

A LÉGKÖRI FOLYAMATOK ELŐREJELZÉSE

A légköri folyamatok előrejelzéséhez olyan egyenletek felírása szükséges, amelyek átfogó módon összefüggést teremtenek a légkör mozgását és termodinamikai állapotát leíró mennyiségek térbeli eloszlása és időbeli változása között. Az így felállítható egyenletrendszer prognosztikai egyenletrendszernek nevezzük.

Amennyiben a felírható egyenletekben a kiszámítandó függő változók lokális idő szerinti differenciálhányadosait az egyenletek bal oldalára, a térbeli differenciálhányadosokat tartalmazó kifejezéseket pedig a jobb oldalra rendezzük, akkor ez az elrendezés azt fejezi ki, hogy a függő változók lokális időbeli megváltozásai előre jelezhetők ugyanezen változók adott pillanatban fennálló térbeli eloszlásai alapján (legalább is bizonyos rövid időközökre, amelyeken belül a változásokat lineárisnak lehet tekinteni). Ebben az esetben az előrejelzést lépésenként kell elvégezni: a t_0 időpontban fennálló térbeli eloszlásokból először előre kell jelezni az első Δt időkülönbség alatt bekövetkező lokális változásokat, ebből azután meg kell határozni a $t_0 + \Delta t$ időpontban előálló új térbeli eloszlást, amelyből a következő Δt időkülönbségre ismét kiszámíthatók a lokális változások, és így tovább

A prognosztikai egyenletrendszer felírásakor elvileg hat változót kell figyelembe venni:

- a $\mathbf{V}(u, v, w)$ három sebesség-összetevőt,
- a p légnyomást,
- a ρ sűrűséget,
- és a T hőmérsékletet.

Ezek közül a T hőmérséklet a

$$T = \frac{p}{\rho R_\ell} \quad (1)$$

egyesített gáztörvény segítségével fejezhető ki (R_ℓ a száraz levegőre vonatkozó gázállandó), így a fennmaradó öt változóra további öt egyenlet felírása szükséges. Ebből három a

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\mathbf{V} \operatorname{grad} u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\boldsymbol{\omega} \sin \varphi v + \frac{1}{\rho} F_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -\mathbf{V} \operatorname{grad} v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - 2\boldsymbol{\omega} \sin \varphi u + \frac{1}{\rho} F_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= -\mathbf{V} \operatorname{grad} w - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{1}{\rho} F_z \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Euler-féle mozgásegyenlet ($\boldsymbol{\omega}$ a forgási szögsebességvektor, az $\mathbf{F}(F_x, F_y, F_z)$ erő pedig a légnyomási erő, a g nehézségi erő, a Coriolis-erő, a forgási centrifugális erő és a súrlódási erők bonyolult eredője); a negyedik egyenlet a

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\mathbf{V} \text{ grad } \rho - \rho \text{ div}(\rho \mathbf{V}) \quad (3)$$

kontinuitási egyenlet, amely a tömeg megmaradásának követelménye alapján a sebesség és a sűrűség között állapít meg összefüggést, és végül ötödik a termodinamika első főtétele alapján felírható

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\mathbf{V} \text{ grad } p - \frac{c_{p\ell}}{c_{v\ell}} p \text{ div } \mathbf{V} + \frac{R_\ell}{c_{v\ell}} \frac{dQ}{dt} \quad (4)$$

nyomás-tendencia-egyenlet, amely az energia-megmaradás törvényének termodinamikai folyamatokra érvényes alakja ($c_{p\ell}$ illetve $c_{v\ell}$ pedig a száraz levegő állandó nyomáson, illetve állandó térfogaton vett fajhője). A (4) összefüggést *termodinamikai energiaegyenletnek* is nevezik, mivel a benne szereplő dQ/dt ún. "nem adiabatikus" vagyis a hőcserét kifejező tag a rendszernek időegység alatt kívülről átadott hőmennyiségét jelöli, és eleve az összefüggés a termodinamika I. főtételéből származik.

