

A Szahara térségéből a Kárpát-medencébe érkező trajektóriák elemzése

SZAKDOLGOZAT
FÖLDTUDOMÁNYI ALAPSZAK
METEOROLÓGUS SZAKIRÁNY



Készítette:

Góth Roland

Témavezető:

dr. Mészáros Róbert, egyetemi docens

Leelőssy Ádám, PhD hallgató

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2015

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. Irodalmi áttekintés	2
3. Ásványi részecskék és jelentőségeik	5
3.1. Ásványi részecskék éghajlati hatásai	5
3.2. Ásványi részecskék egészségügyi hatásai	6
4. A por légköri ciklusa	7
4.1. A por légkörbe jutása	7
4.2. A por transzportja.....	10
4.3. A por depozíciója	10
5. Portranszportnak kedvező szinoptikai helyzetek	11
5.1. Mediterrán ciklonok.....	11
6. A HYSPLIT modell	15
7. Eredmények	16
7.1. Trajektóriák elemzése, statisztikai vizsgálatok	16
7.2. Esettanulmányok.....	24
7.2.1. Esettanulmány: 2012.június 21-22.	24
7.2.2. Esettanulmány: 2014. február 19-22.	27
8. Összefoglalás	33
Köszönetnyilvánítás	35
Irodalomjegyzék	36
Függelék	39

1. Bevezetés

A levegő egy összetett elegy, amely szilárd, cseppfolyós és légnemű halmazállapotú anyagokat is tartalmaz. A légkör állandó mozgásban van, ezért alkotóelemei is vele együtt mozognak, koncentrációjuk is ennek megfelelően változik. Egyes gázok, anyagok mennyisége lassabban, míg másoké gyorsabban módosul. Egyik ilyen anyag a levegőben a sivatagi homok. Mint a többi alkotóelemnek, ugyanúgy a homokszemcsék mennyisége is eltérő a légkörben: mind magasság, tér és idő szerint. Vannak területek, ahol kevésbé játszik fontos szerepet a sivatagi homok, mennyisége ritkán, vagy egyáltalán nem mutat szignifikáns eltéréseket az átlagtól. A por koncentrációja számunkra azért lesz nagyon érdekes, mert jelentős hatással bír az egyes régiók időjárásának, éghajlatának alakulásában.

Kutatásaink során a Szaharából a Kárpát-medence területére, azon belül is a Magyarországra érkező trajektóriákat vizsgáltuk ún. backward trajektóriák (légcella visszakövetés) alapján, a HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) modell alkalmazásával. Ez a modell Lagrange-i szemléletmódban tekinti a légkört, tehát egy adott légréteg útját követi nyomon. Négy magyarországi városra (Budapestre, Miskolcra, Pécsre, illetve Zalaegerszegre) vizsgáltuk adott szinoptikus helyzet alapján az érkező levegő pályáját. Az elmúlt 10 év (2005–2014) azon eseteit vizsgáltuk, amikor a trajektória alapján, a Szaharából érkezett az adott városba a levegő. A vizsgálatokat 3 érkezési magasságra: 1500, 3000, és 5000 m-re végeztük el.

Munkánk fő célja a Szaharából hazánk területére érkező trajektória főbb útvonalainak feltérképezése, csoportosítása, illetve a hozzájuk kapcsolódó szinoptikus helyzetek felvázolása az esettanulmányokon keresztül. A három magasságban történt modellfutásoknak köszönhetően a főbb horizontális pályavonalak mellett a sivatagi por áramának vertikális szintjét is megfigyeltük. Végül pedig a Magyarországon előforduló poros helyzetek gyakoriságát, évszakonkénti eloszlását tekintettük az elmúlt 10 év alatt előfordult esetek alapján.

