizikus, matematikus, enciklopédista *D’Alembert* foglalkozott. Ő adta meg az első, elméleti igényű leírást, ami a légköri folyamatok tanulmányozásában is alkalmazható. Ezzel a *Lagrange-féle szemléletmód* megalapozója lett.

Lagrange, Joseph Luis (1736–1813) francia matematikus, fizikus, csillagász; az új mértékelmélet egyik kidolgozója. Ő is sok szállal kapcsolódik a Porosz Tudományos Akadémiához, annak igazgatója volt az 1780-as években. A mozgásegyenleteket egy légrézecskekhez kötött koordináta-rendszerben írta fel. E szemléletmódban a térkoordináták mint függő változók szerepelnek. E munkát vitte tovább *Hamilton, William Rowan* (1805–1865), ír fizikus csillagász, aki megteremtette a korszerű mechanikai szemléletmódot a Lagrange–egyenletek általánosításával (Hamilton–elv, Hamilton–féle kanonikus egyenletek, illetve hatásfüggvény). A dinamikus meteorológiában, a légköri folyamatok leírásában máig fontos szerepe van a Hamilton–féle formalizmusnak, gondoljunk csak a nabla operátorra, vagy az invariánsok elméletére.

Euler, Leonhard (1707–1783) svájci származású matematikus, fizikus. Megadja a *kontinuus közeg mozgásegyenleteit*. Rézecskek helyett a tömegpont mozgását vizsgálja. Rögzített koordináta-rendszerben (tér-idő) szemléli a folyamatokat. *Euler* egyébként 1727 és 1741 között a Szentpétervári Akadémián dolgozott, ahol *Daniel Bernoulli* utóda lett a Matematikai Tanszéken. 1741–1766 között *Nagy Frigyes* (1712–1786) meghívására a berlini akadémián kutatott, majd később ismét a Szentpétervári Akadémia következett, ahová *II. Katalin* (1729–1796) cárnő hívta meg. Sírja Szentpéterváron a Néva parti *Alekszandr Nyevszkij* (1220–1263) kolostorban van.

I.2.3. A klasszikus termodinamika születése, a XIX. század

A légköri folyamatok leírásában a dinamikai egyenletek mellett fontos szerepe van a termodinamikának. A száraz és nedves levegő állapotjelzőivel, a termodinamikai potenciálokkal és fázisátalakulási folyamatokkal foglalkozunk. Ismerkedjünk meg a kor meghatározó tudósaival:

- *Dalton, John* (1766–1844) angol fizikus és vegyész. Bevezette a parciális nyomás fogalmát.
- *Gay-Lussac, Louis Joseph* (1778–1850) a XIX. század egyik legnagyobb francia vegyésze és fizikusa. Leírta az egymással vegyülő gázok térfogati viszonyának változását, tőle származik a molekulatömeg fogalma. Érdekességként megemlítjük, hogy 1804-ben a légkör szerkezetét vizsgálva 7000 m fölé emelkedett kutató léggömbjével. Ez akkor világcsúcs volt, amit fél évszázadig nem sikerült megdönteni.
- *Carnot, Nicolas Leonhard Sadi* (1796–1832) francia fizikus, a hó munkává történő alakításának korlátait vizsgálta. Maradandót alkotott a termodinamikai körfolyamatok elméletében. Gondoljunk csak a két izotermából és két adiabatából álló – anyagi minőségtől független, maximális hatásfokú – körfolyamatra, amit az utókor róla nevezett el Carnot–körfolyamatnak (1824). Fontos a Carnot-Clausius–elv is, eszerint: minden megfordítható általános termodinamikai körfolyamat felosztható elemi Carnot–körfolyamatok sorozatára.
- *Clausius, Rudolf Julius Emanuel* (1822–1888) német fizikus, az entrópia fogalom bevezetője; nevéhez fűződik a termodinamika II. főtételének megfogalmazása az entrópia segítségével.
- *Clapeyron, Benoit Paul Emil* (1799–1864) francia mérnök és fizikus. *Carnot* munkáját felhasználva tanulmányozta az olvadáspont és a nyomás közötti kapcsolatot, felismerte az univerzális hőmérsékleti függvény létezését. A Clausius-Clapeyron–egyenlet a légköri fázisátalakulási folyamatok alapösszefüggése.

- *Mengyelejev, Dmitrij Ivanovics* (1834–1907) orosz vegyész. Legnagyobb felfedezése a róla elnevezett periodikus rendszer, de nevéhez fűződik az univerzális gázegyenlet felírása, amit *Clapeyron* korábban már megsejtett.

Fontos helyet foglal el a tudománytörténetben *Helmholtz, Hermann Ludwig Ferdinand* (1821–1894) német fizikus és filozófus. Maradandót alkotott az akusztika, a hidrodinamika, a termodinamika és az elektrodinamika területén. A hidrodinamikai és a termodinamikai szemléletmód ötvözésének előfutáraként tekintünk rá. A meteorológia számára is fontos eredményei:

- az energia-megmaradás elve,
- a termodinamikai potenciálok közötti kapcsolat vizsgálata,
- az örvényes mozgás leírása, örvénytételek kimondása: felírja az összenyomhatatlan közeg örvényességi egyenletét. Az örvényességi egyenlet általános alakja (baroklin közegben) az ún. *Friedmann-egyenlet*. (*Friedmann, Aleksandr Aleksandrovich* (1888–1925) orosz fizikus, matematikus, a turbulenciaelmélet egyik megalkotója.)

I.2.4. A légköri termodinamika fejlődése, a XX. század első fele

A légköri termodinamika kialakulása a XX. század első harmadára esett, ami jelentős részben a Bergeni Iskola eredményeinek köszönhető. Ekkor formálódott az a tudásanyag, ami a mai tankönyvekben is megtalálható. Ide tartozik a légkör vertikális szerkezetének a leírása: a tropopauzát 1902-ben, a sztratoszférikus ózonréteget 1913-ban fedezték fel. A vertikálisan emelkedő légréteg termodinamikai folyamatainak (száraz, nedves és pszeudonedves adiabaták) leírásában *von Bezold, Johann Friedrich Wilhelm* (1837–1907) alkotott maradandót. Nevéhez fűződik a potenciális hőmérséklet bevezetése és az első átfogó légköri termodinamika könyv megírása 1888-ban.

Sokan foglalkoztak termodinamikai diagramok készítésével, a ballon, majd később a rádiószondás felszállások kiértékelésével. Itt említjük meg *Hertz, Heinrich Rudolf* (1857–1894) nevét aki az első logaritmusos nyomás–hőmérséklet diagramot konstruálta 1884-ben. Ő egyébként *von Bezold* tanítványa volt Münchenben. *Refsdal, Anfinn*; *Shaw, Sir William Napier* (1854–1945); *Stüve, Georg* (1888–1935); *Lajthman, G. L.*; *Carl-Gustaf Rossby* (1898–1957) és *Vaisala, Vilho* (1889–1969) az 1920–1950-es években dolgoztak a diagramok tökéletesítésén.

A légköri termodinamika és a hidrodinamika közötti hidat *Vilhelm Bjerknes* munkássága képezte a piezotrop és a politrop termodinamikai folyamatok, illetve a barotrop és a baroklin légkör fogalmának bevezetésével. A termodinamikai folyamatok, a különböző hőmérsékleti fogalmak, a termodinamikai potenciálok vagy a fázisátalakulási folyamatok leírásánál a klasszikus elmélethez nyúltak vissza. A mai tankönyvekben a 20–60 évvel ezelőttiekhez képest a leírasmódban és az oktatási anyag rendszerezésében találunk újdonságokat.

I.2.5. Az elméleti meteorológia nagy évszázada, a dinamikus meteorológia megszületése: 1850–1950

Az évszázad két határköve az 1850-es években megszületett háromcellás cirkulációs modell és a légköri-óceáni áramlatok első matematikai leírása *Ferrel, William* és *Dove, Heinrich Wilhelm* (1803–1879) munkássága nyomán. *Dove* klimatológus volt, de foglalkozott például a trópusi ciklonok áramlási rendszerével is. Nála is tanult Berlinben 1842–1844 között *Berde Áron* (1819–1892), a kolozsvári egyetem későbbi professzora, az első magyar nyelvű meteorológiai könyv szerzője.

A másik határkö az első számszerű (numerikus) előrejelző modell elkészítése 1950-ben, amit a *Tellus* című folyóiratban publikált *Charney, Jule Gregory* (1917–1981), *Fjortoft, Ragmar* (1913–1998) és *Neumann János* (1903–1957) „A barotrop örvényességi egyenlet numerikus integrálása” (Numerical integration of the barotropic vorticity equation) címmel.

Nézzük a dinamikus meteorológia fejlődésének néhány állomását! Elsősorban a ciklonok, anticiklonok szerkezetével, fejlődésével foglalkozó, illetve a számszerű előrejelzéshez kapcsolódó kutatásokat tekintjük át.

I.2.5.1. A ciklonok, anticiklonok kialakulásának és fejlődésének elmélete a XIX. század második felében

A ciklonok anticiklonok fejlődését először a termodinamikai folyamatok – hőerőgépek – analógiájára képzelték el. Ezt mutatja *Espy, James Pollard* (1785–1860) modellje 1841-ből. E szerint a meleg területek felett felszálló légmozgás alakul ki, amit a latens hőfelszabadulás tovább erősít, ami a konvekció fő energiaforrása. A kialakuló feláramlás felszíni nyomáscsökkenést okoz, s kifejlődik a ciklonális áramlási kép. A hideg felszín felett kialakuló leszálló mozgás nagy skálájú nyomásemelkedést okoz. Ez alakítja ki az anticiklonokat. Az elmélet a lokális hatások elsődlegességét hangsúlyozza. Ez a termikus hipotézis alkalmazható lokális zivatarok kialakulására, illetve jórészt a trópusi ciklonok fejlődésére. A mérsékeltövi nagyskálájú folyamatok azonban másképp fejlődnek. Erre mutatott rá *Hann, Julius* (1839–1921) osztrák klimatológus, aki a magashegyi megfigyelések alapján bírálta az elméletet 1876-os munkájában. A mérések szerint a ciklonok hideg, míg az anticiklonok inkább meleg képződmények. *Hann* egyébként az Osztrák Meteorológiai Intézet elnöke volt. Nevéhez fűződik a fön jelenség termodinamikai magyarázata is.

A XIX. század végén egyre inkább az advekción folyamatokban keresték a ciklonok fejlődésének a magyarázatát. *Margules, Max* (1856–1920) a Galíciában (Brody) született, s Bécsben dolgozó meteorológus 1903-as klasszikus cikkében megmutatta, hogy az egymáson elmozduló hideg és meleg levegőtömegek adiabatikus tömegátrendeződése révén a potenciális energiából kinetikus energia képződik, kialakítva egy lokális alacsony nyomású képződményt. Megvan tehát a viharok kinetikus energia keletkezése. *Margules* elméletileg megadta a hideg és a meleg levegő egyensúlyi hajlatát, „megjósolta” a frontok jelenlétét már 1906-ban. Tizenhat évnek kellett azonban eltelnie ahhoz, hogy a szinoptikus térképen is kianalizálhassák a frontokat. Ez már a Bergeni Iskola eredménye, amivel később még foglalkozunk.

I.2.5.2. A légköri mozgások matematikai-fizikai leírása

A szél keletkezése, a nagyskálájú egyensúlyi áramlások megértése, a légkörben ható erők felírása, a szabad légkörben a szél magassággal való változása (a termikus szél koncepció), illetve a súrlódási erő szerepének a vizsgálata a XIX. század második felének tudományos

kérdései, amelyek megválaszolása feladatot adott még a XX. század tudósainak is. A nehézségi erő és a nyomási gradiens erő mellett a Föld eltérítő erejének a felírása, illetve a súrlódási erő megadása jelentette a feladatot.

A forgó koordináta-rendszerben elmozduló tömegpontra ható eltérítő erő leírását *Coriolis, Gustave Gaspard de* (1792–1843) francia mérnök, matematikus adta meg az 1830-as években. A meteorológiai gyakorlatba csak később, a XIX. század közepétől került be az eltérítő erő, amit a XIX. század vége, a XX. század eleje óta neveznek az utódok tiszteletből Coriolis-erőnek.

A mérsékelt övben az egymással párhuzamosan futó izobárok határozzák meg a geosztrófikus szelet, ami a szabad légkörben párhuzamos az izobárokkal. A nyomási mező és a szélmező között *Buys Ballot, Christophorus Henricus Diedericus* (1817–1890) állapított meg először egy tapasztalati összefüggést 1857-ben. Ez a mindnyájunk által jól ismert Buys Ballot-féle széltörvény, amely szerint az északi félgömbön álló észlelő, ha hátat fordít a szélnek, balra és előre találja az alacsonyabb nyomású, míg jobbra és hátra a magasabb nyomású területet. A déli félgömbön fordított a helyzetet. Az elméleti magyarázatot *Ferrel* adta meg a már korábban idézett 1856-os cikkében. *Buys Ballot*-ról érdemes még tudni, hogy 1854-ben alapító igazgatója volt a Holland Királyi Meteorológiai Szolgálatnak. Részt vett az 1873-ban alakult Nemzetközi Meteorológiai Szervezet (IMO – International Meteorological Organization, a Meteorológiai Világszervezet WMO elődje) munkájában; annak első elnöke lett.

Ferrel nevéhez kapcsolódik – *Laplace* munkásságát felhasználva – a forgó Földre vonatkozó mozgásegyenletek felírása az eltérítő erő figyelembevételével (1859), továbbá a vertikális szélnyírás és a termikus szél koncepció kidolgozása (1878).

