



Dr. Bottyán Zsolt<sup>1</sup>

## A REPÜLÉSRE VESZÉLYES MEZO-SKÁLÁJÚ METEOROLÓGIAI JELENSÉGEK MODELLEZÉSÉNEK ASPEKTUSAI - NUMERIKUS PROGNOZTIKAI MEGKÖZELÍTÉS

### 1. Bevezetés

Közismert tény, hogy a nem rakétaelven alapuló repülést, a repülőtestet magában foglaló levegő és a repülőtest között létrejövő sebességkülönbségből származó aerodinamikai emelőerő teszi lehetővé. A repülőgép típusától, feladatától függően a repülési útvonal teljes egészében vagy jelentős részben az atmoszféra alsó, 8-12 km vastag rétegében (*troposzféra*) helyezkedik el, amely egyben az időjárási jelenségek, folyamatok színtere is. A fel- és leszállások – melyek egyben a repülés legveszélyesebb fázisai – pedig a *planetáris határreteg* mintegy 800-1500 méteres kiterjedésű vertikális tartományát érintik. A repülések során azonban az atmoszféra állapota időben és térben egyaránt változik. Az említett változások között vannak jól ismert, kiszámítható, statikus légköri jellemzők (pl. a légnyomás exponenciális csökkenése a magassággal), de a repülésre igazán veszélyesek, a nehezen előre jelezhető, térben és időben egyaránt kis léptékű, gyorsan változó időjárási folyamatok (pl. zivatar, szélnyírás, turbulencia, CAT stb.). Ezeknek az időjárási folyamatoknak minél pontosabb előrejelzése a repülésmeteorológia egyik – ha nem a legnagyobb – kihívása. A repülésmeteorológiában alkalmazott *rövid távú előrejelzések* (nowcasting) készítéséhez nélkülözhetetlenek a térben és időben megfelelően nagy felbontású modellek segítségével előállított, numerikus előrejelzési produktumok. Az ilyen előrejelzések készítésének azonban számos elvi és gyakorlati korlátja van, melyeket szeretném röviden áttekinteni ebben a munkában.

### 2. A légköri folyamatok térbeli és időbeli nagyságrendjeiről

Légkörünk egy rendkívül összetett mozgásrendszer, melynek térskálája a 10 ezer km-es karakterisztikus méretű planetáris hullámoktól a néhány cm-es portölcsérekig terjed. Az említett folyamatok méretskálája természetesen folytonos, mégis megfigyelhetünk jellegzetes mozgásformákat adott méret- és térskálával. A légköri mozgásjelenségek mérettartománya és időtartama között igen erős kapcsolat figyelhető meg, melynek fontos tulajdonsága, hogy minél nagyobb kiterjedésű a folyamat annál tovább marad fenn az atmoszféránkban (1. ábra). Ugyanakkor, összefüggés mutatható ki a légköri mozgások előbb említett jellemzői és geometriájuk, valamint energetikájuk között is.

---

<sup>1</sup> ZMNE BJKMK Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék, egyetemi docens, okl. meteorológus, H-5008 Szolnok Kilián u. 1., E-mail: [bottyán.zsolt@zmne.hu](mailto:bottyán.zsolt@zmne.hu)

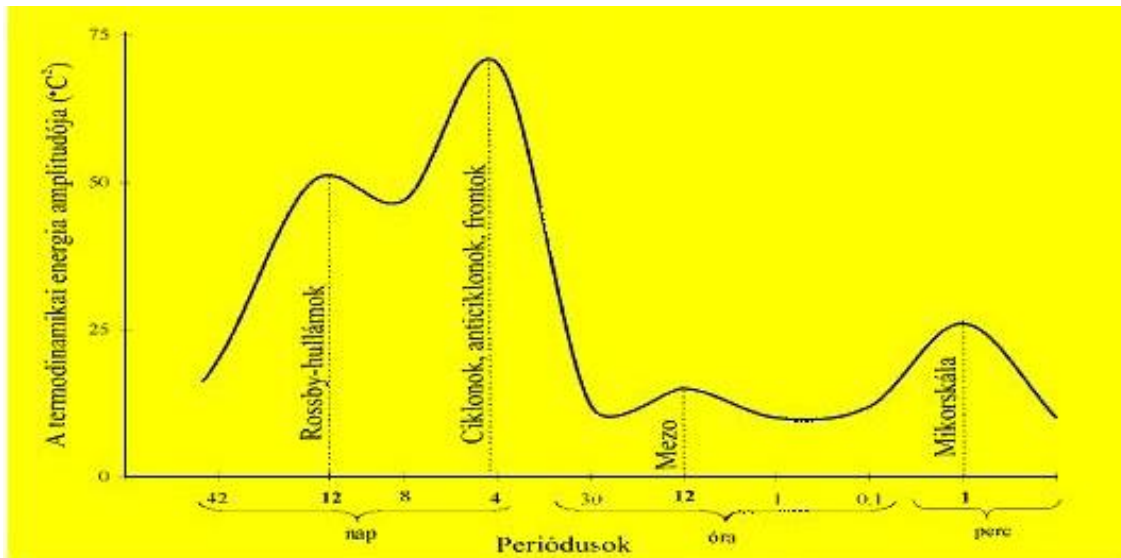
Időtartam / térbeli kiterjedés	Hónap/hét	Nap	Óra	Perc / másodperc	
10000 km	Planetáris hullámok				Makro $\alpha$
2000 km	Baroklin hullámok Ciklonok Anticiklonok				Makro $\beta$
200 km	Frontok Hurrikánok				Mezo $\alpha$
20 km			Low level jet Squall line		Mezo $\beta$
2 km			Zivatar CAT Városi hatás		Mezo $\gamma$
200 m			Tornádó Konvekció Hegyi hullámok		Mikro $\alpha$
20 m				Termik	Mikro $\beta$
				Turbulencia	Mikro $\gamma$
	Klimatológiai skála	Szinoptikus skála	Mezo-skála	Mikroskála	

