

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék

**Magyarországra szaharai port szállító időjárási helyzetek
elemzése MSG műholdképek alapján**



DIPLOMAMUNKA

Készítette:

Nagy Andrea

Témavezetők:

Kolláth Kornél

Dr. Putsay Mária

Országos Meteorológiai Szolgálat

Tanszéki konzulens:

Dr. Pongrácz Rita

ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2009.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
2. Az ásványi por	4
2.1 Az ásványi por, mint aeroszol hatásai	4
2.2. Az ásványi por, mint jégképző mag	7
2.3. Az ásványi por forrásterületei	9
2.3.1. Észak-Afrika, a legnagyobb forrásterület	10
2.3.2. Portranszport Észak-Afrikából.....	12
2.3.3. A portevékenység időbeni változásai.....	12
2.3.4. A portevékenység kapcsolata a csapadékkal	14
2.4. A por légköri ciklusa	15
2.4.1. A por légkörbe kerülése	15
2.4.2. A por szállítása a levegőben	17
2.4.3. A por ülepedése a légkörből:	18
3. A por műholdas távérzékelése	19
3.1. Az MSG műholdak és a SEVIRI műszer	19
3.2 Por detektálása az MSG/SEVIRI műholdképeken.....	21
HRV csatorna:.....	21
RGB-Natural:	22
Por kompozit:	24
4. Statisztikai vizsgálat a DREAM modell alapján.....	27
4.1. A BSC/DREAM por előrejelző modell rövid bemutatása	27
4.2. A statisztikai vizsgálat háttere	29
4.3. A statisztikai vizsgálat eredményei	30
5. Esettanulmányok elemzése	33
5.1. 2008. augusztus 15-16.....	33
5.2. 2008. szeptember 7.....	45
5.3. 2009. április 26-28.....	53
6. Összefoglalás.....	63
Köszönetnyilvánítás	65
Irodalomjegyzék.....	66
Függelék.....	75

1. Bevezetés

A globális klímát befolyásoló egyik legbizonytalanabb tényező az aeroszolak hatása. Jelen diplomamunka az ásványi porról szól, melyről tudjuk, hogy az egyik elsődleges aeroszol forrás. A légkörbe kerülő porrészecskék, ahogy a többi aeroszol részecske is, rendkívül komplexen hatnak a felhőzetre, a csapadéokra és a sugárzási viszonyokra; továbbá koncentrációjuk egy adott helyen igen nagy időbeli változékonyságot mutat. A légköri ásványi por legnagyobb forrása a Földön a Szahara, mely területhez hazánk globális léptékkal mérve viszonylag közel helyezkedik el, így számolnunk kell az időnként fölénk szállítódó por hatásaival. A légkörben megnövekedett porkoncentrációnak – bár kevesebb esetben, de – látható jelei is megfigyelhetők; a leggyakoribb a légkör optikai átlátszóságának csökkenése, emellett időnként a csapadékkal való kimosódásakor a tereptárgyakon sárgás vagy vöröses por maradhat vissza.

A műholdképeken rendszeresen megfigyelhető, hogy a Földközi-tenger térségében észak-afrikai porviharokból származó aeroszol tömeg van jelen a levegőben, ami az aktuális áramlástól függően Európa különböző területeire szállítható. A dolgozat fő motivációját az jelentette, hogy a műholdképek alapján gyakran hazánk felett is megfigyelhető a szaharai por, sőt akár a felhőzetet módosító hatása is.

E szakdolgozat célja, hogy közelebb kerülhessünk a következő kérdések megválaszolásához: Hogyan és milyen mértékben befolyásolhatja az Észak-Afrika felől érkező por hazánk időjárását és felhőzeti viszonyait? Az időjárás előrejelzés napi gyakorlatában milyen szerephez juthat a nagy porkoncentrációt okozó időjárási helyzetek időben való felismerése?

A következő fejezetekben bemutatjuk az ásványi por általános jellemzőit, hatásait, légköri ciklusát; a Magyarországra érkező szaharai por időbeli eloszlását; illetve esettanulmányokon keresztül néhány fontosabb, műholdképek által is detektálható hatását.

2. Az ásványi por

Az utóbbi évtizedben egyre több tanulmány foglalkozik a sivatagi területekről származó ásványi porral, a levegőben való eloszlásával, szállításával. Ennek oka, hogy az egyik fő elsődleges aeroszol forrásként fontos szerepet játszik az időjárás és az éghajlati rendszer alakításában (*IPCC, 2007*).

A légköri ásványi por legfőbb forrásai a sivatagos és száraz területek. Főleg a szubtrópusi szélességeken jellemző a por levegőbe jutása, ahol korlátozott a vízhez való hozzáférés és gyér a növényzet. Az utóbbi pár évtized számos modelltanulmánya 1100-5000 Tg/év közé becsli az átlagos évi por emissziót globális szinten, míg ugyanez Észak-Afrikára nézve 170-1600 Tg/év (*Engelstaedter et al., 2006*). Ezen modelleredményeket mutatja a Függelék 1. táblázata. A nagy eltérések a modell parametrizáció és a bemenő adatok különbségében keresendők.

A legújabb tanulmányok a globális emissziót 1000-2000 Tg/év, míg az észak-afrikai emissziót 500-1000 Tg/évre becsülik. Ezen modellbecslések szerint Észak-Afrika a globális porkibocsátás 40-70%-át teszi ki, és ezzel a világ legnagyobb forrásterületének számít (*Prospero et al., 2002*). Ezt alátámasztja *Tanaka és Chiba (2006)* numerikus tanulmánya is, mely szerint az észak-afrikai sivatag por emissziója 58%-a a globális kibocsátásnak.

2.1 Az ásványi por, mint aeroszol hatásai

- A légköri sugárzási egyenlegre gyakorolt hatás:

A légköri sugárzást közvetve és közvetlenül is befolyásolják a porrészecskék (*Miller és Tegen, 1999*), s ezáltal fontos szerepet játszanak az éghajlat alakításában.

A porrészecskék **közvetlen** hatása a sugárzási egyenlegre, hogy a fizikai, optikai, kémiai és ásványtani tulajdonságaiktól függően (anyagi összetételükre jellemző hullámhosszakon) elnyelik és szórják a rövid- és hosszuhullámú sugárzást; valamint hosszuhullámú sugárzást bocsátanak ki (*Sokolik et al., 2001*). A szórás és

elnyelés hatására kevesebb napsugárzás éri el a talajt, ami a felszíni hőmérséklet csökkenését eredményezi, másrészt viszont az elnyelt sugárzás a porréteg és a közép troposzféra melegedéséhez vezet. Ez pedig megváltoztatja a hőmérséklet függőleges eloszlását és stabil vertikális rétegződéshez vezet (*Miller és Tegen, 1999; Heinold et al., 2008*). A közvetlen hatásból eredő globális éghajlati kényszere az ásványi porok $-0,3$ és $+0,1 \text{ W/m}^2$ között becsülhető (*IPCC 4AR, 2007*). („A sugárzási kényszer annak a hatásnak a mértéke, amivel egy hatótényező megváltoztatja a Föld-légkörrendszer bejövő és kimenő energiájának egyensúlyát. Olyan index, amely lehetővé teszi az egyes hatótényezők, mint az éghajlatváltozás potenciális okainak fontosság szerinti összevetését. A pozitív kényszer melegíti a felszínt, míg a negatív kényszer hűti azt” – *IPCC, 2007*)

A por mint aeroszol **közvetve** is hat a légköri sugárzásra. Befolyásolja a felhők fizikai és mikrofizikai tulajdonságait (felhőelemek szám- és méreteloszlása, szerkezet, nagyság, optikai tulajdonságok, élettartam, stb.) (*Levin et al., 1996, Rosenfeld et al., 2001*) és kondenzációs-, illetve jégképző magként hat a felhő- és csapadékképződési folyamatokra is, ami szintén a felhő mikrofizikai és sugárzási tulajdonságainak változásához vezet (*DeMott et al., 2003, Levin et al., 1996*). Bekerülve a felhőbe, nagyobb számú, de kisebb méretű felhőelemeket eredményez, melyek nagyobb mértékben verik vissza a napsugarakat (felszíni hőmérséklet csökken, planetáris albedó növekedik) és kisebb valószínűséggel képződik belőlük csapadék (felhő élettartama megnő). A közvetett hatások együttes mértéke azonban jelenleg még nem ismert.

Láthatjuk, hogy e sugárzási hatásokon keresztül a porrészecskék hatnak a hidrológiai ciklusra és a légkör dinamikai tulajdonságaira is. Ezen összetett hatások és számos bizonytalanság miatt nagyon nehéz megbecsülni a por összegzett hatását a sugárzásra, illetve az éghajlatra (*Sokolik et al., 2001*). A makro- és mikrofizikai tulajdonságokban való kis változások is jelentős hatást fejtenek ki a klímára (*Collins et al., 1994*), így fontos a téma további kutatása.

- Az ökoszisztémákra gyakorolt hatás:

Az ásványi por leülepedve tápanyagot nyújt a szárazföldi és óceáni ökoszisztémáknak (*Mahowald et al., 2005*), például hozzájárul a fitoplanktonok növekedéséhez. Ugyanakkor negatív hatások is érvényesülhetnek a por ülepedésének köszönhetően. Az elmúlt 25 évben például az Atlanti-óceán nyugati medencéjében a por-ülepedésben bekövetkezett növekedés jelentős mértékben hozzájárult a korallzátonyok megfogyatkozásához, a szállított baktériumok és gombák miatt (*Shinn et al., 2000*). Mivel az ásványi por a talajfelszínről származik, a forrásterület kémiai és ásványtani összetételével jellemezhető. *Wedepohl (1995)* talaj összetételeket vizsgáló tanulmánya szerint Észak-Afrika talajának 4%-os a vastartalma, ezért a saharai port jelentős vas tápanyagot szállító közegnek tekinthetjük.

- Az emberi életre gyakorolt hatás:

A növekvő asztmás betegségek, fertőzések, agyhártyagyulladás (*Griffin és Kellogg, 2004, Sultan et al., 2005*) nagy valószínűséggel kapcsolatba hozhatóak a por-eseményekkel. A porral ugyanis gyakran szállítódnak életképes gombák és baktériumok is, melyek allergiás reakciókat, illetve asztmát okozhatnak (*Griffin és Kellogg, 2004, Prospero et al., 2005*). Ezenfelül a por befolyásolja a levegőminőséget, és látástávolság csökkentő hatása által hat a légi- és földi közlekedésre is.

Fontos megemlíteni, hogy a különböző területekről származó ásványi porrészecskék nagyon különböző fizikai, kémiai és ásványtani tulajdonságokkal rendelkezhetnek, a forrásterület geomorfológiai és meteorológiai folyamataitól függően (*Dubovik et al., 2002*). Fontos tehát tudni a forrásterületek pontos jellemzőit ahhoz, hogy megfelelő becslést tudjunk adni a por időjárásra, klímára és ökoszisztémákra gyakorolt hatásáról.

2.2. Az ásványi por, mint jégképző mag

Számos tanulmány vizsgálta eddig az ásványi por részecskék jégképző magként való működését, melyre direkt és feltételezhető bizonyítékok vannak. Már viszonylag régóta ismert a pornak ez a tulajdonsága. A következőkben áttekintünk néhány ezzel foglalkozó tanulmányt és ezek főbb eredményeit.

Már az 1950-es években találtak ezzel a jelenséggel. *Kumai* (1951) és *Isono et al.* (1959) hókristályokat vizsgáltak, és az ezek belsejében talált részecskéket analizálva különböző ásványi anyagokat tartalmazó agyagot azonosítottak.

Heintzenberg et al. (1996) cirrusz kristályokat gyűjtöttek (CVI-módszerrel: *counter-flow virtual impactor*) és párologtattak el, majd a leülepedő részecskéket analizálták. A részecskék túlnyomó részét ásványi eredetűnek azonosították (szilícium- és vastartalommal). *Cziczo et al.* (2004) szintén cirrusz kristályokból vettek mintát. Vizsgálatuk során a kb. 0,2 μm -nél nagyobb ásványi porrészecskék voltak az egyik fő leülepedő részecskék.

DeMott et al. (2003) a Florida feletti légtömegekben mérték az afrikai eredetű aeroszolok jégképző képességét. A porfelhőn belül a jégképző magok koncentrációja meghaladta az 1 cm^{-3} -t, ami a készülékükkel valaha mért legnagyobb koncentráció volt (20-100-szorosa a máskor jellemzőnek) a homogén fagyási feltételnél (-38°C) magasabb hőmérsékleten. Leírták azt is, hogy ha ilyen nagy porkoncentráció éri el a felső troposzférát, akkor a heterogén jégképződés tud dominálni a környező cirruszfelhők kialakulásában, s ez megváltoztatja a felhőképződést és a felső troposzféra relatív nedvességét.

Gabriel és Rosenfeld (1990) Izraelben vizsgálták a por és a jégképző magvak kapcsolatát. Arra az eredményre jutottak, hogy a felhő-magvasodás növelte a csapadékot, amikor kicsi volt a természetes eredetű jégképző magvak koncentrációja, viszont csökkentette, amikor ezek nagy számban voltak megtalálhatóak a felhőben. A természetes eredetű jégképző magvak magasabb koncentrációja összekapcsolható volt az erősen poros (sivatagi eredetű) napokkal. Egy korábbi tanulmány (*Gagin, 1965*) hasonló eredményeket hozott, miszerint a sivatagi por, különösen a lész, nagy mennyiségű

jégek képző magvakat produkál. Laboratóriumi kísérletek is alátámasztják, hogy erős jégek képző viselkedés társul a levegőben lévő porhoz (Roberts és Hallett, 1968; Zuberi et al., 2002).

Néhány tanulmány kimondottan a por és a cirrusfelhők kapcsolatát vizsgálta. Ezek közül említenek meg a következőkben kettőt.

Az egyik Gobbi és Barnaba (2003) cikke. Ők a por és a cirruszfelhők jelenlétét tanulmányozták Rómában a 2001-es évre vonatkozóan LIDAR mérésekkel. A 198 megfigyelt nap 20%-ában észleltek szaharai port (14 por-eseményt), illetve 45%-ában cirrusz felhőzetet, és mindkettő maximumát tavasszal regisztrálták. A téli hónapok kivételével a por a planetáris határréteg és a cirrusz felhők között helyezkedett el, egy fontos harmadik réteget alkotva (kb. 1,5-6 km között). A vizsgálatuk során arra az eredményre jutottak, hogy por jelenlétében megnövekedett a cirruszfelhők sugárzás gyengítése a 6-10 km-es rétegben. Az évi átlagos gyengítés a poros cirruszfelhőkben majdnem kétszerese volt a por nélküliekéhez képest. A gyengítésben és visszaverődésben történő ilyen szintű növekedés feltehetően a por által szolgáltatott jégek képző magvak gyarapodásának tulajdonítható.

Egy másik tanulmány (Carrió et al., 2006) a zivatarfelhők üllőjét vizsgálta. Szimulációkat végeztek, hogy tanulmányozzák az üllőt alkotó felhők érzékenységét a cumulonimbusban lévő kondenzációs- és jégek képző magként fellépő aeroszolok koncentrációjának változására. Azt kapták eredményül, hogy a felhőbe kerülő nagyobb mennyiségű por hűtő hatást fejt ki a felszínre azáltal, hogy növeli az optikai vastagságot és a felhő albedóját. A por hatására megnövekedett jégek képző- és kondenzációs magvak jelentős hatással vannak a jég részecskeméret spektrumára (szűkebb lesz). Ezen kívül a jégek képző magvak nagyobb koncentrációja az elsődleges jégkristályok fokozottabb előállításához vezet, ami pedig a kis jég részecskék és aggregátumok koncentrációjának növekedéséhez vezet. Az összes jég részecske számbeli növekedése kevésbé fontos (kb. 15%). Feltételezéseik szerint a jég részecskék szűkebb méreteloszlásának hatására nő a cirruszok élettartama.

A felsorolt tanulmányokból is látszik, hogy nagyon fontos szerepük van a porrészecskéknek a felhőkön belül, megváltoztatják azok fizikai és sugárzási tulajdonságait.

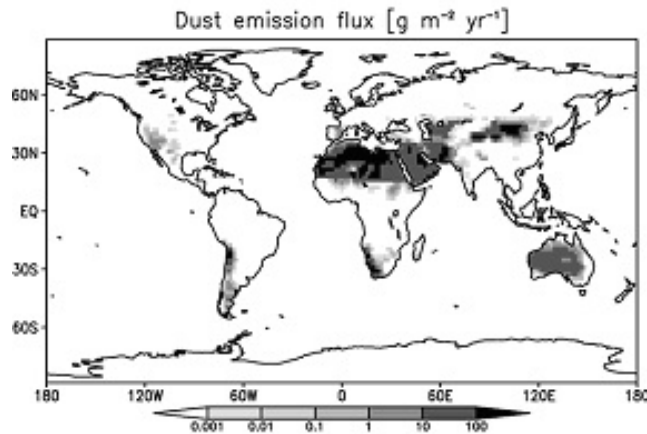
2.3. Az ásványi por forrásterületei

Számos olyan tanulmány készült az elmúlt években, mely a Nimbus 7 műholdon található TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) szenzor méréseiből számított Aeroszol Index (AI) adatai alapján térképezte fel az ásványi por lehetséges forrásterületeit, pl.: *Prospero et al. (2002)*, *Israelevich et al. (2002)*, *Middleton és Goudi (2001)*, *Washington et al. (2003)*. Biztató, hogy mindegyikben hasonló eredményeket kaptak. A TOMS Aeroszol Index a légkör magasabb rétegeiben lévő abszorbeáló aeroszokok (por és füst) mennyiségére jellemző szám. 360 és 331 nm-en mérik a sugárzást derült esetben (ez tartalmazza az aeroszokok hatását is), majd a kettő hányadosát képezik. Ugyanezt a hányadost egy sugárzás átviteli modellel is szimulálják, de csak molekulákból álló légkört feltételezve. A két hányados különbsége az Aeroszol Index, amely az UV-tartományban elnyelő aeroszokok mennyiségére jellemző érték. A következőkben *Prospero et al. (2002)* cikke alapján foglaljuk össze a főbb eredményeket.

13 év adatát felhasználva a legnagyobb és legintenzívebb forrásokat az északi félgömbön lokalizálták, főleg Észak-Afrikában, Közel-Keleten, Közép-Ázsiában és az Indiai-félszigeten. Kimutatták azt is, hogy mérettől és erősségtől függetlenül általában alacsony topográfiajú területekkel lehet őket összekapcsolni, illetve olyanokkal, melyek hegyek vagy felföldek közvetlen közelében találhatók; ahol az átlagos évi csapadék kevesebb, mint 200-250 mm. Érdekes, hogy bár maguk a forrásrégiók száraz vagy extrém száraz területek, mindenhol jelen van a víz, - folyók, patakok, sós tavak stb. formájában - ami elég paradoxnak tűnik. Mégis megmagyarázható, mégpedig azzal, hogy a víz jelenlétében történő eróziós és kémiai folyamatok sokkal hatékonyabban produkálnak finomszemcséjű port, mint a szél általi eróziós folyamatok (*Pyre, 1989*), a finomszemcséjű port pedig könnyebben kapja fel a szél. Legjobb példa erre a Csád-tó, mely mintegy hat ezer évvel ezelőtt még 400 ezer km²-en terülhetett el; 1960-ban a geográfusok 26 ezer km²-re becsülték a méretét; egy 2000-ben végzett felmérés szerint azonban már csak alig

1500 km²-nyi területet foglalt el (*Pálinkás, 2009*). Ezért nem meglepő, hogy kiszáradt medre (Bodele-síkság) ma a világon a legnagyobb forrásterület.

Modelltanulmányok is készültek hasonló célból, például *Tanaka és Chiba (2006)* a MASINGAR nevű globális portranszport modell segítségével próbálták a lehetséges forrásterületeket feltérképezni. Hat éves időszakra (1990-1995) végezték el a szimulációt, melynek eredménye hasonló lett a műholdas adatokból származtatottakkal (1. ábra).



1. ábra
Szimulált évi átlagos por emisszió árama [g/m²év] (*Tanaka és Chiba, 2006*)

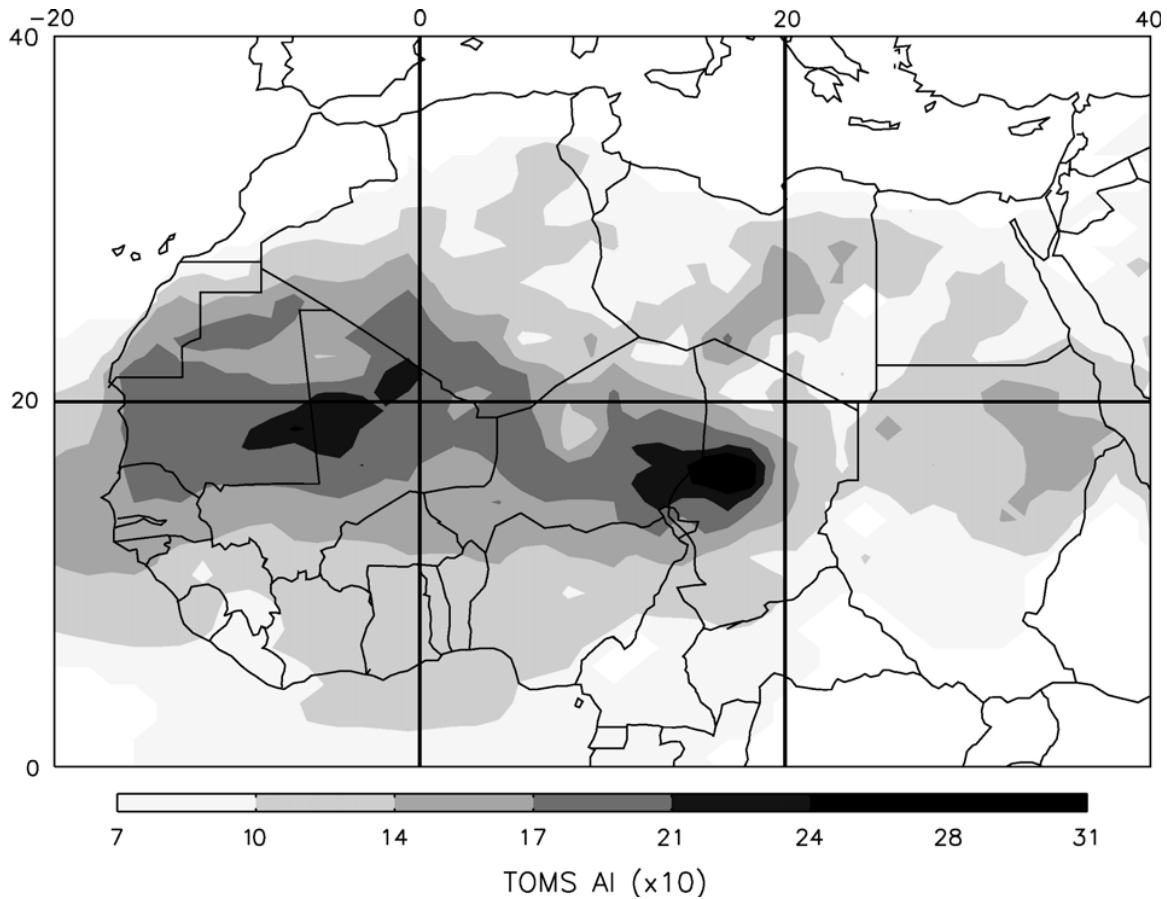
Az emberi tevékenység is jelentősen befolyásolja a por emissziót. Egyrészt a földhasználat által, ami megváltoztatja a talaj felszíni állapotát, másrészt a klíma változtatásával; melyek miatt módosul a por emisszió is (*Engelstaedter et al., 2006*).

Mindazonáltal, a legnagyobb és legaktívabb források az igazán elszigetelt, távoli területeken találhatók, ahol az emberi tevékenység elenyésző vagy nincs jelen. Úgy tűnik tehát, hogy globális skálán a por mozgásánál a természetes források dominálnak.

2.3.1. Észak-Afrika, a legnagyobb forrásterület

Észak-Afrika a világ legnagyobb porforrása, nemcsak az északi félgömbön, de a világon is. Ezt a műholdas mérések és a modell szimulációs kísérletek is alátámasztják (*Prospero et al., 2002; Tanaka és Chiba, 2006*). A globális emisszió több mint 50%-át teszi ki, illetve az óceánok por ellátásának kb. a felét ez a terület fedezi (*D'Almeida, 1987*). *Engelstaedter et al., (2006)* arra az eredményre jutottak, hogy szinte minden

természetes észak-afrikai porforrás a 15. szélességi körtől északra található, olyan régiókban, ahol az évi csapadék kevesebb, mint 200 mm.



2. ábra
Sokéves átlag TOMS Aeroszol Index értékek (1980–1992) (Engelstaedter et al., 2006)

Észak-Afrikán belül legfontosabb kiemelni a már említett Bodele-síkság térségét Csádban, mely vitathatatlanul a Föld legintenzívebb porforrása. A Csád-tótól ÉK-re található térség a Szahara összterületének mindössze 0,2%-át teszi ki. Ennek ellenére mindegyik említett tanulmány ezt kapta a legfontosabb emissziós területnek, nemcsak a Szaharán belül, de az egész Földre nézve is. Ezt a régióban található meteorológiai állomások látástávolság adatai is alátámasztják (*Mbourou et al.*, 1997), melyek alacsony látástávolságot mutatnak egész évben.