Laplace, Pierre Simon (1749–1827) francia matematikus, fizikus munkássága sok tekintetben meghatározó volt az elméleti meteorológiában. Maradandót alkotott a potenciál-elméletben, a determinánsok meghatározásában és a valószínűségszámításban. A mechanikus determinisztikus világkép egyik kialakítója, ami a meteorológiában is meghonosodott, s egészen a XX. század közepéig hatott szemléletünkre. E felfogás bemutatására álljon itt egy idézet *Laplace*-tól (1823): „Sikerült feltárni kisszámú általános törvényt, amelyeket az anyag követ mozgásában. Minden aláveti magát nekik a természetben, minden általuk meggy végbe olyan elkerülhetetlenül, mint az évszakok változásai, és a görbe, amit a könnyű atomok írnak le, amelyeket mintegy véletlenül hordoznak a szelek, ugyanolyan pontosan irányítottak, mint a bolygók pályái.”

A légkör alsó, felszínnel érintkező rétege a határréteg. Itt a termikus és a mechanikus turbulencia keltette örvények biztosítják a tulajdonságok (impulzus, anyag, energia) szállítását. A felszín hatását fejezi ki a súrlódási erő. Ennek meghatározására szolgál a *Guldberg-Mohn*-egyenlet, ahol a súrlódási erőt a mechanikából vett analógia alapján a szélesebséggel arányos, s azzal ellentétes irányú erőként adják meg. Ez az 1880-as évek eleje. *Mohn, Henrik* (1835–1916) norvég meteorológus volt; 1866 és 1913 között a Norvég Meteorológiai Intézet igazgatója. A másik szerző *Guldberg, Cato M.* (1836–1902) pedig matematikusként dolgozott.

A súrlódási erő a molekuláris viszkozitás analógiájára is modellezhető. Ezt a feladatot a Bergeni Iskola tagja, *Ekman, Vagn Walfrid* (1874–1954) oldotta meg.

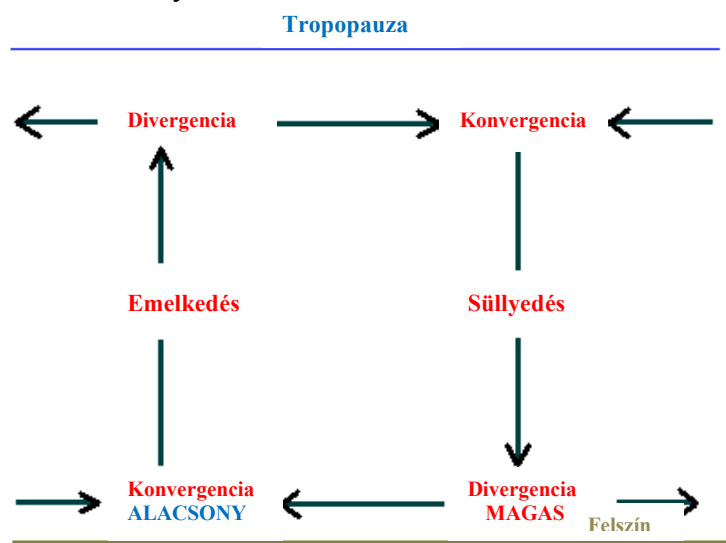
I.2.5.3. A ciklonok, anticiklonok szerkezetének kutatása, a nyomási centrumok áthelyeződése

Kövessük a ciklonok anticiklonok elméletének a fejlődését! A történeti áttekintést a XX. század elején hagytuk abba. A Bergeni Iskola által kifejlesztett polárfrontelmélet a felszíni

megfigyelésekre épült (részletesebb leírást lásd a következő részben). Hiányoztak a magassági adatok, keveset tudtunk a frontok és a nyomási teknők áthelyeződéséről.

A ciklonfejlődésben a termikus advekciónak a hipotézisek a lokális hatások elsődlegességét hangsúlyozták. Itt a kulcsszavak: termikus szél, divergencia, örvényesség, advekción, szélnyírás. Ide tartozott *Braunt, David* (1886–1965) izallobárikus szélelmélete (*Brunt-Douglas*-féle szél), továbbá *Sutcliffe, R. C.* elmélete a ciklonális rendszerek időbeli fejlődéséről 1947-ből. Ő az $AT_{500/1000}$ relatív divergencia mezejét vizsgálta, s ennek a változását hozta összefüggésbe a termikus széllal, és az örvényességi mezővel, megkönnyítve a ciklonális rendszerek fejlődésének az előrejelzését (3. ábra).

Az igazi áttörést *Rossby* munkája hozta, aki először írta le a planetáris hullámok fejlődését. Kiindulási egyenlete a barotrop örvényességi egyenletet volt. Hamarosan megszületett a baroklin hullámok elmélete is. Itt meg kell említenünk többek között *Hourwitz, Bernard* (1905–1986) és *Eady, Eric* (1915–1966) munkásságát, vagy a maiak közül *Joseph Pedlosky* cikkeket, illetve tankönyvét.



3. ábra. *Sutcliffe* ciklonfejlődési modellje (1947).

Mára kialakult a légköri instabilitások elmélete, benne a ciklonfejlődés leírása a nagyskálájú hatások és a kiskálájú folyamatok (pl. latens hőfelszabadulás) együttes kezelése. A ciklonfejlődés mai elméletével kapcsolatban csupán néhány kulcsszót említenek, s a hozzátartozó cikkek tárházát az interneten (ScienceDirect): kvázigeosztrófikus közelítés, frontogenetikus függvény, potenciális örvényesség, instabilitások (pl. barotrop, baroklin, szimmetrikus, ferde).

A ciklonfejlődés elméletének áttekintése után térjünk vissza a dinamikus meteorológia kialakulásához! Ismerkedjünk meg a Bergeni Iskola máig ható eredményeivel!

I.2.5.4. A modern dinamikus meteorológia születése, a Bergeni Iskola (1917–1926)

A modern dinamikus meteorológia születése a XX. század első harmadára esik. Ekkor alakult ki az új tudomány fogalmi rendszere, vizsgálati módszere, amelynek megteremtésében

döntő szerepe volt *Vilhelm Bjerknes*nek (1862–1951) és az általa kialakított dinamikus meteorológiai iskolának, amit az utókor Bergeni Iskola megnevezéssel illet.

Vilhelm Bjerknes Norvégiában, Christiania-ban (Oslo) született. Édesapja a hidrodinamika professzora volt. Az Oszlói Egyetemen matematikát, fizikát és hidrodinamikát tanult, majd Párizsba ment. *Jules Henri Poincaré*-nál (1854–1912) tanult elektrodinamikát, majd Bonnban *Heinrich Hertz* asszisztense lett. E témakörben szerezte a doktorátusát is.

Ez a sokszínű ismeretanyag segítette, amikor érdeklődése az 1890-es évek végén a meteorológia felé fordult. Ekkor már a Stockholmi Egyetemen a matematika és alkalmazott mechanika professzora volt. *William Thomson Kelvin* és a *Hermann Helmholtz* cirkulációs elméletét alkalmazta a légköri és óceáni folyamatokra, ahol a sűrűség változását is figyelembe vette, vagyis a hidrodinamika és a termodinamika eszköztárát egyesítette a légköri folyamatok leírásában.

Nevéhez fűződik a barotrop és a baroklin közeg, illetve a szolenoidok (izobár és izoszter vonalak által határolt paralelogrammák) bevezetése. Barotrop közegről beszélünk, ha a nyomási és a sűrűségi vonalak (vagy felületek) egybeesnek, míg baroklin közegről, ha ezek szöveget zárnak be egymással. A légkör barotrop egyensúly elérésére törekszik (4. ábra).

Megadta a cirkuláció és az örvényesség közötti kapcsolatot. Egy elemi felület örvényessége nem más, mint a felület körüli cirkuláció. A cirkuláció időbeli változásáért – ami egy légtest tulajdonsága – három hatás felelős:

- szolenoidális hatás (pl. a hegy-völgyi, a tengeri-parti cirkuláció elindítója),
- a Föld forgásából származó Coriolis-hatás,
- külső erőhatások, mint a súrlódás.

1904-ben publikálta a *Meteorologische Zeitschrift* hasábjain „Az időjárás-előrejelzés kérdése – a mechanika és a fizika nézőpontjából” című cikkét, ahol megadta a légköri hidrotermodinamikai egyenletrendszer alakját. A hét egyenlet a következő:

- három mozgásegyenlet,
- termodinamikai egyenlet,
- kontinuitási (v. tömegmegmaradási) egyenlet,
- nedvességszállítási egyenlet,
- állapotegyenlet.

„Amennyiben rendelkezésre állnak a megfigyelési adatok és a parciális differenciálegyenlet-rendszer megoldásához szükséges matematikai eszközök (*a XX. század elején a matematika még nem volt elég fejlett e probléma megoldásához, így grafikus módszerekben gondolkodtak*), akkor a számszerű időjárás-előrejelzés megoldható.” Ezzel *Vilhelm Bjerknes* kijelölte az elkövetkező évtizedek egyik legfontosabb kutatási irányát.

Szemléletére, gondolkodásmódjára jellemző a következő idézet: „Minden tiszta anyagi-mechanikai probléma leegyszerűsíthető az érintett tömegrészek jelenlegi helyzetének és mozgásainak meghatározására, valamint a jövőbeli helyzeteinek és mozgásainak előrejelzésére a mechanika törvényei alapján – e problémának elvileg megoldhatónak kell lennie.”

Vilhelm Bjerknes 1917-ben kapott meghívást Bergenbe ahol egy olyan csoportot hozott létre, amely a napi időjárás-előrejelzések készítése mellett dinamikus meteorológiai kutatásokkal is foglalkozott. Kiváló szakemberekkel vette körül magát.

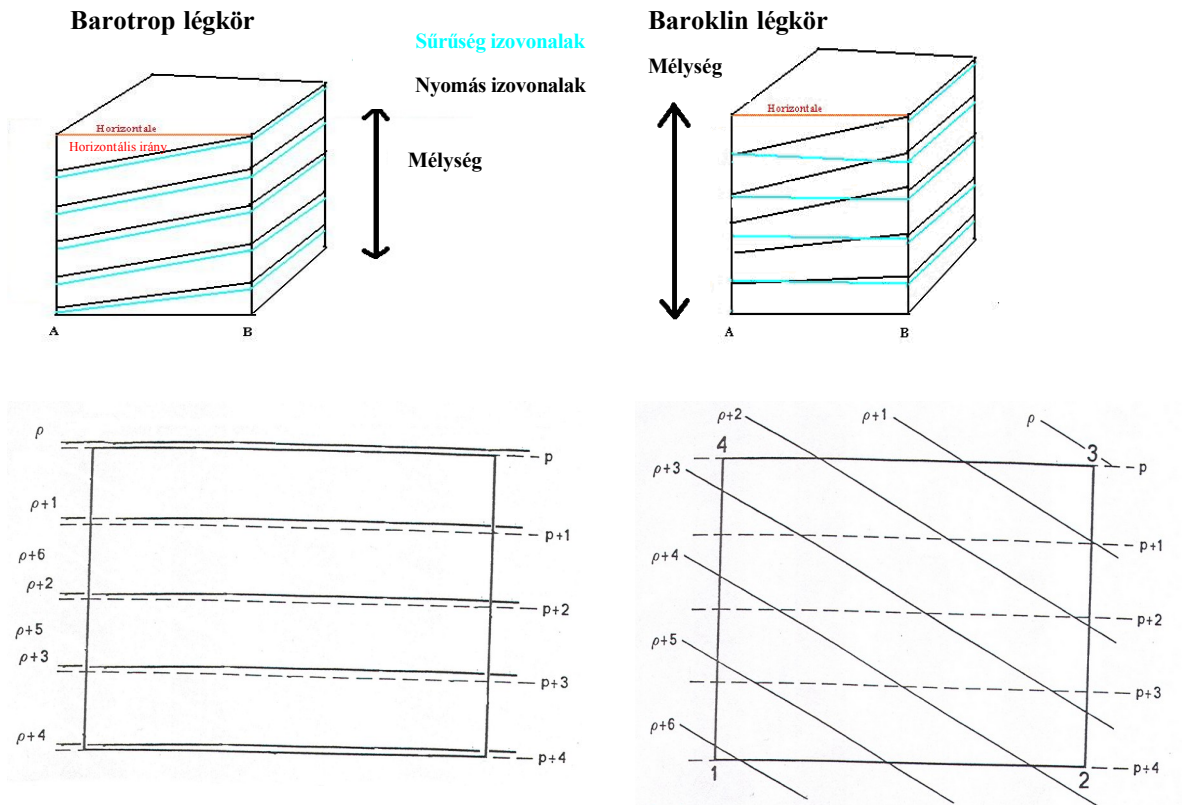
1922-ben publikálták a polárfrontelméletet, ami leírja a mérsékeltövi ciklonok fejlődését, illetve a frontelméletet (5. ábra). A cikk szerzői *Jakob Bjerknes* (1897–1975) *Vilhelm Bjerknes* fia és *Halvor Skappel Solberg* (1895–1974). Kutatásaik során megállapították, hogy a trópusokon kívüli ciklonok frontális felületeken alakulnak ki, ahol jelentős szerepe van a légtömegeket elválasztó keskeny átmeneti rétegben (frontálzóna)

kialakuló nagy horizontális hőmérsékleti gradiensnek (baroklinitás). A ciklonok kinetikus energiája csak addig növekszik, amíg jelentős a légtömegek közötti hőmérsékletkülönbség.