Az (1) – (4) egyenletrendszer a legegyszerűbb légköri feltételek mellett, száraz levegő esetén, elvileg prognosztikus célra használhatunk. Ennek a gyakorlati alkalmazása azonban egyáltalán nem egyszerű. Egyrészt a fenti többváltozós nem-lineáris parciális differenciálegyenlet-rendszer matematikai megoldása igen bonyolult, leginkább a *véges differenciás* numerikus közelítő módszerrel érdemes megoldani. E célból az egyenletekben található térbeli parciális deriváltakat különbségi hányadosokkal helyettesítjük, az állapothatározók valamilyen (legtöbbször négyzetes) rácshálózat pontjaiban mért értékeinek felhasználásával. Az így kapott mezők jövőbeli állapotait viszonylag rövid Δt időkülönbségekre számítjuk ki, a változásokat lineárisnak tekintve. Szerencsére ma már rendelkezésre állnak olyan szuperszámítógépek, amelyekkel a feladat megoldható.

A megoldás másik nehézsége a prognosztikai egyenletekben lévő egyes légköri tulajdonságok mérésével kapcsolatos. A meteorológiai mérés technika nem teszi lehetővé az összes változó hálózatszerű mérését, amelyek a prognosztikus egyenletrendszer fenti megoldásához szükségesek lennének. Hiányoznak pl. a w vertikális sebesség mérései, és egyelőre meglehetősen pontatlanul közelíthetők a dQ/dt hőcsere értékei. Ez utóbbival érdemes kicsit részletesebben is foglalkozni.

A dQ/dt ún. "nem adiabatikus" hőcsere három alapvető módon következhet be: 1, a levegőben levő víz fázisváltozásaikor elvont, illetve leadott látens hő révén; 2, a sugárzási folyamatok révén; és: 3, a kinetikus energia turbulens disszipációja révén.

Ha a levegőben levő víz nem szenved fázisváltozásokat, akkor a légnedvesség nem játszik lényeges szerepet, a levegőt a számítások során száraznak tekinthetjük, különösebb hiba elkövetésének veszélye nélkül. Ha viszont fázisváltozások lépnek fel, a látens hő folyamatai jelentős dQ/dt értékeket eredményeznek, amelyeket feltétlenül figyelembe kell venni.

A sugárzási folyamatok révén bekövetkező hőcsere nehezebb kérdés. Ezt jól közelíteni nem tudjuk. Általában feltételezzük viszont, hogy ha a prognózis rövidebb időre (24-36 órára) szól, a sugárzási hőcsere a légkörben elhanyagolható.

A turbulens hőcsere még problematikusabb kérdés. Ahhoz ugyanis, hogy a kinetikus energia turbulens disszipációját (hőenergiává alakulását) számításba vehessük, részletes adatok volnának szükségesek az áramlási mezők finom részleteire vonatkozóan. Ilyen adataink sajnos nincsenek. Némileg könnyít a helyzeten, hogy turbulens disszipáció igazán csak a légköri határrétegekben (elsősorban az alsó pár száz méteres rétegben) jelentős, ahol a sűrűlási erők számottevőek.

A különböző egyszerűsítések és elhanyagolások által okozott problémák és pontatlanságok az ún. *parametrizálás* módszerével vehetők figyelembe, ennek részleteibe azonban itt nem megyünk bele.

Ma már több különböző prognosztikai rendszer fut óriási kapacitású szuperszámítógépeken.

A **GFS** (*Global Forecast System*) az amerikai NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) numerikus időjárás előrejelző számítógépes modellje. A modellt naponta 4 alkalommal, a világidő szerint 0, 6, 12 és 18 órakor futtatják két részben. Az első részben nagyobb felbontással számol a rendszer és +180 óráig (7 és fél napos időtartamra) ad előrejelzést, míg a második fázisban +180 és +384 óra között (16 napra) ad előrejelzést kisebb felbontással. A vízszintes felbontás a Föld különböző régióin 35 és 70 km között változik, és a függőleges felbontás is igen részletes. Az első fázisban a modell 3 óránként szolgáltat kimenetet, 180 órán túl már csak 12 óránként. Ez az egyetlen globális modell, melynek teljes kimenete ingyen hozzáférhető az interneten, gyakorlatilag a világon az összes internetes időjárás szolgáltatás a GFS kimenetére építi előrejelzését. Hazánkban is alkalmazzák a GFS modellt, többek közt a regionális WRF modell bemeneteként.