A másik nagy, de kevésbé intenzív térséget a Szahara nyugati részében azonosították, Mauritánia partjainak keleti részén, közel a Mali-Mauritánia határhoz. További fontosabb emissziós területek a TOMS adatok alapján: az Atlasz-hegységtől

délre fekvő térség (Észak-Algéria), a Líbiai-sivatag keleti része és a Núbiai-sivatag (Egyiptom és Szudán) (*Engelstaedter et al., 2006*).

Összességében elmondható, hogy nem a nagy kiterjedésű homokdűnés területekről származik a legtöbb por, viszont számos fő forrásterület fekszik ezek szélén (*Prospero et al., 2002*).

2.3.2. Portranszport Észak-Afrikából

A por nagy távolságokra is eljuthat a levegőben, s így befolyásolja a forrásterülettől távol fekvő térségekben az emberi életet, az ökoszisztémát és az éghajlatot. Három fő útvonalon szállítható a por Észak-Afrikából:

- az Atlanti-óceánon keresztül az Egyesült Államok, a Karibi térség és Dél-Amerika felé (*Perry et al., 1997; Prospero és Lamb, 2003*),
- a mediterrán térség és Európa felé (*Moulin et al., 1998; Borbély-Kiss et al., 2004*),
- a keleti mediterrán térség és a Közel-Kelet felé (*Israelevich et al., 2003*), akár Kelet-Ázsiáig (*Tanaka et al., 2005*).

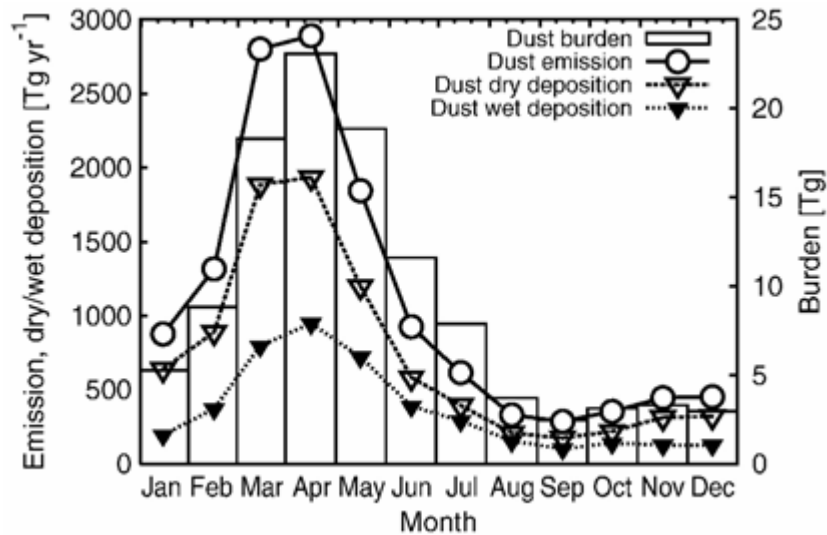
Dél-Európában gyakran figyelhető meg szaharai por a levegőben (*Mattsson és Nihlen, 1996; Rogora et al., 2004*), de tovább is szállítható Közép-Európa fölé (*Bücher és Dessens, 1992; Coen et al., 2004*), sőt akár Angliáig (*Burt, 1991; Ryall et al., 2002*) vagy Skandináviáig (*Franzen et al., 1994*) is eljuthat. Az Alpokban történő por depozíció befolyásolja a környezetet és az éghajlatot, ugyanis csökkenti a gleccserek albedóját és ezáltal növeli az olvadásukat (*Franzen et al., 2004*); valamint az Alpok tavainak kémiai tulajdonságait is megváltoztatja (*Psenner, 1999*).

2.3.3. A portevékenység időbeni változásai

A műholdas TOMS/AI-, a modell- és a megfigyelési adatok azt mutatják, hogy nagy idő- és térbeli változékonyság jellemzi a por emissziót és transzportot.

Tanaka és Chiba (2006) globális modelleredményei alapján elmondható, hogy a különböző régiók különböző szezonális jellemzőkkel rendelkeznek. Az 5. ábrán Észak-

Afrika porterhelésének, por emissziójának, illetve száraz- és nedves ülepedésének éves menete látható.



3. ábra

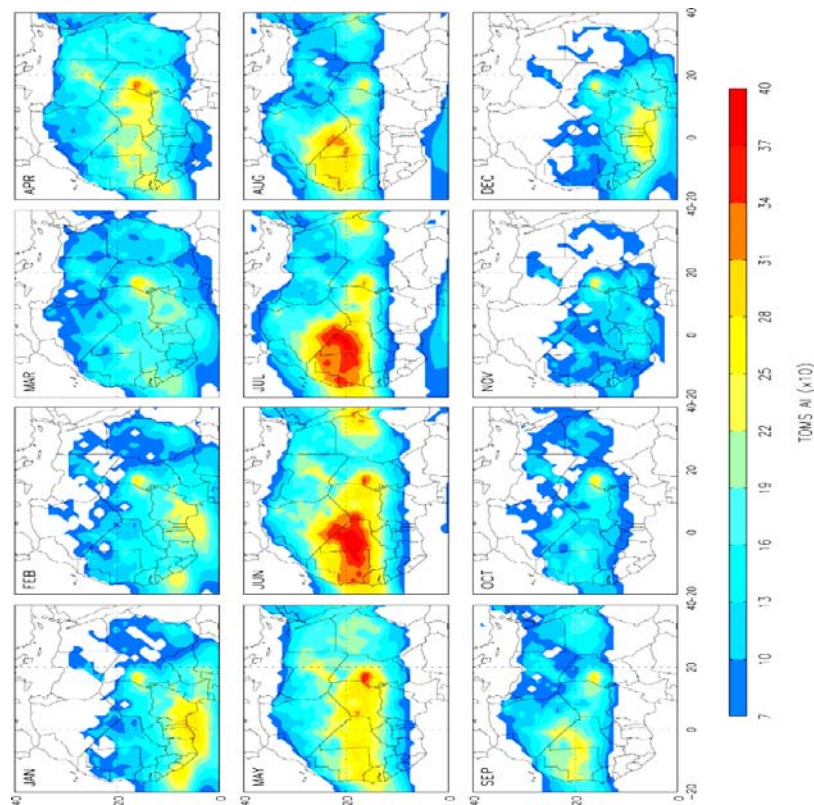
A por havi átlagos emissziója, száraz ülepedése, nedves ülepedése és légköri terhelése Észak-Afrikában (modell szimuláció) (Tanaka és Chiba, 2006)

A 3. ábra alapján a por emisszió (a fehér körökkel jelzett görbe) maximuma Észak-Afrikában a tavaszi hónapokra tehető, míg nyár végén, ősszel éri el a minimumot. Fontos megemlíteni, hogy ezek az éves menetek erősen korrelálnak a globális éves menetekkel, melyből egyértelműen Észak-Afrika dominanciájára következtethetünk.

Az Atlanti-óceán felé történő transzport július-november között nagyobb magasságokban történik, míg március-május között alacsonyabban szinteken (*Chiapello et al.*, 1995). A Kárpát-medence térsége szempontjából az észak felé történő transzport játszik kiemelkedő szerepet. Ezt vizsgálta *Moulin et al.* (1998) a Meteosat műhold porra vonatkozó optikai mélység adatsorai alapján. Arra az eredményre jutottak, hogy március-augusztus között (vagyis a száraz időszakban) van az észak felé irányuló portranszport maximuma, míg ősszel és télen kevesebb por jut el a Földközi-tenger térségébe. Ehhez hasonlóan *Israelevich et al.* (2002) is arra a következtetésre jutott, hogy tavasszal és nyáron többnyire porral telített a Földközi-tenger medencéje felett a levegő, illetve hogy a port alacsony nyomású képződmények szállítják ide. Általában a medence nyugati

részen kezdődnek a porviharok, és átlagosan 7-8°/nap sebességgel haladnak kelet felé (TOMS/AI adatok alapján).

Megfigyelték azt is, hogy Észak-Afrikában a téli félévben a por aktivitás az alacsony szélességeken a legnagyobb, míg az év múlásával egyre magasabb szélességek felé tolódik (*Prospero et al., 2002; Engelstaedter et al., 2006*) (4. ábra). A jellegzetes éves menet a ciklontevékenység, a vegetáció és a talaj nedvességtartalmának éves változásával köthető össze (*Tanaka és Chiba, 2006*).



4. ábra

Havi átlagos Aeroszol Index a TOMS adatok alapján (1980–1992) (Engelstaedter et al., 2006)

2.3.4. A portevékenység kapcsolata a csapadékkal

Többen is kimutatták, hogy a légkörbe kerülő pormennyiség változása összefüggésbe hozható a csapadékmennyiség változásával, rövid és hosszú időskálán egyaránt. Az 1982-87 közti időszak extrém száraz periódus volt Észak-Afrikában, ami 1983-84-ben érte el a csúcstát (*Nicholson et al., 2000*). Ebben a két évben a por szállítása az Észak Atlanti térségben a megfigyelések kezdete (1965) óta mért legnagyobb volt

(*Prospero és Nees*, 1986). Ehhez hasonlóan, *Middleton* (1989) is inverz kapcsolatot talált a porviharok gyakorisága és az előző évi csapadék között. (Vizsgálatait Mauritánia partjaira végezte).

Az utóbbi évtizedekben megnövekedett pormozgást észleltek számos helyen, pl. Mauritániában (*Mbourou et al.*, 1997), a Száhel övezetben, Barbadosz-on (*Prospero és Nees*, 1986) stb. Ez kapcsolatba hozható azzal, hogy az 1968-1997-es időszak alatt 25-40%-kal csökkent a csapadék az 1931-60-as időszakhoz képest (*Nicholson et al.*, 2000). A por mennyiségének növekedése egyéb meteorológiai változásoknak is a következménye, például nagyobb szélsébség, fokozott széllelkések, a por kisebb mértékű kimosódása a forrásterületeken (ugyanis megnövekedett a "száraz" konvektív viharok előfordulása). Nyilvánvaló tehát, hogy ez az ok-okozati kérdés még további részletes kutatásokat igényel.

2.4. A por légköri ciklusa

A por-ciklus 3 fő lépésből áll: 1. a por légkörbe kerülése, 2. a por szállítása, 3. a por ülepedése/lerakódása. Mindhárom erősen függ a légkör állapotától. A következőkben *Schepanski* (2009) doktori disszertációja alapján részletezem a por körforgását.

2.4.1. A por légkörbe kerülése

A por levegőbe jutását főként két tényező befolyásolja: a talajfelszín jellemzői (növényborítottság, érdesség, talajféleség, talajnedvesség tartalom) és a felszíni szélsébség. Ahhoz, hogy a por elemelkedjen a felszínről a szélsébségnek meg kell haladnia egy kritikus sebességet, mely a helyi adottságoktól függ. A száraz és félszáraz területek felett legalább 6 m/s-os szélsébség szükséges (*Todd et al.*, 2007). Megfigyelések és laboratóriumi kísérletek nemlineáris kapcsolatot találtak a felkapott por szám- és méreteloszlása és a felszíni szélsébség között (*Bagnold*, 1941). Azt, hogy egy porrészecske mozgásba lendül-e vagy nyugalomban marad a következő tényezők határozzák meg: a szél vagy másik részecskével való ütközés által átadott mozgási energia nagysága, a részecskére ható gravitációs erő és a részecskék között ható kohéziós erő (van der Waals-, elektrosztatikus-, kapilláris erő, kémiai kötések). Mind a gravitációs,

mind a kohéziós erő részecskeméret-függőek, illetve a talajfelszín tulajdonságai befolyásolják őket (a kohéziós erő függ pl. az ásványtani összetételtől).

Bagnold (1941) alapján három fő típusba sorolható a részecskék mozgása (5. ábra):

1. Aerodinamikai légbeszívás (szuszpenzió):

A finom részecskék ($<60\mu\text{m}$) elég kicsik ahhoz, hogy a turbulens örvények és aerodinamikai erők felkapják őket. Ezen részecskék között viszont nagy a kohéziós erő, ezért nem ez a legjellemzőbb mozgásfajta (*Loosmore és Hunt, 2000*). Viszont ha egyszer mozgásba kerülnek, akkor hosszú ideig a levegőben tudnak maradni és képesek nagy távolságokra is eljutni (*Prospero et al., 1981*).

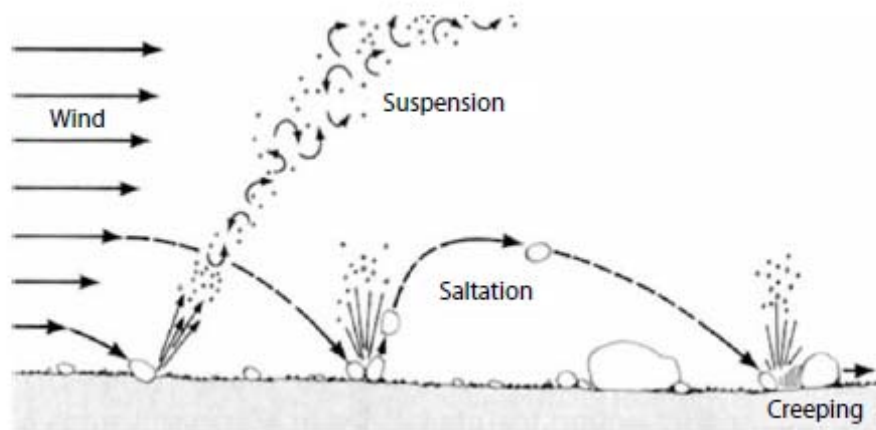
2. „Tánc” (bombázás):

A $60\text{-}100\mu\text{m}$ átmérőjű részecskék a legalkalmasabbak, hogy mozgásba lendüljenek (*Iversen és White, 1982*). De a gravitációs erő hatására ezek pár percen-órán belül le is ülepednek (*Duce, 1995*). Ez a „tánc” mozgás a legfőbb és leghatékonyabb folyamat a por légkörbe kerüléséhez. A részecskék felszínre való visszahullásakor ugyanis finomabb részecskék is mozgásba lendülnek (*Shao et al., 1993; 1996*).

A $60\text{-}2000\mu\text{m}$ átmérőjű részecskék pár decimétert, legfeljebb $1\text{-}2\text{ m}$ -t emelkedhetnek (*Pacyna, 1995*). Ahhoz, hogy a levegőben maradjanak, a gravitációs és a felhajtóerőnek legalább egyensúlyban kell lenniük. A $60\mu\text{m}$ -nél nagyobb részecskék a forrásterülethez közel vissza is hullnak a földre.

3. „Kúszás”:

A $2000\mu\text{m}$ -nél nagyobb részecskék már túl nehezek ahhoz, hogy felfelé emelkedjenek, ezeket maximum csak oldalsó irányban tudja a szél elmozdítani.



5. ábra

A részecske mozgások osztályozása (Bagnold, 1941)

2.4.2. A por szállítása a levegőben

A légkörbe került por a lokális szélrendszerekkel, illetve a regionális és a nagyskálájú cirkulációs rendszerekkel szállítódik. A 60 μm -nél nagyobb porrészecskék kevesebb, mint egy nap alatt ki is kerülnek száraz ülepedés által (csapadék és felhő-kölcsönhatás hiányában) (Duce, 1995). A még nagyobb (60-2000 μm) részecskék pedig már a forrás közelében kihullnak a légkörből, illetve nem is jutnak fel nagy magasságokig. Csak a kis (<60 μm) részecskék tudnak felkeveredni a határréteg teljes magasságáig, és több napig a légkörben maradni (Duce, 1995). A vertikális turbulens áram határozza meg a keveredési magasságot és ezáltal a porréteg vertikális kiterjedését. A lokális szélrendszerek szállítják el a forrásrégióktól a port, melyeket a felszíni jellemzők (pl. topográfia, érdességi elemek: vegetáció, sziklák...) befolyásolnak, illetve nagyobb skálán a regionális és nagyskálájú cirkulációs rendszerek.

A transzport közben a légtömeg jellemzőitől (pl. nedvességtartalom, hőmérséklet) függően változhat a porréteg magassága, illetve vastagsága. A felső troposzférába felkevert porrészecskék akár 1-2 hétig is képesek a légkörben maradni (Duce, 1995).

A légkörben való szállítódás közben a részecskék felszíne is változhat, ideértve a fizikai, optikai és kémiai jellemzőket. És ezen változások által a részecskék és a sugárzás kölcsönhatása is változhat, valamint a por által szállított mikro-tápanyagok hasznosulása

és a higroszkopikus tulajdonságok is, melyek fontosak a részecske-felhő kölcsönhatásokban (*Johansen et al.*, 2000; *Fan et al.*, 2006).

2.4.3. A por ülepedése a légkörből:

A por kikerülése a légkörből száraz, illetve nedves ülepedéssel történhet. A száraz ülepedés a turbulens diffúzió és a gravitációs erő által mehet végbe. A nedves ülepedés lehet eső általi kimosódás (a hulló esőcsepp porrészecskéket gyűjt) vagy felhőn belüli kikerülés (aktiválódás, vagy felhőelemek általi koaguláció).

3. A por műholdas távérzékelése

3.1. Az MSG műholdak és a SEVIRI műszer

Európa első geostacionárius műholdját, a Meteosat-1-et 1977-ben lőtte fel az Európai Űrkutatási Szervezet (az Európai Űrügynökség (ESA) elődje). Ezután 1997-ig még hat műhold került pályára, a Meteosat-3 műholdtól kezdve már az EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) működése keretében. Ez a hét első generációs Meteosat műhold jelentős javulást hozott az időjárás-előrejelzésében. Ám a technológiai fejlődés és az egyre kifinomultabb időjárás-előrejelzési követelmények hatására megnőtt a kereslet a gyakoribb, pontosabb és nagyobb felbontású megfigyelésekre. Ezért az EUMETSAT elindította a második generációs Meteosat (Meteosat Second Generation = MSG) programját (az ESA-val együtt). Az első tagja ennek a generációnak, az MSG-1 (Meteosat-8) 2002-ben került pályára. Majd ezt követte 2005-ben az MSG-2 (Meteosat-9), ami 2007 óta jelenleg is az operatíván működő európai, geostacionárius műhold. Még két műholdat terveznek fellőni ebből a generációból, illetve már tervezik az ezeket követő harmadik generációt. (<http://www.eumetsat.int>)

Az MSG-t úgy tervezték, hogy eleget tegyen a felhasználói követelményeknek, kiszolgálja a Nowcasting alkalmazások és a numerikus előrejelzés igényeit. Emellett fontos adatokat szolgáltat az éghajlat megfigyeléséhez és kutatásához is.

Az MSG legjelentősebb fejlesztése a SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) nevű képalkotó rendszer, mely – mint ahogy a nevéből is kitűnik – látható és infravörös tartományokban készít felvételeket. Ez térben, időben és spektrálisan is jobb felbontású információt szolgáltat, mint a korábbi műhold. Félóra helyett negyedóránként, 5 ill. 2,5 km helyett 3 és 1 km-es térbeli felbontásban készülnek a felvételek, és ami talán a legfontosabb, hogy 3 hullámhossztartomány helyett 12 sávban. A gyors képkészítés lehetővé teszi a felhőképződés és a felhőpályák, illetve az egyéb gyorsan kialakuló események pontosabb nyomon követését, ezáltal elősegíti a veszélyes időjárás jelenségek (mint például zivatarok, heves esőzések, köd, stb.) időben

való felismerését és előrejelzését. A 12 spektrális csatorna pedig jóval pontosabb adatokat szolgáltat az egész légkörről, és ezzel együtt sokkal jobb minőségű kezdeti feltételeket ad a numerikus előrejelző modellek számára. E csatornák tulajdonságait az 1. táblázat tartalmazza.

Csatorna	Tartomány [μm]	Fő alkalmazási lehetőségek	Felbontás
CH1 – VIS 0.6	0,56-0,71	felhők észlelése és követése földfelszíni monitoring (NDVI) aeroszol megfigyelés	3 km
CH2 – VIS 0.8	0,74-0,88	felhők észlelése és követése földfelszíni monitoring (NDVI) aeroszol megfigyelés	
CH3 – IR 1.6	1,50-1,78	aeroszol megfigyelés hó/jég detektálása	
CH4 – IR 3.9	3,48-4,36	köd detektálása (éjjel) felhő fázis (víz/jég) felszíni hőmérséklet, városi hősziget tűz detektálása	
CH5 – WV 6.2	5,35-7,15	vízgőztartalom (közép-, felső troposzférában) szélvektor számítás légköri instabilitás	
CH6 – WV 7.3	6,85-7,85	vízgőztartalom (közép-, felső troposzférában) szélvektor számítás légköri instabilitás	
CH7 – IR 8.7	8,30-9,10	vékony Ci felhők felhő fázis (víz/jég) légköri instabilitás	
CH8 – IR 9.7	9,38-9,94	összozon tartalom tropopauza megfigyelése	
CH9 – IR 10.8	9,80-11,80	talaj és felhők felszínhőmérséklete alacsony szintű nedvesség légköri instabilitás felhőkövetés	
CH10 – IR 12	11,00-13,00	talaj és felhők felszínhőmérséklete alacsony szintű nedvesség légköri instabilitás felhőkövetés	
CH11 – IR 13.4	12,40-14,40	légköri instabilitás vékony/Ci felhők magassága	1 km
CH12 – HRV	0,40-1,10	kis skálájú konvekció felszíni tagoltság aeroszol észlelés	

1. Táblázat

A SEVIRI műszer csatornáinak főbb jellemzői és fő alkalmazási területei
(<http://www.eumetsat.int>)

Fontos megemlíteni még, hogy a Meteosat-8 (MSG-1) műhold – mely az Egyenlítő felett a keleti hosszúság $9,5^\circ$ -nál helyezkedik el – 2008. május 13. óta „rapid-scan” módban üzemel. Ez azt jelenti, hogy 5 perces intervallumokban készít képeket kb. az északi szélesség $15-70^\circ$ között.

Az MSG/SEVIRI képek megjelenítésére 3 féle módszer is létezik:

1. Egyedi sávok képei (fekete-fehér skálával vagy ún. ‘pseudo-color’ színezéssel)
2. Két csatorna különbsége/aránya (szintén fekete-fehér skálával vagy ‘pseudo-color’ színezéssel)
3. RGB kompozit képek: két vagy három csatorna (vagy csatorna kombináció) az egyes alapszínekben megjelenítve (Red-piros, Green-zöld, Blue-kék)

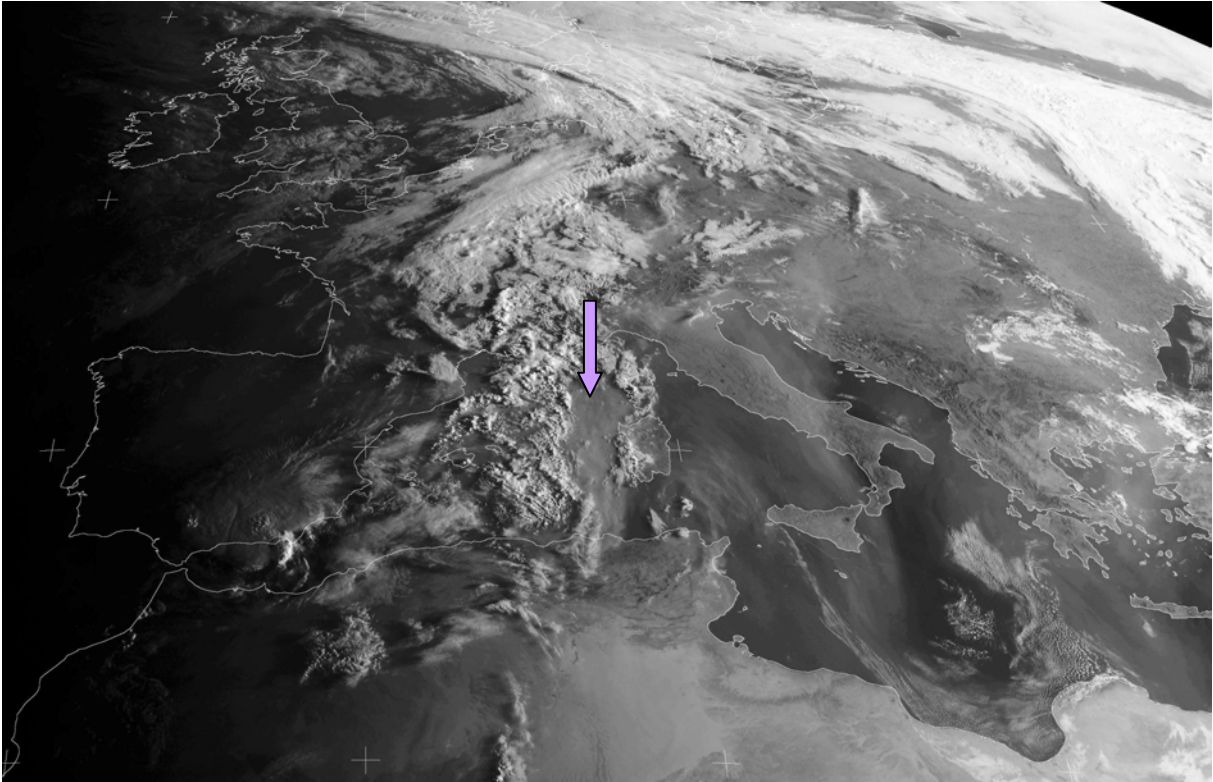
A műholdas mérésekből különböző légköri paramétereket számíthatunk, származtathatunk. A származtatott képek multispektrális algoritmusokkal SEVIRI képek és egyéb információk felhasználásával készülnek (pl. felhőfajták, osztályozott képek (SAFNWC programcsomag), diszkrét osztályok színezése, stb.).