A határreteg dinamikai leírása a svéd *Ekman, Vagn Walfrid* (1874–1954) nevéhez fűződik. Ő *Vilhelm Bjerknes* PhD-s diákja volt. Miért is kezdtek el foglalkozni a sűrűlési réteggel? Nézzük a történetet! *Nansen, Fridtjof Wedel-Jarlsberg* (1861–1930) norvég sarkkutató figyelte meg elsőként, hogy a tengeráramlás iránya változik a mélységgel. Ennek fizikai magyarázatát kérte barátjától, *V. Bjerknes*-től. Ő a feladatot tanítványára bízta. *Ekman* a sűrűlési erő, a Coriolis-erő és a nyomási gradiens erő figyelembe vételével adta meg – analitikus megoldásként – a tengerek felsőbb rétegeinek áramlási képét. Összenyomhatatlan közeg feltételezésével élt. Eredményeit alkalmazták a légköri határreteg modellezésében is. Ma a légkörnek ezt az alsó 1–2 km-es rétegét *Ekman-réteg*nek nevezzük.

A Bergeni Iskola maradandót alkotott a felhőfizikában is. Ez *Bergeron, Tor* (1891–1977), az Uppsalai Egyetem későbbi meteorológus professzorának az érdeme. Nevéhez fűződik a kolloid instabilitáson alapuló jégkristály-növekedési modell (Bergeron-Findeisen-elmélet). Megjegyezzük, hogy az Országos Meteorológiai Szolgálat 100 éves évfordulójára szerkesztett Időjárás különszámban 1970-ben *Bergeron* cikkét is olvashatjuk. *Bergeron* egyébként *Högström, Ulf* majd *Zilitinkevich, Sergei Sergeievich* követte az uppsalai Meteorológiai Tanszék élén. Mindketten mikrometeorológiával és a határreteg folyamataival foglalkoznak.

A további tanítványok közül kiemelkedik; *Rosby, Carl-Gustav* (1898–1957); *Petterssen, Sverre* (1898–1974); *Palmén, Erik* (1898–1985) és *Sandström, Johan* (1874–1947).



4. ábra. A barotrop (jobb oldal) és a baroklin (bal oldal) légkör. Baroklin légkörben a nyomás-sűrűség izovonalak egymással szöget zárnak be. Kialakul a szolenoidális szerkezet. A sűrűségi mező aszimmetriája mozgást generál. A létrejövő cirkuláció a felszín közelében a nagyobb sűrűségű hely felől a kisebb sűrűségű hely felé indul (1–2–3–4–1).

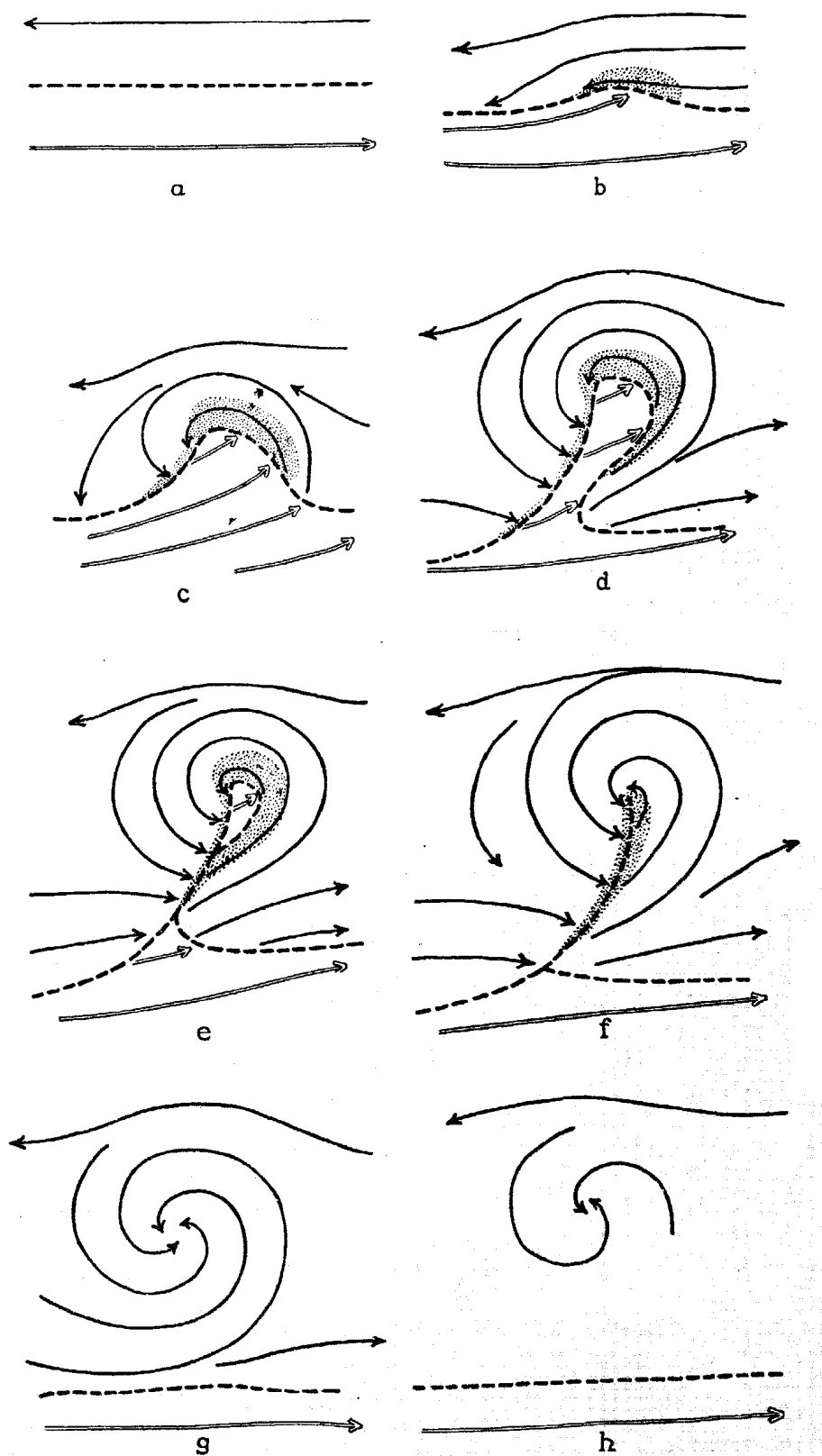


Fig. 2. The ›Life cycle‹ of cyclones.

5. ábra. A polárfronton képződött ciklon életrajza a hullámállapottól az okklúzióig *J. Bjerknes* és *H. Solberg* (1922) nyomán.

Vilhelm Bjerknes és a Bergeni Iskola széles kapcsolatrendszerével döntő hatással volt a XX. századi meteorológia fejlődésére, mint pl.:

- légköri hullámmozgások,
- légköri instabilitások (pl. barotrop, baroklin, szimmetrikus),
- cirkuláció, örvényesség és a potenciális örvényesség modellezése,
- kvázigeosztrófikus közelítések elmélete,
- frontfejlődés, frontogenézis,
- numerikus prognosztika.

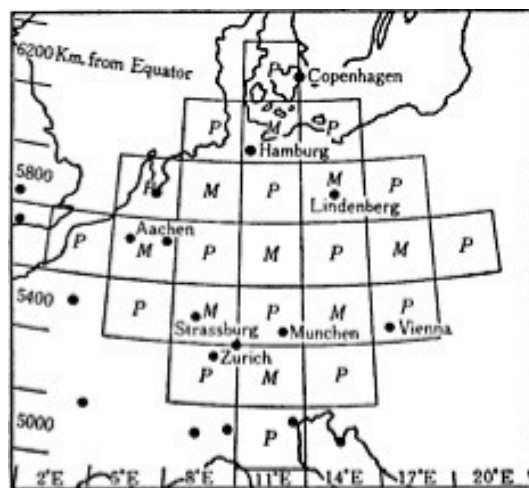
Kiválóan ötvözték a meteorológiai megfigyeléseket és a szinoptikus meteorológia adta lehetőségeket az elméletileg korrekt matematikai-fizikai modellezéssel. Az új fizikai szemléletű dinamikus és szinoptikus meteorológiai tankönyveik átformálták a meteorológus képzetét.

I.2.5.4. Időjárás matematikai alapon – Az első sikertelen numerikus előrejelzés (Richardson, 1922)

Vilhelm Bjerknes az időjárás numerikus előrejelzésében, az egyenletek grafikus, illetve vegyes numerikus-grafikus megoldásában látta a jövőt. *Margules* és *Exner* Bécsben a kontinuitási egyenlet, illetve a felszíni nyomástendencia-egyenlet megoldásával készítettek számszerű előrejelzéseket. *Exner* módszerét a gyakorlatban is alkalmazták.

Az igazi áttörést *Richardson*, *Lewis Fry* (1881–1953) 1922-ben publikált könyve jelentette (Weather Prediction by Numerical Process. Cambridge, University Press, 1922, 236 lap.) Először készített számszerű előrejelzést a *Bjerknes* által javasolt hidrotermodinamikai egyenletrendszer felhasználásával konstruált barotrop (egyszintes) modellel.

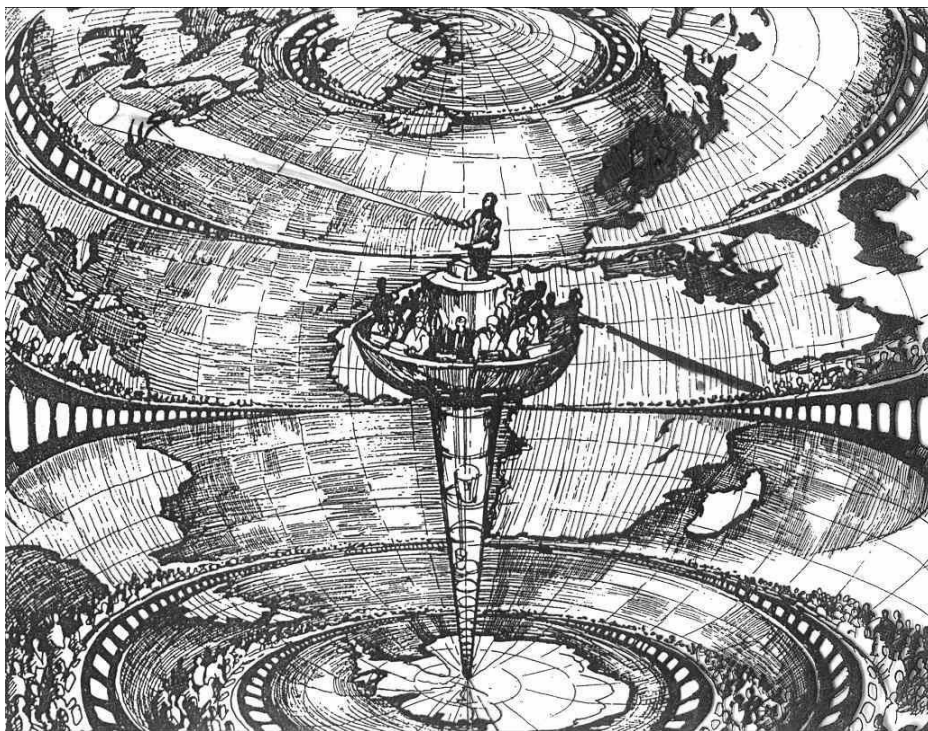
Az egyszerűsített egyenletrendszert véges különbséges módszerrel oldotta meg egy rácshálózaton $\frac{3}{4}$ órás időlépcső alkalmazásával. 1910. május 20-ra készített időprognózist (6. ábra). Megadta az állapotjelzők kezdeti mezőit többek között az akkor Lipszében dolgozó *Vilhelm Bjerknes* által készített szinoptikus és 500 hPa-os analízistérképek alapján. A munka 1914-ben indult, amit az I. világháború megszakított.



6. ábra. *Richardson* előrejelzési tartománya. A rácsnégyzetek közepére számította ki a nyomást (*P*) és a szélességet (*M*)

Az előrejelzés nem sikerült; a felszíni légnyomás a modellben 6 óra alatt 145 hPa-t nőtt. A hiba az alkalmazott numerikus módszerben, illetve a kezdeti mező előállításában volt. Hiányzott a gyors „számológép” is. Könyvében érdekes megállapítást tett, miszerint: ahhoz, hogy modellje pusztán kövesse a légköri folyamatokat legalább 64 000 kalkulátort (számításokban segédkező technikust) kellene alkalmaznia, s az eredmény még így sem lenne teljességgel biztos. A munka megmutatta, hogy elképzelhető és megvalósítható az időjárás számszerű előrejelzése. Sokakat megihletett *Richardson* „időjárás-előrejelző gyára”, ahogy azt a 7. ábrán is látjuk.

Vilhelm Bjerknes az elvégzett munka fontosságáról így ír: „Mihelyt a számítás egyezik a tényekkel, a tudományos győzelem megvan. A meteorológia egzakt tudománnyá, valóban a légkör fizikájává lett. Ha eddig eljutottunk, a gyakorlati eredmény is csakhamar megjön. Évekig tarthat egy alagút megfúrása egy hegyen át. Sokan a munkások közül nem is érik meg, míg a munka elkészül. De az utódokat ez nem fogja akadályozni abban, hogy gyorsvonati sebességgel keresztül ne száguldjanak az alagúton.”



7. ábra „Richardson időjárás-előrejelző gyára” (A. Lannerback). Dagens Nyheter, Stockholm. (L. Bengtsson, ECMWF, 1984)

Nézzük meg, hogy mi okozta az időprognózis kudarcát!