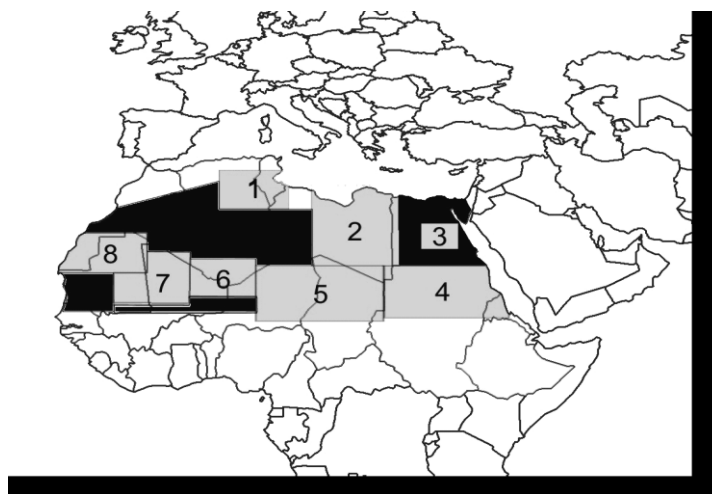
2. Irodalmi áttekintés

Az utóbbi években az éghajlat, illetve annak változása világszerte a kutatások középpontjába került. Az éghajlat meghatározásában, változásában számos tényező játszik

szerepet. Ezek egyike az ásványi por, amelynek fő forrásterületei a sivatagok, félsivatagok, tehát száraz (arid) területek. A Szahara a legnagyobb területű sivatag Földünkön, ennek megfelelően egyben a legaktívabb forrásterület. A globális emisszió több mint 50%-a Észak-Afrikából származik. (D’Almeida, 1987) Ez a legújabb tanulmányok alapján 500–1000 Tg/év por emissziót jelent, szemben a globális kibocsátás 1000–2000 Tg/év értékével (Nagy, 2009).

A Szaharai emissziót három részre oszthatjuk a por transzportjának iránya alapján: egy része Európába, egy másik része az Amerikai kontinens felé, harmadrészben pedig keleti irányba (Ázsia) sodródik (Schepanski, 2009). Azt, hogy egy adott pillanatban éppen merre szállítódnak az ásványi részecskék, azt az adott szinoptikai helyzet, azon belül is a szélmező határozza meg. A szemcsék pályáinak követésére, terjedésének éves menetére, térbeli eloszlására számos tanulmány készült, legtöbbször Európára vonatkozóan.

Egyik ilyen tanulmány (Escudero et al., 2006) abból a célból született, hogy meghatározza a HYSPLIT (Hibrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) modell segítségével, hogy az észak-afrikai régió mennyiben járul hozzá Közép-Ibéria PM10 koncentrációjához (10 µm alatti részecske átmérőjű szilárd szemcsék). A kutatás során a 2003. márc. 12–15-i esetet vizsgálták, melyhez távérzékelést, felszíni megfigyeléseket és időben visszafelé haladó backward trajektóriákat használtak. A Hysplit modellt alkalmazták, amely a szaharai forrásterületet tekintve a legerteljesebb. Ugyanakkor e modell hibája, hogy a kis skálájú eseményeknél gyakran felülbecsli a por koncentrációját (Escudero et al., 2006). A vizsgálatok során a Szahara területét nyolc potenciális forrásrégióra osztották (Prospero et al., 2002) alapján (1. ábra).



1. ábra: Észak-afrikai forrásterület felosztása (Escudero 2006)

A Hysplit modell segítségével szimulációkat végeztek az Ibériai-félszigetre vonatkozóan a PM10 adatok ismeretében. Arra jutottak, hogy a 2013. márciusi eset alkalmával az ásványi por főként Mali, Mauritánia és az Ahaggar-hegység nyugati területéről származott.