3.2 Por detektálása az MSG/SEVIRI műholdképeken

A későbbi esettanulmányainkban főként a következő három fajta műholdképet használtuk:

HRV csatorna:

A nagyfelbontású (1 km/pixel a műhold alatti pontban) látható tartományú (0,4-1,1 μm) csatorna általában jól alkalmazható a por észlelésére, illetve hasznos, ha csak egy kisebb területre vagyunk kíváncsiak, mert kivágva a területet még mindig jó felbontással dolgozhatunk (pl. 2. esettanulmány 43. ábra). Hátránya viszont, hogy csak nappal használható. A 6. ábrán láthatunk egy példát 2008.09.10. 06:00 UTC időpontban, amelyen a Földközi-tenger felett nagykiterjedésű porréteg észlelhető (lila nyíl jelzi a legnagyobb koncentrációjú területet).



6. ábra
MSG – HRV nagyfelbontású látható tartományú műholdkép
2008.09.10. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)

A továbbiakban két típusú kompozit képet fogunk bemutatni. A kompozit képeket úgy állítjuk elő, hogy az alapszínekben különböző csatornákat (vagy csatornák különbségeit) jelenítjük meg. Ezáltal több csatorna információtartalmát egyszerre láthatjuk. A kompozit képet sokszor RGB képnek hívják a három alapszín után.

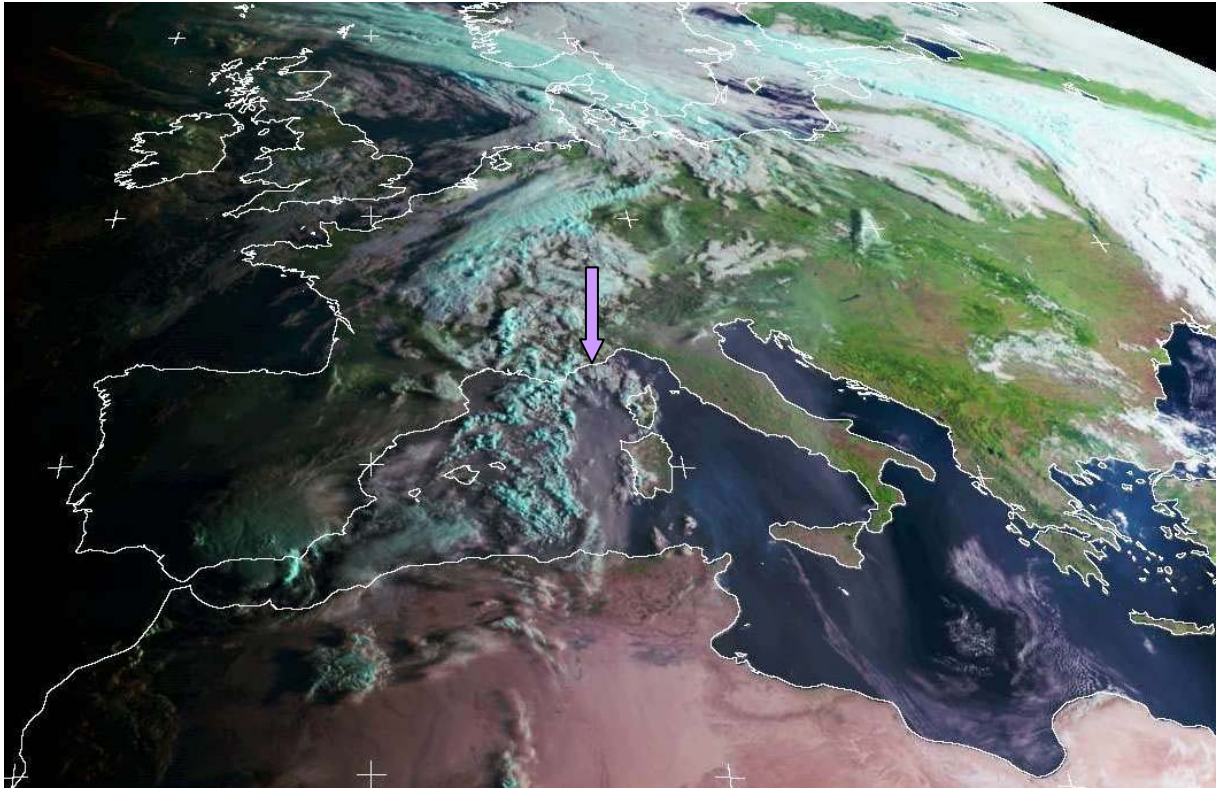
RGB-Natural:

Ez egy RGB kompozit műholdkép, a következő csatornákkal:

- Red: NIR1.6 (Ch 03)
- Green: VIS0.8 (Ch 02)
- Blue: VIS0.6 (Ch 01)

Ez a kompozit kép (pl.: 9. ábra) a neve ellenére nem valós színezésű (MSG csatornákból ilyen nem lehet előállítani) mégis így hívjuk, mert a színei a többi kompozit képhez képest még a legközelebb áll a valódi színekhez. Az alábbi eltérések jellemzőek a

valódi színekhez képest: a felhők vagy fehérek (vízfelhők) vagy türkiz színűek (jégfelhők, olyan felhők, amelyek tetején jégkristályok vannak), továbbá a hó is türkiz színű.



7. ábra
MSG – RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.09.10. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)

Az RGB-Natural képeken a színek a következő objektumokat jelzik:

- Felhők:
 - Élénk türkiz kék – vastag jégfelhők (vékony jégfelhők alig látszanak)
 - Fehér, rózsaszínes – vízfelhők kis cseppekkel
 - Fehér, kissé türkizes – vízfelhők nagy cseppekkel
 - Türkizes – vegyes halmazállapot
- Felszín:
 - Zöld – növény
 - Barnáspirosas – kevés növény
 - Rózsaszínes – sivatag

- Türkiz kék – hó

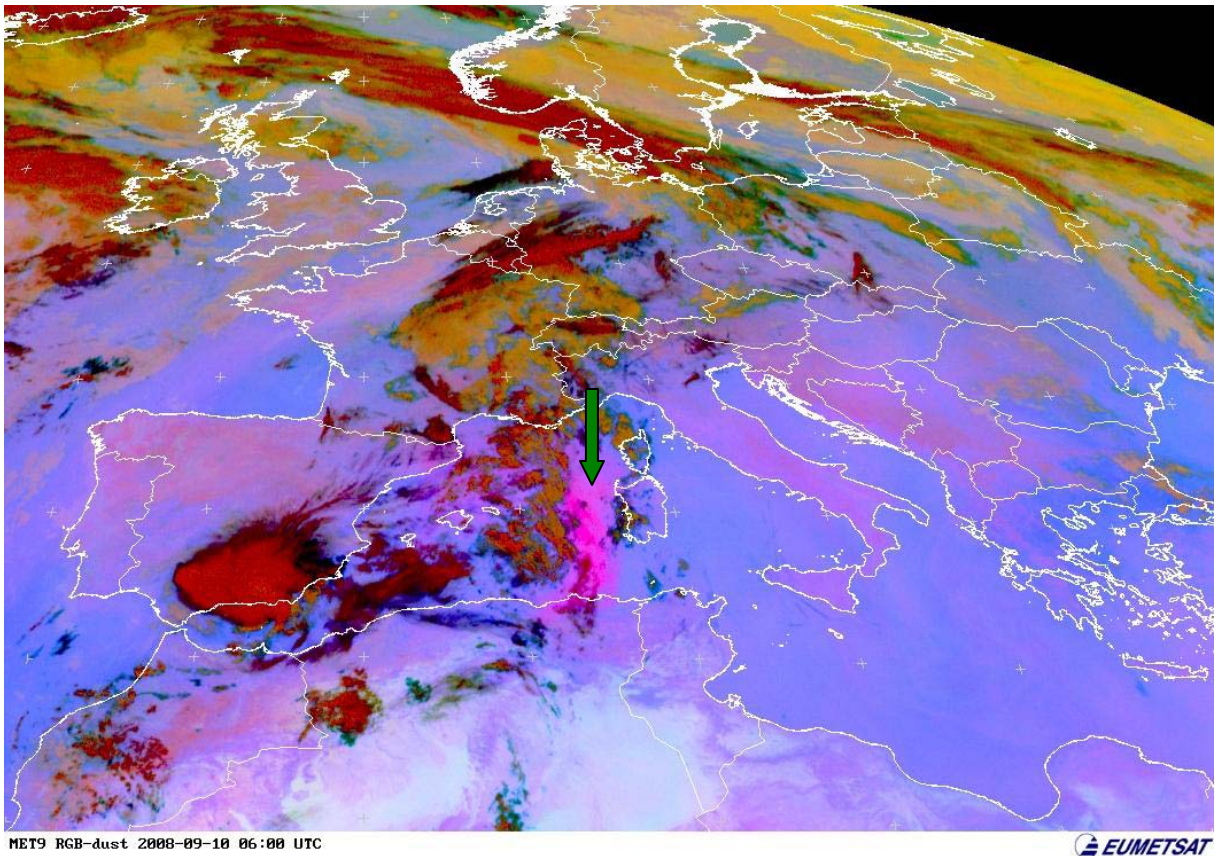
A porfelhő főleg tenger felett (sötét háttér) látszik jól ezen a típusú műholdképen, és ott is főleg akkor, ha nagy az optikai vastagsága. Szárazföld felett és kisebb koncentrációban inkább csak alacsony napállásnál láthatjuk, mivel az aeroszol részecskéken a szóródás kis szögekben (előreszórás) igen erős. Mivel a csatornák a látható és a közeli infravörös tartományban találhatóak, ezért ez a fajta kompozit kép is csak nappal használható.

Por kompozit:

Ez egy hamis színezésű RGB kompozit műholdkép, a következő csatornákkal, illetve csatorna-különbségekkel:

- Red: IR12.0–IR10.0 (Ch 10–ch 09)
- Green: IR10.8–IR8.7 (Ch 09–Ch 07)
- Blue: IR10.8 (Ch 09)

Ez a fajta kompozit kép éjjel-nappal használható. A por detektálása azonban a nagyobb koncentrációjú és megfelelő magasságig emelkedett porrétegekre korlátozódik. Tapasztalataink szerint az európai szárazföld felett már ritkán lehet nyomon követni az Észak-Afrika felől érkező por útját. Nagy előnye viszont, hogy a sivatag felett is jó kontraszttal kiemeli a porfelhőket (pl.: 8. ábra).



8. ábra
MSG – por kompozit műholdkép
2008.09.10. 06:00 UTC
(<http://www.eumetsat.int>)

A por kompozit képek színezése alapján a következő objektumok különíthetők el:

- Felhők:
 - Élénk rózsaszínű – porfelhő nappal
 - Lilás – porfelhő éjszaka
 - Barna – magas, vastag felhők (a felhőteten jégkristályok vannak)
 - Fekete – magas, vékony, áttetsző jégfelhők
 - Barnássárga – középszintű felhők
 - Zöld – középszintű vékony, áttetsző felhők (a sivatag felett vékony áttetsző jégfelhők)
 - Sárga – alacsonyszintű vízfelhők
- Felszín:
 - Kékes, ill. halvány rózsaszínes – derült föld vagy tengerfelszín

- inkább kékes – nagyobb az alsó légréteg nedvesség tartalma
- inkább halvány rózsaszínű – kisebb az alsó légréteg nedvesség tartalma
- Fehéres lilás foltok – derült sivatag nappal
- Sárgás lilás rózsaszínes foltok – derült sivatag éjszaka

Egyéb lehetőségek a por észlelésére műholdképeken:

Az eddig említett három fajta műholdképen kívül más csatornák, csatorna-kombinációk is használhatók por detektálására. Ezekre sorolunk fel még néhány példát (*Kerkmann., 2004*).

Por detektálása nappal (a már említetteken kívül):

- **VIS0.6** és VIS0.8 (az előbbi jobb, mert sötétebb a háttér)
- IR10.8 (a legérzékenyebb infravörös csatorna)
- IR9.7 (ózon elnyelési csatorna)
- **IR8.7–IR10.8** és IR3.9–IR10.8 különbségek

Illetve éjszaka:

- IR8.7 (a legjobban használható infravörös csatorna)
- **IR8.7–IR10.8** különbség (a legjobb éjszaka, sivatagi felszín felett)

4. Statisztikai vizsgálat a DREAM modell alapján

4.1. A BSC/DREAM por előrejelző modell rövid bemutatása

A DREAM (*Dust REgional Atmospheric Model*) a *Barcelona Supercomputing Center*-ben futó modell, mely a sivatagi por légköri életciklusát jelzi előre. A SKIRON/Eta előrejelző modellt használták az DREAM fejlesztésére, ami az NCEP/Eta regionális légköri modellen alapul. Az Euler-féle nemlineáris differenciálegyenletet oldja meg a por tömegmegmaradására (*Nickovic et al., 2001*).

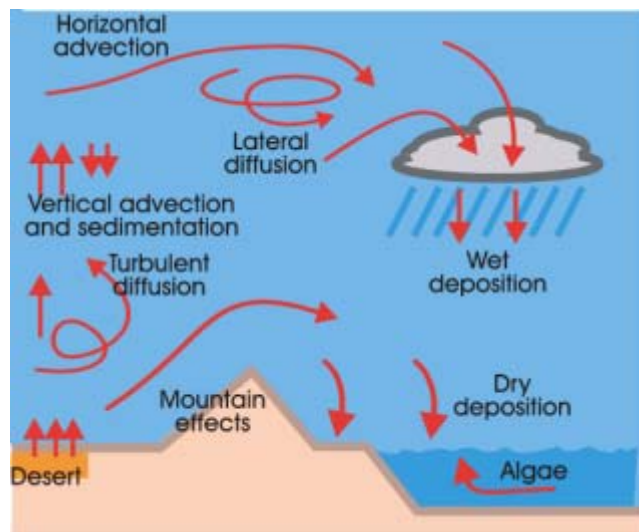
A DREAM két fő részre osztható: (1) a légköri modellre és (2) a porkoncentráció modulra. A rendszer por moduljai magukban foglalják a por életciklusának fő fázisait: termelődés, diffúzió, advekción, ülepedés.

A szél eróziója a DREAM parametrizációs sémájában főként a következő tényezőktől függ: a talaj típusától, a növényborítottság típusától, a talaj nedvességtartalmától és a talaj közeli turbulenciától. A modell, integrációja során kiszámolja a por emisszió fluxusát a sivatagra eső modellpontok felett. Az egyik fő input adat a felszínborítottság mező, amely alapján kijelölik a „produktív” területeket. Ezen kívül, nagy felbontású mezőket is felhasználnak, melyek tartalmazzák a tengerszint feletti magasságot, a talaj tulajdonságait és a növényborítottságot. A légkörbe kerülő por teljes tömege erősen függ a részecskék méret-eloszlásától. A jelenlegi operatív modellkonfiguráció 4 részecskeméret osztályt (agyag, kis iszap, nagy iszap, homok) használ a következő körülbelüli sugarakkal: 0,73; 6,1; 18 és 38 μm . A hosszú távú transzport szempontjából csak az első kettő lényeges (élettartamuk nagyobb, mint 12 óra).

A DREAM-ben a porkoncentráció mint felszíni állapot szerepel. A felszabaduló mozgó részecskék felszíni koncentrációja és a megfelelő felszíni vertikális fluxus a talaj szerkezetétől és állapotától, valamint a légkör alsó részében található turbulens rendszerektől függenek, illetve a por vertikális árama a súrlódási sebesség és a talajnedvesség függvénye is.

Amint bekerül a levegőbe, a por-aeroszol a légköri modellváltozók szerint mozog (9. ábra):

- a folyamat korai szakaszában a turbulens paraméterek szerint (határrétegben való elkeveredés),
- a későbbi fázisban a modell áramlási mezejének megfelelően (légköri transzport),
- és végül a modell termodinamikai folyamatai és csapadéka, valamint a felszínborítottság alapján (melyek a por száraz és nedves ülepedését adják).



9. ábra

A por légköri ciklusa (<http://www.bsc.es/projects/earthscience/DREAM/>)

A modell egyik kulcs komponense a kezdeti forrás feltételek előállítás (koncentráció kontinuitási egyenlet). Ennek pontos szimulációja/előrejelzése hiányában minden más folyamat is rosszul fog megjelenni a modellben. Ezért különös figyelmet kell szentelni a por termelőési fázisának megfelelő parametrizációjára.

Mivel még nincs kielégítő 3D-s porkoncentráció megfigyelés, amit be lehetne ágyazni a modellbe, ezért a porkoncentráció kezdeti állapota az előző napi modellfuttatás 24 órás előrejelzéséből adódik.

4.2. A statisztikai vizsgálat háttere

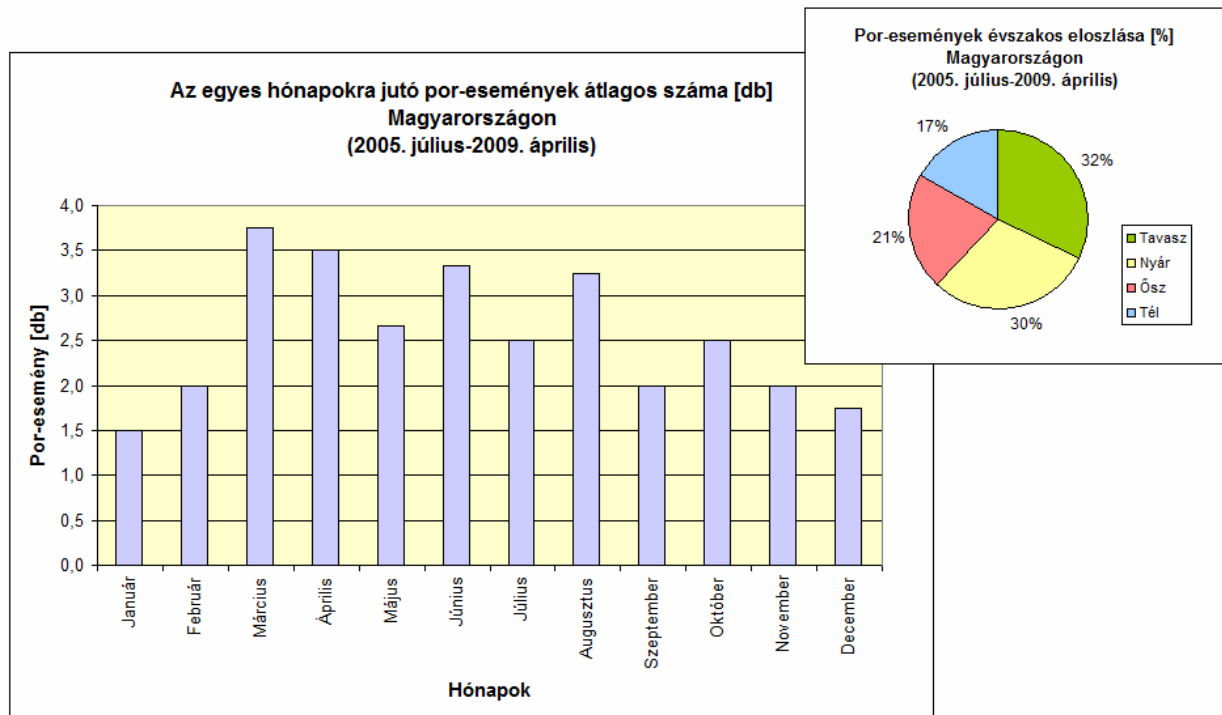
A BSC/DREAM archívuma (forrás: *BSC/DREAM archívuma*) alapján készítettünk egy rövid statisztikai vizsgálatot a por-eseményekről Magyarországon. A 2005. július és 2009. április közötti időszak porterhelésre [g/m^2] (az 1 m^2 talajfelszín feletti légoszlopban található por tömege g-ban megadva) vonatkozó térképeit vizsgáltuk. (Az előtte lévő időszakban sajnos a térkép kivágat nem tartalmazta Magyarországot.) A modellt minden nap 12 UTC-kor futtatják 72 órára, 6 órás időlépcsővel, és ahogy már említettük, a kezdeti porkoncentráció az előző napi modellfuttatás 24 órás előrejelzéséből származik. A térképeken a porterhelésen kívül a 3000 m-es szél előrejelzése is fel van tüntetve. 2005. július és 2006. december között az é. sz. $15\text{-}48^\circ$, illetve a ny. h. $20^\circ\text{-k. h. } 45^\circ$ által határolt terület látható az előrejelzési térképeken. Ezt a kivágatot 2007 januárjától kibővítették az é. sz. 58° -ig, illetve a ny. h. 30° -tól a k. h. 50° -ig.

A vizsgálat során a következő paramétereket figyeltük: volt-e por-esemény; ha volt, hány napot érintett; és milyen irányból érkezett hazánk fölé. Egy por-eseménynek tekintettük azon napo(ka)t, mely(ek)en ugyanaz a poros légtömeg időzött Magyarország felett. Volt rá példa, hogy a por kikerült hazánk légteréből, majd rövid idő múlva (1-2 nap) visszasodródott fölénk a megváltozott szélviszonyoknak köszönhetően; ilyenkor ezt nem tekintettük új eseménynek. A poros napok egyértelműen azok a napok, amikor Magyarország felett poros levegőt jelzett a modell (minimum $0,05 \text{ g}/\text{m}^2$).

A porterhelést mennyiségileg ezen térképek alapján, vizuálisan nem lehetett volna pontosan meghatározni, ezért ettől eltekintettünk. Természetesen a többi, elemzett paraméter vizsgálata sem teljesen objektív – hiszen a térképes megjelenítést vettük alapul –, de mivel Magyarországra még nem készült ilyen felmérés, ezért az esetleges pontatlanságoktól eltekintve összességében átfogó képet ad a Magyarországot érintő szaharai por időbeli változásairól.

4.3. A statisztikai vizsgálat eredményei

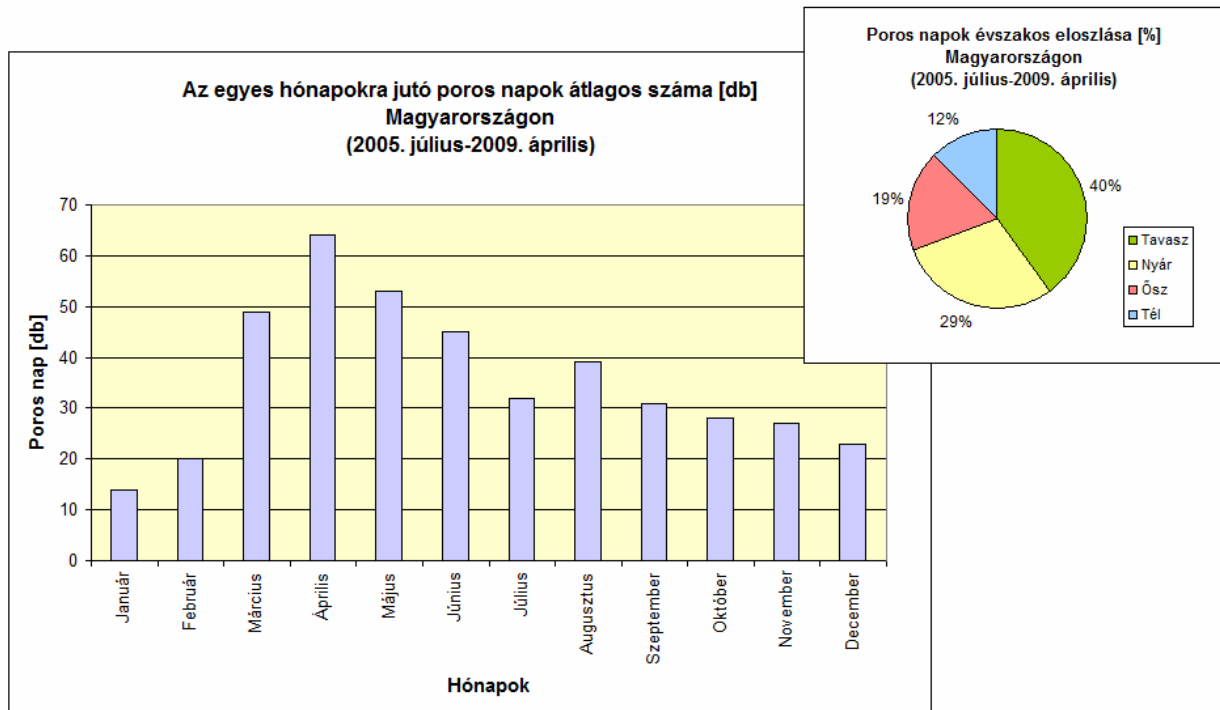
A vizsgálat eredményeképp egy áttekintő képet kaptunk a por-események és poros napok időbeli változásáról Magyarországon, illetve a hazánkba szállított por érkezési irányáról.



10. ábra

A por-események átlagos havi és évszakos eloszlása a vizsgált időszakban (2005. július-2009. április) Magyarországon

A 10. ábrán az egyes hónapokra jutó **por-események** átlagos számát láthatjuk. A legtöbb por-esemény a március-augusztus közti időszakban figyelhető meg (március-áprilisi maximummal), míg szeptembertől februárig kevesebb fordult elő. A kördiagramból egyértelműen látszik, hogy a legtöbb por-eseményt a tavaszi, a legkevesebbet, pedig a téli hónapokra jelezte előre a modell.