A **WRF** (az angol Weather Research and Forecasting szavak rövidítése) szintén egy numerikus időjárás előrejelző modell. E modellt számos magánkézben lévő meteorológiai szervezet, és többek közt az amerikai meteorológiai szolgálat, illetve az amerikai hadsereg is alkalmazza. A modellnek két változata létezik. Az *Advanced Research WRF* vagy **WRF-ARW** (a professzionális kutatási WRF) változatot leginkább kutatási célokra használják, míg a *Nonhydrostatic Mesoscale Model* vagy **WRF-NMM** (a nemhidrosztatikus mezoskálájú modell) változatot üzemszerű előrejelzés készítésére alkalmazzák. Mivel a modell mezoskálájú, ezért nem az egész Földre, csupán egyes régiókra futtatják. Magyarországon három szervezet is rendszeresen futtatja a WRF modellt, mindegyik grafikus kimenete nyilvános. Az *Időkép* WRF két-napos előrejelzés napi 4 futtatással a GFS modell bemenő adatai alapján, a *Metnet* WRF háromnapos előrejelzés napi 2 futtatással a GFS modell bemenő adatai alapján, míg az *OMSZ* WRF egynapos előrejelzés napi 2 futtatással az *Aladin-modell* bemenő adatai alapján.

A földtudományokkal foglalkozó gyakorlati szakemberek, - így különösképpen a geodéták számára a terepi mérések során igen fontos az időjárás előrejelzése. Ezt ma már jelentősen segíti az interneten elérhető, erre vonatkozó hatalmas mennyiségű információ. Az információhalmaz ma már rendkívül széleskörű és bonyolult, ráadásul az értelmezhetősége és megbízhatósága sem homogén, ezért érdemes áttekinteni, hogyan is tájékozódhatunk ebben az "adatrengetegben", illetve hogyan választhatjuk ki a célunknak leginkább megfelelő információkat.

Legegyszerűbb esetben a mindennapi életben az időjárás előrejelzése során négy fontos paraméterre vagyunk kíváncsiak: a **hőmérséklet**, a **csapadék**, a **szél** és a **felhőzet** alakulására; az előrejelzés időtartamát tekintve pedig rövid-, közép- vagy hosszú távra gondolkozhatunk.

Néhány órás időtartamra természeti (terepi) körülmények között az adott időjárási helyzet ismeretében a helyi fizikai paraméterek (légnyomás, felhőzet, szélirány, látástávolság, stb.) változása alapján tájékozódhatunk; rövid- és középtávú előrejelzésre meteorológiai szolgálatok számítógépes futtatásai, internetes adatszolgáltatása alapján lehetünk képesek, míg a hosszútávú előrejelzésre korábbi megfigyelések, Rossby-hullámok alakulása, Naptevékenység, stb. alapján nagy szakértelemmel és kis megbízhatósággal lehet vállalkozni.

A továbbiakban röviden áttekintjük, hogy az interneten különböző szolgáltatóktól milyen fontosabb információkat érdemes a leginkább figyelemmel kísérni.

Az *Országos Meteorológiai Szolgálat* weboldala a <http://www.met.hu> címen érhető el. Könnyen áttekinthető, nagyon jól hasznosítható weboldal, igen gazdag az információtartalma. Többek között folyamatosan érdemes figyelni a METEOSAT műhold *1. ábrán* látható infra felhőképét, amelyet 3 óránként frissítenek, és a korábbi felvételekből előállított “mozgó” kép is megtekinthető. Az OMSZ talán legjobban használható szolgáltatása a Budapesten, Pogányváron és Nyíregyházán működő radarállomások mérései alapján előállított a csapadékinzintitás képe (*2. ábra*), amely az egészen rövid távú csapadék-előrejelzésre használható kiválóan és nagy megbízhatósággal. A csapadékinzintás területi eloszlásának képét 15 percenként frissítik és a korábbi felvételekből összerakott “mozgó” kép szintén megtekinthető. Zivatarhajlam esetén hasznos a villám-térkép figyelése, amelyet 15 percenként frissítenek, így szintén rendelkezésre áll a korábbi felvételek alapján előállított “mozgó” kép.