Egy másik kutatás (*Israelevich et al., 2012*) az Európára jellemző fő pályákat, évszakos területi eloszlásokat térképezte fel. MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) által megfigyelt AOT index értékéből (aerosol optical thickness) – aeroszolk optikai vastagsága – állapították meg a terjedési útvonalat, illetve a gyakoriságot. A modellezések alapján két jellemző pályát találtak: a saharai por Európa nyugati részére az Atlanti-óceán felől jut el, a keletebbi területekre – így esetünkben hazánk területére is – a Mediterráneumon keresztül. Megfigyelték, hogy tavasszal az előbbi pályavonal a jellemzőbb, ezáltal kontinensünk nyugati országaiban magasabb a poros esetek száma (poros esetnek nevezzük, amikor egy adott térségben a por koncentrációja 20%-kal nagyobb, mint az előző 30 nap átlaga). Nyáron Közép-Európában, ősszel pedig Kelet-Európában kimagasló ugyanez az érték. A porkibocsátásnak nemcsak éves, hanem napi menetét is megfigyelték. Értéke jellemzően téli éjszakákon a legalacsonyabb (2–4 g/m²), tavasszal, éjszakánként elérheti akár 10 g/m²-t, de a 30 g/m²-t sosem haladja meg (*Fiedler et al. 2013*). Szintén tavasszal, a déli órákban azonban 70–110 g/m² értéket is mértek, ami a télihez képest magasabban lévő határréteggel van összefüggésben. A tavaszi emisszió maximumának másik fő oka, hogy a mérsékelt övi ciklonok is délebbi pályán mozognak az északi félgömbön, a nyári pályáikhoz képest.

Kimutatták, hogy a hegységek szintén hatással vannak a PM10, és egyben az ásványi por koncentrációjára. A Pó völgyében több okból is kifejezetten magas ez az érték. A jellemző déli áramlás miatt az Alpok vonulatainak előterében ugyanis feldúsul a saharai por mennyisége, ráadásul az extrém értékeket a térségben jellemző jelentős ipari tevékenység csak tovább fokozza. Ennek köszönhetően Észak-Olaszországban gyakoriak az extrém PM10 koncentrációs értékek. Ezen a területen földrajzi fekvésének köszönhetően az év jelentős szakaszában magasan van a szállópor koncentrációja. Természetesen ez a jelenség nem csak Észak-Itáliában figyelhető meg, hanem Európaszerte, mint például a spanyol város, Barcelona környékén, illetve Bulgáriában a Rodope előterében is (*Israelevich et al., 2012*).

Hazánk hegységekkel van körülvéve, Magyarországot tekintve szintén jelentős befolyásoló tényező lehet az Alpok, de ennél jóval gyakoribb tényező a Kárpátok, illetve a Dinári-hegység, mivel a poros esetek többségénél délies, délnyugati áramlás a jellemző

Pey et al. (2013) tanulmányukban 2001–2010-ig vizsgálták a PM10 koncentrációt, és a Szaharából a Mediterrán térségbe áramló por eseteiben fennálló mezoskálájú meteorológiai folyamatokat, szinoptikai helyzetet. A kutatás a LIFE Programme European project MED-PARTICLES (Particles size and composition in Mediterranean countries: geographical variability and shortterm health effects) része volt. A pontos kimutatás érdekében a vizsgálatot sok európai városra és hosszabb időtartamra végezték el. Az egyes országokkal szorosán együttműködve gravimetriás módszerrel határozták meg a PM10 koncentrációkat, melyeket úgy kaptak, hogy a mért értékből kivontak egy elméleti értéket, ami a szaharai por nélküli koncentrációnak az értéke. Azt az eredményt kapták, hogy keleten és az iparosodottabb városokban, Észak-Itáliában, Közép-Spanyolországban magasabb a koncentráció, akár 21–24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, máshol alacsonyabb. A legnagyobb eltérés télutókor, kora tavasszal figyelhető meg a keleti és a nyugati területek között, a maximumot nyáron éri el a koncentráció értéke.

A Szaharán kívül más forrásterületek karakterisztikáit is vizsgálták az elmúlt évtizedekben. Ausztrál kutatók is készítettek egy tanulmányt (*McGowan and Clark, 2008*), amelyben Lake Eyre, vagyis az Eyre tó környékéről származó sivatagi por főbb pályáit vizsgálták évszakokra lebontva. Nyáron (december–január) magasabb rétegekben (2000–5000 m), télen (június–július) inkább alacsonyabb rétegekben (500–1000 m) történik a szállítás és évszaktól függően akár Indonéziát, a Fülöp-szigeteket, vagy Chile-t, Antarktiszra is elérheti az Ausztráliából származó ásványi por.