- Nem voltak megfelelőek a kezdeti- és peremfeltételek. Hiányos volt a felszíni észlelőhálózat, nem álltak rendelkezésre megfelelő magaslégköri (aerológiai) megfigyelések – a három-dimenziós légkör állapotathározóinak mérése.
- Nem volt megfelelő az alkalmazott egyenletrendszer, nem ismerték a hidrotermodinamikai egyenletrendszer energiakonzisztens egyszerűsítéseit – a légköri folyamatok nagyságrendi osztályozása, a skálázás kérdése.
- Nem álltak rendelkezésre megfelelő eljárások a meteorológiai állapotjelzők rácsponti értékeinek meghatározásához, a nem kívánt oszcillációk (pl. az akkor már ismert gravitációs hullámok) kiszűrésére – az adatasszimiláció (vagy modell-inicializáció) problémaköre.

- Nem volt még kidolgozva a parciális differenciálegyenletek numerikus megoldásának elmélete. Nem ismerték a véges különbséges módszerek stabilitási kritériumát – a tér- és időbeli felbontás problémaköre.
- Nem állt rendelkezésre megfelelő gyorsaságú számítógép („kalkulátor”).

Vegyük sorra a problémák megoldását!

- A háromdimenziós légkör állapothatározóinak mérése. Az 1900-as évek elején ugyan voltak már összehangolt nemzetközi ballonfelszállási napok, s működött a Lindenbergi Obszervatórium (Németország), ahol napi kötött ballonos méréseket végeztek, de nem voltak folyamatos magaslégköri adatok. *Molchanov, Pavel Alexandrovich* (1893–1941) 1930-ban megkonstruálja az első rádiószondát, majd rá egy évre a Helsinki Egyetem Meteorológiai Tanszékének professzora, *Vaisala, Vilho* is elkészíti saját eszközét. 1936-ban megalakul a VAISALA cég, amely mára a meteorológiai műszergyártás egyik óriása lett. A hálózatszerű rádiószondás mérések az 1950-es években indulnak. Magyarországi folyamatos rádiószondás adatok (12843 Budapest, 12982 Szeged) a hatvanas évek elejétől állnak rendelkezésre. Mára a WMO földbázisú és űrbázisú alaprendszere szolgáltatja az adatokat, a felbontás és az adatsűrűség azonban „sosem elég jó”.
- A légköri folyamatok nagyságrendi osztályozása, a skálázás kérdése. *Jeffryys, Sir Harold* (1891–1989) az 1920-as években kidolgozta az egyensúlyi áramlások osztályozási rendszerét, megadta a szférikus rendszerbeli mozgásegyenletek nagyságrendi analízisét.

Gyorsulás = nyomási gradiens erő + gravitációs erő + Coriolis-erő +
metrikus gyorsulási tagból származó erő + súrlódási erő.

A meteorológiában mindig a tömegegységnyi légrészre ható erőkkel foglalkozunk, ezért írhatjuk a fenti egyenlet bal oldalára a gyorsulást.

Megemlítjük, hogy Jefferys (1926) foglalkozott a hő és az impulzusmomentum alacsony és magas szélességek közötti légköri átvitelével. Megállapította, hogy a folyamat során az egy szélességi kör mentén haladva más és más típusú levegőtömeg mozog északi, illetve déli irányba. Ez a mérsékelt övi ellentétes irányú mozgás biztosítja az impulzusmomentum meridionális transzportját (14 évvel vagyunk a Rossby-hullámok felfedezése előtt).

Fontos lépés volt a numerikus modellezés irányába a kis perturbációk módszerének kifejlesztése, vagyis a hidrotermodinamikai egyenletrendszer linearizációja. *Kiebel, Ilya Afanasevich* (1904–1970) orosz matematikus, fizikus, meteorológus készítette el a hidrotermodinamikai egyenletrendszer energiakonzisztens egyszerűsítéseit (1940). Ez a kvázigeosztrófikus elmélet módszertani alapja. A „kvázigeosztrófikus” szó itt azt jelenti, hogy minden időlépcsőben teljesül a geosztrófikus szélegyenlet, vagyis a nyomási mező adaptálódik a szélmezőhöz.

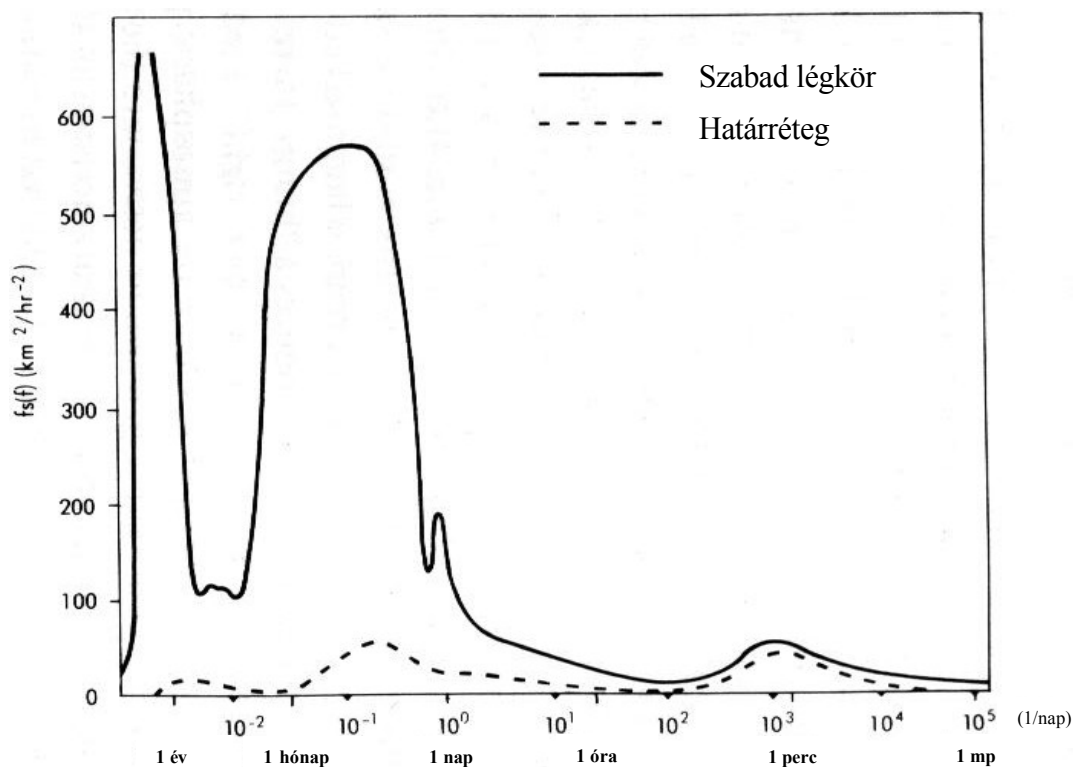
A gyakran használt „kvázisztatikus” feltételezés pedig azt jelenti, hogy minden időlépcsőben teljesül a sztatika alapegyenlete, vagyis a sűrűségmező és a nyomási mező vertikális szerkezete között egy diagnosztikai egyenlet teremt kapcsolatot. Itt is két mező adaptálódik egymáshoz. Természetesen sztatikus légkörben nincs a vertikális sebességnek gyorsulása. Ez persze nem jelenti azt, hogy a vertikális sebesség térben és időben ne változhatna.

Kiebel a tropopauzát mint a numerikus modellek felső „rugalmas” határfelületét vizsgálta. 1957-ben monográfiát jelentetett meg a számszerű előrejelzés témaköréből, mintegy Richardson 1922-es könyvének folytatásaként.

A nagyskálájú légköri folyamatok megismerésében fontos szerepet kapott a planetáris méretű hullámok leírása, a hidrotermodinamikai egyenletrendszer egyszerűsítése, az örvényességi egyenlet alkalmazása. A legegyszerűbb modell a barotrop örvényességi egyenlet megoldásán alapul, vagyis kétdimenziós áramlás feltételezésével dolgozik. A planetáris (tehetetlenségi) hullámokat leírójukról nevezték el Rossby-hullámnak.

Megjegyezzük, hogy a légköri hidrotermodinamikai egyenletrendszer általános alakja tartalmazza a hanghullámokat, a belső és a különböző közegek határán terjedő külső gravitációs hullámokat, a Coriolis-erő és a nyomási gradiens erő hatására kialakuló tehetetlenségi hullámokat, illetve az ezek kombinációjaként előálló vegyes hullámokat. A légköri hidrotermodinamikai egyenletrendszer (az ún. primitív egyenletek) egyszerűsítése mögött e hullámok némelyikének a kiszűrése, illetve az általunk választott tér- és időskálához tartozó egyenletrendszer felírása áll. Természetesen a nagyságrendi analízis után kapott egyenletrendszernek is teljesíteni kell az alapvető megmaradási tételeket (tömeg, energia, impulzus).

Különböző mérések összeillesztésével kapták a légköri mozgásrendszerek kinetikus energiaspektrumának sematikus képét (8. ábra).



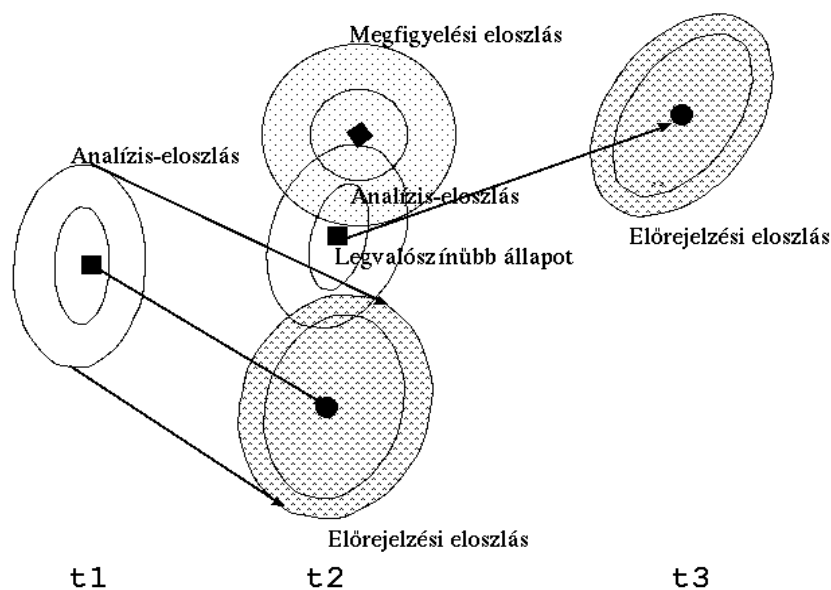
8. ábra. A nyugati szélkomponens jellegzetes kinetikus energiaspektruma ($f_s(f)$) a mérsékelt szélességeken a szabad légkörben (egyenes vonal) és a határrétegben (szaggatott vonal) *Vinnichenko* (1970) alapján (f a frekvencia).

Vannak jellegzetes tér- és időskálák, ahol a kinetikus energia lokális maximumát láthatjuk. A légköri mozgásrendszerek skáláit a korábban már bemutatott 2. ábra szemlélteti. A skálaanalízis területén a numerikus időjárás- és éghajlatmodellezés három meghatározó személyiségének, *Smagorinsky, Joseph* (1924–2005); *Orlanski, Isidoro* és *Fujita, Tetsuya*

Theodore (1920–1998) nevét kell megemlíteni. *Smagorinsky* a nagyskálájú, illetve az éghajlati modellek területén, a ma is oktató *Orlanski* a mezoskálájú folyamatok leírásában, míg *Fujita* a tornádók osztályozásában alkotott maradandót.

- Az adatasszimiláció (modell-inicializáció), a rácsponti értékek optimális meghatározásának a problémaköre (pl. a gravitációs hullámok kiszűrése) egyidős a numerikus modellel. Az első sikeres statisztikai eljárás – ami a megfigyelési és a klimatológiai adatok együttes figyelembevételén alapul – az orosz *Gandin, Lev Semenovich* (1921–1997) által kidolgozott optimális interpoláció volt. A fejlődés azóta is töretlen.

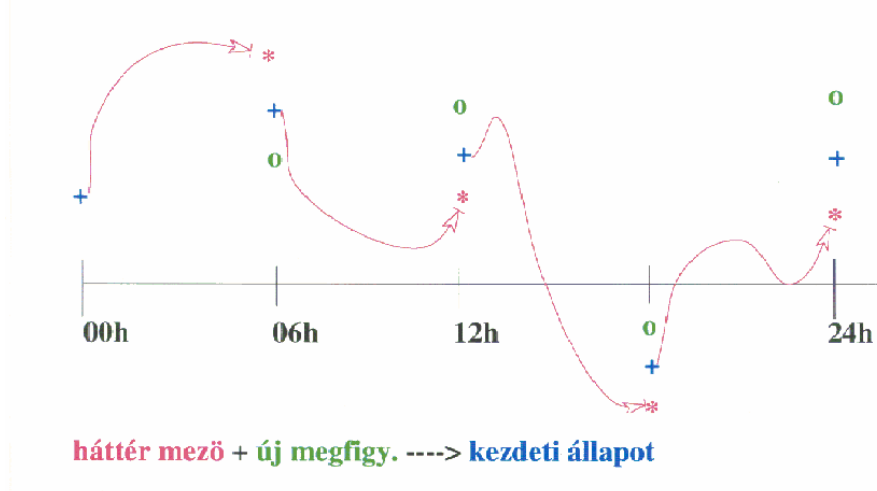
Az adatasszimiláció sikere kulcskérdés a numerikus modellezésben. Ha pontatlan a légkör jelenlegi állapotának a leírása (a modell kiindulási állapota, azaz kezdeti feltétele), akkor még tökéletes modellegyenletekkel és integrációs eljárásokkal sem lenne esélyünk sikeres előrejelzést készíteni (9. ábra). Fontos megjegyezni, hogy egyrészt elméletileg sem lehetséges a kezdeti feltételek teljesen pontos meghatározása (a származtatás során fellépő hibák miatt), másrészt pedig a légkör kaotikus voltából adódóan rendkívül kis hibák a kezdeti feltételekben nagy hibákká nőhetnek az előrejelzésben (a légkör rendkívül érzékeny a kezdeti feltételekre).