1. ábra. A METEOSAT műhold infravörös tartományban rögzített felhőképe



2. ábra. Pillanatnyi csapadékeloszlás és intenzitás a radarfelvételek alapján

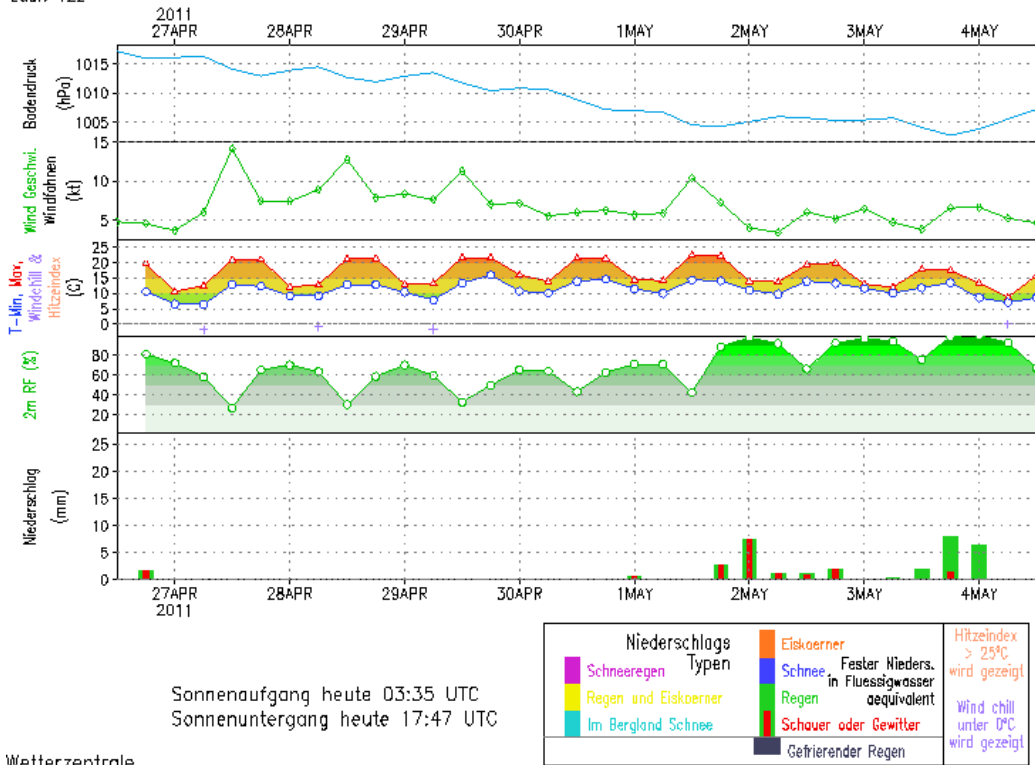
2010. január 1.-től a METEOSAT felvételek kivételével mindezek, sok más adattal együtt (pl. időjárás helyzetképpel, webkamera felvételekkel) archiválva vannak, és lekérdezhetők.

Több különböző célra is igen jól használható a nagy kapacitású számítástechnikai háttérrel és erőforrásokkal rendelkező német szolgálat <http://www.wetterzentrale.de> weboldala. Többek között a világ valamennyi nagyobb városára 8 napos csapadék, páratartalom, hőmérséklet, szél, légnyomás, felhőzet, stb. előrejelzést ad a GFS modell alapján, amely kiemelkedően pontos és megbízható Európa területére. Különösen értékes a csapadék 6 órás felbontású mennyiségi előrejelzése. Ugyancsak hasznosak a különböző előrejelzett paraméterekre adott az ún. fálya-diagramok, amelyekben az előrejelzések megbízhatóságáról kapunk fontos információt (5. ábra). Mindezek a paraméterek nem csak Európa nagyobb városaira, hanem Európa teljes területén $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ -os rácshálózat pontjaiban is elérhetők. A prognosztikai rendszer eredményeit 6 óránként folyamatosan frissítik. A http://www.wetterzentrale.de/pics/MS_Budapest_avn.png példaként Budapest területére mutatja a 8 napos légnyomás, szél, hőmérséklet, páratartalom, csapadékmennyiség előrejelzést (3. ábra), a http://www.wetterzentrale.de/pics/MU_Budapest_avn.png pedig ugyancsak Budapest területére adja a felhőzet, szélerősség, szélirány, stb. magassági profiljának előrejelzését (4. ábra). A különböző magassági profilokban előrejelzett paraméterek diagramjai nem méterben kifejezett magasságra, hanem praktikus okokból azonos légnyomás értékű helyekre “nyomásmagasságokra” vonatkoznak és hectoPascalban szerepelnek. (A fő nyomásmagasságok: 925 hPa → kb. 700 m, 850 hPa → kb. 1500 m, 700 hPa → kb. 3000 m, és 500 hPa → kb. 5500 m.)