3. Ásványi részecskék és jelentőségeik

3.1. Ásványi részecskék éghajlati hatásai

Az ásványi részecskék parányi átmérőjűek. Méretük ellenére nagymértékben befolyásolják az egyes területek éghajlatát. Ezeket a részecskéket méretük alapján aeroszoloknak is nevezhetjük. Légkörfizikai jelentőségük közel sem nevezhető jelentéktelennek. Közvetlen hatásuk, hogy a beérkező napsugarak útjában akadályt képeznek, ezért rajtuk szóródik a napfény (*Nagy, 2009*). A napfény rövidhullámú sugarain kívül a hosszuhullámú sugarakat is elnyelik és szórják optikai, fizikai, kémiai és ásványi tulajdonságaik alapján, így meggátolva a hosszuhullámú sugarak világűrbe való távozását,

ezáltal melegítik a légkört (*Sokolik et al., 2001*). Természetesen nemcsak a légköri sugárzás pillanatnyi karakterisztikáira, a troposzféra vertikális hőmérsékleti profiljára vannak kihatással, hanem aeroszokok lévén a felhőelemek képződésében is fontos szerepet játszanak. Mivel kondenzációs- és jégképző magvakként szolgálnak, ezért felhőelem képződését eredményezik. Mivel általuk jóval több kondenzációs, illetve jégképző mag található a légkörben, ezért ugyanaz a vízgőzmennyiség többfelé oszlik el, jóval kisebbek lesznek az egyes cseppek. A kisebb felhőelemek pedig nem tudnak kiesni a felhőből, ezáltal vagy elpárolognak, vagy pedig fennmaradnak felhők formájában. E közvetett hatásuk pedig csökkenteni igyekszik a felszíni és az alacsonyabb légrétegek hőmérsékletét, hiszen a felhő, azaz a vízgőz az ásványi részecskék közvetlen hatásának megfelelően viselkedik a légkörben (*Nagy, 2009*).

Mivel a légkör önmagában is egy komplex rendszer, amelyben bármilyen kisebb változás történik, az kihatással van a jövőbeli állapotára, így annak előrejelzése nagyon nehéz. Az ásványi részecskék hatása ráadásul jelentősen befolyásolja a légköri sugárzást, illetve ezáltal magát az áramlási rendszert is. Ennek a következménye az, hogy a sivatagi homok részecskéinek éghajlat módosító hatását nagyon nehéz pontosan leírni.

3.2. Ásványi részecskék egészségügyi hatásai

Kevés tanulmány készült eddig ebben a témában, ezek is inkább azokat a földrajzi területeket vizsgálják, amelyek sokkal jobban ki vannak téve a szaharai por hatásának. Ilyen területek például a dél-európai országok. Az ásványi részecskék egészségügyi hatását az egyes időszakok alatti megbetegedések számának alakulását vizsgálva nézték meg. A kutatások egy része csak rövid időszakra vizsgálja a megbetegedések számát, ezekből a kimutatásokból minden kétséget kizáró következtetéseket nem lehet levonni (*Karanasiou et al. 2012*). Könnyen belátható, hogy ezek a kutatások nem tudnak olyan tényezőket figyelembe venni, mint az adott évszak, vagy a hőmérséklet, hiszen télen, illetve hűvösebb időben több egyéb megbetegedés, esetleg járványidőszak is torzítja a vizsgált betegségekre vonatkozó statisztikákat. Másik jelentős hiba a kis időtartam esetében az, hogy például a légúti megbetegedések sem egyből a magasabb szállópor-koncentrációs napokon következnek be, hanem az ásványi részecskék egészségügyi hatásai csak napokkal, esetleg hetekkel később jelennek meg, bizonyos átfutási idővel (*Dominici et al. 2003, Bell et al. 2004*). Ennél sokkal több eredménnyel kecsegtetnek azok a kutatások, amelyek nemcsak