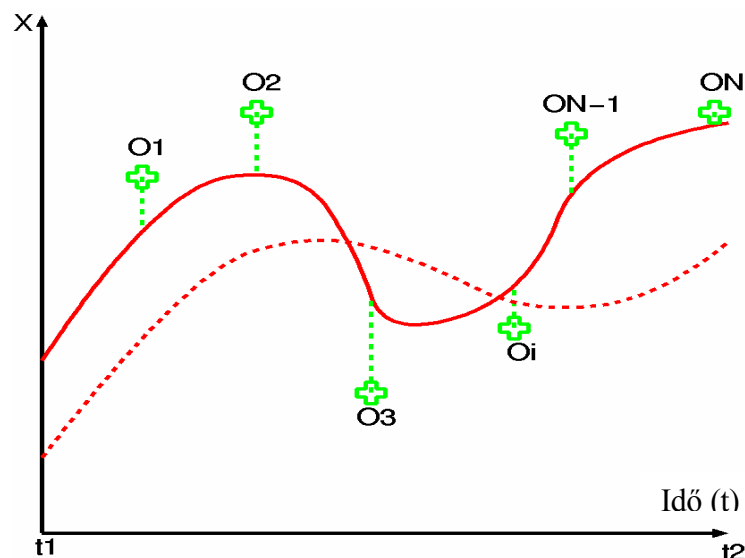
9. ábra. Az adatasszimilációs probléma szemléltetése. Hogyan határozhatjuk meg a méréseknek és a modell fizikájának megfelelő optimális kiindulási feltételeket, a legvalószínűbb állapotot? Hogyan viselkedik a minta az előrejelzés első szakaszában? A szemléletesség kedvéért feltesszük, hogy a fázistér kétdimenziós (*Szunyogh et al.*, 2003 alapján). A gyakorlatban két adatasszimilációs módszert használnak a numerikus előrejelző központokban: az optimális interpolációt, valamint a variációs analízis technikát (*Horányi*, 2006). Az optimális interpoláció egy legkisebb négyzetes lineáris statisztikai becslés, amely egyrészt lineáris közelítés, másrészt pedig abban az értelemben optimális, hogy az analízis mezőt (a modell kezdeti feltételét) a valóság és az analízis mező közötti négyzetes eltérés várható értékének minimumában definiálja. A variációs adatasszimilációs technika során először egy veszteségfüggvényt adunk meg,

amely a rendelkezésre álló információk, valamint a valóság közötti eltérést méri, s ezen veszteségfüggvény minimuma fogja meghatározni modellünk kiindulási állapotát.

Az adatasszimiláció során vagy háromdimenziós, vagy négydimenziós formában történik a megfigyelési adatok felhasználása (Horányi, 2006). A háromdimenziós esetben adott időbeli sűrűséggel készítünk légkör analíziseket (tipikusan 6 óránként) és a folyamatot ciklikusan ismétljük (innen származik az adatasszimilációs ciklus fogalma; 10. ábra). A négydimenziós esetben az adatasszimiláció folytonos, azaz nemcsak, hogy minden megfigyelést figyelembe veszünk, hanem azokat pontosan a mérésük időpontjában alkalmazzuk (11. ábra).



10. ábra. A szekvenciális (háromdimenziós adatasszimiláció) vázlat. A háttérmezőt (*) 6 óránként pontosítjuk a megfigyelésekkel (+; o: megfigyelések), s készítünk újabb háttérmezőt. Az eljárást ciklikusan ismétljük, létrehozva az adatasszimilációs ciklust (Horányi, 2006).



11. ábra. A négydimenziós variációs adatasszimiláció sematikus ábrája. A modell által leírt állapotokat (trajektória) igazítjuk a rendelkezésre álló megfigyelésekhez (O_i), azaz azokat a kezdeti állapotot megelőző modellállapotokat tekintjük, amelyek a legjobban illeszkednek (folytonos vonal) a megfigyelésekhez (Horányi, 2006).

- A tér- és időbeli felbontás problémaköre. A légköri modelleket egy meteorológiai (tér- és időbeli) rácshálózaton oldjuk meg. A véges különbséges numerikus módszerek stabilitásának kritériuma az ún. CFL-feltétel (*Courant-Friedrichs-Lewy*-feltétel). Az ezt leíró cikket 1928-ban publikálta *Courant, Richard* (1888–1972); *Friedrichs, Kurt Otto* (1901–1982) és *Lewy, Hans* (1904–1988). E szerint a parciális differenciálegyenletek (így a légköri modellek) megoldásában az alkalmazott rácsfelbontás (horizontális és vertikális) és a modellben használt időlépcső hányadosa nagyobb kell, hogy legyen, mint az adott irányban leggyorsabban terjedő hullám sebessége. (Megjegyezzük, hogy ez a feltétel az explicit, – „időben előrehaladó” – numerikus sémák esetén szükséges. Az implicit módszerek nagy előnye a feltétel nélküli stabilitás. Itt az időlépcső választásának az egyenletrendszer által leírt nemlineáris folyamatok miatti oszcilláció megszüntetése szab határt. Az implicit módszerek számításigénye viszont nagyobb a mátrixműveletek és az alkalmazott rácpontok nagyobb száma miatt.
- Az első számítógépet 1945-ben konstruálták. A számítógép atyja a magyar származású matematikus *Neumann János* (1903–1957). A gép neve ENIAC (*E*lectronic *N*umerical *I*ntegrator *A*nd *C*omputer).

Az első barotrop (egyszintes) modell rácsfelbontása 8 fokos (a 45° szélességi körön 736 km) volt, s a 24 órás előrejelzés elkészítéséhez közel 24 óra kellett. A mai fejlesztés alatt álló globális modellek horizontális rácsfelbontása már 10 km alatti, s a vertikális modellszintek száma félszáz feletti. Egyre hangsúlyosabb szerepet kapnak a parametrizációk (talaj, határreteg, felhőfizika, sugárzásátvitel stb.), illetve a sztratoszféra és a mezoszféra dinamikája. A modellekbe egyre inkább beépítik a levegőkémiai és légkörfizikai folyamatokat.



12. ábra. A világ első 500 számítógépének teljesítménynövekedése 1993 és 2010 között. Tíz év alatt az elsőből az 500-adik lehet a számítógép.

A numerikus időjárás-előrejelzés fejlődése igazi sikertörténet. A számítástechnikai lehetőségek bővülésével folyamatosan nő a modellek tér- és időbeli felbontása. Ma már „összeérnek” a mérnöki tudományokban alkalmazott numerikus megoldók, mint pl. a FLUENT, amelyben egy-egy épület körüli áramlást a határfelület mentén akár cm-es felbontással adnak meg és a mezoskálájú meteorológiai modellek, ahol a legkisebb rácsméret már m-es nagyságrendű, lehetővé téve pl. az utcaközök áramlási rendszerének vagy a gomolyfelhők fejlődésének direkt modellezését. Itt már a molekuláris viszkozitás hatását is figyelembe kell venni. Ahogy haladunk a mikroskálájú folyamatok közvetlen modellezése felé, ismét fontossá válik (i) az új numerikus modellezési technikák fejlesztése, (ii) a „rácshalatti” turbulens folyamatok parametrizálása. Itt a néhány méterestől a néhány 100 m-es folyamatokról van szó, míg a numerikus modellezés hajnalán a „rácshalatti” turbulencia a több száz kilométeres mezoskálájú folyamatokat jelentette. Fontos kérdés továbbra is (iii) a felszín-bioszféra-légkör kölcsönhatások leírása. Továbbra is probléma (iv) a megfelelő sűrűségű és térbeli felbontású mérések hiánya, s (v) a számítástechnikai kapacitás sem elég – hasonlóan *Richardson* korához.

A gyors fejlődés, a számítógépek rövid idő alatti „elavulása” felhívja a figyelmet, hogy egy mai nagyteljesítményű asztali számítógép 10–15 évvel ezelőtt akár az első 500 számítógép egyike is lehetett volna (12. ábra). Így az igazi kihívás nem a számítógép hiánya, hanem a jó ötlet az adatasszimilációtól a numerikus sémákon át a különböző parametrizációs eljárásokig.

Ha vázlatpontokba szedve szeretnénk bemutatni a numerikus modellezéshez kapcsolódó dinamikus meteorológiai kutatások fő irányait, akkor a következőket mondhatjuk:

- egyszerű dinamikai modellek konstruálása a különböző skálájú légköri folyamatok fejlődésének a megértéséhez,
- határfelületi jelenségek, instabilitások, energiaátalakulások,
- részletesebb parametrizációs eljárások (sugárzásátvitel, felhő- és csapadékképződés, határreteg, felszín-bioszféra-légkör kölcsönhatások stb.),
- ensemble előrejelzések (az időjárás folyamatok előrejelzése mellett az előrejelzések megbízhatóságát is meg kell adni),
- numerikus módszerek fejlesztése és skálafüggő alkalmazása (véges különbséges, véges elem, pszeudo-spektrális, spektrális módszerek, beágyazott modellek, a tér- és időfüggő rácshálózat kérdése),
- modell-inicializáció (3D és 4D technikák, szűrési eljárások, pl. digitális Kálmán-szűrő).

I.2.6. A dinamikus meteorológia helyzete, főbb kutatási irányai

Véget ért a dinamikus meteorológia nagy évszázada (1850–1950). A világ meteorológiai kutatásának azonban közel 10%-a ma is szigorúan vett elméleti (dinamikus) meteorológia. Töretlen (i) a numerikus modellek fejlődése, (ii) az új parametrizációs eljárások kifejlesztése, (iii) a légköri mozgásrendszerek tanulmányozása. Folytatódik az „aprómunka”. Az elmúlt 60 évnek azonban voltak meghatározó állomásai:

- a skálafüggő légköri instabilitások, légköri hullámmozgások, a légköri turbulencia és energiaátalakulások egységes szemléletű tárgyalása,
- az *Edward Lorenz* (1917–2008) nevéhez fűződő káoszelmélet. E szerint nem lehetséges az időjárás pontos előrejelzése, mivel a légkör viselkedését leíró folyadékdinamikai elméletek kaotikus természetűek. Az időjárás megfigyelőállomások nem egyenletesen

fedik le a Föld felszínét, a rendelkezésre álló adatok térben és időben is korlátozottak, ami további bizonytalanságot eredményez a légkör kiindulási állapotának meghatározásánál.

- az ensemble (sokasági) előrejelzések elméletének kialakulása, az ehhez kapcsolódó modell-inicializációs eljárások, illetve a célzott megfigyelések elméletének kidolgozása, azzal a gyakorlati céllal – ami a dinamikus meteorológiai fő feladata – hogy jobb legyen az időjárás előrejelzése. Egy prognózis ugyanis akkor és csak akkor teljes, ha hozzá tudunk rendelni megbízhatósági mutatókat (beválási valószínűségeket).

A dinamikus meteorológia főbb kutatási irányairól a legfontosabb szakmai folyóiratokból tájékozódhatunk. Ezek a következők:

- Boundary Layer Meteorology,
- Journal of the Atmospheric Sciences,
- Journal of Geophysical Research D,
- Monthly Weather Review,
- Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,
- Tellus A.

A jelentősebb kutatási irányok:

- légköri instabilitások (a különböző tér- és időskálájú folyamatok fejlődése),
- légköri energetika (energiaátalakulások, kapcsolat a különböző mozgásrendszerek között),
- légköri turbulencia,
- felszín-bioszféra-légkör kölcsönhatások modellezése, a felszínközeli réteg és a határreteg elmélete (inhomogén felszín feletti turbulens kicserélődés, a rácsalatti turbulencia kérdése)
- az időjárási jelenségek modellezési lehetőségei, az előrejelezhetőség problémaköre, a modell-inicializáció kérdése,
- a káoszelmélet alkalmazása a meteorológiában,
- a numerikus módszerválasztás kérdése,
- skálafüggő meteorológiai folyamatok egyszerűsített dinamikai modellezése,
- ensemble-előrejelzések „a légkör olyan, mint Herkules a válaszüton”,
- az éghajlat-modellezés elméleti kérdései, fizikai klimatológia (a numerikus modellek hosszú távú integrálása, a megmaradási tételek teljesülése, parametrizációk, matematikai módszerválasztás, az eredmények interpretálása, a modell és a valóság kapcsolata).

A dinamikus meteorológia történetének utolsó fejezeteként a légköri turbulenciaelmélet fejlődésével foglalkozunk. A turbulencia – ellentétben a kaotikus mozgással – egy sok szabadsági fokú rendszerként írható le. A turbulencia sajátja a légköri folyamatoknak a kis szellőkésektől a zonális áramlásra rakódó nagyskálájú szinoptikus képződményekig.

A légköri folyamatok multi-skálájúak. A turbulenciaelmélet alapján érthetjük meg az energiaátalakulásokat, vagy a különböző skálájú mozgásrendszerek (instabilitások) fejlődését.

A turbulenciaelmélet hidat képez az elméleti folyadékdinamika, a hidrodinamika, a mérnöki tudományok (áramlástan) és a meteorológia között. A turbulens mozgások vizsgálata köti össze a dinamikus meteorológiában a mikroskálájú folyamatokat, a felszínközeli réteg és a határreteg jelenségeit a mezo- és nagyskálájú folyamatokkal. A légköri turbulencia és a határreteg folyamatainak elemzése a dinamikus meteorológia tananyag ötöde. E tématerület fontos pl. a nyomanyagok turbulens diffúziós folyamatainak a megértésében, vagy a szennyezőanyag-terjedés modellezésében, szorosan kapcsolódik a levegőkémiahoz és a légkörfizikához.