Budapest

Lauf: 12Z

GFS – Bodennahe Werte



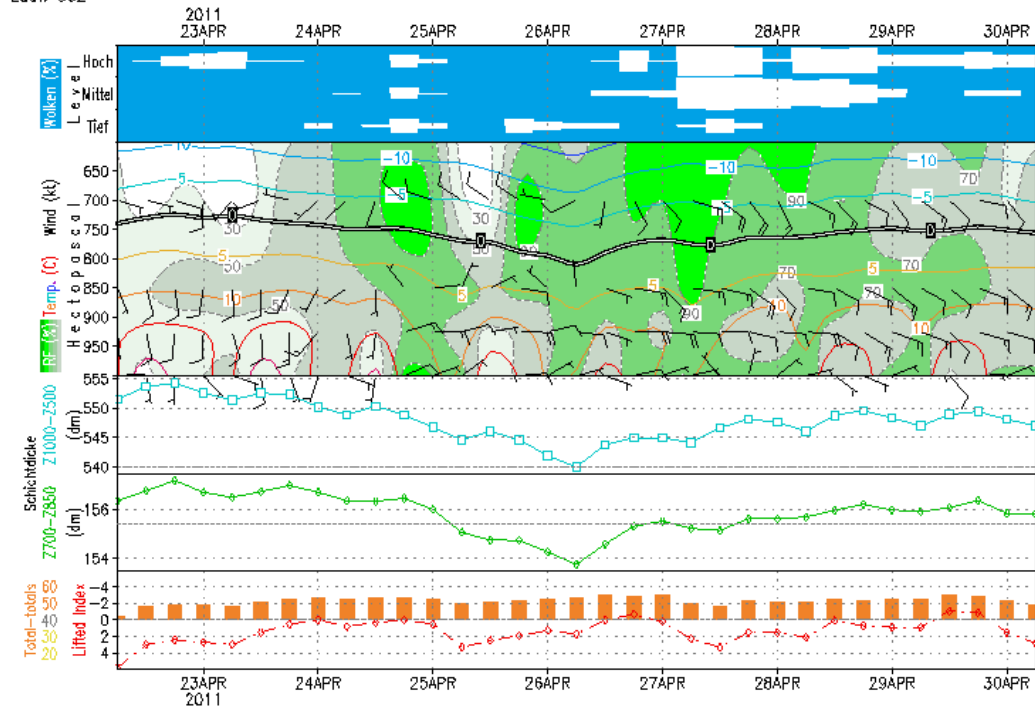
Wetterzentrale

3. ábra. A Wetterzentrale 8 napos előrejelzése Budapestre

Budapest

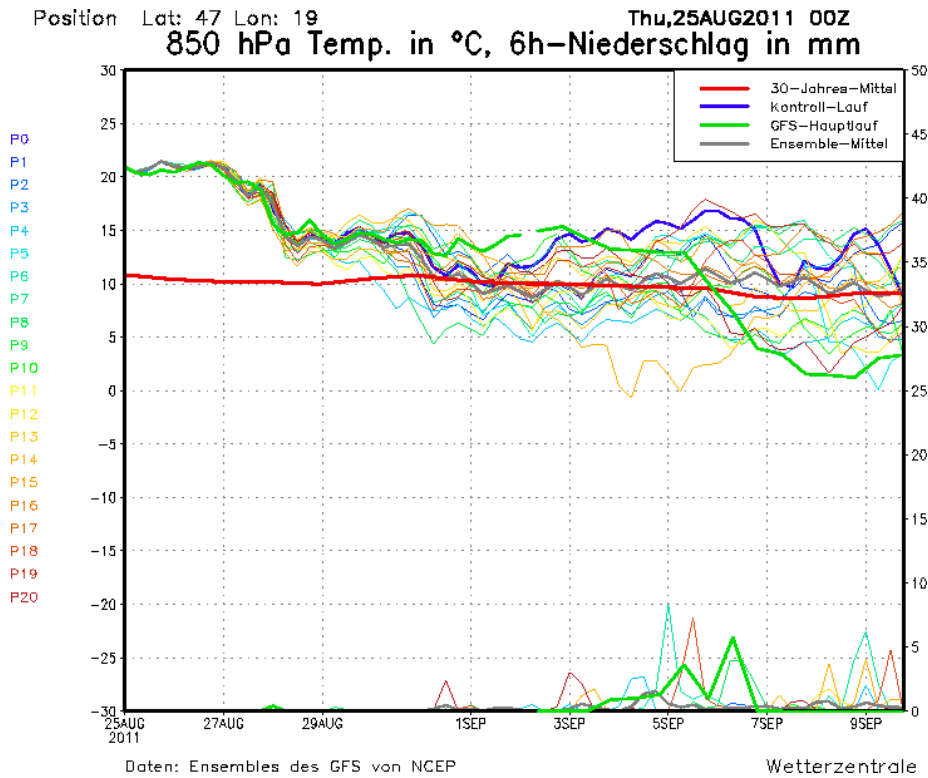
Lauf: 06Z

GFS – Freie Atmosphäre



Wetterzentrale

4. ábra. A felhőzet, hőmérséklet, szélerősség és irány, stb. magassági előrejelzése



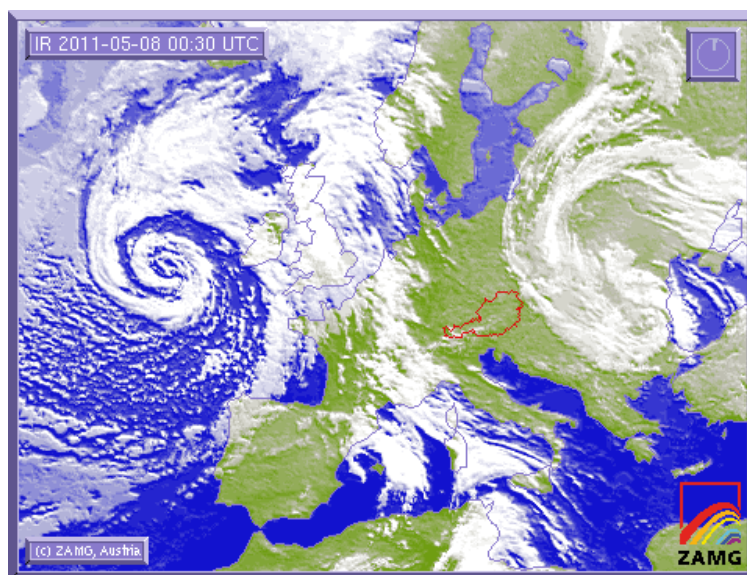
5. ábra. A 850 hPa magassági hőmérséklet és a csapadék-előrejelzés fáklyadiagramja

Sok tekintetben igen fontos a szélirány és szélesség időbeli alakulásának előrejelzése. Erre megbízható információk nyerhetők a <http://windguru.com> weboldról. Ezen több más paraméter mellett 4 napra, óránkénti felbontásban találjuk a világ 152 országára, ezen belül Magyarország területén 33 pontra az átlagos szélerősséget, a várható legerősebb szellőkések nagyságát és a szél irányát. A 6. ábrán példaként a Budapest területére vonatkozó <http://windguru.com/int/index.php?sc=41971> előrejelzés látható.