pár napra, esetleg hónapra, hanem hosszabb időszakra vonatkozóan tesznek megfigyeléseket. Ez esetben regressziós modellek segítségével végzik a számításokat. A porszemcsék hatását úgy mutatják ki, hogy egy bizonyos százalékot adnak az adott betegségekhez, ami azt jelenti, hogy az adott helyzet, porkoncentráció, annyi százalékkal növeli meg az adott megbetegedés kockázatát (*Karanasiou et al. 2012*). Az elkészült tanulmányok többségében arra a következtetésre jutottak, hogy a finom szemcsés szaharai por egészségügyi hatása nem kimutatható, nem szignifikáns (*Perez et al. 2008; Jimenez et al. 2010; Mallone et al. 2011; Tobias et al., in press*). Durva szemcsék esetében az eredmények már sokkal kevésbé pozitívak. Az eddigi kutatások alapján egyes betegségeknel (aszma, szív-és érrendszeri rendellenességek) jelentősen megnő a kialakulási valószínűség, a többi betegség esetén azonban itt sincsenek szignifikáns hatások (*Samoli et al., 2011*). A részecskék közvetve okozhatnak gyulladáso megbetegedéseket is, tekintve, hogy a szemcsékkel együtt baktériumok is transzportálódhatnak.

Összességében tehát megállapíthatjuk, hogy a sivatagi por szemcsemérettől függően káros hatással lehet az egészségünkre. Durva szemcséjű homok kimutathatóan káros az emberi egészségre, légúti, gyulladáso, valamint szív- és érrendszeri megbetegedéseket is okozhat.

4. A por légköri ciklusa

A por légköri ciklusát vizsgálva három fázist különíthetünk el, melyek a következők: 1. a por légkörbe jutása; 2. a por transzportja; 3. a por depozíciója (ülepedése) (*Schepanski, 2009*). Az ásványi részecskék vándorlásának ezen lépcsőfokai során fontos feltételeknek kell teljesülnie ahhoz, hogy az egész folyamat végbemehessen. A légköri stabilitás, szállítási magasság, ásványi aeroszolok méret szerinti eloszlása a levegőben, illetve a felhő és a csapadék térbeli eloszlása egyaránt fontos tényezők a por légköri ciklusának.

4.1. A por légkörbe jutása

A részecske légkörbe való jutását 2 karakterisztika határozza meg. Az egyik fontos tényező maga a talaj, a másik pedig a légmozgás, vagyis a szél, illetve a turbulencia. A talaj

jellemzőit tekintve hatalmas szerepet játszik a részecskék mobilitásában a növényzet, a talaj cserepedése, illetve a hóborítottság. Hóval, vagy sűrű növényzettel borított felszín gátat szab a részecsketranszportnak. A másik meghatározó faktor a megfelelő sebességű szél (*Schepanski, 2009*). E tényezőktől függ az, hogy a részecske milyen magasan, illetve merre szállítódik. Az advekción keresztül a sivatagi por trajektóriájának modellezéséhez elengedhetetlen a pontos meteorológiai előrejelzés. A légkör egy kaotikus rendszer, így annak állapota is az, ezért a benne történő mozgások, például a por transzportja is egy kaotikus folyamat. Ha a szállítódáshoz szükséges alapvető légköri feltételek romlanak, akkor a részecskék leülepednek, majd kedvező időjárási viszonyok esetén újra a levegőbe emelkednek és tovaszállítódnak. Egy-egy eset alkalmával néha több, néha kevesebb por indul útnak, melynek bizonyítékai a homokviharok, szemben a száraz légköri homály jelenségével. Utóbbi a kisebb részecskék megnövekedő légköri koncentrációja miatt alakulhat ki (*Schepanski, 2009*).