A légköri folyamatok leírásában, a turbulencia modellezésében a hasonlósági kritériumok nyújtanak segítséget. Ez az áramlások összehasonlíthatóságának, a közös tárgyalásmódnak az alapja. Lehetővé teszi a légköri és az óceáni folyamatok együttes tárgyalását, vagy a bolygólégkörök dinamikai egyenletekkel történő modellezését. Ilyen pl. a WRF Planet háromdimenziós mezoskálájú modell, amelynek a marsi és a Titánra vonatkozó változata jól használható kutatási és oktatási célokra. Ugyanazok a kormányzóegyenletek, „csak” a légkör összetétele, a fizikai állandók értéke, a folyamatok típusa és nagyságrendje, a légkörben ható erők egymáshoz képesti viszonya vagy a turbulens kicserélődés intenzitása változik.

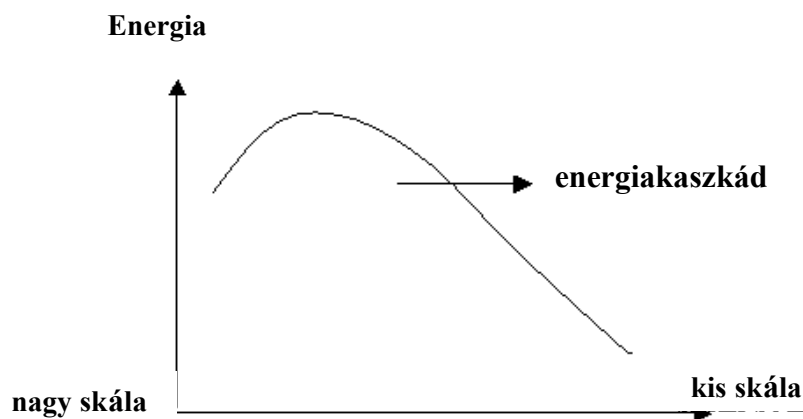
Nézzük a legfontosabb hasonlósági kritériumokat, dimenzió nélküli mennyiségeket:

- Reynolds-szám (Re) - a gyorsulás (a tömegegységnyi légrézre ható erők eredője) és a molekuláris viszkozitási erő hányadosa. (A lamináris és a turbulens áramlást választja el.)
- Froude-szám (Fr) - a gyorsulás és a nehézségi erő hányadosa.
- Rossby-, vagy Kibel-szám (Ro) - a gyorsulás és a Coriolis-erő hányadosa. (Többek között a bolygó légkörök dinamikai összehasonlítására szolgál.)
- Ekman-szám (E) - a turbulens viszkozitási erő és a Coriolis-erő hányadosa.
- Richardson-szám (Ri) - a felhajtó erő és a vertikális nyírási erő hányadosa.
- Strouhal-szám (St) - a folyadék stacionárius áramlásának kritériuma. Az áramlási instabilitás frekvenciájából, az áramlás sebességéből és az áramlás útjába helyezett akadály karakterisztikus méretéből számítható. Henger alakú testek esetén értéke 2.
- Mach-szám (M) - megadja, hogy mennyire befolyásolja a folyadék összenyomhatósága a folyadék mozgását. Szétválasztja a szubszonikus és szuperszonikus áramlásokat. Az áramlási sebesség és a hangsebesség hányadosa.
- A konvekcióval történő stacionárius hőátadás hasonlósági kritériumai. Itt kis skálájú folyamatokra kell gondolni, ahol fontos a molekuláris viszkozitás. Lehet az pl. egy hőmérőház árnyékolója, vagy a felszín feletti néhány cm-es légtér:
 - Prandtl-szám (Pr), a hőátadás határfok jellegű mérőszáma. Az áramló közeg állandó nyomáson vett fajhőjétől, a molekuláris diffúziós együtthatótól és a közeg hőátadási tényezőjétől függ.
 - Nusselt-szám (Nu), a Rayleigh- és a Prandtl-szám függvénye, az áramlásba helyezett test karakterisztikus mérete, a közeg hővezetési és hőátadási tényezője határozza meg.
 - Grashof-szám (Gr), a térfogategységre eső felhajtóerő és a belső súrlódási erő hányadosa.

Nézzük a turbulenciaelmélet fejlődését, az elmúlt közel másfél évszázad eredményeit! Gyakran találkozunk azokkal a nevekkkel, akikről a hasonlósági kritériumokat is elnevezték.

- *Reynolds, Osborn* (1842–1912) angol fizikus. Nevéhez fűződik a lamináris és a turbulens áramlás elkülönítése, a turbulencia keletkezésének vizsgálata. A hasonlósági elmélet egyik megteremtője (Reynolds-szám). A meteorológiai állapotjelzők pillanatnyi értékeit egy átlagos érték és egy erre rakódó fluktuációs tag összegeként írta le. A Reynolds-féle átlagolást máig használjuk. A molekuláris viszkozitást az átlagos mozgás és a fluktuációk segítségével vizsgálta.
- *Friedmann, Aleksandr Aleksandrovich* (1888–1925) orosz matematikus, fizikus. A korrelációs függvények alkalmazása a turbulencia statisztikai szerkezetének leírásában, és az ezekből lezártatott dinamikai egyenletek felírása – Friedmann-Keller-egyenletek. Maradandót alkotott a kozmológiában is. Az ő nevéhez fűződik a táguló világegyetem képe.

- *Richardson, Lewis Fry* (1881–1953) Megadta a légkör vertikális stabilitásának mérőszámát, a termikus és mechanikus turbulencia viszonyát. (Korábban már ismertettük az első numerikus előrejelzését (*Richardson, 1922*) – egy sokoldalú tudós képe rajzolódik elénk.)
- *Prandtl, Ludvig* (1875–1953) német fizikus, meteorológus – a mozgásegyenletek határretegben használatos alakjának elméleti levezetése. *Kármán Tódor*ral együtt kidolgozta a félempirikus turbulenciaelmélet hidrodinamikai alapjait. Az utódok tiszteletből a felszínközeli állandó fluxusú réteget gyakran Prandtl–rétegnek nevezik.
- *Kármán Tódor* (1881–1963), magyar származású amerikai fizikus. A turbulencia statisztikai elméletének egyik megalapítója. Leírja az akadályok mögött kialakuló turbulens áramlás szerkezetét (Kármán–féle örvénysorok). A logaritmikus szélprofil egyenlet felírása is az ő nevéhez kapcsolódik. Tiszteletből róla nevezték el a turbulens áramok és a meteorológiai állapotjelzők gradienseit összekötő egyenletben szereplő állandót. Ez a Kármán-konstans.
- *Taylor, Sir Geoffrey Ingram* (1886–1975) angol fizikus. 1935-ben kidolgozza az izotrop turbulencia elméletét.
- Az elméletet *Kolmogoroff, Andrej Nikolajevich* (1903–1987) orosz matematikus, fizikus fejlesztette tovább (1941), leírva a lokálisan homogén és izotrop turbulenciát. Szintén ő kezdett el foglalkozni a turbulens kinetikus energia spektrumával, s a turbulens kinetikus energia disszipációjával (13. ábra).



13. ábra. A turbulens kinetikus energiakaszád. Az energia a nagyobb hullámhosszak felől az alacsonyabbak felé „áramlik”. A negatív viszkozitás ennek a fordítottja, amikor a nagyobb skálájú folyamatok kapnak energiát a kisebb skálák felől (pl. egy trópusi ciklon fejlődésében a konvekció szerepe).

- *Ekman, Vagn Walfrid* (1874–1954) svéd oceanográfus, *Vilhelm Bjerknes* tanítványa. Leírja a tengeráramlások mélység szerinti változását. A határreteg-meteorológia kialakításában játszott szerepét a Bergeni Iskola kapcsán már említettük.
- *Starr, Victor Paul* (1909–1976) amerikai meteorológus, kiváló tanáregyéniség, aki a nagyskálájú turbulens mozgásokkal, a különböző skálájú légköri folyamatok közötti energiaátalakulásokkal foglalkozott. Nevéhez kapcsolódik a negatív viszkozitás fogalmának bevezetése. (Egy nagyobb skálájú folyamat a kisebb skálák felől is kaphat energiát.)
- *Monin, Andrei Sergeevich* (1921–2007) és *Obukhov, Aleksander Mikhailovich* (1918–1989) orosz fizikus, meteorológus. Az általuk kidolgozott félempirikus hasonlósági elméletet (1950-es évek közepe) máig használják a felszínközeli réteg turbulens kicserélődési folyamatainak leírásában.

- *Monin, Andrei Sergeevich és Zilitinkevich, Sergei Sergeievich* (1936-) orosz fizikus, meteorológus. A félempirikus hasonlósági elmélet kiterjesztése a planetáris határreteg turbulens kicserélődési folyamatainak modellezésére (1960-as évek). A stabil felszínközeli réteg és a határreteg hasonlósági elmélete (*Zilitinkevich*).

I.3. A dinamikus meteorológia hazai története

I.3.1. Kezdetek

Az első magyar nyelvű meteorológiai tankönyv „*Berde Áron: Légtüneménytan s a két Magyarhon égaljviszonyai s ezek befolyása a növényekre és állatokra. (1-2. rész)*” 1847-ben jelent meg. *Innen kezdjük a történeti áttekintést.* A könyv szerzője *Berde Áron* (1819–1892), a kolozsvári egyetem professzora, a Magyar Tudományos Akadémia tagja. A meteorológiai tudomány bemutatásában *Dove* német meteorológus (*Berde* mestere) hatása érződik. A könyv megfelel kora európai tudományosságának.

Greguss Gyula (1829–1869), a Bécsi Politechnikumban tanult. 1864-től tagja a Magyar Tudományos Akadémiának. A „Természettani földrajz” című 1864-ben megjelent könyvében szereplő általános cirkulációs modellben az áramlás már szélességi körök szerint is cellákra bomlik. Érdekes cikket közölt a meteorológia tudomány haladásairól a Természettudományi Közlönyben, 1869-ben. Többek között ezt írta: „Ha nálunk valami változás keletkezik a légkörben, az csakhamar módosulva, új változásokat előidézve tovaterjed; hasonlóképpen a háborításoknak, melyek nálunk feltűnnek, bölcsője rendszerint távoli vidékeken keresendő; a légkör állapota, amint azt ez órában megfigyeljük, következménye azon állapotoknak, melyekben a légkör egy órával, egy nappal elébb találkozott.”

Az elmélet és a gyakorlat, a mérés és a modellezés kapcsolatáról, a csak SOK és az ÉRTELMESES munka különbségéről is álljon itt egy idézete: „... sokan derűre-borúra adatokat halmoznak rakásra, időt s fáradságot nem kímélve igazán vak buzgósággal űzik a munkát, nem tartva szemük előtt bizonyos meghatározott célt.”

Heller Ágost (1843–1902) műegyetemi tanár, a Magyar Tudományos Akadémiai tagja; a [Heidelbergi Egyetemen](#) [Kirchoff](#), [Gustav Robert](#) (1824–1887) és [Helmholtz](#) tanítványa volt.

A természettudományi Közlöny 1895-ös évfolyamában megemlékezik *Helmholtz* munkásságáról. Tárgyalja a hullámok és a szél energiáját, foglalkozik az örvénylő mozgásoknak megfelelő hidrodinamikai egyenletek integráljaival. A hazai elméleti meteorológiai gondolkodás egyik megalapozója. 1883-ban megjelent „*Physikai Földrajz*” című könyvében már a szél keletkezését a légnyomás, nem pedig a hőmérséklet változásával hozza összefüggésbe.

Kövesligethy Radó (1862–1934), meteorológus, csillagász, geofizikus, a Magyar Tudományos Akadémia tagja. Munkásságát az Ógyallai Obszervatóriumban kezdte *Konkoly Thege Miklós* (1842–1916) irányításával, később a Budapesti Tudományegyetem tanára lett, 1890-től meteorológiai előadásokat is tart. 1893 *Hann* vizsgálatai alapján elemzi az adiabatikusan fel- és leszálló levegőrészecskéket. Ahogy cikkében írja: „... a levegő körfolyamata a meteorológiának ma még egyetlen ága, mely az analitikai tárgyalást megbírja ...”. Levezeti a nedves adiabata egyenletét; felhívja a figyelmet a gomolyfelhők közötti kompenzációs leáramlások fontosságára. E jelenség elméleti leírását *Bjerknes, V.* és *Petterssen, S.* adta meg az 1930-as években.

Fontos dátum a Magyar Országos Királyi Meteorológiai és Földdelejjességi Intézet megalapítása 1870-ben. Ez adta a szervezeti keretet a hazai meteorológia, s benne az időjárás-előrejelzés és kutatás fejlődéséhez. Az első térképes prognózist 1891-ben adták ki. 1897-ben megindul az *Időjárás* című folyóirat *Héjas Endre* (1867–1947) szerkesztésében. Az elméleti és alkalmazott meteorológiai kutatási eredményeket közlő folyóirat a világ egyik legrégebbi szaklapja.

I.3.2. A hazai dinamikus meteorológia fénykora – a századfordulótól az 1930-as évekig

Hasonlóan a nemzetközi fejlődéshez, a hazai elméleti meteorológiának is jelentős időszaka volt a XX. század első harmada. Hamar felismerték a Meteorológiai és Földmágnességi Intézet vezetői, hogy a korszerű meteorológia műveléséhez matematikai fizikai ismeretek kellenek. Egyre többen kerültek az intézetbe a Budapesti Tudományegyetem matematika-fizika szakáról. A kiváló külföldi – különösen német – kapcsolatok, az Intézet nemzetközi hírű vezetői biztosították a szakmai színvonalat.