Hungary - Budapest		[Options]																																		
Forecast [Map] [Webcams] [Wind reports] [Accommodation] [Schools/Rentals] [Shops] [Other...]																																				
12 hours delayed forecast. Latest MM5-WRF forecasts are only available to Windguru PRO subscribers. Click for more info.																																				
WRF 9 km		Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Sa	Su	Su	Su	Su	Su	Su	Su	Su	Su	Su	Su	Su	Su	Mo	Mo	Mo	Mo										
30.04.2011		30.	30.	30.	30.	30.	30.	30.	30.	01.	01.	01.	01.	01.	01.	01.	01.	01.	01.	01.	01.	01.	01.	02.	02.	02.	02.									
12 UTC		14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	03h	04h	05h	06h	07h	
Wind speed (km/h)		7	4	4	2	1	7	8	6	7	6	6	6	7	8	8	7	8	8	8	5	6	10	7	4	2	13	12	11	10	12	13	13	11	11	
Wind gusts (km/h)		12	8	8	7	5	8	13	13	15	14	14	14	14	15	12	13	13	12	10	8	10	10	7	6	6	15	20	20	20	24	25	26	21	19	
Wind direction		↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	↖	
*Temperature (°C)		21	21	21	21	20	20	19	18	17	13	13	13	13	13	15	16	17	18	19	20	20	20	20	20	20	20	18	17	16	15	13	13	12	11	12
Cloud cover (%)		96	98	96	75	61	95	97	96	95	96	97	98	98	91	89	89	96	98	99	98	98	99	99	99	96	99	98	93	93	70	70	47	42	31	
high / mid / low		36	30	27	30	27	21	14	15	17	10	6	16	13	10	10	8																			
*Precip. (mm/h)		-	0.7	1.4	1.2	1	0.3															0.3	0.2				0.2	0.3	0.1							
Windguru rating																																				
WRF 9 km		Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Mo	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	Tu	
30.04.2011		02.	02.	02.	02.	02.	02.	02.	02.	02.	02.	02.	02.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	03.	
12 UTC		08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h		
Wind speed (km/h)		9	6	4	6	8	10	13	13	13	12	11	11	9	8	10	10	10	10	10	9	8	7	7	6	6	6	5	4	5	7	14	19			
Wind gusts (km/h)		15	10	6	7	8	9	12	13	13	15	13	13	17	14	16	17	19	19	17	17	14	13	12	11	9	6	5	3	5	7	19	30			
Wind direction		↓	↓	↓	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	↘	
*Temperature (°C)		12	13	14	15	16	17	17	17	17	17	17	14	13	9	9	9	8	8	9	10	11	13	15	16	17	18	19	19	19	17	14				
Cloud cover (%)													13	13	12	81	97	99	98	96	97	98	99	99	99	99	99	99	98	78	80	96	80	87		
high / mid / low																41	42	47	68	72	83	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	91		
*Precip. (mm/h)																							16	38	48	71	84	78	80	70	66	69	69	80	84	30
Windguru rating																																				
Lat: 47.5, Lon: 19.1, Alt: 110 m, Timezone: CEST (UTC+2) ☀️ 05:30 - 19:51																																				
[Detail / Map] [Archive] [Link]																																				

6. ábra. A Budapest területére vonatkozó szélerősség és szélirány előrejelzés

Sok esetben kérdés a felhőzet, napsütéses órák számának várható alakulása. Ebben a kérdésben mindenképpen érdemes figyelni a műholdakról készített infra, vagy a látható kompozit felhőképeket, ezek mozgását. A mai műholdas technika mellett sok jó lehetőség kínálkozik ennek megfigyelésére. Egyik lehetőség a met.hu weboldalán szolgáltatott nem túl jó időbeli és térbeli felbontású infra kép (1. ábra). Jobb az időbeli de gyengébb a térbeli felbontása az Osztrák Meteorológiai és Geofizikai Intézet (ZAMG) weboldalán látható 30 perces időbeli felbontású mozgó infra felhőképnek, amely a http://www.zamg.ac.at/wetter/sat_bilder/?ts=1187692382 címről tölthető le (7. ábra). Még jobb, 15 perces időbeli felbontása van a <http://www.sat24.com> címről letölthető európai mozgó infra képnek, ahol az egyes országok, így Magyarország területe külön is nagyítható. A teljes Földre vonatkozó műholdképek részben a http://www.weatherphotos.co.za/international-satellite_photos.html vagy a <http://en.allmetsat.com> weboldalakon láthatók, nagy felbontású 2-3 óránként frissülő műholdkép pedig a http://en.allmetsat.com/images/noaa_nsbern_n1b640.php webcímről tölthető le Európáról.



7. ábra. A ZAMG mozgó infra képének részlete

Amennyiben archív adatokra van szükségünk, a <http://www.tutiempo.net/en/> címen a világ összes nagyobb városára napi bontásban, benne 1973-tól Magyarország 21 helyszínére megtalálhatók a közép-, maximum- és minimum-hőmérséklet, légnyomás, közepes páratartalom, csapadékmennyiség és csapadékforma, átlagos és maximum szélereősség, látótávolság, stb. adatok.

Végül említést kell tenni a Magyarországon egyre jobban kiépülő két “amatőr” meteorológiai szolgálat: az IDŐKÉP <http://www.idokep.hu/> és METNET <http://www.metnet.hu> weboldaláról, ahol nagy mennyiségű hasznos információ található. Az IDŐKÉP zivatarok esetén pl. igen részletes időbeli és térbeli felbontásban saját radarképet tesz közzé, és nagyon jól használható a folyamatosan frissülő igen nagy számú webkamera felvételük is. Nagyon jól használható a METNET <http://www.metnet.hu/gfs> weboldala, amelyen a GFS modell finomabb felbontású regionális eredményei tekinthetők meg térképes formában.

Valamennyi európai ország meteorológiai szolgálatának weboldala a <http://www.ecmwf.int> oldalról egyetlen kattintással elérhető.