11. ábra

A poros napok átlagos havi és évszakos eloszlása a vizsgált időszakban (2005. július-2009. április) Magyarországon

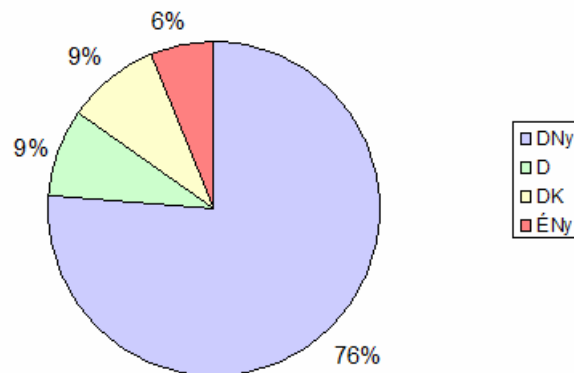
A 11. ábra az egyes hónapokra jutó **poros napok** átlagos számát reprezentálja. Ezek a havi értékek szignifikánsabban eltérnek egymástól. Jól látható a tavaszi hónapok dominanciája, azon belül áprilisé. Ezek után az év múlásával fokozatosan csökken a modell szerint a poros napok száma. A legkevesebb port hazánk fölé a téli hónapokra adta, januári minimummal.

Eredmények jó egyezést mutatnak a 2.3. fejezetben említett műholdas vizsgálatok eredményeivel, miszerint a száraz időszakban (március-augusztus) van a Szaharából észak felé irányuló transzport maximuma, és ősszel-télen a minimuma (*Moulin et al., 1998*).

Ha az éveket külön-külön tekintjük (Függelék/2. táblázat), akkor látható, hogy évről-évre változó a poraktivitás hazánkban. Átlagosan elmondható, hogy az év kb. 30%-ában adott a modell Magyarország fölé kisebb-nagyobb területre poros levegőt. A legnagyobb arány a 2007-es évben volt (kb. 38%).

Az egész időszakot havonta szemlélve, az abszolút minimumot 2006 januárjában, 2006 novemberében és 2007 januárjában adta a modell, amikor is egyáltalán nem volt por-esemény, a poros napok száma nulla volt. Por-események szempontjából 2006 áprilisa és 2008 márciusa volt kiemelkedő 5-5 eseménnyel. A legtöbb poros napot 2008 áprilisára jelezte előre a modell, amikor is 28 napra adott port hazánk fölé, vagyis szinte az egész hónapra.

**A por érkezési irányainak eloszlása a vizsgált időszakban
(2005. július-2009. április)**



12. ábra

A por érkezési irányainak eloszlása a vizsgált időszakban (2005. július-2009. április)

A 12. ábrán azoknak az irányoknak az átlagos eloszlása szerepel, ahonnan a poros légtömeg (egy-egy esemény) megközelítette hazánkat. Látszik, hogy a leggyakoribb szignifikánsan a délnyugati irány volt (kb. 76%). A délkeleti és déli irány nagyjából azonos arányban volt megfigyelhető (kb. 9%), és északnyugat felől érkezett a legkevesebb por Magyarországra (ami szintén a Szahara felől jött, csak észak felől kanyarodott vissza ránk).

Összességében elmondható, hogy a szakirodalmi tényekkel (pl.: *Tanaka és Chiba, 2006; Moulin et al., 1998*) összhangban a tavaszi hónapokra adta a modell Magyarországra a por-események és poros napok számának maximumát, az őszi-téli hónapokra pedig a minimumát. A legtöbb esemény délnyugati irányból érte el hazánkat a vizsgált időszakon belül.

5. Esettanulmányok elemzése

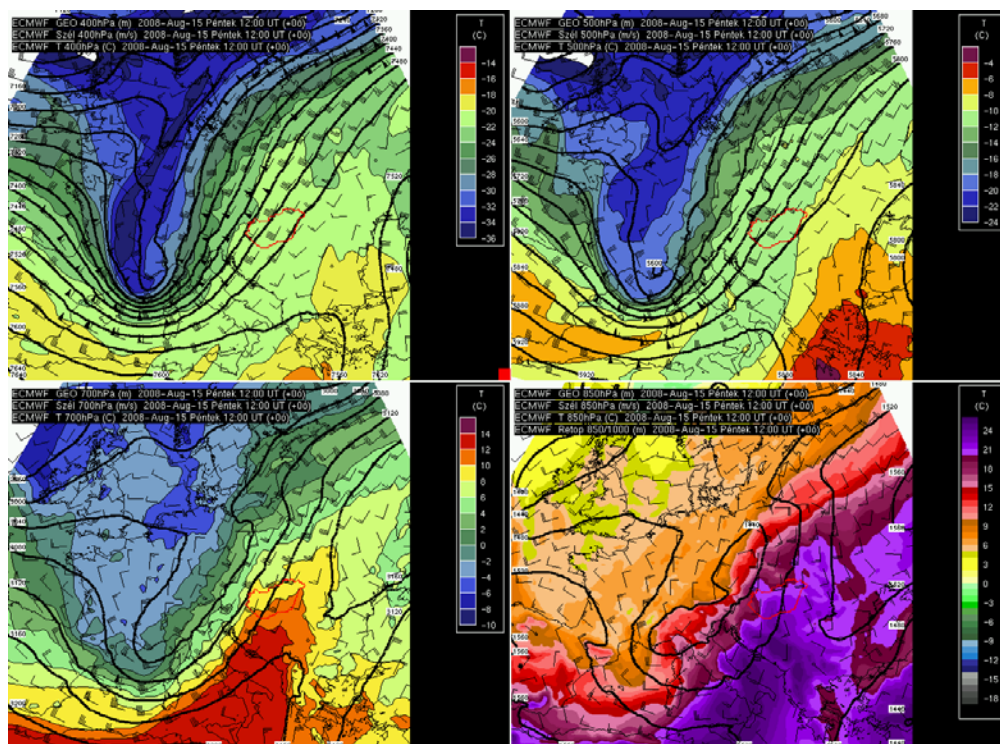
E fejezetben bemutatott esettanulmányainkat a 2004. augusztus-2009. április közti időszakot tartalmazó adatbázisunkból (Függelék/ 3-8. táblázat) választottuk ki különböző magyarországi por-események bemutatására. Az adatbázist MSG műholdképek (<http://www.sat.dundee.ac.uk>) alapján, trajektória számítások és a DREAM előrejelző modell segítségével készítettük, 3 kategóriába sorolva a Magyarországot érintő por-eseményeket (tisza vagy többnyire felhőtlen ég hazánk felett; többnyire felhővel borított ég hazánk felett; speciális szerkezetű magas szintű felhőzet a műholdképen – ami tapasztalataink és feltételezéseink szerint poros levegő jelenlétére utal – és poros levegő hazánk felett). A választott esetek ezekre egy-egy szemléletes példa.

5.1. 2008. augusztus 15-16.

2008. augusztus 16-án tanúi lehettünk a szaharai por nedves ülepedésének Magyarországon.

A szinoptikus helyzet leírása:

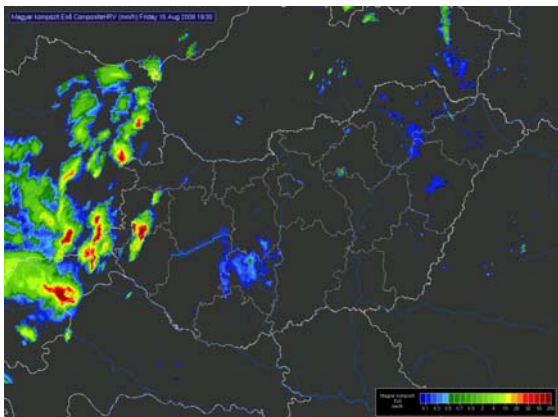
A mediterrán térségben a megelőző napokban nagyon meleg légtömeg volt található. Észak- és Nyugat-Európa felett egy egyre markánsabb magassági hideg teknő uralta az időjárási helyzetet. Ennek előoldalán tartós délnyugati áramlás alakult ki, mely meleg, illetve poros levegőt szállított Közép- és Kelet-Európába. A teknő peremén hullámzó frontrendszer alakult ki, mely 2008. augusztus 15-én elérve hazánkat, a Dunántúlon heves zivatarokat is okozott.



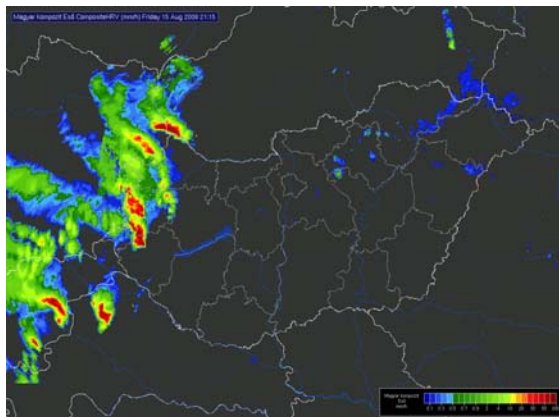
13. ábra
HAWK – 2008. augusztus 15. 18:00 UTC
Hőmérsékleti-, szél-, és geopotenciál mezők (400, 500, 700, 850 hPa)

A 13. ábrán az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK rendszerével megjelenített kép-négyes látható, melyen az ECMWF modellből származó hőmérsékleti-, szél-, és geopotenciál mezők vannak feltüntetve különböző nyomási szinteken (400, 500, 700, 850 hPa) a 2008. augusztus 15. 12:00 UTC időponban. Ezekon a képeken jól látszik, hogy mind a talaj közelében, mind a magasabb nyomási szinteken D-DNy-ias volt az áramlás Magyarország felett az eseményt megelőzően, illetve a magassági hideg teknő is jól kivehető, melynek előoldalán helyezkedik el hazánk.

A frontrendszer felhőzete augusztus 15-én az esti órákban érte el az ország nyugati határát, nagy esőzéseket okozva az éjszaka folyamán a Dunántúlon. A legnagyobb csapadékok az Alpokalján hullottak, hevesebb zivatarokat a Nyugat- és Dél-Dunántúlon figyeltek meg. A csapadékrendszer kelet felé helyeződve fokozatosan gyengült és a Dunát elérve már nem okozott számottevő csapadékot. A frontrendszer 16-án estére elhagyta térségünket.



14. ábra
Országos kompozit radar kép
2008. augusztus 15. 19:30



15. ábra
Országos kompozit radar kép
2008. augusztus 15. 21:15



16. ábra
Országos kompozit radar kép
2008. augusztus 16. 01:30



17. ábra
Országos kompozit radar kép
2008. augusztus 16. 04:30



18. ábra
Országos kompozit radar kép
2008. augusztus 16. 07:30



19. ábra
Országos kompozit radar kép
2008. augusztus 16. 12:30

A 14-19. ábrán magyarországi kompozit radarképek láthatók, melyeken nyomon lehet követni a front áthaladását az országon. A nagyobb mennyiségű és intenzitású csapadék a Dunántúlon, annak is a nyugati felében hullott. A középső országrészre érve legyengült a front, majd Kelet-Magyarországon kissé újra megerősödött.



20. ábra
Napi jelentés (OMSZ) - 24 órás csapadékösszeg
(2008.08.15. 8h – 2008.08.16. 8h)



21. ábra
Napi jelentés (OMSZ) - A csapadék fajtája
(2008.08.15. 8h – 2008.08.16. 8h)



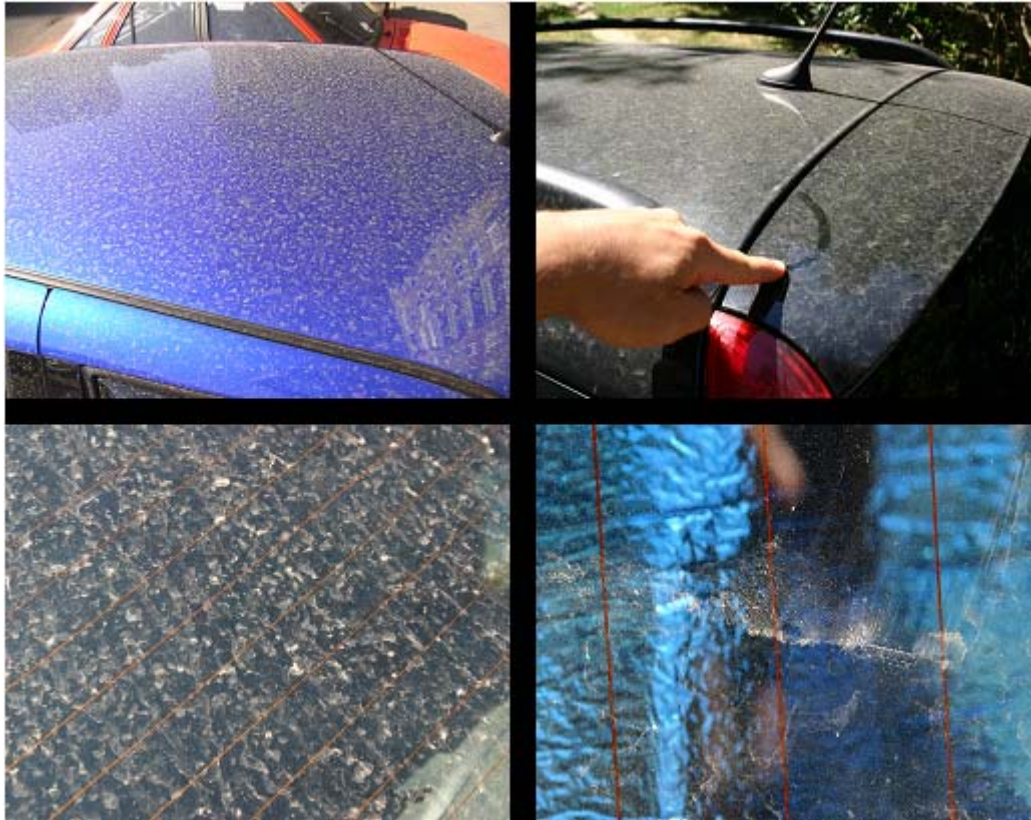
22. ábra
Napi jelentés (OMSZ) - 24 órás csapadékösszeg
(2008.08.16. 8h – 2008.08.17. 8h)



23. ábra
Napi jelentés (OMSZ) - A csapadék fajtája
(2008.08.16. 8h – 2008.08.17. 8h)

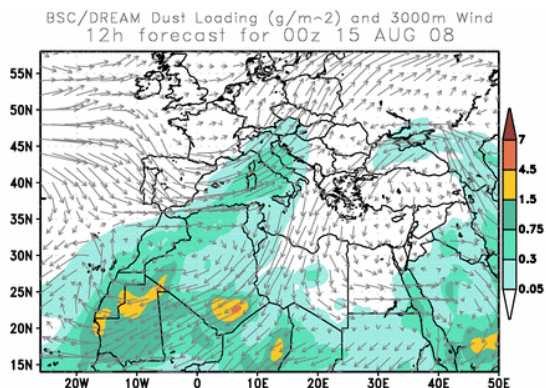
A 20-21., illetve 22-23. ábrán az OMSZ napi jelentésének csapadék térképei láthatók az adott két napon. A 20. ábra a 2008.08.15. 8h - 2008.08.16. 8h közti időszak csapadékösszegeit ábrázolja országunkra. Ez jól reprezentálja a vizsgált frontrendszerünk csapadékát 16-a 8 óráig, mivel előtte nem hullott jelentősebb csapadék az adott 24 órában. A legnagyobb csapadékösszegeket az Alpokalja térségében mérték. A 21. ábrán ugyanezen időszak csapadékfajtái vannak feltüntetve. Zivatarokat a Dunántúl nyugati és

déli részén észleltek. A 22. és 23. ábra a következő 24 óra (2008.08.16 8h – 2008.08.17 8h) csapadékösszegeit és fajtáit mutatja. A keleti országrészben már kevesebb csapadék hullott, de több helyen detektáltak még zivatarokat.

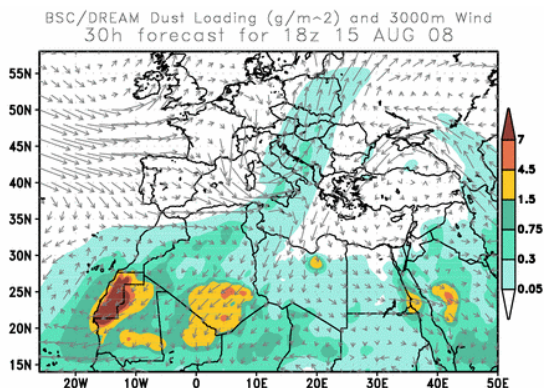


24. ábra
Fényképek a por látható nyomairól
(A fotókat készítette: Kolláth Kornél)

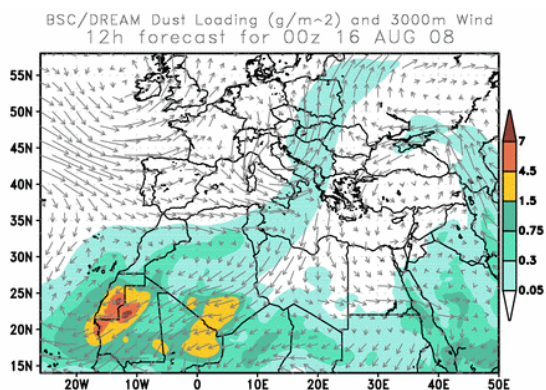
A 24. ábra az esemény után Budapesten készült fényképeket ábrázolja. Az autókon, tereptárgyakon jól látható nyoma maradt az esőzésnek a délnyugatias áramlással hazánk fölé szállított por nedves ülepedésének köszönhetően. Megjegyezzük, hogy kisebb mennyiségű csapadék esetén a főváros levegőjében a helyi forrásokból származó por ülepedése is időnként hasonló következményekkel járhat. A fényképeken látható pormennyiség azonban jóval nagyobb a megszokottnál, illetve az ország más, egyébként helyi forrásoktól mentes területein is hasonló jelenséget észleltek a csapadékhullást követően.



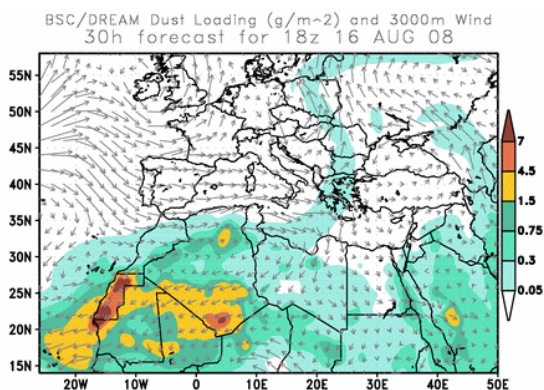
25. ábra
BSC/DREAM porterhelés előrejelzés
2008.08.15. 00:00 UTC-re (+12 h)



26. ábra
BSC/DREAM porterhelés előrejelzés
2008.08.15. 18:00 UTC-re (+30 h)



27. ábra
BSC/DREAM porterhelés előrejelzés
2008.08.16. 00:00 UTC-re (+12 h)



28. ábra
BSC/DREAM porterhelés előrejelzés
2008.08.16. 18:00 UTC-re (+30 h)

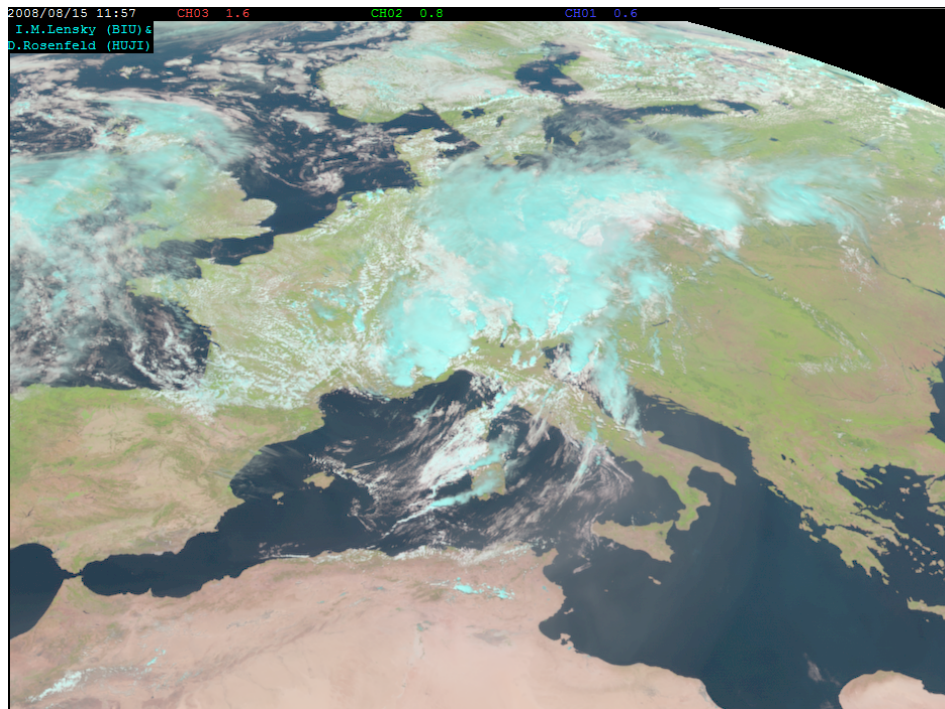
A BSC/DREAM modell porterhelés előrejelzései láthatóak a 25-28. ábrán. A modell szerint a por 15-én dél körül érte el hazánkat délnyugati irányból, majd estére már az egész országot ellepte.

A valóság hasonlóképpen alakult, ezt láthatjuk a 29-31. ábrán. Ezek RGB-Natural kompozit műholdképek. A 29. ábra augusztus 15-e 12:00 UTC időpontra vonatkozik. A Földközi-tenger felett jól láthatóan kirajzolódik a porréteg, ami – bár ezen a kompozit képen nem kivehető, de nagy valószínűséggel – ekkor már elérte a szárazföldet is, és hazánk nyugati részét is. A 30. ábrán augusztus 15-e 16:45 UTC időpontban figyelhető meg a porfelhő nagy kiterjedése. Ez a naplementéhez közeli időpontban készült felvétel

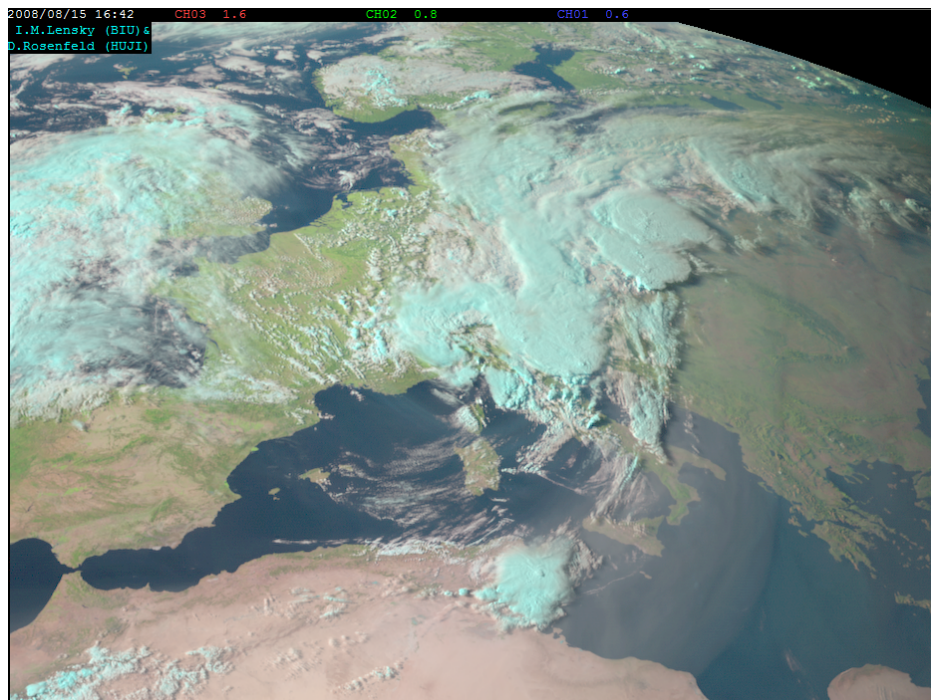
alkalmasabb a por detektálására, mivel ekkor (illetve a napkelte időpontjához közel) a legerősebb az aeroszol rétegről a visszaverődés. Itt látható a szárazföld feletti porréteg is, ami ebben az időpontban Magyarország teljes légterében megtalálható volt. A front felhőzete már a nyugati határszél közelében helyezkedik el.

A por tehát nem a ciklonnal együtt érkezett hazánkba, hanem már előtte ideszállítódott.