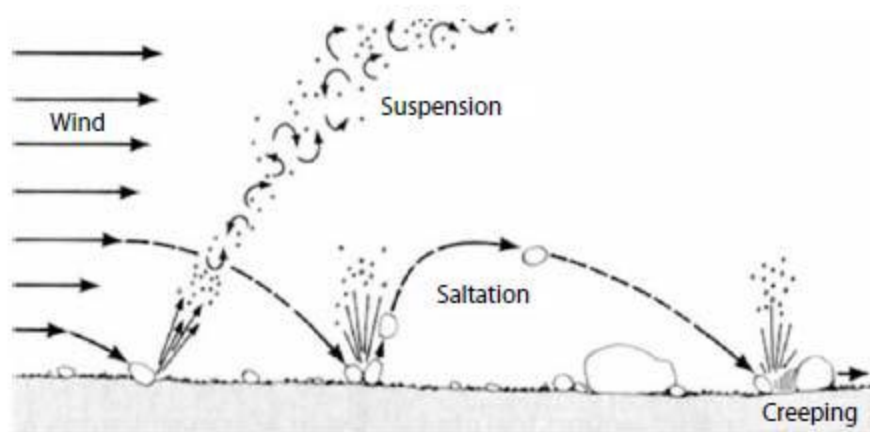
Megfigyelések és laboratóriumi kísérletek során a kutatók azt tapasztalták, hogy a szemcsék méret és darabszám szerinti eloszlása valamint a talaj és a légköri karakterisztikák között nem lineáris az összefüggés (*Bagnold et al., 1941*). A szél sebességének el kell érnie egy kritikus határt, ez alatt a határsebesség alatt meg sem valósulhat a szemcse légkörbe jutása. Száraz és félszáraz környezet esetében ennek a határsebességnek az értéke legalább 6 m/s kell hogy legyen (*Nagy, 2009*). Ez a sebesség biztosít kellő mennyiségű energiát ahhoz, hogy a talajon lévő szemcséket mozgásba hozza, és a levegőbe emelje a légmozgás. A határsebesség kizárólag a részecske átmérőjétől, és a levegő, valamint a részecske sűrűségétől függ. Ez az energia az ütközés során adódik át (levegő molekula, avagy már mozgásban lévő porszemcsék ütközése során) a talajon lévőnek. Ütközés esetén a levegőben lévő részecskék mozgási energiája és a részecskék között ható kohéziós erő játszanak fontos szerepet az energia átadásában. A határsebességből származó mozgási energiát így a talaj típusa, szerkezete (felszínborítottság, domborzat, felszínen található sziklák), felszín érdessége, talaj nedvességtartalma határozza meg (*Shao, 2000*). Ezek a tényezők azonban nem csak a por légkörbe kerülésében játszanak alapvető szerepet, hanem a felszín erodálódásában is, azaz a homokszemcsék létrejöttében is (*Schepanski, 2009*).

A por szemcséinek méret szerinti eloszlása a gravitációs erő és a molekulák között fellépő kohéziós erőtől függ, utóbbi pedig az ásványi összetétellel van összefüggésben. Mivel a gravitációs erő nagysága függ a részecske tömegétől, illetve a tömeg a mérettel is arányos, ezért a kettő összefüggésben van. Így tehát a méret szerinti eloszlás és a

határsebesség közötti kapcsolat egyértelmű (*Marticorena and Bergametti, 1995*).

Bagnold (1941) három csoportba osztotta a részecskék mozgását méretük szerint (2. ábra):

1. lebegtetés: 60 μm alatti átmérőjű részecskék,
2. ugráltatás: 60 és 2000 μm közötti átmérőjű részecskék,
3. görgetés: 2000 μm feletti átmérőjű részecskék.



2. ábra: A részecskemozgások osztályozása (*Bagnold, 1941*)

1. lebegtetés:

A parányi (60 μm átmérő alatti) részecskéket a szél, illetve a turbulens örvények könnyen mozgásba lendítenék, majd tovaszállítanák (*Shao, 2001*). Azonban a finomszemcsék közötti kohéziós erő olyan erős, hogy ezt megakadályozza, így ezek a parányi részecskék csupán a szél, illetve turbulencia hatására nem tudnak a levegőbe kerülni. Amelyik kis átmérőjű szemcse a levegőbe jut, az már át tudja szelni akár az Atlanti-óceánt is (*Schepanski, 2009*).