1. ábra. A légköri mozgásrendszerek tér- és időskálája (Sándor és Wantuch, 2005.)

A légköri mozgásrendszerek *nagyságrendi osztályozásának* matematikai alapját a Fourier-sorok elmélete képezi. Az atmoszférában alapvetően előforduló - periodikus vagy kvázi-periodikus - hullámjellegű mozgásokat közelíthetjük *Fourier-sorokkal*, így az adott mozgások jellemző tulajdonságainak spektrál-analízisével lehetőségünk nyílik arra, hogy becslést kapjunk a különböző kiterjedésű légköri mozgásrendszerek *karakterisztikus idejére* vonatkozóan.

Nyilvánvaló ugyanis hogy, a spektrumban megjelenő lokális maximumokhoz tartozó periódusidejű légköri folyamatok kialakulásához leginkább kedvezőek a dinamikai feltételek az atmoszférában. Ha ezek után megvizsgáljuk a légköri folyamatok termikus energiaspektrumát, megállapíthatjuk, hogy négy lokális maximum jelentkezik a spektrumban, melyeket alapvetően három nagy meteorológiai skálacsoportba helyezhetjük el (2. ábra).

A 12 és a 4 napos periódusidő az ún. nagytérségű (szinoptikus) légköri folyamatok (Rossby-hullámok, ciklonok, anticiklonok) átlagos karakterisztikus ideje. Ezek a jelenségek alkotják a *makro* skálát. Jellemző rájuk, hogy horizontális méretük (1000-3000 km) jóval meghaladja a vertikális kiterjedésüket (10-18 km) és ezért alapvetően hidrosztatikai szempontból kiegyensúlyozottnak tekinthetők. Jellemző rájuk a középpontos szimmetria (3.a ábra).



2. ábra. A légköri mozgásrendszerek termikus energiaspektruma (Práger, 2008)

A következő periódusidő-maximum már az óra nagyságrendbe esik, átlagosan 12 óra. Ez a tartomány a meteorológiai **mezo-skálát** fedi le. Az ebbe a skálába tartozó jelenségek már nem hidrosztatikusak, horizontális méretük csak kb. 5-szöröse a vertikálisnak és bennük jelentős függőleges sebességek és gyorsulások tapasztalhatók. A skála legjellegzetesebb képviselői a konvektív mozgásrendszerek (zivatar, squall-line, tornádó, MCC stb.) (3.b. ábra).

A harmadik meteorológiai skála a **mikro** tartomány, melynek karakterisztikus periódusideje átlagosan 1 perc. A mikroléptékű mozgásokat maximum néhány száz méteres kiterjedés jellemzi és alapvetően a határréteg folyamatai tartoznak ide (tereptárgyak körül kialakult áramlások és a turbulencia) (3.c. ábra). Nagyon gyorsan változó jelenségekről van szó, melyek átmenetet jelentenek a rendezett és a sztochasztikus légköri mozgások között (Práger, 1992.)