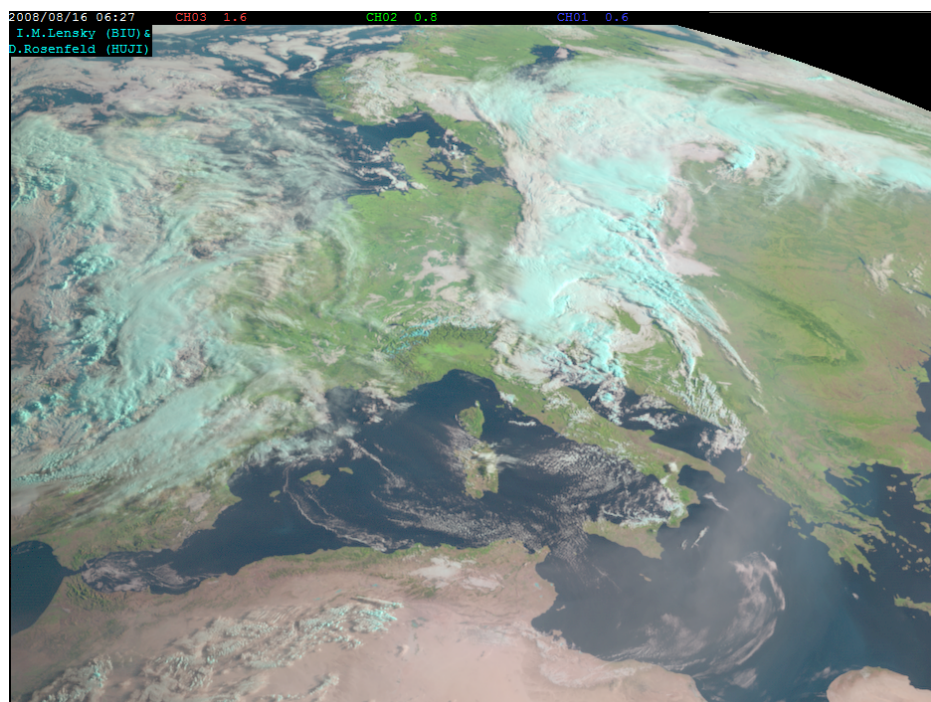
A 31-32. ábrán 06:30, illetve 06:00 UTC-s időpontok képei láthatók. A 31. ábra szintén RGB-Natural kompozit kivágata, a 32. ábra pedig egy HRV nagyfelbontású kép kivágata (1 km-es felbontással). Jól látszik a még mindig széles sávban poros Földközi-tenger levegője, a Magyarország fölé érkezett front felhőzete és hazánk szintén poros légtere.



29. ábra
MSG –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.08.15. 12:00 UTC



30. ábra
MSG –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.08.15. 16:45 UTC



31. ábra
MSG –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.08.16. 06:30 UTC

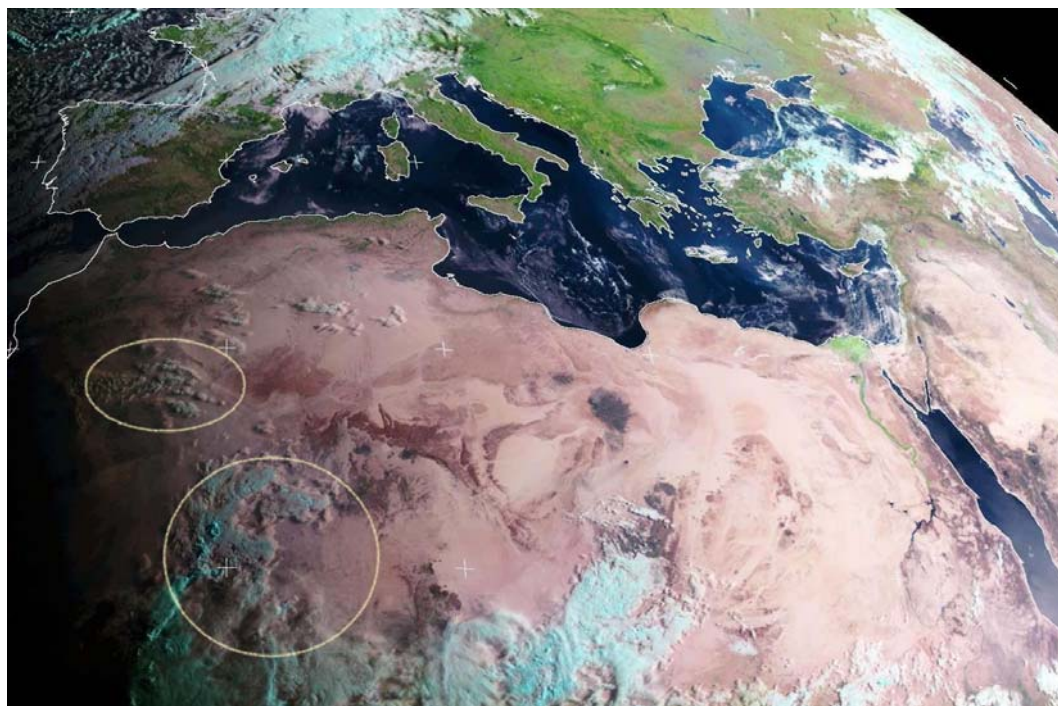


32. ábra
MSG2 – HRV műholdkép
2008.08.16. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)

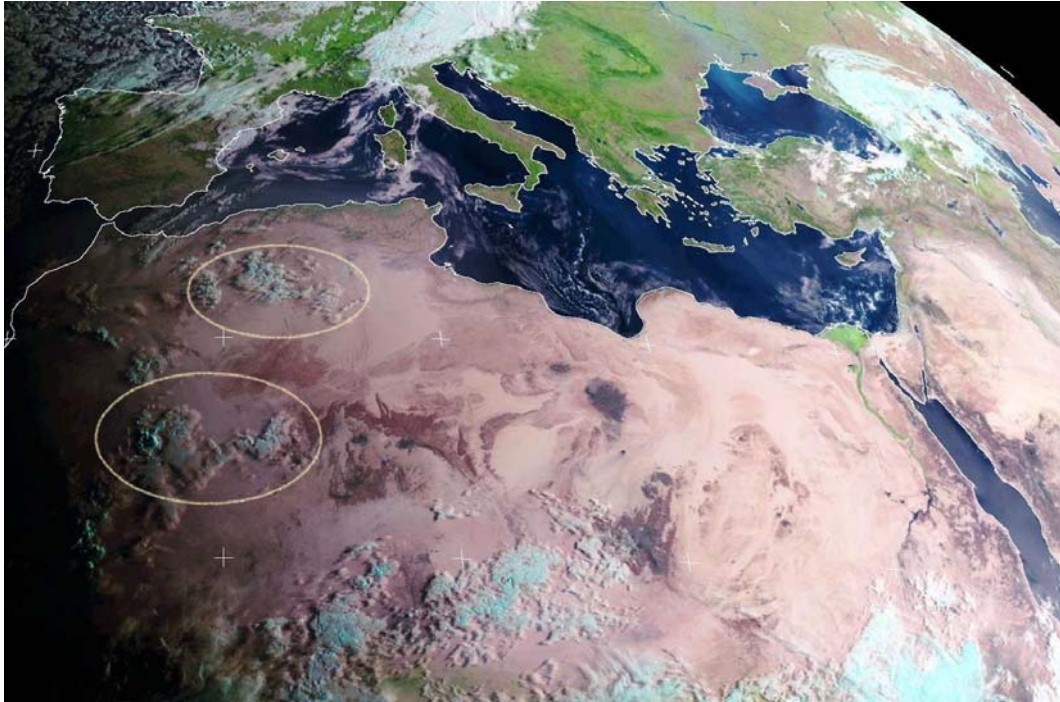
Műholdképek alapján visszakerestük a nagy mennyiségű por forrását, ezt kb. augusztus 11-ig tudtuk visszavezetni. Ez látható a 33-36. ábra RGB-Natural képein, ahol sárga ellipszisekkel jelöltük a nagy légköri porkoncentrációjú területeket. Mindegyik kép 06:00 UTC időpontottra vonatkozik (ekkor könnyebb detektálni a légkörben lévő port, mert alacsony a napállás).



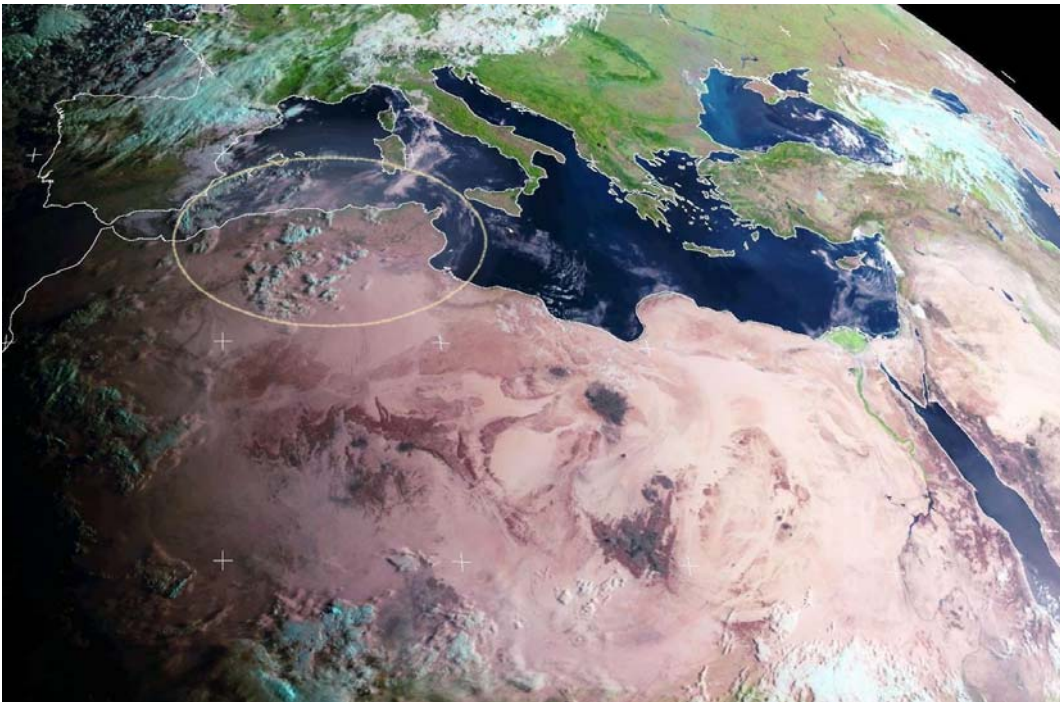
33. ábra
MSG2 –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.08.11. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)



34. ábra
MSG2 –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.08.12. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)

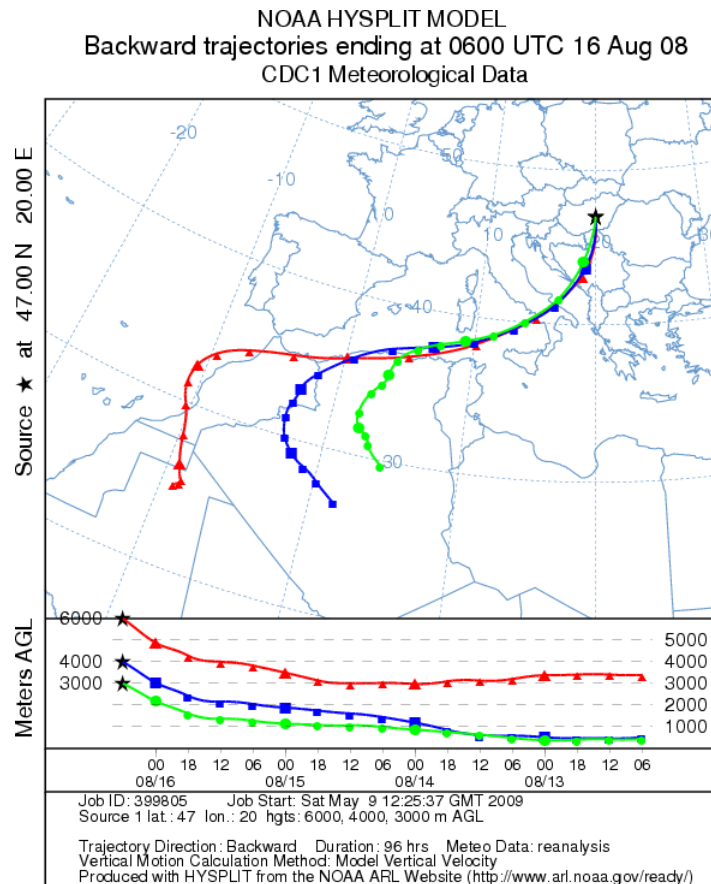


35. ábra
MSG2 –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.08.13. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)



36. ábra
MSG2 –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.08.14. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)

Azért, hogy igazoljuk vizuális eredményeinket, készítettünk egy trajektória számítást a NOAA HYSPLIT modellel (<http://www.ready.noaa.gov/ready/open/hysplit4.html>). A forrásterületet és az útvonalat is jól visszaadta a modell, mellyel 2008. augusztus 16-ára futtattunk le 'backward' trajektóriákat 96 órára visszamenően a 2000, 4000 és 6000 m-es magasságokból indítva a részecskéket (37. ábra). A műholdképek alapján kapott eredményhez hasonlóan ez a szimulációs vizsgálat is a Nyugat-Szahara térségére jelezte az érkezett por forrását.



37. ábra
NOAA HYSPLIT modellel készített backward trajektória
é. sz. 47°, k. h. 20° felett 3000, 4000 és 6000 m-ről indítva
2008.08.16. 06:00 UTC (-96 h)

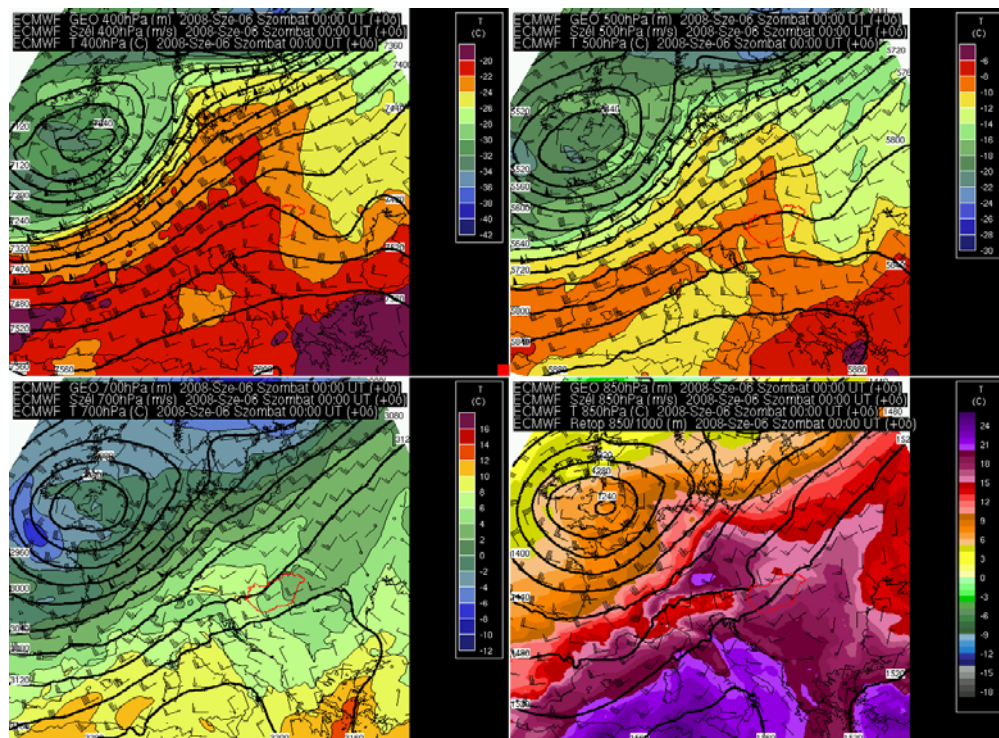
Hasonló esetnek lehettünk tanúi például 2005. április 18-án Miskolcon és környékén (Erdődiné és Kovács, 2005).

5.2. 2008. szeptember 7.

A második bemutatott esetben a porfelhő jól kivehető Magyarország felett a műholdképeken.

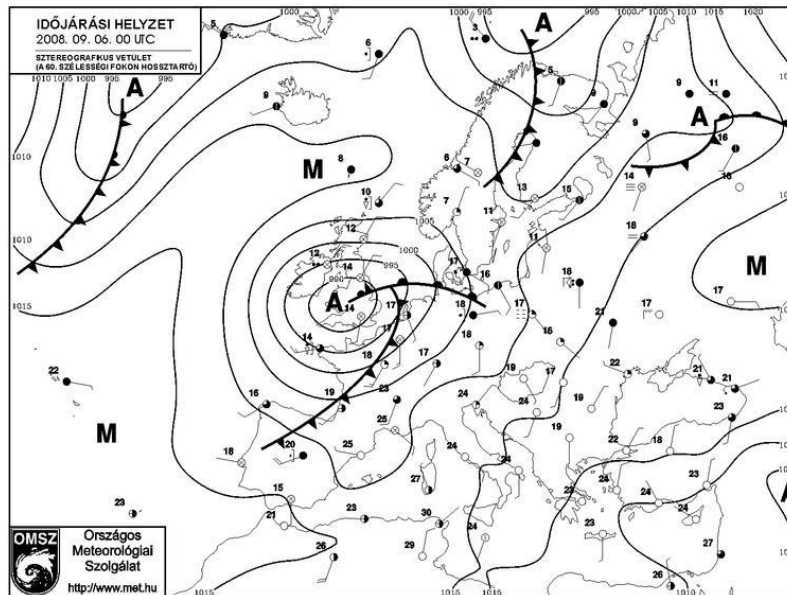
Szinoptikus háttér:

Az eset szinoptikus háttere hasonlít az előzőéhez. Ekkor is egy D-DNy-i áramlás állt fenn már a hónap eleje (kb. szeptember 3.) óta. A 38. ábrán különböző nyomási szintek hőmérsékleti-, szél-, és geopotenciál mezőit találjuk 2008.09.06 00:00 UTC időpontban. Látható, hogy hazánk egy Nyugat-Európa felett örvénylő ciklon előoldalán helyezkedett el. Az Észak-Afrika felől érkező levegőtömegben az előző esettel ellentétben nem volt nagy mértékű vertikális feláramlás, és valószínűleg a nedvesség is korlátozott volt nagy kiterjedésű felhőzet képződéséhez, így a porfelhő közel derült időben érhetett el térségünket



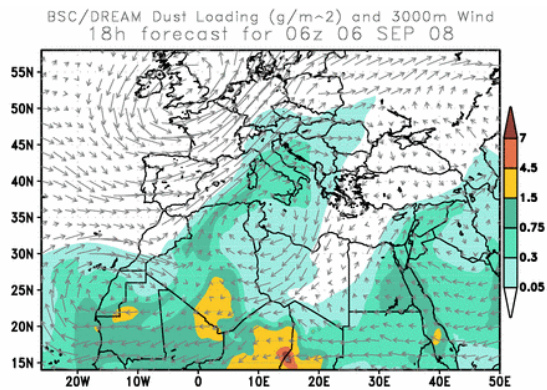
38. ábra
HAWK – 2008. szeptember 6. 00:00 UTC
Hőmérsékleti-, szél-, és geopotenciál mezők (400, 500, 700, 850 hPa)

A 39. ábra a 2008.09.06 00 UTC-s időpont talajtérképét mutatja. Kelet és Közép-Európa felett egy anticiklon uralta az időjárást, míg Nyugat-Európa felett egy markáns ciklon örvénylett.

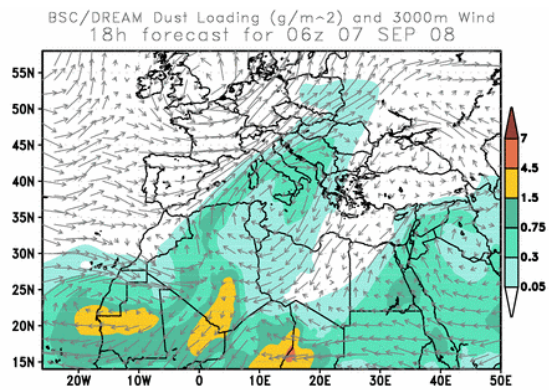


39. ábra
Időjárási helyzet – 2008. szeptember 6. 00:00 UTC

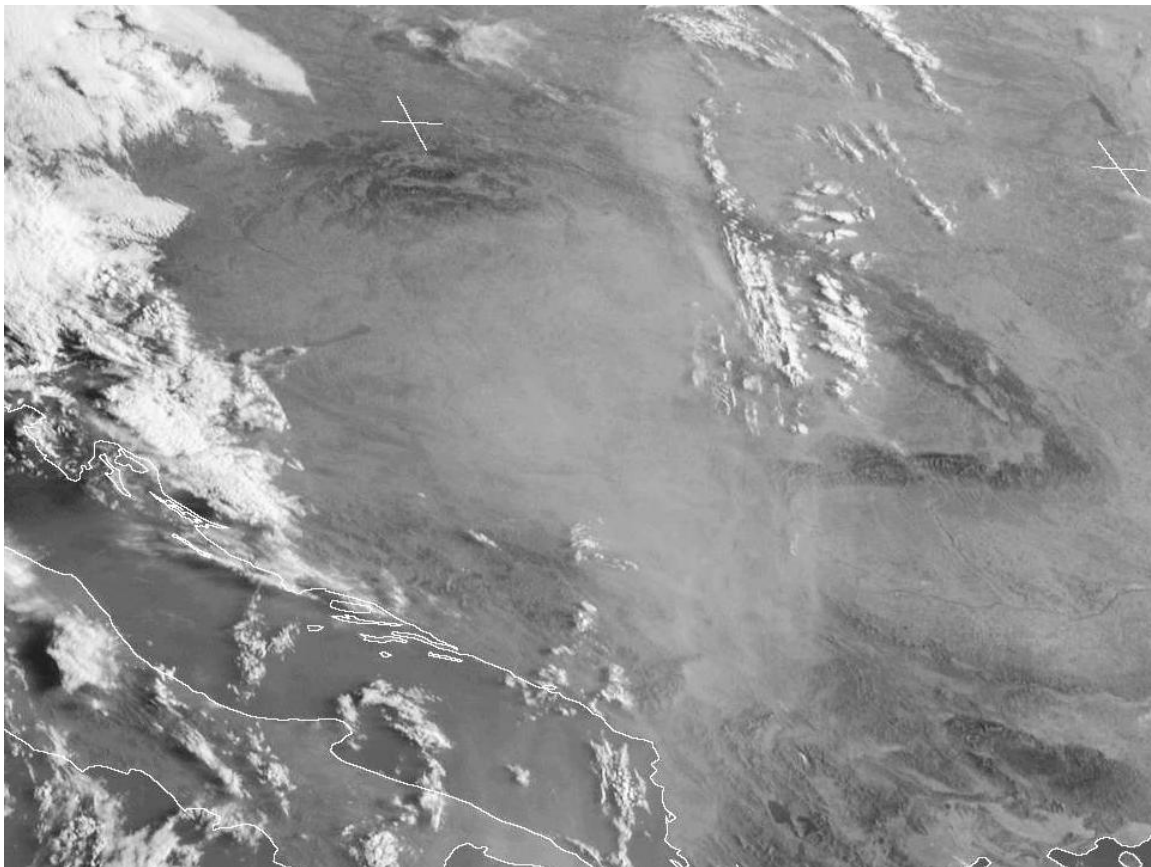
A 40-41. ábrán a BSC/DREAM modell előrejelzéseit láthatjuk szeptember 6-7-ére (06:00 UTC). A modell mindkét napra poros levegőt jelzett előre Magyarország egész területére. Ez szeptember 7-ére meg is történt, ahogy azt a 42. ábrán lévő HRV képből kitűnően láthatjuk (06:00 UTC-s időpont). Illetve a 43. ábra fotóján – mely Hevesről készült szeptember 7-én délelőtt – a szokásosnál nagyobb méretű napkorong és az égbolt kéktől jelentősen eltérő színe erős szórt sugárzásra enged következtetni, ami por jelenlétére utal.



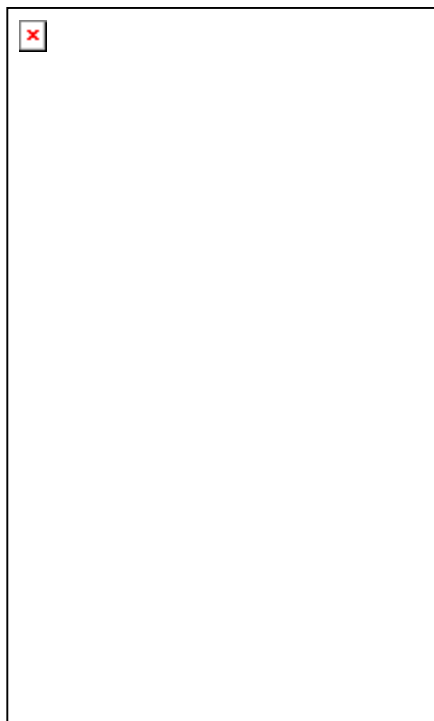
40. ábra
BSC/DREAM porterhelés előrejelzés
2008.09.06. 06:00 UTC-re (+18 h)



41. ábra
BSC/DREAM porterhelés előrejelzés
2008.09.07. 06:00 UTC-re (+18 h)



42. ábra
MSG2 – HRV műholdkép
2008.09.07. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)



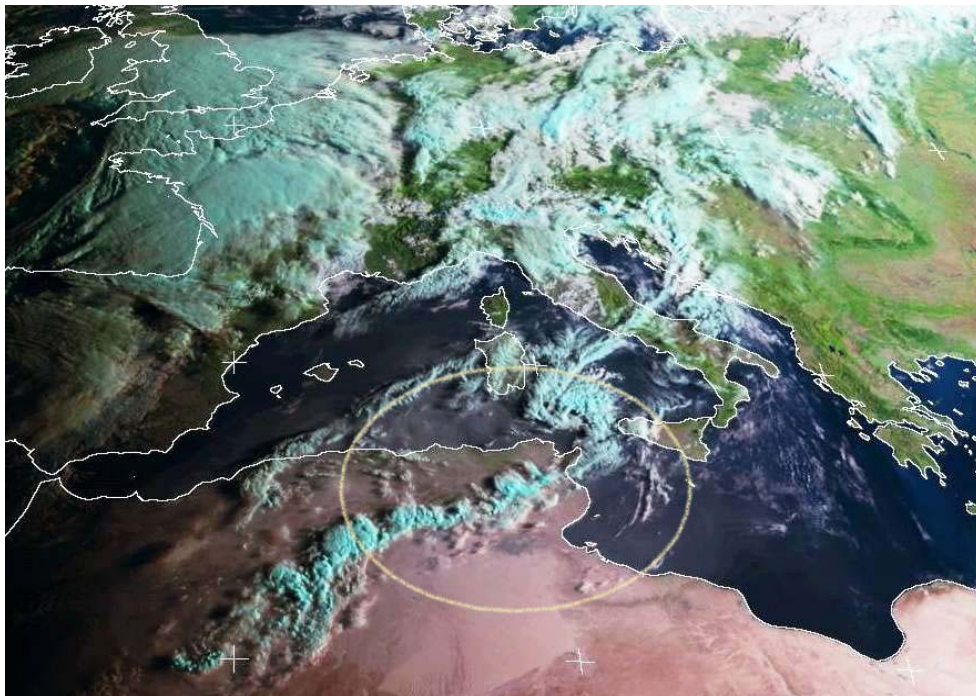
43. ábra
Fénykép a poros levegőről (Heves, 2008.09.07. délelőtt)

Ebben az esetben is visszakerestük a forrást, ami most az Atlasz-hegység környéke volt. A 44-51. ábrák RGB-Natural és por kompozit műholdképein végigkövethetjük a por útját hazánkig. Ezek alapján azonban 6-án 06:00 UTC-kor még csak az ország nyugati felét érintette a porréteg.