A dinamikus meteorológiában a fő kutatási terület a légkör vertikális szerkezete, a vertikálisan elmozduló levegőrész viselkedése volt, ami a német iskola, *von Exner-Ewarten, Felix Maria* (1876–1930), *Ertel, Hans* (1904–1971) és *Koschmieder, Harald* (1897–1966), hatását tükrözte.

Nézzük, kik vezették az Intézetet a századelőtől a második világháború végéig, s milyen tudományos eredményeket értek, el mindenekellett a dinamikus meteorológia területén:

- 1890–1911 között *Konkoly Thege Miklós*, (1842–1916) a Magyar Tudományos Akadémia és az országgyűlés felsőházi tagja, az Ógyallai Fő-Obszervatórium (1871) megalapítója volt az igazgató. A kor színvonalán álló műszerparkkal szerelte fel az Intézetet. Akkor épült az OMSZ mai székháza.
- 1911–1927 között *Róna Zsigmond* (1860–1941), a leíró klimatológia egyik hazai megteremtője, irányította az Intézetet. Nevéhez fűződik többek között a felsőbb légrétegek (aerológia) kutatásának megszervezése.
 - A függőlegesen felemelkedő illetve lesüllyedő légrésezecske labilitási viszonyainak tanulmányozásával a hazai dinamikus meteorológiában is maradandót alkotott. Foglalkozott a Föld forgásának eltérítő erejével és a nagykiterjedésű hőcserélődési áramlatok szerepével is. Követte *Bjerknes, V.* és *Richardson, L.F.* munkáit. 1925-ben az Időjárás hasábjain ismertette a polárfrontelméletet (Bergeni Iskola), bemutatva a frontálzónákat.
- 1927–1932 között *Steiner Lajos* (1871-1944) geofizikus és meteorológus állt az Intézet élén. 1907-ben nyert magántanári kinevezést a Pázmány Péter Tudományegyetemen, amit 1937-ben kiterjesztettek légkörfizikára is, 1917-től tagja a Magyar Tudományos Akadémiának. A hazai dinamikus meteorológiai kutatás egyik kiválósága. Ismerkedjünk meg munkásságának főbb eredményeivel!
 - „A légkör sűrűdése és a felső inverzió” című 1914-ben megjelent dolgozatában a sztratoszférikus inverzió lehetséges okát kutatja, felhasználva *Fényi* munkáját.
 - A dinamikus meteorológiai irodalom alapos ismerője. Ő mutatja be kora legjobb tankönyveit az Időjárás olvasóinak az 1910-es és 20-as években:
 - *Bjerknes*: Dynamic Meteorology and Hydrography.
 - *Richardson*: Weather Prediction by Numerical Process.
 - *Exner*: Dynamische Meteorologie.
 - A sztratoszféraig érő légoszlop középhőmérséklet- és nyomásváltozása közötti kapcsolatot vizsgáló 1926-ban megjelent cikkével nemzetközi elismertséget szerzett. Foglalkozott az advekciónak bekövetkező nyomás- és hőmérsékletváltozással is. Nevét örzi az ún. *Steiner-tétel*: „Ha egy tetszőleges szinten tömegbeáramlás (vagy kiáramlás) következtében az e szint fölött fekvő légoszlopban lokális nyomásváltozás lép fel, akkor

az alsó légoszlopban minden légrészecske individuális nyomásváltozása egyenlő egymással és a felszínen fellépő nyomásváltozással.”

- Foglalkozott a légkör sugárzási és mechanikai egyensúlyával. Eredményeit 1932-ben publikálta.
- *Koschmieder* az általa írt korszakos Dinamikus meteorológia könyvben „Dynamische Meteorologie, Leipzig, 1933” hivatkozik *Steiner* eredményeire, sőt levezetéseit és táblázatait is átveszi. A könyv 1941-es második kiadásába *Steiner* hatására kerültek be *Rosby* és *Ertel* eredményei.
- „Az időjárás” című ismeretterjesztő könyvet 1931-ben írta. *Réthy Antal* szerint a magyar meteorológiai irodalom egyik gyöngyszeme. A szerző itt is hangsúlyozza a meteorológiai feladatok matematikai-fizikai jellegét, az időjárás hidrodinamikai előrejelzésének fontosságát.
- 1932–1934 között *Marczell György* (1871–1943) igazgatta az Intézetet. A hazai aerológiai kutatás megteremtője, de publikált cikkeket mikrometeorológiai témában is. Elsősorban a mérések területén végzett úttörő munkát.
- 1934 és 1944 között *Réthy Antal* (1879–1970), volt a Meteorológiai és Földmágnességi Intézet vezetője. A Szent István Akadémia titkára, majd elnöke. Részt vett az első magyar Adria-kutató expedíción, s maradandót alkotott a történeti éghajlati adatok feldolgozásában is. Vizsgálta a vízrendezés hatását az Alföld éghajlatára. Nem mutatott ki szárazodást. A török meteorológiai szolgálat egyik megszervezőjeként is emlékezhetünk rá.

A XX. század első harmadának dinamikus meteorológiával is foglalkozó szakemberei közül hárommal ismerkedünk meg részletesebben.

Hegyfoki Kabos (1847–1919) túrkevei plébános, a századelő híres klimatológusa. Publikált többek között a Természettudományi Közlönyben, a Meteorologische Zeitschrift-ben és a Wetter-ben is. Több száz dolgozata közül nem egy akad, amelyik a dinamikus meteorológia szemszögéből is érdekes.

- Elsőként hivatkozik a *Buys-Ballot*-féle széltörvényre (1895).
- Saját készítésű felhőhuzam-mérőjével szerzett adatokat feldolgozva (1894) a vertikális szélnyírásra mint dinamikai tényezőre vont le következtetéseket. Megállapította, hogy a szél többségében a magassággal jobbra fordul. Kimutatta azt is, hogy a szél magassággal történő jobbra fordulása annál ritkább, minél inkább emelkedik a nyomás. Mai magyarázat: a határréteg szélfordulási törvénye + az advekción (termikus szél).

P. Fényi Gyula (1845–1928) jezsuita páter, a kalocsai *Haynald-Csillagászati Observatórium* igazgatója. Napfizikai megfigyelései mellett meteorológiai kérdésekkel is foglalkozott. *Róna Zsigmond* így írt meteorológiai észleléseiről Magyarország éghajlatáról szóló könyvében: „a szélfordulás tapasztalt jelensége – amint azt már *Fényi* is sejtette – a ciklonpályák helyzetével kapcsolatos”.

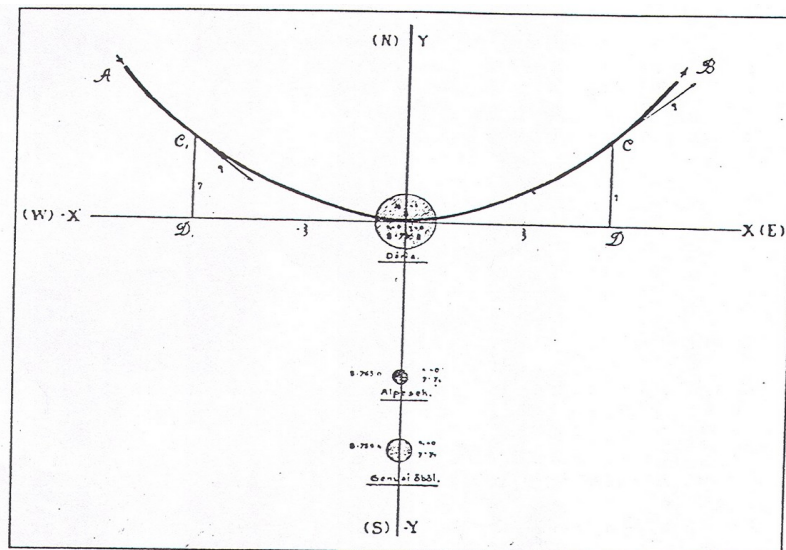
Elsők között próbálta elméletileg megmagyarázni a sztratoszféra kialakulását. Cikkét az Időjárásban publikálta. Az okot a nagy magasságban növekvő ózon koncentrációjában vélte felismerni. Számításokkal igyekezett meghatározni a sztratoszféra határának hőmérséklet- és magasságváltozása, valamint a felszíni nyomásváltozás közötti kapcsolatot.

Harmadikként *Homoródi Anderkó Aurél* (1869–1940) munkásságát ismertetjük. A Meteorológiai és Földdelejtességi Intézet munkatársa, aki szintén tagja volt a Szent István Akadémiának. 1901-18 közt az Intézet ombrometriai (csapadékmérési) osztályát vezette. Nevéhez fűződik az ún. Anderkó-féle esőmérő konstruálása és bevezetése a hazai mérőhálózatba.

A Pázmány Péter Tudományegyetem magántanáraként meteorológiai előadásokat tartott a Bölcsészeti Karon; *Kövesligethy Radó* munkáját folytatta.

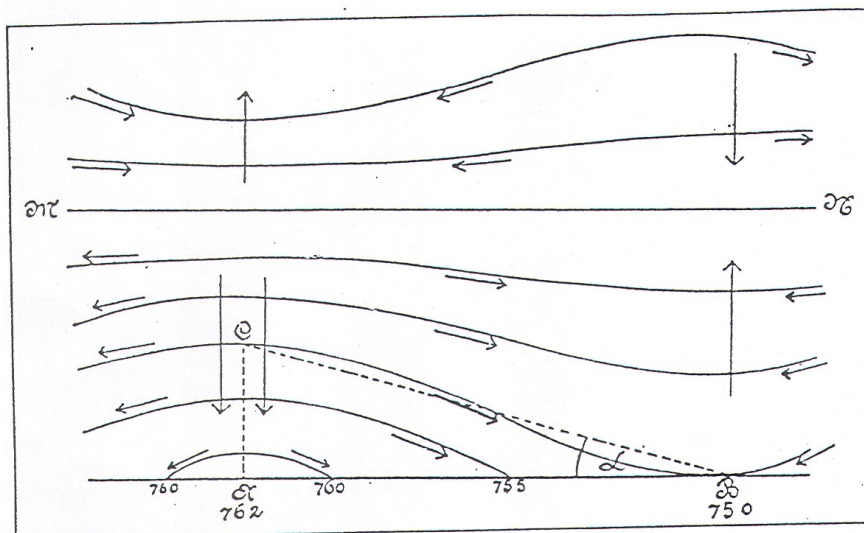
Nézzük a dinamikus meteorológiában elért eredményeit *Bodolainé Jakus Emma* szakirodalmi feldolgozása alapján.

- Adalékok az időprognózis elméletéhez című 1902-ben megjelent könyve a dinamikus meteorológiai ismeretek első magyar nyelvű összefoglalója (*Guldberg-Mohn* egyenlete a sűrűlódásos áramlásról, barometrikus magassági formula, a vertikális hőmérsékleti gradiens értéke különböző műléggörökben, mozgásegyenletek, az áramvonalak egyenlete, mezők egymásra helyezése, stb.).
- A másodrendű depressziók kialakulásának kinematikai és dinamikai feltételeiről szóló közlemény, 1906 – örvénymentes, potenciáláramlást feltételezve, szigorú egyszerűsítésekkel megoldja a mozgásegyenleteket. Arra a következtetésre jut, hogy az északi félgömbön valahányszor a depressziók parabola görbén mozognak, akkor éppen a pálya csúcspontjánál lévő ciklonoktól délre a nyomási mezőben viszonylagos maximum és minimum fejlődhet (14. ábra). A bipoláris depresszió izobárjait számítás útján is előállította és összevetette a tényleges helyzettel.



14. ábra. Másodlagos nyomási depresszió kialakulásának modellje *Homoródi Anderkó Aurél* szerint. Jól látszik a ciklonpálya, illetve az Alpok karéja és a Földközi-tenger között kifejlődő másodlagos depresszió.

- A mozgásegyenletek deriválásával levezeti a Z tengely körüli (x, y) síkra vonatkozó örvényességi egyenletet, amelyben a léggört már nem tekintette inkompresszibilisnek. Az abszolút örvényesség állandóságát a léggörben explicit formában először *Anderkó* bizonyította.
- A légáramlások általa felvázolt modellje hasonlít *Sutcliffe* klasszikus ciklonfejlődési elméletére, de megelőzi azt egy emberöltővel (vesd össze a 3. és a 15. ábrát).
- A pszeudoizotrop (homogén vízáteresztő) talaj szakaszos hőmérsékleti ingásának vizsgálatával (1914) kimutatja, hogy a léghőmérséklet maximumának a nyári napforduló után 27 nappal (július 18.) kell beállnia, ami közelítőleg teljesül is.
- Tanulmányozta a levegő éjjeli lehülésének folyamatát (1918), nomogramot dolgozott ki a hajnali fagy előrejelzésére.



15. ábra. A légáramlások háromdimenziós eloszlásának modellje *Homoródi Anderkó Aurél* szerint. Vessük össze az ábrát *Sutcliffe* közel fél évszázaddal későbbi ciklonfejlődési modelljével (3. ábra).

I.3.3. Az 1930-as évek közepétől az 1950-es évek közepéig

A meteorológia fejlődésébe közbeszólt a történelem. Nem voltak a két háború közötti elődöknek olyan tanítványai, akik továbbvitték volna a kutatásokat. Néhány kiemelkedő nevet azért említsünk meg ebből az időszakból is.