Makro skála	Mezo skála	Mikro skála
		
a. mérsékelt övi ciklon	b. zivatar	c. turbulencia

3. ábra. A meteorológiai skálák jellemző mozgásrendszerei

### 3. A repülés és a mezo-skálájú légköri folyamatok kapcsolata

A repülési feladatokra leginkább azok a légköri (meteorológiai) folyamatok hordozzák a veszélyt, melyek viszonylag hirtelen alakulnak ki, képesek gyorsan helyzetüket megváltoztatni, nagy energiákat mozgatnak meg és hatásterületük összemérhető a repülési út vertikális és horizontális méretével. Általában a repülési feladatok időben karakterisztikusan néhány órát fednek le, a térbeli kiterjedésük pedig horizontálisan kb. 10-1000 km-es, míg vertikálisan néhány km-es nagyságrendben mozog.

A légkörben fellépő mozgásrendszerek időbeli és térbeli kiterjedését, a bennük felszabaduló energia mennyiségét, a repülőeszközök tulajdonságait és a repülési feladatok jellegét figyelembe véve elmondhatjuk tehát, hogy a repülésre leginkább veszélyes meteorológiai jelenségek a mezo-léptékű tartományban helyezkednek el (1. ábra). Nagy veszélyt jelentenek ezek a képződmények a repülés *felszállási* (take-off) és különösen a *megközelítési* (final approach) valamint az ehhez kapcsolódó *leszállási* (landing) fázisában, amikor alacsony a sebesség, kicsi a magasság és a repülőgép térbeli helyzetének szabadsági foka rendkívül alacsony. Ezek a korábban már említett mezo-méretű mozgásrendszerek néhány órás élettartamuk alatt óriási mennyiségű energiát szabadítanak fel és számos, a repülésre igen veszélyes fizikai jelenség kíséri megjelenésüket.

A fent említett mezo-tartomány egyik igen fontos és viszonylag gyakran előforduló jelensége a *zivatar*, mely magában hordozza a repülésre nagyon veszélyes:

- alacsony meteorológiai, repülési valamint ferde látástávolság értékeket,
- vertikálisan és horizontálisan egyaránt erős turbulenciát és szélnyírást,
- intenzív hajtómű és felületi jegesedést,
- nagy intenzitású folyékony és szilárd halmazállapotú csapadékhullást,
- időben és térben gyakori villámlásokat,
- erős, gyakran viharos erősségű változó irányú szelet.

Egy másik – a repülésre szintén életveszélyes – jelenség, a *köd* megjelenése is igen gyakran a mezo-skálához köthető. A rendkívül gyors látástávolság-csökkenéssel járó áramlási ködök dinamikáját is a mezo-tartományban zajló folyamatok írják le és a radiációs ködök kialakulása is előfordul ezen a meteorológiai mérettartományon (persze gyakran a *mikro-skálán* találkozunk ezzel a ködtípussal). Mind a zivatar, mind a köd előrejelzése a legnehezebb feladatok közé tartozik, ugyanakkor életbevágóan fontos a minél pontosabb prognosztizálásuk!

Elmondhatjuk tehát, hogy előrejelzési és repülésbiztonsági szempontból egyaránt alapvető fontosságú, hogy a légköri mozgásrendszerek közül a mezo-léptékű tartományra vonatkozóan is rendelkezünk numerikus modell produktumokkal az operatív prognosztikai munka során. A gyakorlatban alkalmazott mezo-skálájú numerikus modellek (MM5, WRF, ALADIN, és jelenleg kísérleti stádiumban az AROME) komoly eredményeket mutatnak az említett mozgásrendszerek előrejelzésében, de néhány alapvető elméleti és gyakorlati probléma rendkívül megnehezíti ezen a skálán a modellfejlesztést. Másfelől, a fentebb említett problémák miatt, a jelenleg futtatott modellek bizonyos

– gyakran a repülésre veszélyes jelenségeket magában foglaló - meteorológiai szituációk előrejelzésében nem adnak megfelelő eredményt. A továbbiakban ezekről a problémákról ejtünk szót röviden.

#### 4. A numerikus előrejelzés általános prognózis-feladata és problémái

##### 4.1. A légköri rendszer fizikai-matematikai általános modellje

Ahhoz, hogy képesek legyünk számszerű időjárás-előrejelzést készíteni, első lépésben meg kell alkotnunk a légkör egy megfelelő fizikai modelljét, melyet célszerűen matematikai apparátussal írunk le. Ez nem jelent mást, mint formularizálni az atmoszférában zajló **legfontosabb** hidro- és termodinamikai folyamatokat valamint kölcsönhatásokat. A modell megalkotásánál figyelembe kell venni, hogy a modell a valós légkör egyszerűsített leképezése, melynek meg kell őriznie az atmoszféra fontos fizikai tulajdonságait, törvényeit és jól kell kezelnie a légkörben zajló időjárás alakító folyamatok összességét is (Práger, 1992.).