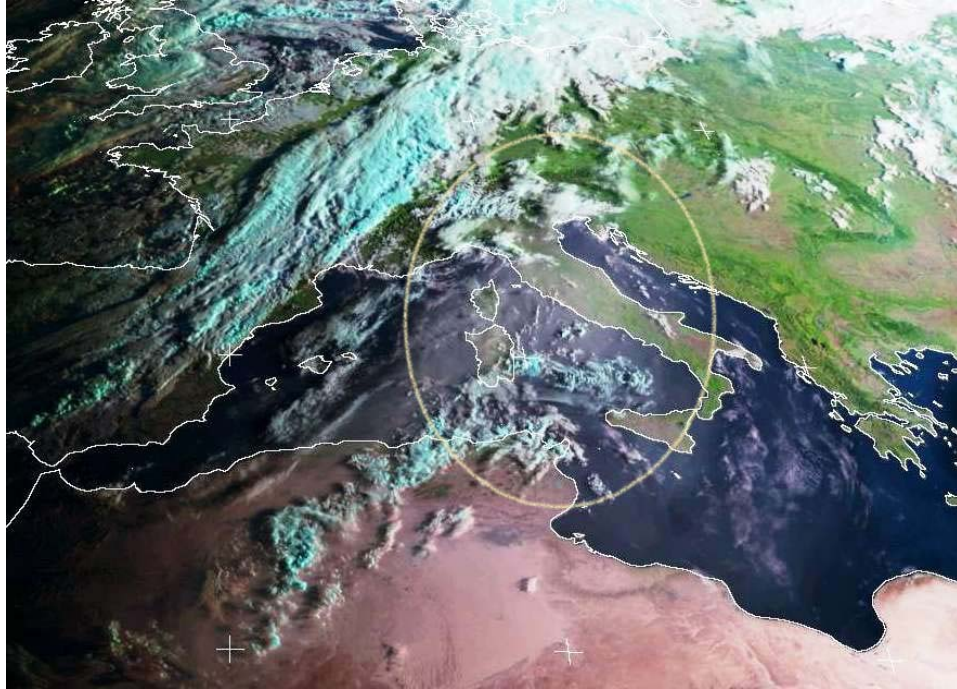
Szintén készítettünk backward trajektóriákat is 84 órára visszamenően a 2000, 4000 és 6000 m-es magasságokból indítva a részecskéket (52. ábra).



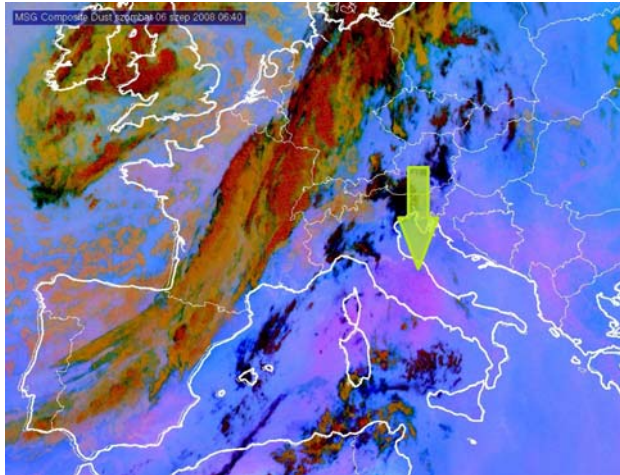
44. ábra
MSG2 –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.09.04. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)



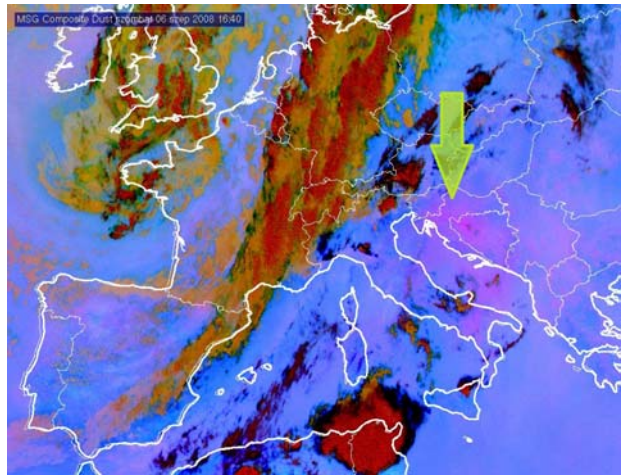
45. ábra
MSG2 –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.09.05. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)



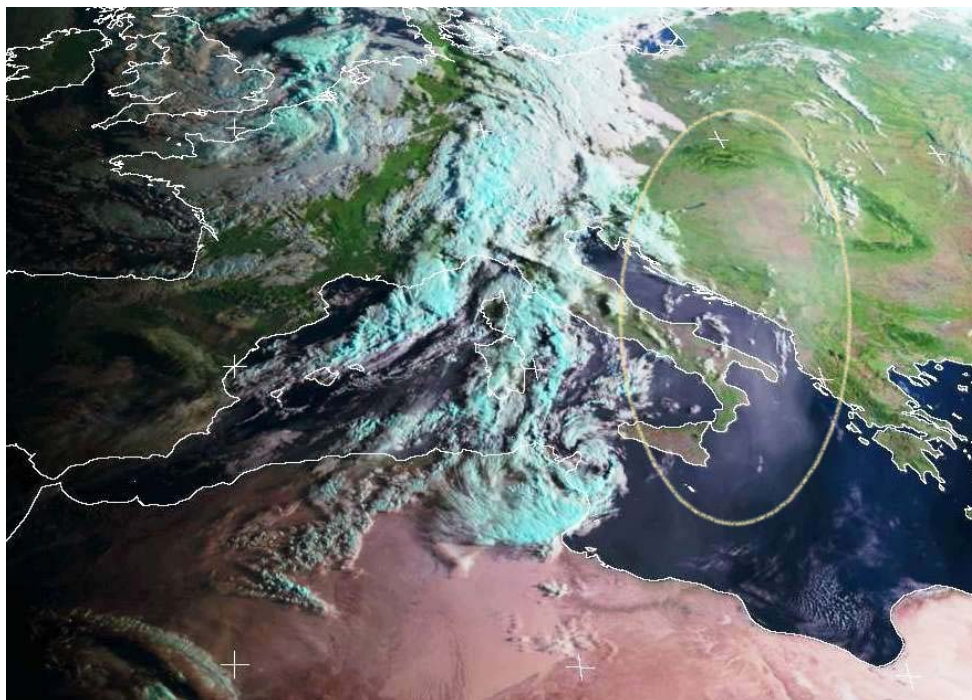
46. ábra
MSG2 –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.09.06. 06:00 UTC
 (<http://www.sat.dundee.ac.uk>)



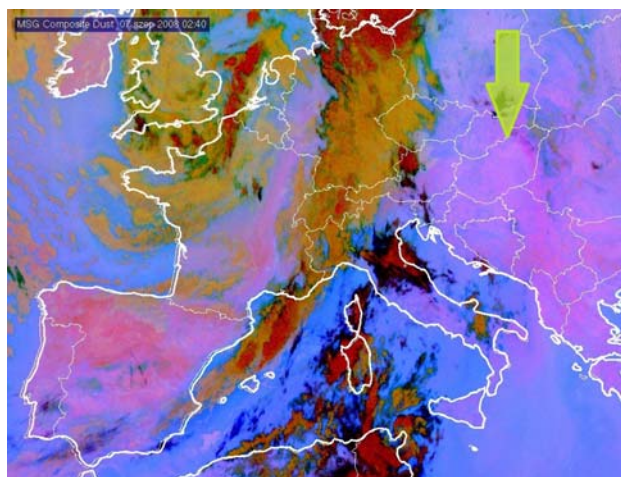
47. ábra
MSG2 –Por kompozit műholdkép
2008.09.06. 06:40 UTC



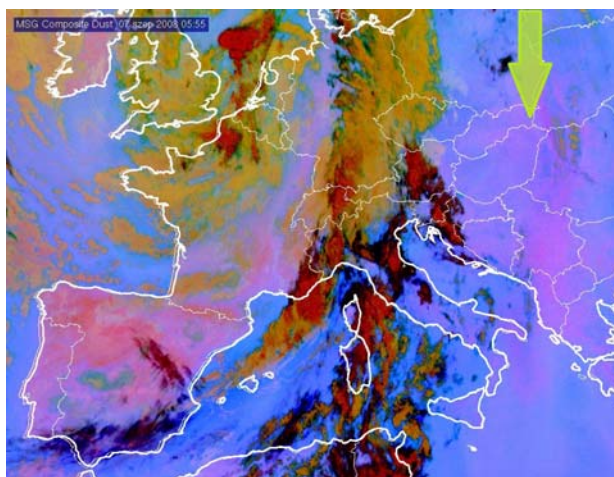
48. ábra
MSG2 –Por kompozit műholdkép
2008.09.06. 16:40 UTC



49. ábra
MSG2 –RGB-Natural kompozit műholdkép
2008.09.07. 06:00 UTC
(<http://www.sat.dundee.ac.uk>)

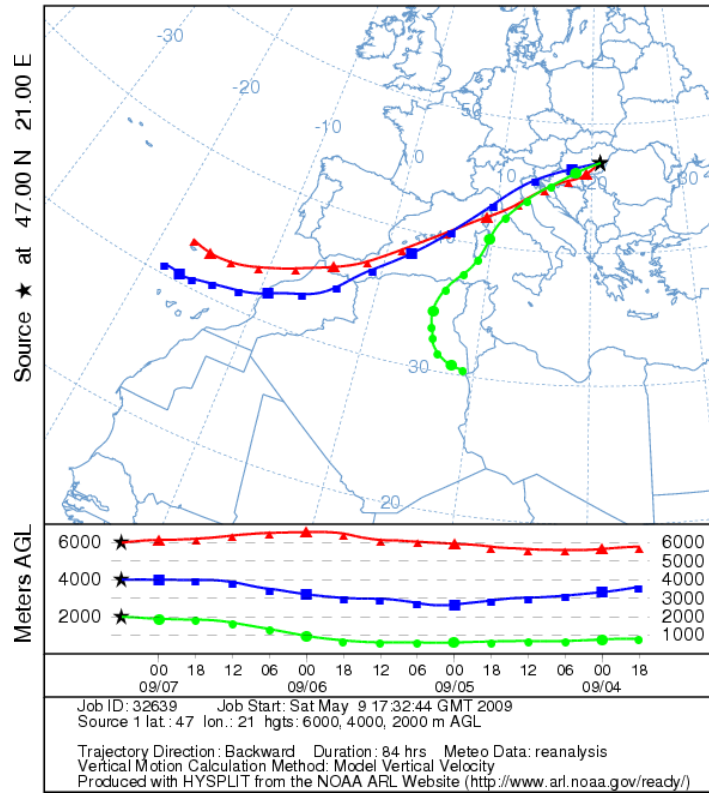


50. ábra
MSG2 –Por kompozit műholdkép
2008.09.07. 02:40 UTC



51. ábra
MSG2 –Por kompozit műholdkép
2008.09.06. 05:55 UTC

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 0600 UTC 07 Sep 08
 CDC1 Meteorological Data



52. ábra
 NOAA HYSPLIT modellel készített backward trajektória
 é. sz. 47°, k. h. 21° felett 3000, 4000 és 6000 m-ről indítva
 2008.09.07. 06:00 UTC (-84 h)

5.3. 2009. április 26-28.

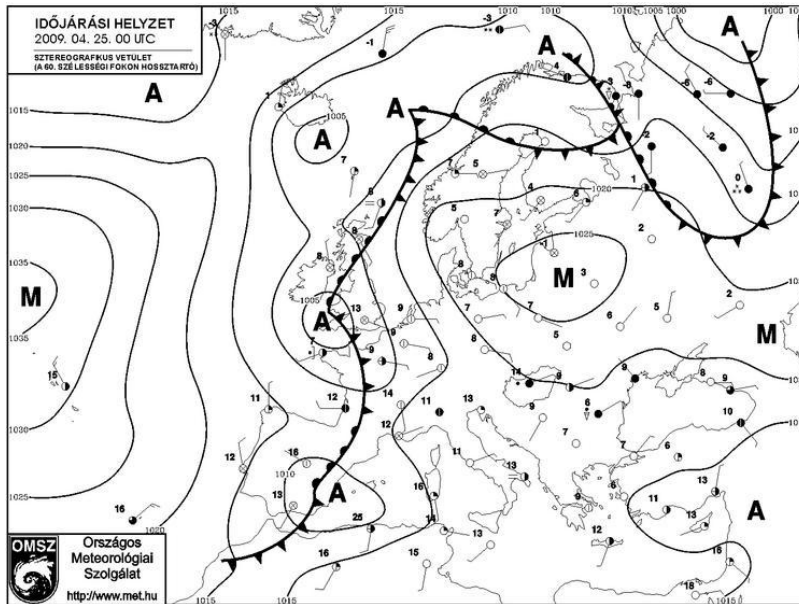
Az utolsó bemutatott eset nem kimondottan a Magyarországra szállított porról szól (bár eljutott hazánkig), hanem inkább a por cirrusz felhőzetre gyakorolt hatásáról, melyet 2009. szeptember 26-28 között Európa több országa felett meg lehetett figyelni.

A por események több éves időszakot átölelő műholdképeken keresztüli szisztematikus vizsgálata során figyelmesek lettünk egy felhőzeti képen látható jelenségre. A nagy mennyiségű port tartalmazó, emelkedő légtömegben kialakuló magas szintű felhők az esetek döntő részében speciális megjelenésűek. Különösen a nagy felbontású, látható csatornán (HRV) készült felvételeken, a reggeli, kora délelőtti órákban egyfajta szemcsés szerkezet figyelhető meg, mely a stratocumulusok zárt cellás konvekciójára emlékeztet. Sok esetben a műholdképeket elemző előrejelző szakemberek figyelmét éppen ez a fajta felhőtető struktúra hívja fel arra, hogy nagy mennyiségű por van jelen a légkörben. Por nélküli esetekben soha nem talákoztunk hasonló cirrusz-tető megjelenéssel. A jelenségre a nemzetközi szakirodalomban nem találtunk magyarázatot. Jelen dolgozatban felvázolunk egy hipotézist ezen felhő-dinamikai jelenségre.

A szóban forgó felhőstruktúra az április 26-28. közötti időszakban is megfigyelhető volt.

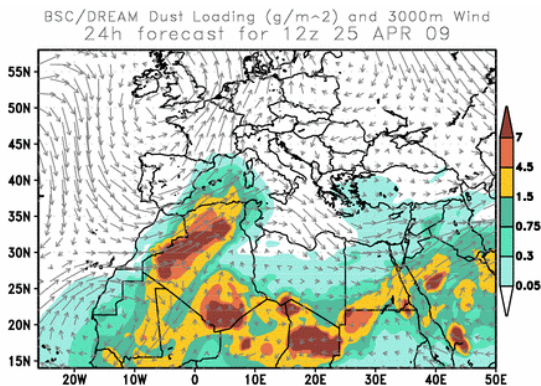
Szinoptikus háttér:

Ómega-típusú cirkulációs helyzet alakult ki Európa felett. Ahogy azt az 53. ábrán láthatjuk, 2009. április 25. 00:00 UTC-kor Nyugat- és Kelet-Európa felett ciklonok örvénylettek, míg a közbülső területeken a szárazföld nagy része felett egy anticiklon határozta meg az időjárási helyzetet. Nyugat-Európát az Északi-tengertől egészen Észak-Afrikaig egy hullámzó frontrendszer szelte át, amely előtt kialakult délies áramlás szaharai port juttatott Európa nagy része fölé.



53. ábra
Időjárási helyzet – 2009. április 25. 00:00 UTC

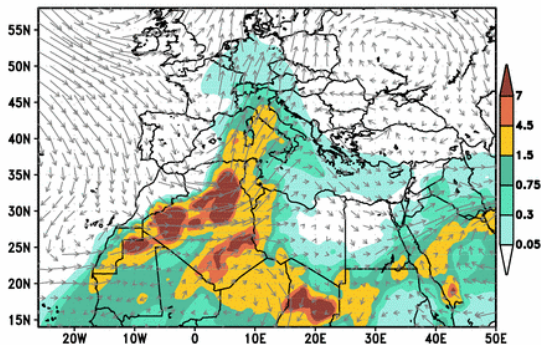
A BSC/DREAM modell előrejelzési térképei (54-59. ábra) alapján láthatjuk, hogy a por a napok múlásával egyre északabbra jutott a front mentén. Szeptember 27-ére már a Skandináv-félsziget országait is érintette a modell szerint.



54. ábra

**BSC/DREAM portterhelés előrejelzés
2009.04.25. 12:00 UTC-re (+24 h)**

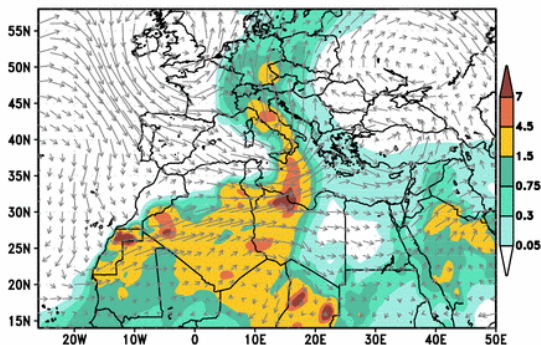
BSC/DREAM Dust Loading (g/m²) and 3000m Wind
6h forecast for 18z 26 APR 09



56. ábra

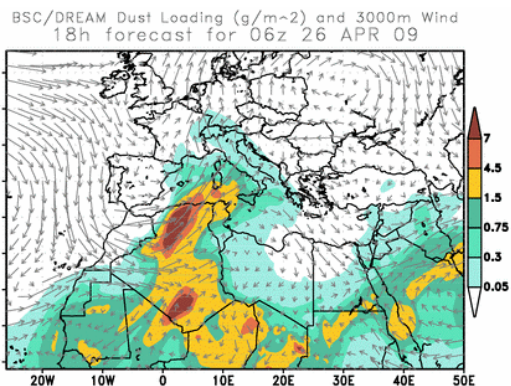
**BSC/DREAM portterhelés előrejelzés
2009.04.26. 18:00 UTC-re (+6 h)**

BSC/DREAM Dust Loading (g/m²) and 3000m Wind
6h forecast for 18z 27 APR 09



58. ábra

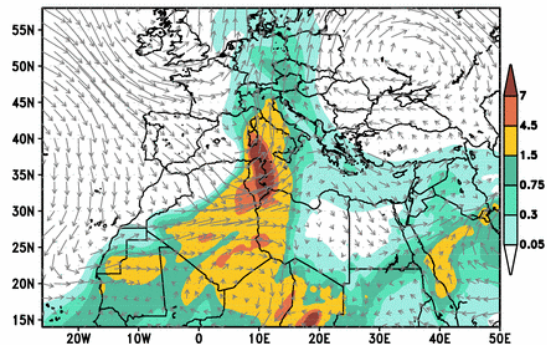
**BSC/DREAM portterhelés előrejelzés
2009.04.27. 18:00 UTC-re (+6 h)**



55. ábra

**BSC/DREAM portterhelés előrejelzés
2009.04.26. 06:00 UTC-re (+18 h)**

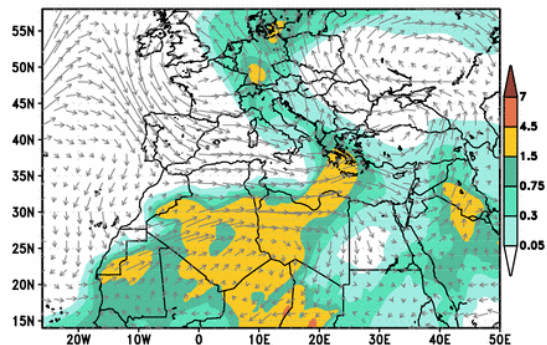
BSC/DREAM Dust Loading (g/m²) and 3000m Wind
18h forecast for 06z 27 APR 09



57. ábra

**BSC/DREAM portterhelés előrejelzés
2009.04.27. 06:00 UTC-re (+18 h)**

BSC/DREAM Dust Loading (g/m²) and 3000m Wind
18h forecast for 06z 28 APR 09



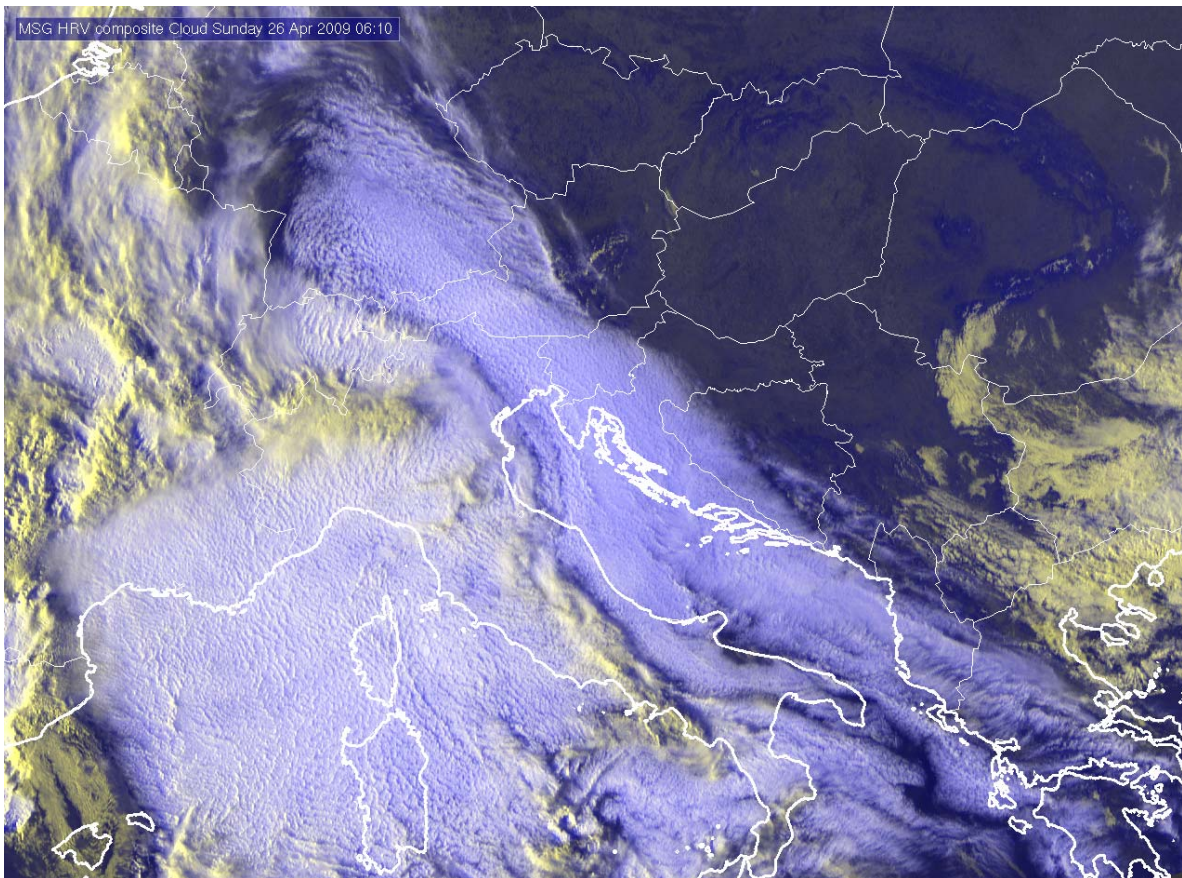
59. ábra

**BSC/DREAM portterhelés előrejelzés
2009.04.28. 06:00 UTC-re (+18 h)**

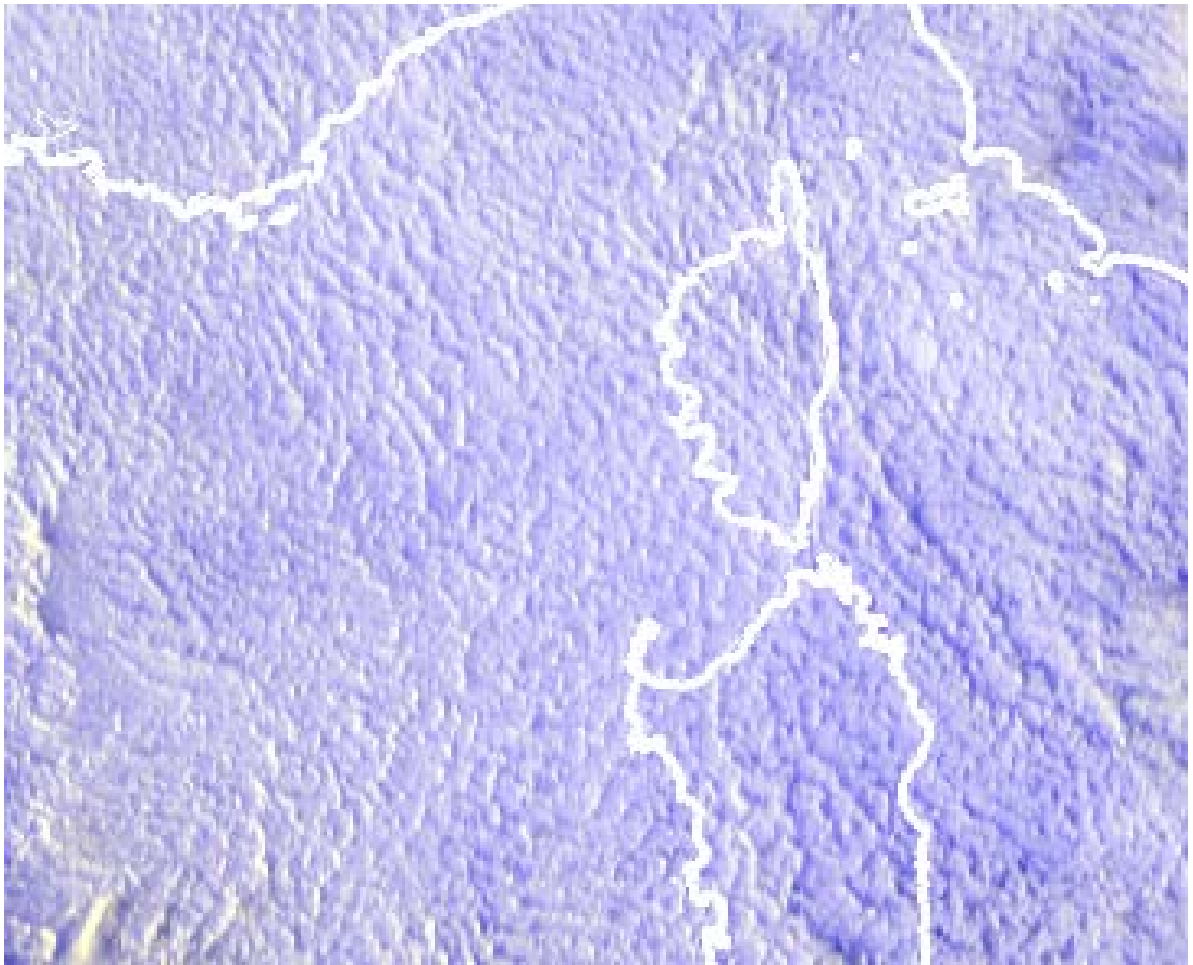
Az eset érdekessége a 60. és 61. ábrán látható magas szintű felhőzet gomolyos szerkezete. Az ábrák ún. HRV-felhő kompozit képet (R: HRV, G: HRV, B: IR10.8)

ábrázolnak, melyet 06:10 UTC-kor a Meteosat-8 műhold készített „rapid-scan” módban. Nagyon jól látszik az egész felhőre kiterjedő zárt konvekciós cellás szerkezet. A 12:10 UTC-kor készült HRV-felhő kompozit képen (62. ábra) ez a struktúra már eltűnt, ’normál’ cirrusfelhőket láthatunk rajta, melyek elérték hazánkat, valószínűleg port hozva a légterünkbe.