- *Dési Frigyes* (1912–1978) meteorológus, az Országos Meteorológiai Szolgálat (illetve jogelődjének) elnöke (1950–1974), az ELTE Meteorológiai Tanszék vezetője (1953-1970). Nevéhez fűződik az hazai dinamikus meteorológiai oktatás elindítása, az első tankönyv megírása 1970-ben *Rákóczi Ferenc*ccel közösen. Tudományos munkáját a 30-as évek végén kezdi. Foglalkozik a felszínközeli réteg turbulenciaelméletével, a köddel és a párolgással. A függőlegesen elmozduló légrésezecske egyensúlyi viszonyainak tanulmányozásával kapcsolatos első munkáját 1943-ban publikálta. A téma visszaköszön az ötvenes évek cikkeiben is – e kutatások azonban a nemzetközi szintéren már nem hoztak újat.
- Az Országos Meteorológiai Intézet munkatársai közül többen írtak dinamikus meteorológiai tárgyú hazai cikkeket. Említsük meg *Berkes Zoltán* (1908–1993), *Ozorai Zoltán* (1915–1980), *Aujeszkai László* (1903–1978) és *Kozma Béla* (1909–1996) nevét. Foglalkoztak (i) a vertikálisan elmozduló levegőrész leírásával, (ii) légköri energiaátalakulásokkal, illetve a szélút és a szélnyomás előrejelzésével.

I.3.4. Az új meteorológus generáció, az 1960-as évektől a 80-as évek elejéig

Az ELTE Természettudományi Karán 1950-ben indult a meteorológus képzés. A Meteorológiai Tanszék vezetője *Száva Kováts József* (1898–1980) professzor volt, akit 1953-ban igazságtalanul eltávolítottak a katedráról. A tanszékvezetést *Dési Frigyes* professzor vette át (1953–1970), majd őt követte *Dobosi Zoltán* (1915–2009) professzor úr 1983-ig.

Az Országos Meteorológiai Intézetnél az 1950-es évek második felében megjelent egy korszerű matematikai, fizikai ismeretekkel rendelkező, a kutatás iránt érdeklődő új generáció. Munkájukat *Bodolai István* (1923–1979) a kiváló dinamikus és szinoptikus meteorológus irányította. Tudományos pályája az 1950-es évek elején indult. Az orosz iskola (*Kibel*) eredményeire támaszkodva a számszerű előrejelzési módszerek hazai meghonosítója. Foglalkozott az örvényességi egyenlet egyszerűsítéseivel. Meghatározó szerepe volt az instabilitási vonalak, illetve az alacsonyszinti jet-ek hazai kutatásában. A mezoszínoptikai kutatásban iskolát teremtett. Fontos szerepe volt az ELTE egyszakos meteorológus képzésben: dinamikus és szinoptikus meteorológiát oktatott (1953–1956), majd speciális kollégiumot hirdetett határréteg-meteorológiából. Ő indította el a mezoszínoptika oktatást 1978-ban, amit halála után felesége, *Bodolainé Jakus Emma* vitt tovább több mint 20 évig. E hagyományra épül a mai oktatás. A tárgy előadója Horváth Ákos, a Siófoki Viharjelző Observatórium vezető munkatársa.

A hazai numerikus prognosztika kezdetei az 1960-as évek elejére nyúlnak vissza. Követték a nemzetközi szakirodalmat, foglalkoztak grafikus megoldási módszerekkel, s egyre inkább számítógépes programozással. Törekedtek az egyszerűbb számítási módszerek hazai meghonosítása. *Ambrózy Pál*, *Tánczer Tibor* és *Götz Gusztáv* tevékenységét kell kiemelnünk.

A 60-as évek második és a 70-es évek első felének kiemelt kutatási témája volt a hazai állomáshálózat optimális sűrűségének meghatározása. Itt *Czelnai Rudolf*, *Dési Frigyes* és *Rákóczi Ferenc* nevét kell megemlíteni. E kutatások érdeme a modern statisztikai szemlélet meghonosítása a hazai meteorológiában. Erre épülve kezdődött az adatasszimilációs módszerek kutatása a nyolcvanas évek elején, ami azóta is meghatározó eleme a hazai elméleti meteorológiai kutatásoknak.

A kor két meghatározó egyénisége az OMSZ-ben dolgozó *Götz Gusztáv* és az ELTE Meteorológiai Tanszék néhai professzora, *Rákóczi Ferenc*.

- *Götz Gusztáv* pályája az 1950-es évek közepén indult. Vizsgálta a légkör vertikális instabilitásait, a nagyskálájú folyamatok energetikáját. Jelenleg az időjárási folyamatok előrejelezhetőségével, a káoszelmélet meteorológiai alkalmazásával foglalkozik. Az OMSZ kutatói közül sokan az Ő szakmai irányításával kezdték pályájukat. Kiemelkedik dinamikus meteorológiai szakírói tevékenysége és a 2001-ben megjelent *Káosz és prognosztika* című monográfiája.
- *Rákóczi Ferenc* (1931–2000) mindvégig az ELTE Meteorológiai Tanszéken dolgozott, s annak vezető professzora volt 1983 és 1996 között. *Dési Frigyes*szel együtt a hazai dinamikus meteorológiai oktatás megteremtője. Kutatási területei: a meteorológiai állomáshálózatok optimális tervezése, az információelmélet meteorológiai alkalmazása, a sűrűlódásos áramlás elméleti leírása, a planetáris határréteg meteorológiája.

I.3.5. A maiak

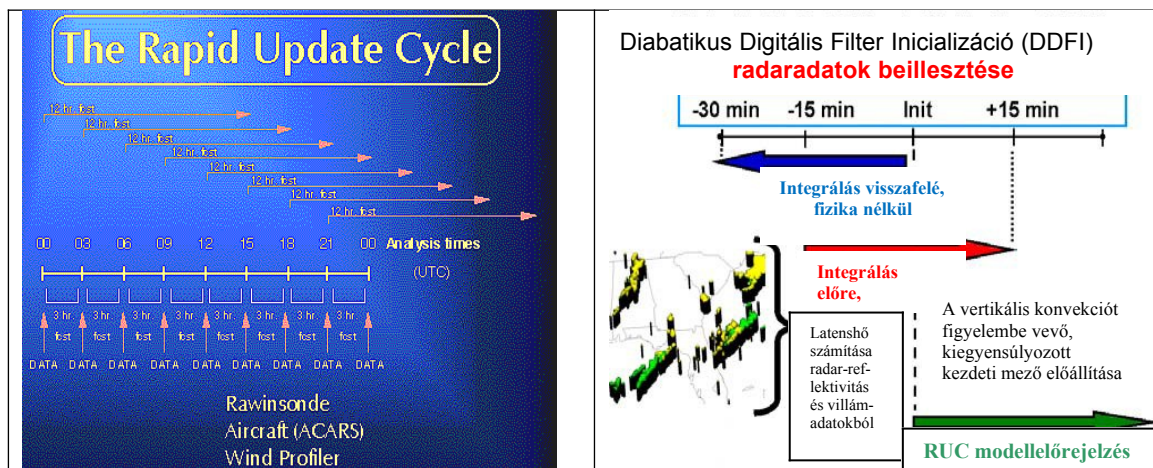
A nyolcvanas évek második felétől egyre több lehetőség nyílt a nemzetközi együttműködésre, amihez megfelelő alapul szolgált az egyetemi képzés és a hazai meteorológia színvonala.

1978-ban ismét elindult az egyszakos meteorológusképzés, ahol hagyományosan nagy súlyt helyeztek az elméleti oktatásra (matematikai analízis, elméleti fizika, dinamikus meteorológia, numerikus prognosztika). A matematikai-fizikai szemléletű „bevezetés a meteorológiába” tárgyat *Czelnai Rudolf* akadémikus oktatta. Az általa írt három kötetes jegyzet ma is haszonnal forgatható. A dinamikus meteorológiát *Rákóczi Ferenc*, a szinoptikus meteorológiát *Makainé Császár Margit* (1931–2003), míg a matematikai alapon felépülő, a felszín-légkör kölcsönhatásokat részletesen tárgyaló agrometeorológiát *Erdős László* tanította.

A dinamikus és szinoptikus meteorológiára épül a mezo- és távprognosztika, illetve a repülésmeteorológia. Ezek oktatásában *Bodolainé Jakus Emma*, *Koppány György*, és *Katkó Bertalan* vett részt. A légkörfizika és a levegőkémia tematikáját *Major György* és *Mászaros Ernő* akadémikusok, illetve *Bencze Pál*, *Takácsné Bónis Katalin* és *Wirth Endre* alakították. A szennyezőanyag-terjedési modellek elméleti igényű bemutatásához *Szepesi Dezső* tette meg az első lépéseket. Nem feledkezhetünk meg a klasszikus éghajlattant oktató *Dobosi Zoltán* professzor úr és *Felméry László* oktató és tankönyvíró munkásságáról sem. A dinamikus meteorológiai ismeretekre támaszkodott az újonnan indult fizikai klimatológia, amelyet *Mika János* oktatott.

A hetvenes évek végén, a nyolcvanas évek elején kezdődtek hazánkban a numerikus modellkísérletek (*Práger*, 1979). Az akkor induló kutatók megismerkedtek a német, a japán és az orosz meteorológiai iskola eredményeivel. Közülük *Dévényi Dezső*, *Iványi Zsuzsa*, *Mersich Iván* és *Práger Tamás* tevékenységét kell kiemelnünk. Az 1980-as évek végén *Dévényi Dezső* irányításával operatíván futott a Svéd Meteorológiai Szolgálatnál kifejlesztett és sikeresen adaptált numerikus modell. Ez alapozta meg az 1990-es évek elején indult, s máig tartó ALADIN modellfejlesztést. Ismerkedjünk meg néhányuk munkásságával, s emlékezzünk meg a hazai numerikus prognosztika és az adatasszimilációs kutatások külföldön is elismert kutatójáról, *Dévényi Dezsőről* (1948–2009)!

- *Práger Tamás*, matematikus, meteorológus. Az 1970-es évek közepétől foglalkozik a nagyskálájú időjárási folyamatok matematikai modellezésével. A hetvenes évek végén ő készítette az első Kárpát-medence térségére vonatkozó beágyazott numerikus előrejelző modellt. Bevezette a numerikus modellezés oktatását az ELTE-n. Számos fiatal kutatót indított el a pályán.
- *Dévényi Dezső* (1948–2009) meteorológus. Fő kutatási területe a numerikus modellfejlesztés, illetve a modell-inicializáció. Az OMSZ-ban működő kutatócsoportjával adaptálta a Svéd Meteorológiai Szolgálat (SMHI) számszerű előrejelzési modelljét az 1980-as évek végén. Részt vesz a meteorológus oktatásában (számszerű előrejelzés), diplomamunkák és PhD témák irányításában. A '90-es évek közepétől kisebb megszakításokkal az USA-ban dolgozott (NOAA Forecast Systems Laboratory, Boulder, Colorado). Az Amerikai Egyesült Államok Óceán és Légkörkutató Intézetében (NOAA) kifejlesztett numerikus előrejelző modell gyors adatasszimilációs rendszerének egyik kidolgozója (16. ábra). Sokan tartják mesterüknek. Neki köszönhető a nemzetközi szinten is elismert hazai numerikus módszerfejlesztő tevékenység elindítása, amit már a fiatalabb generáció visz tovább (*Ihász István*, *Radnóti Gábor*, *Horányi András* és az utánuk jövők).



16. ábra. Az USA-ban futó 3D variációs adatasszimilációs rendszer sémája. Balra a standard előrejelzés készítésénél felhasznált adatforrások: rövid modellfuttatások és mérések (felszíni állomások, rádiószondák, repülőgépek és wind profiler-ek). Jobbra a gyors modell-inicializációs rendszer sémája, a Doppler-radaradatok beillesztése a 3D VAR adatasszimilációs rendszerbe, digitális Kálmán-szűrő alkalmazásával.

- *Tóth Zoltán*, filozófus és meteorológus. Pályája az 1980-as évek elején indult. 1990-es évek eleje óta az USA-ban dolgozik. Az ensemble előrejelzések elméletével és gyakorlati megvalósításával foglalkozik, az egyik legismertebb magyar kutató.
- *Szunyogh István*, meteorológus. Az 1990-es évek elején kezdett dolgozni az ELTE Meteorológiai Tanszékén, kutatómunkáját a Hamilton-féle mechanika meteorológiai alkalmazásaival kezdte. Az 1990-es évek második felétől az ensemble előrejelzések és a célzott megfigyelések elméletével foglalkozik az USA vezető kutatóhelyein.

I.3.6. A hazai dinamikus meteorológia a nemzetközi publikációs tevékenység tükrében

Ahogy a hazai dinamikus meteorológia fejlődésének a bemutatásánál láttuk, az OMSZ, illetve jogelődjei mellett az egyetemi tanszékek képviselték a kutatást. A legfontosabb dinamikus meteorológiával foglalkozó kutatóhelyek az ELTE-n, a Pécsi Tudományegyetemen, illetve a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen vannak. Meteorológusok mellett alkalmazott matematikával, áramlástannal, elméleti, illetve komplex rendszerek fizikájával foglalkozó szakemberek is publikálnak dinamikus meteorológiai témájú cikkeket.

Ha a nemzetközi szakirodalmat vizsgáljuk, megállapítható, hogy a meteorológiai kutatások kb. 10%-a tartozik a dinamikus meteorológia témakörébe. Magyarország a világ meteorológiai cikktermésének kevesebb, mint 1%-át adja. Ezen belül az elméleti cikkek aránya 5% körüli, tehát rosszabb a nemzetközi átlagnál. Ellenben, ha a külföldön dolgozó magyar származású szakemberek munkáit is figyelembe vesszük, már a nemzetközi átlagnak megfelelően szerepelünk. A világ vezető folyóirataiban minden évben megjelenik néhány jó cikkünk.