A fentieket figyelembe véve, adhatjuk meg a jól ismert modellt a légkörre vonatkozóan, amely matematikai szempontból egy **parciális differenciálegyenlet-rendszer** (PDER) (1)-(5), fizikailag pedig a megmaradási törvények rendszere az atmoszférára vonatkozóan. A kapott modellt leíró egyenletrendszert a légkör **hidro-termodinamikai egyenletrendszerének** (HTER):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \text{grad}(p) + \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{v} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho} Q = c_p \frac{dT}{dt} - \frac{RT}{p} \frac{dp}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{dq}{dt} = -\frac{1}{\rho} M \quad (4)$$

$$p = \rho RT \quad (5)$$

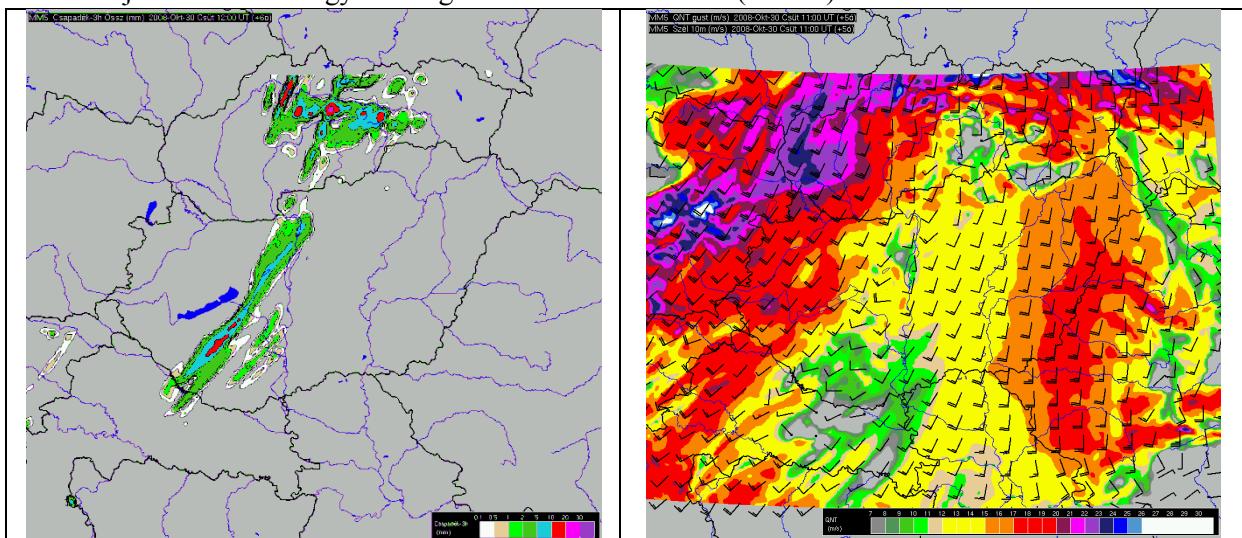
Az egyenletrendszerben szereplő változók, a  $\rho$  levegősűrűség,  $p$  légnyomás,  $T$  abszolút hőmérséklet,  $q$  specifikus nedvesség és a  $\vec{v}$  áramlási sebességvektor. A  $Q$  és  $M$  a termodinamikai kölcsönhatásokat írja le (kényszerek),  $\vec{g}$  a gravitációs gyorsulás vektora,  $\vec{\Omega}$  a Föld forgásának szögsebesség-vektora,  $R$  a gázállandó és  $c_p$  pedig a levegő állandó nyomáson mért fajhője. Az egyenletek **zárt rendszert** alkotnak, azaz, ha rendelkezünk korrekt kezdeti és peremfeltételekkel, akkor az egyenletrendszer egyértelműen megoldható (matematikai értelemben ún. vegyes feladat). A **prognózis-feladat** tehát nem más, mint a HTER megoldása adott kezdeti- és peremfeltételek esetén egy meghatározott előrejelzési tartományra és időintervallumra vonatkozóan.

## 4.2 A numerikus előrejelzési produktumok készítése

A számszerű előrejelzések készítéséhez a HTER-t bizonyos feltételek mellett meg kell oldani. Az (1)-(5) egyenletrendszer megoldását jelentő állapotváltozó-függvényeket azonban nem lehetséges analitikus (zárt) formában megadni, amiből következik, hogy csak **közelítő eljárások** alkalmazásával juthatunk eredményre. A megoldások előállítására leginkább az ún. **véges differenciák** módszerét használják, melynek során az egyenletekben szereplő differenciálhányadosokat véges különbségekkel közelítik.