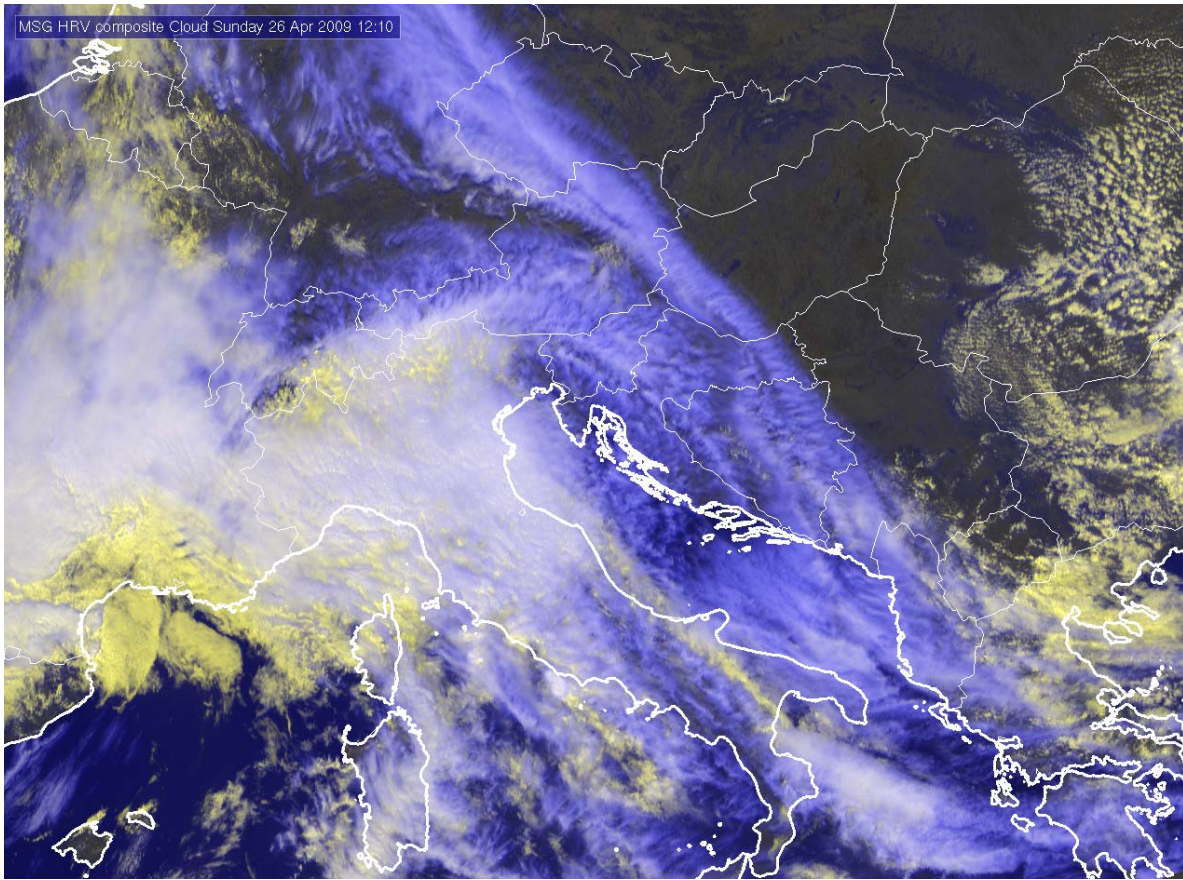
A 63. ábrán két színezett infra kép (IR10.8) látható a szeptember 26. 05:55 és 11:55 UTC időpontokból. Ezek alapján látszik, hogy a reggeli időpontban a felhőtető jóval nagyobb része ért el igen alacsony hőmérsékleteket, míg nappal magasabb hőmérsékletek voltak jellemzőek.



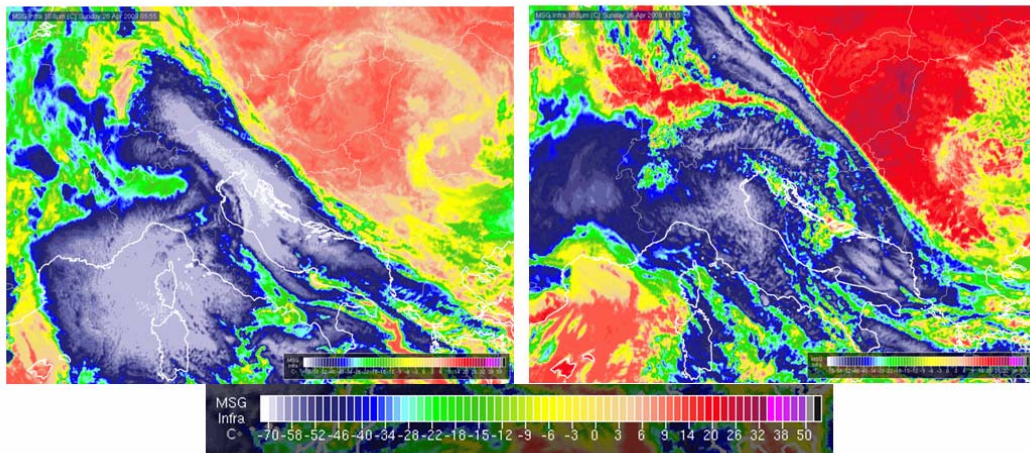
60. ábra
MSG – HRV-felhő kompozit műholdkép
2009. április 26. 06:10 UTC



61. ábra
MSG – HRV-felhő kompozit műholdkép egy kisebb részlete kinagyítva
2009. április 26. 06:10 UTC



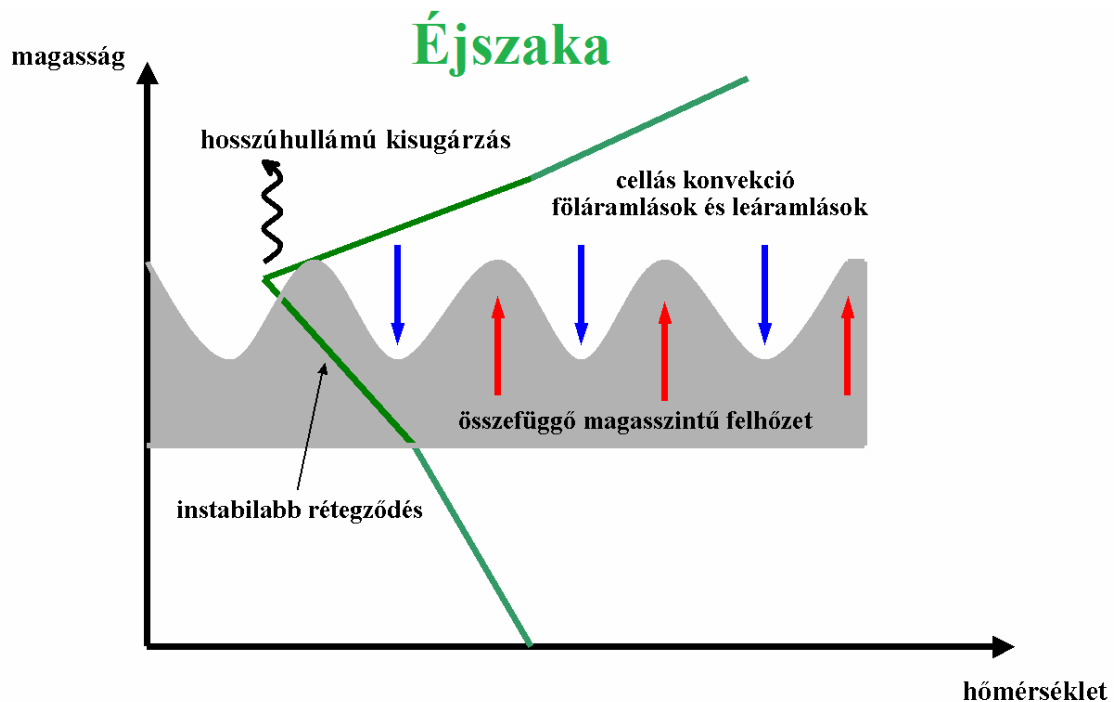
62. ábra
MSG – HRV-felhő kompozit műholdkép
2009. április 26. 12:10 UTC



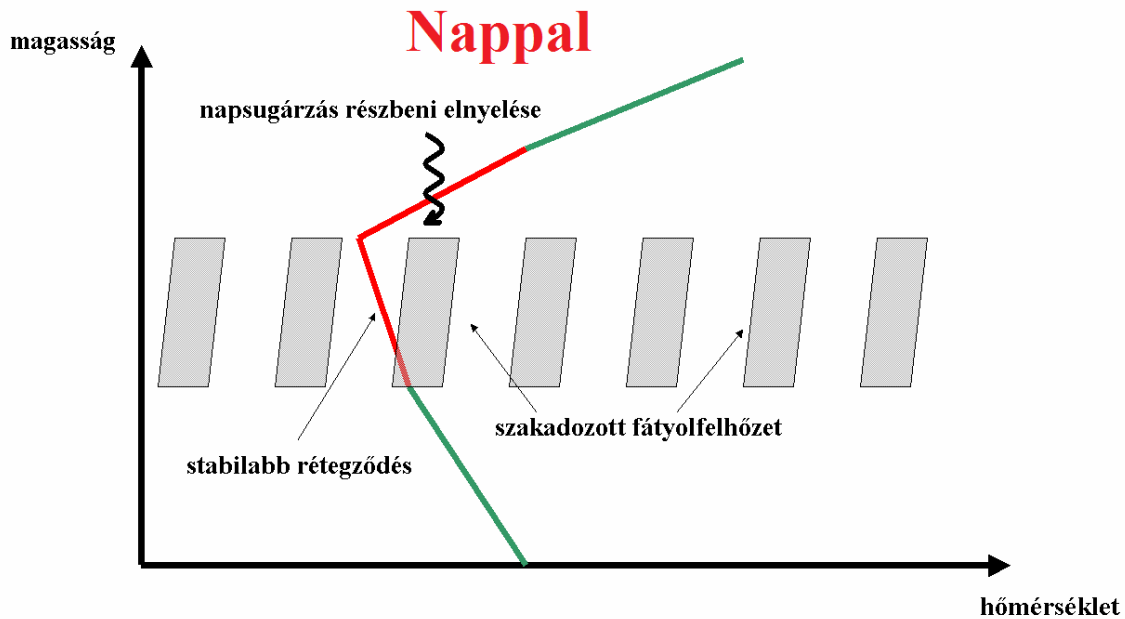
63. ábra
MSG – IR10.8 infra műholdkép
2009. április 26. 05:55 UTC és 11:55 UTC

Mint már említettük, munkánk során számos ehhez hasonló esettel találkoztunk, amikor a magas szintű felhőzet por jelenlétében zárt cellás struktúrát mutatott a műholdképeken. Ilyen azonban csak a kora reggeli órákban volt megfigyelhető, ahogy felkelt a Nap a felhők gomolyos szerkezete szép lassan leépült, és átlagos cirrusfelhők vették át a helyüket. Ez a napi menete a poros felhő szerkezetének minden bizonnyal a sugárzási viszonyok megváltozására vezethető vissza.

Zárt cellás szerkezet a felhőkben akkor alakul ki, ha abban fel- és leáramló cellák váltják egymást. A feláramláshoz pedig instabil rétegződés szükséges. Így indirekt módon jutottunk el a feltevésünkig, miszerint a porrészecskék jelenléte miatt éjszaka labilisabb rétegződés alakul ki a felhőn belül, míg nappal stabilabb. Mindez a por részecskék sugárzást befolyásoló hatásának tulajdonítható. A 64. és 65. ábra ezt az elgondolást illusztrálja.



64. ábra
A cirrusfelhők folyamatai éjszaka por jelenlétében



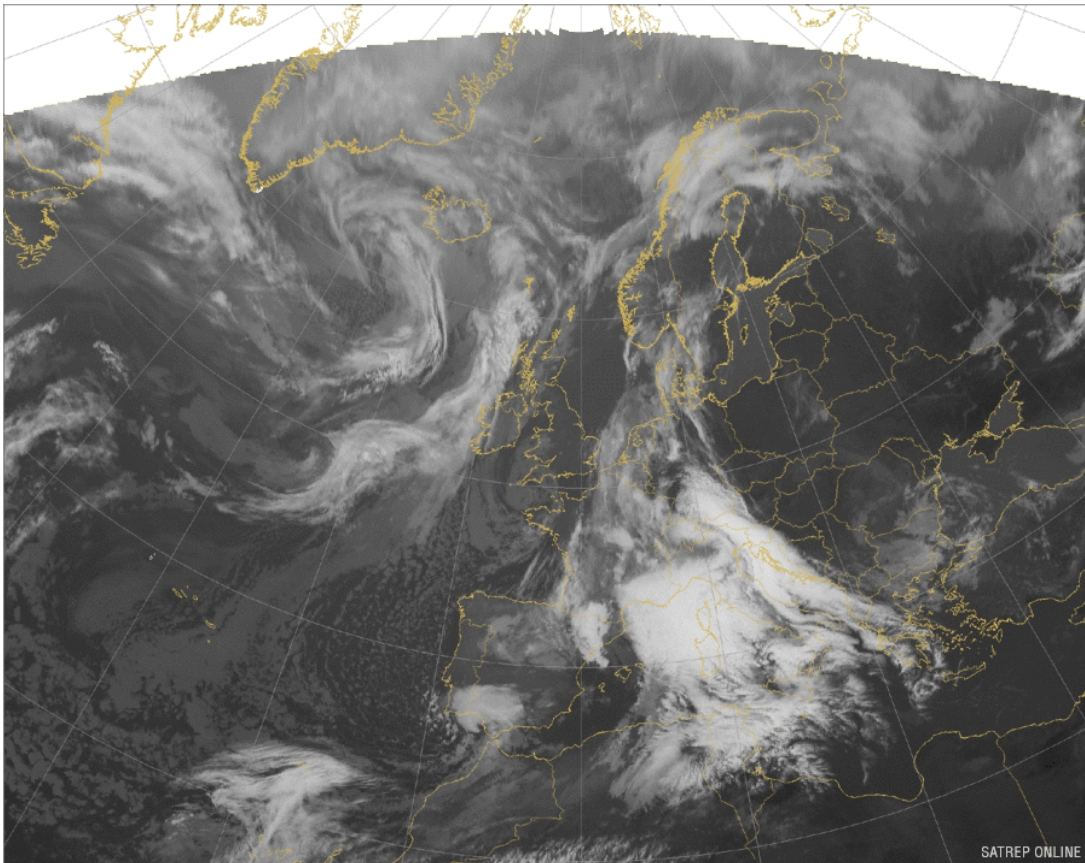
65. ábra
A cirrusfelhők folyamatai nappal por jelenlétében

Az elgondolásunk lehetséges magyarázata a következő: Feltételezzük, hogy a porréteg a cirrusfelhő tetejéig felnyúlik. A porrészecskék megnövelik a magas szintű felhőzetnek a sugárzás elnyelő képességét, és a hosszuhullámú emisszivitását. Nappal így több sugárzást nyel el, mint por nélküli esetben, csökkentve ezzel a felszínre jutó sugárzást és növelve a felhőzet felső rétegének hőmérsékletét. Ennek hatására a hőmérsékleti rétegződés a stabilabb irányba tolódik el. Éjszaka a többlet aeroszol következtében nagyobb mértékű a felhőzet felső rétegét hűtő hosszuhullámú kisugárzás, ami a felhőn belüli hőmérsékleti rétegződés instabilabbá válásához vezet. Összességében ezekben a cirrusfelhőkben hasonló feltételek tudnak kialakulni, mint az óceánok fölötti alacsonyszintű felhőzet zárt konvekciós cellái esetében.

A szakirodalom szerint (pl.: *Carrió et al.*, 2006) a por jelenléte megnöveli a cirrusfelhők élettartamát. A szóban forgó esetben ez a jelenség is tetten érhető. Összehasonlítottuk a 2009. április 26. 06:00 UTC-re vonatkozó IR10.8 csatornában készült műholdképet (66. ábra) és az ECMWF előrejelző modelltől származtatott pszeudo-IR10.8 képet (67. ábra). Az infravörös pszeudo-műholdképek a modell rácspontjai fölötti felhőzeti és hőmérsékleti profilból származnak (Saunders et al. 1999).

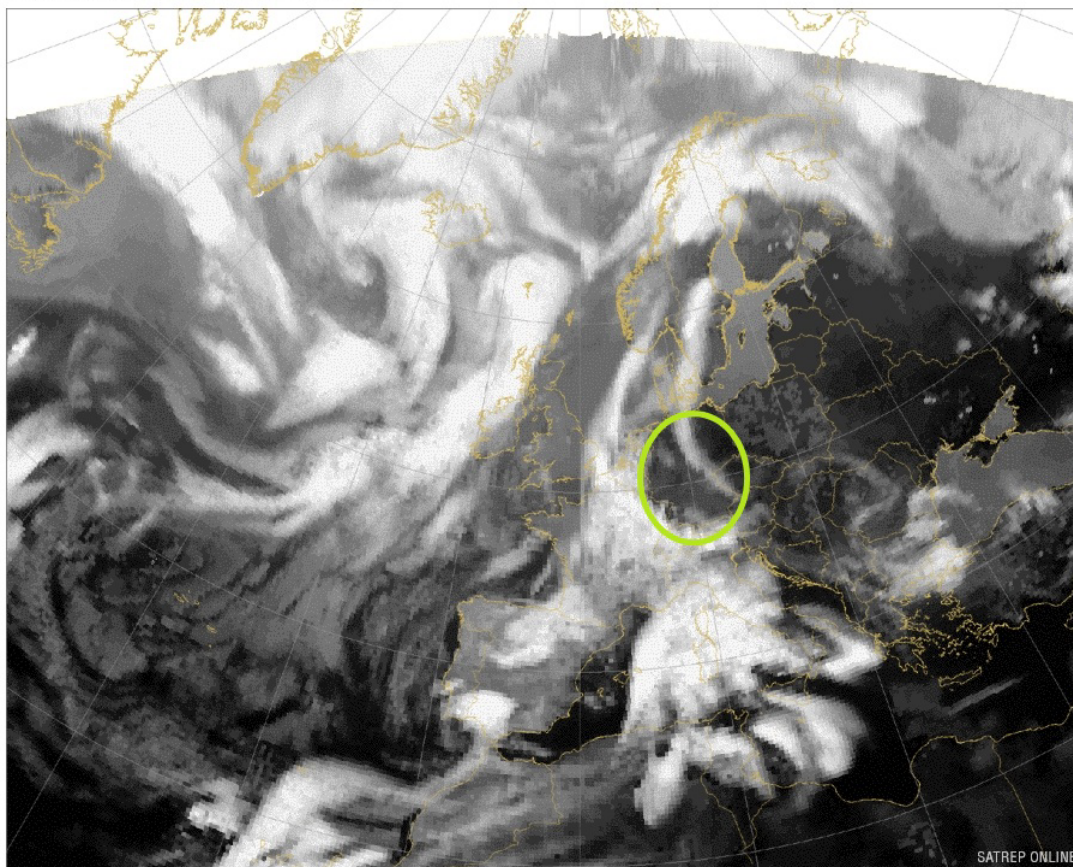
Ha összevetjük a valódi és a szimulált műholdképeket, akkor látható, hogy a modell szinte minden területre nagyon jó közelítést ad a felhőzetre, kivéve egy térséget Németország környékén. (melyet zöld ellipszissel jelöltünk) Feltételezésünk szerint a modell magas szintű felhőzetre vonatkozó sikertelen előrejelzése a por miatt megnövekedett jégképző mag koncentrációnak, és az ebből következő felhő-élettartam meghosszabbodásnak köszönhető.

Meteosat 9 IR10.8 - 26 April 2009 06:00UTC



66. ábra
MSG – IR10.8 infra műholdkép
2009. április 26. 06:00 UTC
(forrás: <http://www.satreponline.org/archive.php>)

ECWMF Pseudo IR10.8 - 26 April 2009 06:00UTC



67. ábra
Pseudo-IR10.8 infra kép az ECMWF modellből származtatva
2009. április 26. 06:00 UTC
(forrás: <http://www.satrep-online.org/archive.php>)

A fent kifejtett hipotézis bizonyítása kézenfekvően rádiószondás mérések hőmérsékleti profiljai alapján lenne lehetséges. Ez azonban a felszállások ritka tér- és időbeli eloszlása miatt meglehetősen nehéznek bizonyult.

6. Összefoglalás

Jelen diplomamunka célja az volt, hogy bemutassuk az ásványi por légkörben való viselkedését, hatásait általánosan, valamint speciálisan néhány esettanulmányon keresztül Magyarországra vonatkozóan.

Munkánk három fő részből állt. Először a nemzetközi szakirodalom alapján a por légköri ciklusát és hatásait tekintettük át. Az ásványi pornak, elsődleges aeroszol forrásként fontos szerepe van az **éghajlat** alakításában. A légkörbe kerülve befolyásolja a **sugárzási viszonyokat**, a **felhő- és csapadékképződést**, a **levegőminőséget**, illetve hatással van az **élő szervezetekre** is. A por legnagyobb forrásterületei az északi félgömbön, azon belül is Észak-Afrikában találhatók.

A második részben **Magyarországra vonatkozóan** képet kaptunk a **szaharai por jelenlétének időbeli változásáról**. Ennek bemutatására készítettünk egy rövid statisztikai vizsgálatot a BSC/DREAM por-előrejelző modell felhasználásával. Azt kaptuk eredményül, hogy mind a por-események mind a poros napok száma tavasszal a legnagyobb, az őszi-téli időszakban a legkisebb, és az események kb. ¾-e délnyugati irányból érkezett hazánk fölé.