A megoldásfüggvények értékeinek meghatározását az előrejelzési intervallumban adott  $t$  időpontban egy – az előrejelzési tartományhoz rögzített, célszerűen választott - konkrét 3 dimenziós rácson lévő pontokban kell elvégezni. Ebből következik, hogy a HTER megoldásához szükséges kezdeti változó-értékeket is biztosítani kell a  $t_0$  időpillanatban, ugyanezen a rácson. Ezeket a kiindulási értékeket a globális meteorológiai mérőhálózat által – különböző módon és rendkívül inhomogén területi eloszlás mellett - észlelt és mért adatai és korábbi időpontra számított modellfuttatások eredményei (**first guess** vagy **background**) együttesen testesítik meg. Azt az eljárást, melynek során a rendelkezésre álló meteorológiai adatokból megfelelő, a rácspontokra interpolált kezdeti értékek lesznek, **adatasszimilációnak** nevezzük.

Miután megtörtént az adatasszimiláció, az ún. **inicializáció** (melynek során gondoskodni kell a nyomási és a szélmező kezdeti összehangolásáról, egyensúlyáról) és a **peremfeltételek meghatározása** következik, majd ezután az egyenleteket kell numerikusan integrálni adott időlépcső ( $\Delta t$ ) alkalmazásával. Ennek eredményeként adott  $t$  időpontban meghatározhatók a változók értékei a korábban definiált rácson. Végül az **elő- és utófeldolgozás** során elkészülnek azok a produktumok, amelyek eljutnak a felhasználókhöz (előrejelzőkhöz). Ezek szemléletesen mutatják az előre jelzett mezők alakulását, nagyrészt valamilyen grafikus megjelenítési mód alkalmazásával, de természetesen még további numerikus feldolgozást is elvégeznek a kapott nyers adatokon (pl. egyéb paraméterek származtatása). Példaként egy, az MM5 numerikus modell alkalmazásával készített csapadék- és szélelőjelzés látható Magyarország területére vonatkozóan (4. ábra).



4. ábra. Az MM5 mezo-skálájú modell csapadék- és szélelőjelzése Magyarország területére 2008.10.30-án, 12.00 UTC-kor (HAWK megjelenítés)

### 4.3. A számszerű előrejelzések készítésének néhány problémája

A korábban felírt HTER a légkör összes mozgásrendszerét magában foglalja, vagyis egy ún. *nem szelektív* rendszert reprezentál. Ez – a modellre nézve kedvező – tény azonban a gyakorlati numerikus modellezés területén három rendkívül fontos problémát vet fel.

1. **A HTER megoldásához szükséges kezdeti feltételek megadásának kérdése.** Ahogy korábban említettük, a HTER megoldásához szükséges minél pontosabb kezdeti feltétel-mező megadása a számítási rácsra vonatkozóan. Ezeket az adatokat azonban jelentős részben a meteorológiai mérőhálózat által szolgáltatott – térben és időben egyaránt rendkívül egyenlőtlen eloszlású - értékekből kell a rácspontra interpolálni. A felszíni és távérzékelési rendszerek által szolgáltatott meteorológiai adatok azonban egyrészt eleve *pontatlansággal terheltek* másrészt, pedig a légkör óriási méretéhez képest viszonylag kevés értéket jelentenek, azaz bizonyos *légköri mozgások reprezentációja nem megfelelően* történik meg (különös problémát jelent a függőleges sebességvektorhoz tartozó kezdeti feltételek meghatározása, mivel a változó közvetlen mérése nem megoldott).
2. **A numerikus produktumok előállításához használt számítási eljárások kérdése.** A HTER megoldására rendelkezésre álló numerikus eljárások (közelítő algoritmusok, melyek mindig hibával terheltek) rendkívül *nagy számításigénnyel jelennek meg*. Tovább nehezíti a produktumok előállítását az alkalmazott 3 dimenziós rácshálózat pontjainak igen magas száma is. Így az előrejelzések elkészítése (modellek futtatása) időben hosszú folyamat, valamint számítástechnikai (hardware és software) szempontból komoly költséggel jár. A térbeli rácsfelbontás növekedése mellett fontos szempont a numerikus integrálásnál alkalmazható időlépcső mértéke is, hiszen a *CFL* (Courant-Friedrichs-Lewy) *stabilitási kritérium* értelmében, a numerikus sémában alkalmazott rácsávolság és időlépcső arányának felül kell múlnia a légkörben fellépő hanghullámok sebességét (~ 340 m/s). Ellenkező esetben a számítási eljárásunk „felrobban” és a prognosztizált változók irreális értékűek lesznek, hasonlóan Richardson 1922-es kísérletéhez (*Lynch, 2004*). Példaként tekintsünk egy 900x600 km-es területet, melyet különböző felbontású ráccsal reprezentálunk. A CFL-kritériumból számított időlépcsők, és a 24 órára történő előrejelzéshez szükséges számítási ciklusok valamint az összes szükséges alapművelet száma jól mutatja, hogy a számításigény robbanásszerűen nő a térbeli felbontás növekedésével (1.táblázat)! Az említett tényekből adódóan, a világ nagy teljesítményű supercomputerei szinte kivétel nélkül, az időjárás numerikus előrejelzési feladatain is dolgoznak. A számítási algoritmus további problémájáról később még szólunk.

Horizontális felbont. (km)	Vertikális felbont. (km)	Rácspontok száma	Alkalmazható időlépcső(s)	Számítási ciklus száma	Összes alapl művelet
50	1	4320	~ 3	28800	$2,7 \times 10^{10}$
10	0,2	540000	~ 0,6	144000	$1,7 \times 10^{13}$
2	0,2	13500000	~ 0,6	144000	$4,2 \times 10^{14}$

1. táblázat. A numerikus modellek térbeli felbontásának növekedéséből adódó számítási igény változása

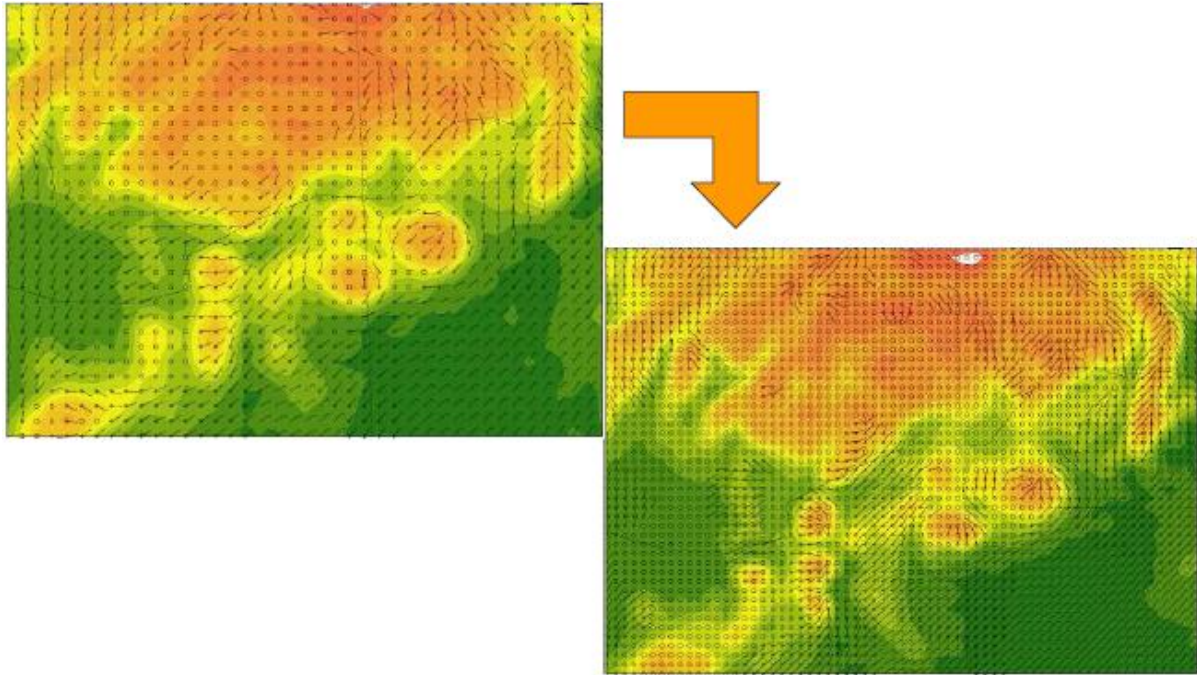
3. **A meteorológiai folyamatok paraméterezésének kérdése.** A HTER-ben szerepelnek olyan mennyiségek is, melyek változásait illetve a légkörben felvett értékeit a felszín és a légkör kölcsönhatásai (kényszerek) határozzák meg (hóáram, nedvességáram). Ezek a kölcsönhatások azonban az ún. *turbulens diffúzió* folyamatán keresztül hatnak, melynek nagyságrendi skálája a mikro- tartományba esik. Tekintve, hogy a folyamat sok szempontból nem ismert pontosan, így a HTER megoldásakor csak ún. *paraméterezési eljárással* vehető figyelembe. Ennek lényege, hogy „az explicite nem kezelhető, az adott ráccsal már nem felbontható, ún. *szubgrid* folyamatoknak a vizsgált skálára kifejtett hatását a modell paramétereinek a függvényében *statisztikailag* vesszük figyelembe” (Götz, 1976). A paraméterezésnél az adott hatás statisztikai átlagértékeit alkalmazzuk, vagy az adott hatás folyamatának erősen leegyszerűsített, empirikusan formulázott változatával dolgozunk (Práger, 1992). Meg kell említeni még a *felhőfizikai folyamatokat* és a *sugárzás elnyelődés folyamatát* is, melyeket szintén csak paraméterezéssel vehetünk figyelembe a HTER megoldásánál.