A harmadik részben esettanulmányokon keresztül szemléltettük, illetve magyaráztuk a por légköri szerepét MSG műholdképek segítségével, Magyarországot is érintő példákat hozva. E három esetet a 2004. augusztus–2009. április közti időszakot tartalmazó adatbázisunkból (melyben a Magyarországot érintő por-események vannak jelölve és kategorizálva) választottuk ki. Két fontos hatása is van a pornak, mely a műholdképeken is detektálható: a **légkör optikai átlátszóságának gyengülése** és a **felhőzetre gyakorolt hatása (szerkezet, élettartam)**. Ez utóbbi talán a legfontosabb tulajdonsága a pornak, hiszen a felhőzet befolyásolásával hat az időjárásra és a klímára is. A felhők élettartamának növekedése, sőt egyáltalán a poros felhő jelenléte hatással lehet a **lokális hőmérséklet napi alakulására**. Nappal a napsugárzás fokozottabb szórása által kevesebb sugárzás jut le a felszínre, így mérsékli a felmelegedést; éjszaka viszont melegíti a felszínt az üvegházhatás révén. A műholdképek tanulmányozása során (2004-napjainkig) figyelmesek lettünk arra, hogy por jelenlétében a magas szintű felhők struktúrája megváltozhat, szemcsés szerkezetűvé válhat. Ilyen esetekkel azonban csak a

reggeli, délelőtti órákban találkoztunk. Erre a problémára vázoltunk fel egy lehetséges magyarázatot. Elképzelésünk szerint a porrészecskék nagy koncentrációjának köszönhetően a felhő emisszivitása, és következésképpen az éjszakai hosszuhullámú kisugárzása megnő. Így nappal stabilabbá, éjszaka labilisabbá válik a felhőn belüli réteg, és ez az éjszakai instabil rétegződés megfelelő feltételeket biztosít – az alacsonyabb szintű felhőkben is megfigyelhető – zárt konvekciós cellák kialakulásához.

Összességében el lehet mondani, hogy Magyarországon is megfigyelhető a szaharai por jelenléte, melynek hatását a műholdképek figyelemmel kísérése által a mindennapi előrejelző munkában figyelembe lehet venni. A téma azonban további részletesebb kutatást igényel, melynek fő irányvonalai a következők lehetnek:

- A port tartalmazó jégfelhők felhőtető hőmérsékletében történő napi menet objektív kimutatása.
- A légköri aeroszol, különös tekintettel a nagy mennyiségű jégképző magot tartalmazó szaharai eredetű por mennyiségétől függően a jelenleg használt numerikus előrejelzési modellek bevalásának vizsgálata.
- Részletes felhőfizikai sémákat alkalmazó, és a tényleges por tartalomnak megfelelően megváltoztatott paraméterekkel futtatott numerikus előrejelzések vizsgálata kiválasztott időjárási szituációkban.
- A magas szintű felhők élettartam növekedésének igazolása a pszeudo-IR képek és a tényleges infravörös képek hosszabb időre vonatkozó, szisztematikus összehasonlításával.
- A megfelelő sugárzási és felhőfizikai folyamatok numerikus modellezése a magas szintű felhők por jelenlétében kialakuló speciális struktúrájának további elemzéséhez, és a dolgozatban felvázolt hipotézis igazolásához. A jelenség kampányszerű megfigyelése különféle közvetett és közvetlen mérési módszerrel, különös tekintettel a felhőfizikai paraméterek és az aeroszokok függőleges profiljára.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, Kolláth Kornélnak és dr. Putsay Máriának a szakmai tanácsaikért, a rám áldozott idejükért és a hasznos észrevételeikért.

Köszönöm dr. Pongrácz Ritának segítőkész közreműködését és értékes tanácsait.

Továbbá hálával tarozom családomnak és barátaimnak a nem szűnő támogatásukért.

Irodalomjegyzék

Bagnold, R. A., 1941: *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, 265 pp., Methuen, New York.

Borbély-Kiss, I., Kiss, A.Z., Koltay, E., Szabó, G., Bozó, L., 2004: Saharan dust episodes in Hungarian aerosol: elemental signatures and transport trajectories, *Journal of Aerosol Science* 35 (10), 1205–1224.

BSC/DREAM archívuma:

<http://www.bsc.es/projects/earthscience/visor/dust/med/dld/archive/>

Burt, S., 1991: Falls of dust rain in Berkshire, March 1991, *Weather* 46, 248.

Bücher, A., Dessens, J., 1992: Saharan dust over France and England, 6–9 March 1991, *Journal of Meteorology* 17, 226–233.

Carrió, G.G., van den Heever, S.C., Cotton, W.R., 2006: Impacts of nucleating aerosol on anvil-cirrus clouds: A modeling study, *Atmospheric Research* 84 (2007) 111–131, doi:10.1016/j.atmosres.2006.06.002.

Chiapello, I., Bergametti, G., Gomes, L., Chatenet, B., Dulac, F., Pimenta, J., Soares, E.S., 1995: An additional low layer transport of Sahelian and Saharan dust over the North-Eastern Tropical Atlantic, *Geophysical Research Letters* 22 (23), 3191–3194.

Coen, M.C., Weingartner, E., Schaub, D., Hueglin, C., Corrigan, C., Henning, S., Schwikowski, M., Baltensperger, U., 2004: Saharan dust events at the Jungfraujoch: detection by wavelength dependence of the single scattering albedo and first climatology analysis, *Atmospheric Chemistry and Physics* 4, 2465–2480.

- Collins, W. D., Conant, W. C., Ramanathan, V., 1994: Earth radiation budget, clouds, and climate sensitivity, *The Chemistry of the Atmosphere: Its Impact on Global Change*, edited by: J. G. Calvert, pp. 207–215, Blackwell Scientific Publishers, Oxford, UK.
- Cziczo, D.J., Murphy, D.M., Hudson, P.K., Thomson, D.S., 2004: Single particle measurements of the chemical composition of cirrus ice residue during CRYSTAL-FACE, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 109 (D4), D04201.
- D'Almeida, G. A., 1987: On the variability of desert aerosol radiative characteristics, *J. Geophys. Res.*, 92(D3), 3017-3026, 1987.
- DeMott, P.J., Sassen, K., Poellot, M.R., Baumgardner, D., Rogers, D.C., Brooks, S.D., Prenni, A.J., Kreidenweis, S.M., 2003: African dust aerosols as atmospheric ice nuclei, *Geophysical Research Letters* 30 (14), L1732.
- Dubovik, O., Holben, B., Eck, T.F., Smirnov, A., Kaufman, Y.J., King, M.D., Tanre, D., Slutsker, I., 2002: Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations, *Journal of the Atmospheric Sciences* 59 (3), 590–608.
- Duce, R. A., 1995: Sources, Distributions, and Fluxes of Mineral Aerosols and Their Relationship to Climate, in *Dahlem Workshop on Aerosol Forcing of Climate*, edited by R. J. Charlton and J. Heintzenberg, pp. 43–72, John Wiley, Chichester, U. K.
- Engelstaedter, S., Tegen, I., Washington, R., (2006): North African dust emission and transport, *Earth-Science Reviews*, 79, 73–100, doi:10.1016/j.erscirev.2006.06.004.

- Erdődiné Molnár, Zs., Kovács, A., 2005: Szaharai homok Borsodban, Légekör – 50. évf., 2005. 4. szám.*
- Fan, S.-M., Moxim, W. J., Levy, H., 2006: Aeolian input of bioavailable iron to the ocean, Geophys. Res. Lett., 33 (7), L07,602, doi:10.1029/2005GL024852.*
- Franzen, L.G., Mattson, J.O., Martensson, U., 1994: Yellow snow over the Alps and sub-Arctic from dust storm in Africa, March 1991, Ambio 23 (3), 233–235.*
- Gabriel, K.R., Rosenfeld, D., 1990: The Second Israeli Stimulation Experiment: Analysis of precipitation on both targets, J. Appl. Meteor., 29, 1055-1067.*
- Gagin, A., 1965: Ice nuclei, their physical characteristics and possible effect on precipitation initiation, Proc. Intl. Conf. Cloud Physics, Tokyo-Sapporo, p.155.*
- Gobbi, G. P., Barnaba, F., 2003: 2003 The vertical distribution of aerosols, Saharan dust and cirrus clouds at Rome (Italy) in the year 2001, Atmos. Chem. Phys. Discuss., 3, 5755–5775.*
- Griffin, D.W., Kellogg, C.A., (2004): Dust Storms and Their Impact on Ocean and Human Health: Dust in Earth's Atmosphere, EcoHealth, 1, 284–295.*
- Heinold, B., Tegen, I., Schepanski, K., Hellmuth, O., 2008: Dust Radiative Feedback on Saharan Boundary Layer Dynamics and Dust Mobilization, Geophys. Res. Lett., 35, L20, 817, doi: 10.1029/2008GL035319.*
- Heintzenberg, J., Okada, K., Strom, J., 1996: On the composition of non-volatile material in upper tropospheric aerosols and cirrus crystals, Atmos. Res., 41, 81-88.*
- IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis., Contribution of Working Group I to the Forth Assessment Report of the Intergovernmental Panel*

- on Climate Change, edited by S. Solomon, D. Quin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, and H. L. Miller, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC 4AR, 2007: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L.), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change, Summary for Policymakers, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.*
- Isono, K., Komabayasi, M., Ono, A., 1959: The nature and origin of ice nuclei in the atmosphere, J. Meteorol. Soc. Japan, 37, 211– 233.*
- Israelevich, P.L., Levin, Z., Joseph, J.H., Ganor, E., 2002: Desert aerosol transport in the Mediterranean region as inferred from the TOMS aerosol index, Journal of Geophysical Research, [Atmospheres] 107 (D21) (art. no.—4572).*
- Israelevich, P.L., Ganor, E., Levin, Z., Joseph, J.H., 2003: Annual variations of physical properties of desert dust over Israel, Journal of Geophysical Research, [Atmospheres] 108 (D13) (art. no.— 4381).*
- Iversen, J. D., White, B. R., 1982: Saltation threshold on Earth, Mars and Venus, Sedimentology, 29, 111–119.*
- Johansen, A. M., Siefert, R. L., Hoffmann, M. R., 2000: Chemical composition of aerosols collected over the tropical North Atlantic, J. Geophys. Res., 105 (D12), 15,227-15,312.*
- Kerkmann, J., 2004: Meteosat Second Generation (MSG): Dust detection, http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html, Contributors: Lutz, H.-J., Roesli, HP., Rosenfeld, D.*

- Kumai, M.*, 1951: Electron-microscope study of snow-crystal nuclei, *J. Atmos. Sci.*, 8, 151–156.
- Levin, Z., Ganor, E., Gladstein, V.*, 1996: The Effects of Desert Particles Coated with Sulfate on Rain Formation in the Eastern Mediterranean, *J. Appl. Meteor.*, 35, 1511–1523.
- Loosmore, G. A., Hunt, J. R.*, 2000: Below-threshold, non-abraded dust resuspension, *J. Geophys. Res.*, 105, 20,663–20,671.
- Mahowald, N.M., Baker, A.R., Bergametti, G., Brooks, N., Duce, R. A., Jickells, T. D., Kubilay, N., Prospero, J. M., Tegen, I.*, (2005): Atmospheric global dust cycle and iron inputs to the ocean, *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB4025, doi: 10.1029/2004GB002402.
- Mattsson, J.O., Nihlen, T.*, 1996: The transport of Saharan dust to southern Europe: a scenario, *Journal of Arid Environments* 32 (2), 111–119.
- Mbourou, G.N., Bertrand, J.J., Nicholson, S.E.*, 1997: The diurnal and seasonal cycles of wind-borne dust over Africa north of the equator, *J. Appl. Meteorol.*, 36, 868–882, 1997.
- Middleton, N. J.*, 1989: Climatic controls on the frequency, magnitude and distribution of dust storms: Examples from India/Pakistan, Mauritania and Mongolia, in *Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*, edited by M. Leinen and M. Sarnthein, pp. 97–132, Kluwer Acad., Norwell, Mass.
- Middleton, N.J., Goudie, A.S.*, 2001: Saharan dust: sources and trajectories, *Transactions Institute of British Geographers* 26 (2), 165–181.

- Miller, R., Tegen, I., (1999): Radiative Forcing of a Tropical Direct Circulation by Soil Dust Aerosols, *J. Atmos. Sci.*, 56, 2403–3433.
- Moulin, C., Lambert, C.E., Dayan, U., Masson, V., Ramonet, M., Bousquet, P., Legrand, M., Balkanski, Y.J., Guelle, W., Marticorena, B., Bergametti, G., Dulac, F., 1998: Satellite climatology of African dust transport in the Mediterranean atmosphere, *Journal of Geophysical Research, [Atmospheres]* 103 (D11), 13,137–13,144.
- Nicholson, S. E., Some, B., Kone, B., 2000: A note on recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy season of the 1997 ENSO year, *J. Clim.*, 13, 2628–2640, 2000.
- Nickovic, S., Papadopoulos, A., Kakaliagou, O. Kallos, G., 2001: Model for prediction of desert dust cycle in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 106, 18113-18129.
- Pacyna, J. M., 1995: *Sources, Particle Size Distribution and Transport of Aerosol*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- Pálincás, K., 2009: Az élet a Csád-tó nélkül, *National Geographic Magyarország* (<http://www.geographic.hu/index.php?act=napi&id=13126>)
- Perry, K.D., Cahill, T.A., Eldred, R.A., Dutcher, D.D., Gill, T.E., 1997: Long-range transport of North African dust to the eastern United States, *Journal of Geophysical Research, [Atmospheres]* 102 (D10), 11,225–11,238.
- Prospero, J.M., Lamb, P.J., 2003: African droughts and dust transport to the Caribbean: climate change implications, *Science* 302 (5647), 1024–1027.
- Prospero, J.M., Nees, R.T., 1986: Impact of the North African Drought and El-Nino on mineral dust in the Barbados trade winds, *Nature* 320 (6064), 735–738.

Prospero, J. M., Glaccum, R. A., Nees, R. T., 1981: Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America, *Nature*, 289, 570–572.

Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S.E., Gill, T.E., 2002: Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of Geophysics* 40(1), 1002, doi:10.1029/2000RG000095.

Prospero, J.M., Blades, E., Mathison, G., Naidu, R., 2005: Interhemispheric transport of viable fungi and bacteria from Africa to the Caribbean with soil dust, *Aerobiologia* 21 (1), 1–19.

Psenner, R., 1999: Living in a dusty world: airborne dust as a key factor for alpine lakes, *Water, Air and Soil Pollution* 112 (3–4), 217–227.

Pye, K., 1989: Processes of fine particle formation, dust source regions, and climatic changes, in *Paleoclimatology and Paleometeorology: Modern and Past Patterns of Global Atmospheric Transport*, edited by M. Leinen and M. Sarnthein, pp. 3–30, Kluwer Acad., Norwell, Mass.

Roberts, P., Hallett, J., 1968: A laboratory study of the ice nucleating properties of some mineral particulates, *Q. Jl. Roy. Meteor. Soc.*, 94, 25-34.

Rogora, M., Mosello, R., Marchetto, A., 2004: Long-term trends in the chemistry of atmospheric deposition in Northwestern Italy: the role of increasing Saharan dust deposition, *Tellus. Series B, Chemical and Physical Meteorology* 56 (5), 426–434.

Rosenfeld, D., Rudich, Y., Lahav, R., 2001: Desert dust suppressing precipitation: a possible desertification feedback loop, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98 (11), 5975–5980.

- Ryall, D.B., Derwent, R.G., Manning, A.J., Redington, A.L., Corden, J., Millington, W., Simmonds, P.G., O'Doherty, S., Carslaw, N., Fuller, G.W., 2002: The origin of high particulate concentrations over the United Kingdom, March 2000, *Atmospheric Environment* 36 (8), 1363–1378.
- Saunders, R., Matricardi, M., Brunel, P., 1999: An improved fast radiative transfer model for assimilation of satellite radiances observations, *Q J. R. Meteorol. Soc.*, 125, 1407-1425.
- Schepanski, K., 2009: Characterising Saharan Dust Sources and Export using Remote Sensing and Regional Modelling, <http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=4775>
- Shao, Y., Raupach, M. R., Findlater, P. A., 1993: The effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind, *J. Geophys. Res.*, 98, 12,719–12,726.
- Shao, Y., Raupach, M. R., Leys, J. F., 1996: A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region, *Aust. J. Soil Res.*, 34, 309–342.
- Shinn, E.A., Smith, G.W., Prospero, J.M., Betzer, P., Hayes, M.L., Garrison, V., Barber, R.T., 2000: African dust and the demise of Caribbean coral reefs, *Geophysical Research Letters* 27, 3029–3032
- Sokolik, I.N., Winker, D.M., Bergametti, G., Gillette, D.A., Carmichael, G., Kaufman, Y.J., Gomes, L., Schuetz, L., Penner, J.E., 2001: Introduction to special section: outstanding problems in quantifying the radiative impacts of mineral dust, *Journal of Geophysical Research* 106 (D16), 18,015–18,027.
- Sultan, B., Labadi, K., Guegan, J.F., Janicot, S., 2005: Climate drives the meningitis epidemics onset in West Africa. *Plos Medicine* 2 (1), 43–49.

Tanaka, T.Y., Chiba, M., 2006: A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget, *Global and Planetary Change, Volume 52*, Issues 1-4, July 2006, Pages 88-104.

Tanaka, T.Y., Kurosaki, Y., Chiba, M., Matsumura, T., Nagai, T., Yamazaki, A., Uchiyama, A., Tsunematsu, N., Kai, K., 2005: Possible transcontinental dust transport from North Africa and the Middle East to East Asia, *Atmospheric Environment* 39 (21), 3901–3909.

Todd, M., R. Washington, Martins, J. V., Dubovik, O., Lizcano, G., M'Baimayel, S., Engelstaedter, S., 2007: Mineral dust emission from the Bodele Depression, northern Chad, during BoDEx 2005, *J. Geophys. Res.*, 112 (D6), D06,207, doi: 10.1029/2006JD007170.

Washington, R., Todd, M.C., Middleton, N.J., Goudie, A.S., 2003: Dust-storm source areas determined by the total ozone monitoring spectrometer and surface observations, *Annals of the Association of American Geographers* 93 (2), 297–313.

Wedepohl, K.H., (1995): The composition of the continental crust, *Geochemica et Cosmochimica Acta* 59 (7), 1217–1232.

Zuberi, B., Bertram, A. K., Cassa, C. A., Molina, L. T., Molina, M. J., 2002: Heterogeneous nucleation of ice in (NH₄)₂SO₄-H₂O particles with mineral dust immersions, *Geophys. Res. Lett.*, 29, doi:10.1029/2001GL014289.

Függelék

Hivatkozás	Emisszió Észak-Afrikára [Tg/év]	Emisszió globális szinten [Tg/év]
Peterson and Junge (1971)		500
Jaenicke (1979)	260	
Schütz (1980)		Több mint 5000
Schütz et al. (1981)	260	
D'Almeida (1986)	630–710	1800–2000
Tegen and Fung (1994)		3000
Duce (1995)		1000–2000
Tegen and Fung (1995)		1222
Andreae (1996)		1500
Marticorena and Bergametti (1996)	586–665	
Prospero (1996)	170	
Swap et al. (1996)	130–460	
Mahowald et al. (1999)		3000
Callot et al. (2000)	760	
Ozer (2001)	1600	
Penner et al. (2001)		2150
Ginoux et al. (2001)		1814
Chin et al. (2002)		1650
Werner et al. (2002)		1060±194
Tegen et al. (2002)		1100
Zender et al. (2003)		1490±160
Luo et al. (2003)	1114*	1654
Mahowald and Luo (2003)		1654
Ginoux et al. (2004)	1430	2073+
Miller et al. (2004)	479–589	1018
Tegen et al. (2004)		1921
Kaufman et al. (2005)	240±80	
Jickells et al. (2005)		1790

2. Táblázat

Különböző modellszámítások eredményei a por emisszió éves nagyságára [Tg/év] Észak-Afrikában és az egész Földre (Goudie and Middleton (2001), Zender et al. (2004) és Mahowald et al. (2005) munkái alapján Engelstaedter et al. (2006))

	Por-esemény	Havi átlag por-esemény	Poros napok	Havi átlag poros nap	Az érkezési irány szerinti előfordulási szám				Az érkezési irány szerinti relatív gyakoriságok			
					DNy	D	DK	ÉNy	DNy	D	DK	ÉNy
Január	6	1,50	14	3,50	3	2	0	1	50%	33%	0%	17%
Február	8	2,00	20	5,00	6	1	1	0	75%	12%	13%	0%
Március	15	3,75	49	12,25	8	2	3	1	57%	14%	21,43%	7,14%
Április	14	3,50	64	16,00	12	1	0	2	80%	7%	0%	13%
Május	8	2,67	53	17,67	7	0	1	0	88%	0%	12%	0%
Június	10	3,33	45	15,00	7	1	1	1	70%	10%	10%	10%
Július	10	2,50	32	8,00	9	0	1	0	90%	0%	10%	0%
Augusztus	13	3,25	39	9,75	12	0	1	0	92%	0%	8%	0%
Szeptember	8	2,00	31	7,75	6	0	1	1	75%	0%	13%	12%
Október	10	2,50	28	7,00	8	0	1	1	80%	0%	10%	10%
November	8	2,00	27	6,75	7	0	1	0	88%	0%	12%	0%
December	7	1,75	23	5,75	4	3	0	0	57%	43%	0%	0%
Összesen	117	30,75	425	114,42	89	10	11	7	76%	9%	9%	6%
Tavaszi		32%		40%	30%	30%	37%	43%				
Nyári		30%		29%	31%	10%	27%	14%				
Őszi		21%		19%	24%	0%	27%	29%				
Téli		17%		12%	15%	60%	9%	14%				

3. Táblázat
A BSC/DREAM por-előrejelző modell térképei alapján készített statisztika összefoglaló táblázata

2004

<u>Augusztus</u>							<u>Szeptember</u>							<u>Október</u>						
H	K	Sze	Cs	P	Szo	V	H	K	Sze	Cs	P	Szo	V	H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
						1			1	2	3	4	5					1	2	3
2	3	4	5	6	7	8	6	7	8	9	10	11	12	4	5	6	7	8	9	10
9	10	11	12	13	14	15	13	14	15	16	17	18	19	11	12	13	14	15	16	17
16	17	18	19	20	21	22	20	21	22	23	24	25	26	18	19	20	21	22	23	24
23	24	25	26	27	28	29	27	28	29	30				25	26	27	28	29	30	31
30	31																			

<u>November</u>							<u>December</u>						
H	K	Sze	Cs	P	Szo	V	H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
1	2	3	4	5	6	7			1	2	3	4	5
8	9	10	11	12	13	14	6	7	8	9	10	11	12
15	16	17	18	19	20	21	13	14	15	16	17	18	19
22	23	24	25	26	27	28	20	21	22	23	24	25	26
29	30						27	28	29	30	31		

3. Táblázat

Magyarországi poros napok a 2004. augusztus-december közti időszakban (MSG műholdképek alapján)

Színek jelentése: kék – tiszta vagy többnyire felhőtlen ég hazánk felett; rózsaszín – többnyire felhős ég hazánk felett; zöld – magas szintű felhőzet a műholdképen és poros levegő hazánk felett

2005

Január

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Február

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28						

Március

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

Április

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	

Május

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

Június

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

Július

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Augusztus

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

Szeptember

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		

Október

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

November

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30				

December

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

4. Táblázat

Magyarországi poros napok 2005-ben (MSG műholdképek alapján)

Színek jelentése: kék – tiszta vagy többnyire felhőtlen ég hazánk felett; rózsaszín – többnyire felhős ég hazánk felett; zöld – magas szintű felhőzet a műholdképen és poros levegő hazánk felett

2006

Január

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

Február

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28					

Március

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

Április

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

Május

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

Június

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		

Július

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Augusztus

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

Szeptember

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	

Október

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

November

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

December

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

5. Táblázat

Magyarországi poros napok 2006-ban (MSG műholdképek alapján)

Színek jelentése: kék – tiszta vagy többnyire felhőtlen ég hazánk felett; rózsaszín – többnyire felhős ég hazánk felett; zöld – magas szintű felhőzet a műholdképen és poros levegő hazánk felett

2007

Január

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

Február

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28				

Március

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Április

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

Május

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

Június

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	

Július

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

Augusztus

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

Szeptember

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

Október

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

November

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30		

December

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

6. Táblázat

Magyarországi poros napok 2007-ben (MSG műholdképek alapján)

Színek jelentése: kék – tiszta vagy többnyire felhőtlen ég hazánk felett; rózsaszín – többnyire felhős ég hazánk felett; zöld – magas szintű felhőzet a műholdképen és poros levegő hazánk felett

2008

Január

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

Február

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29		

Március

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30
31						

Április

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30				

Május

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Június

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30						

Július

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
	1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12	13
14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27
28	29	30	31			

Augusztus

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Szeptember

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

Október

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31		

November

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
					1	2
3	4	5	6	7	8	9
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27	28	29	30

December

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	31				

7. Táblázat

Magyarországi poros napok 2008-ban (MSG műholdképek alapján)

Színek jelentése: kék – tiszta vagy többnyire felhőtlen ég hazánk felett; rózsaszín – többnyire felhős ég hazánk felett; zöld – magas szintű felhőzet a műholdképen és poros levegő hazánk felett

2009

Január

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

Február

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	

Március

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31					

Április

H	K	Sze	Cs	P	Szo	V
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

8. Táblázat

Magyarországi poros napok a 2009. január-április közti időszakban (MSG műholdképek alapján)
 Színek jelentése: kék – tiszta vagy többnyire felhőtlen ég hazánk felett; rózsaszín – többnyire felhős
 ég hazánk felett; zöld – magas szintű felhőzet a műholdképen és poros levegő hazánk felett