## 5. A mezo-skálájú folyamatok numerikus előrejelzésének további aspektusai

A repülésre leginkább veszélyes meteorológiai folyamatok – mint korábban említettük – a mezo-skálán jelennek meg, melyeknek numerikus prognosztizálása a nowcasting folyamat alapvető eleme. Nyilvánvaló tehát, hogy a mezo-léptékű modelleknek tudniuk kell ezeket a jelenségeket nyomon követni a kialakulásuktól a felbomlásukig, vagyis egy nagyon komoly térbeli és időbeli *felbontási kritériumnak* kell megfelelnie az adott modellnek.

A felbontás növelése azért szükséges, mert egy adott  $L$  hosszúságú hullám (mintegy 10%-nál kisebb hibával történő) reprezentációjához legalább  $L/10$  lineáris méretű rácshálózatra van szükség (Kreiss & Olinger, 1972). Ebből következik, hogy a mezo-léptékű folyamatok leírásához szükséges rács lineáris mérete jelentősen kisebb a globális numerikus modelleknél alkalmazott rácsméretnél (ami pl. az ECMWF globális modellnél 25 km-es a felbontás, így ez a modell elvileg sem képes a 250 km-nél kisebb karakterisztikus méretű folyamatokat kezelni). Másfelől, a globális modellek a makro-tartományon dolgoznak és a bennük alkalmazott *kvázi-statisztikus közelítéssel* (jelentős egyszerűsítés a számításban, hiszen pl. a konvekció ezzel ki van zárva) felépített modell-egyenletek miatt *eleve nem is képesek* a mezo-léptékű jelenségek reprezentációjára!





5. ábra. Az OMSZ ALADIN rövidtávú numerikus modellje (balra fent), mint oldalsó peremfeltétel az AROME modell (jobbra lent) számára. Jól látható a szélmező sokkal finomabb felbontása az AROME modell esetén, ami a lényegesen kisebb rácsméretnek köszönhető (Kullmann, 2008)

A mezo-léptékű folyamatok leírásához szükséges sűrűbb rács (általában 2-5 km-es horizontális rácselem) és a *nem-hidrosztatikus HTER* miatt a modell-egyenletek integrálása további jelentős számítási igény-növekedéssel jár. Ezért a mezo-skálájú modelleket egy adott kisebb térbeli tartományra vonatkozóan futtatják, azaz *korlátos tartományú* modellek, melyek a futtatáshoz szükséges oldalsó peremfeltételeket egy másik – az említett területet is magában foglaló - előrejelzési tartományú modell futtatásának eredményeiből nyerik. Pl. az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) használt AROME modellt, egy Magyarországot lefedő 2,5 km-es horizontális rácson futtatják és a peremfeltételeit az ALADIN korlátos tartományú 8 km-es felbontású modellből kapják (5. ábra). Ebből adódóan érvényességi területük is csak az a szűkebb régió, amelyen definiálva vannak.

Szólnunk kell még a numerikus modellek outputjának *időbeli érvényességi intervallumáról* is, hiszen minden egyes modell output előállítás jelentős előkészületeket igényel és így lényeges, hogy egy adott időszakra vonatkozóan hány futtatást kell elvégezni. Az operatív numerikus előrejelzésben négyféle modellt különböztetünk meg attól függően, hogy mennyi időnként futtatják őket (2. táblázat). A jelen munkánkban vizsgált mezo-léptékű modellek esetében a modell outputok érvényességi ideje 24-36 óra, de a jövőben ez az intervallum várhatóan csökkenni fog akár kb. 6-12 órára! Ezek az érvényességi intervallumok összhangban vannak a repülésre elsődlegesen veszélyes, mezo-skálájú meteorológiai jelenségek karakterisztikus idejével, másrészt időbeli rövidegük miatt *csak rövid időintervallumra* van prognosztikai értékük! A rövidebb output-érvényességi idő miatt a mezo skálán

dolgozó modellek futtatása sűrűbben kell, hogy megtörténjen, ami a számítási igény és költségek vonatkozásában további növekedésével jár.

	<b>Éghajlati</b>	<b>Középtávú</b>	<b>Rövidtávú</b>	<b>Ultrarövid távú</b>
<b>Elsődleges modell</b>	ALADIN-Climate	ECMWF	ALADIN	AROME
<b>Horizontális felbontás</b>	10-25 km	25 km	8 km	2-3 km
<b>Output időintervallum</b>	30 év	10 nap	2 nap	24 óra

2. táblázat. Az OMSZ egységes numerikus előrejelző rendszerének elemei

(Horányi, 2008 nyomán módosítva)

Külön említést kell tennünk a mezo-léptékű modellek parametrizációs problémáiról. Ezt a kérdéskört csak röviden „per tangentem” tárgyaljuk, mert e cikk keretei nem teszik lehetővé a mélyebb elemzést. Két területet kell kiemelnünk, nevezetesen a **konvekció** és a **nedvesség** illesztését a modellekbe. A két meteorológiai tényező összekapcsolódik egymással és együtt felelősek a **konvektív felhőrendszerek** és a hozzájuk tartozó – sokszor a repülésre rendkívül veszélyes – jelenségek kialakulásáért. A konvekció parametrizációjában nagy nehézséget okoz a **függőleges légáramlás nagyságának** meghatározása, hiszen a felemelkedő légréteg sebességét sok tényező befolyásolja: a talaj minősége, a növényzet, a domborzat, az adott légtömeg stabilitási viszonya, a nedvességtartalom stb. Ugyanakkor, a nedvességtartalom vertikális eloszlásának viszonylag pontos ismerete nélkül az előbbi paraméter nem is határozható pontosan meg! Ezzel el is érkeztünk a mezo-skálájú modellezés egyik legnagyobb kihívásához, mely a **nedvességtartalom három dimenziós eloszlásának a becslését** jelenti. Tekintve, hogy a légköri nedvesség eloszlása térben és időben egyaránt nagyon szélsőséges értékek között mozoghat, a mezo-skálájú modellek „elszállásának” gyakori forrása az elégtelen térbeli nedvességi és hőmérsékleti előrejelzés. Ebből a problémából fakad a **ködök** előrejelzésének nehézsége is, hiszen többször előfordult, hogy pl. az MM5 modell akár 10000 km<sup>2</sup> nagyságú területen kialakult, majd advektálódott ködöt nem prognosztizált! Persze ez a leírtak fényében nem meglepő, de tény és az előrejelzőnek ezt a problémát kezelnie kell. (Erre az esetre marad a műhold és az OMSZ klímaállomás-hálózata, vagy adott esetben kizárólag az előrejelző tapasztalata...)

## 6. Összefoglalás

A mezo-léptékű időjárási rendszerek jelentik a legnagyobb veszélyt a repülésre, ezért numerikus prognosztikai megközelítésük alapvető fontosságú a rövid távú előrejelzésben. Ezen jelenségek mérettartományának megfelelő felbontású mezo-léptékű modellek azonban

számos nehézséggel kezelhetők csak. Ezek közül néhányat említettünk meg munkánkban, melyek elvi és gyakorlati problémák:

- A HTER megoldásához szükséges kezdeti feltételek megadásának kérdése
- A numerikus produktumok előállításához használt számítási eljárások kérdése
- A meteorológiai folyamatok paraméterezésének kérdése
- A felbontási kritérium kérdése
- A mezo-léptékű modellek parametrizációs problémáinak kérdése.

#### **Irodalom**

- [1] Götz G. (1976): Légköri folyamatok dinamikus modellezése. *Időjárás*. 27-41.
- [2] Horányi A. (2008): A numerikus előrejelző modellek fejlesztése és alkalmazása az Országos Meteorológiai Szolgálatnál. Meteorológiai Tudományos Napok.
- [3] Kreiss H.-O., Olinger J.(1972): Comparison of accurate methods for the integration of hyperbolic equations. *Tellus*. Vol. 24. 199-215.
- [4] Kullmann L.(2008): Az ALADIN numerikus előrejelző modell a rövid távú előrejelzés szolgálatában. Meteorológiai Tudományos Napok.
- [5] Lynch P.(2004): A century of numerical weather prediction: The view from Limerick. *Weather*. Vol. 59. No. 12. p 331.
- [6] Práger T.(2008): A szinoptikus és numerikus időjárás-előrejelzés elméleti hátterének fejlődéséről. Meteorológiai Tudományos Napok.
- [7] Práger T.(1992): Numerikus prognosztika. Budapest.
- [8] Sándor V. és Wantuch F.(2004): Repülésmeteorológia. Budapest