2. ugráltatás:

Ebbe a csoportba tartozó homokszemcsék a leghatékonyabbak a részecskék levegőbe való juttatását illetően. Legkönnyebben a 60 és 100 μm közötti átmérőjű szemcsék tudnak a talajról a levegőbe kerülni, e tekintetben ez a szemcseméret a legoptimálisabb (*Bagnold, 1941; Iversen and White, 1982*). Ezeknek a részecskéknek már nagyobb a súlyuk, így a gravitációs erő miatt pár perc, esetleg pár óra elteltével a földre csapódnak (*Duce, 1995*). Becsapódásukkal hozzájárulnak ahhoz, hogy a kisebb átmérőjű, finomabb szemcsék a légkörbe kerüljenek (*Schepanski, 2009*). A 60–2000 μm közötti részecskék 1–2 dm-től

kezdve akár néhány méteres magasságig is emelkedhetnek (*Marticorena and Bergametti, 1995; Pacyna, 1995*). Ezzel együtt azonban a 60 μm -nél nagyobb szemcseméretű részecskék nem tudnak nagy távolságokat megtenni a légkörben a nagyobb tömegük miatt.

3. görgetés:

A 2000 μm -nél nagyobb átmérőjű szemcséket a szél már nem tudja felemelni, ennek nyomán horizontális mozgásuk a jellemző. Csupán a talaj közelében, a nagyon erős nyíróerők hatására minimálisan görgetve haladnak.

4.2. A por transzportja

A por szállítása helyi, illetve regionális és nagy skálájú szelekkel történik (*Schepanski, 2009*). A 60 μm -nél nagyobb részecskék pár napon belül kikerülnek a légkörből: száraz ülepedéssel, vagy pedig a felhő és csapadékelemek jóvoltából nedves ülepedéssel (*Duce, 1995*). A 2000 μm -nél nagyobb szemcsék pedig nem is tudnak a légkörbe kerülni, így egyedül a 60 μm -nél kisebb átmérőjű finom szemcsék juthatnak a forrásterületüktől messzebb. A részecskék légkörben való áramlása közben változik áramlásuk magassága a légkör sajátosságai miatt. Többek között ez összefüggésben van a határréteg magasságával is (*Schepanski, 2009*). A szállítás során reakcióba léphetnek a légkörben található többi légköri szennyezőanyaggal is. Emellett még fontos szerepet játszanak a felhő- és csapadékképződésben is, így mire a felszínre érkeznek, már teljesen más optikai, kémiai és fizikai tulajdonságokkal rendelkezhetnek, mint amikor a troposzférába kerültek.

4.3. A por depozíciója

Az ásványi por kétféleképpen kerülhet ki a légkörből: száraz, illetve nedves ülepedéssel (*Nagy, 2009*). A száraz ülepedés esetében a nagyobb szemcseméretű részecskék (2 mikrométer feletti átmérő) főként a gravitáció hatására hullanak a felszínre, míg a kisebb cseppecskék (2 mikrométer alatti átmérő) a turbulens mozgások hatására kerülhetnek ki a légkörből, növényzetnek, felszíni sziklának, egyéb akadálynak ütközve. A nedves ülepedésnek szintén két fajtáját különböztetjük meg: az egyik eset az, amikor az esővel együtt érik el a földfelszínt az ásványi részecskék. Ez úgy történik, hogy a

csapadékelemek kiesnek a felhőből és útjuk közben a felszín felé találkoznak a porszemcsékkel, és sáros esőt okoznak. A másik eset pedig, amikor az ásványi részecskék felhő- és csapadékképző elemként szolgálnak, csepp képződik rajtuk, vagy a csapadékelemek képződésénél összeolvadnak egy cseppel (Schepanski, 2009).

5. Portranszportnak kedvező szinoptikai helyzetek

Európa mediterrán térségében az év 30–37%-ában található a légkörben jelentős mennyiségű szaharai por. Ugyanez a mutató Európa északnyugati területeit tekintve mindössze 20% (Pey et al., 2013). Évente eltérő irányú a szállítás fő útvonala az évszakok, az éppen domináns szelek változásának köszönhetően. Télen, amikor az ITCZ (Intertropical Convergence Zone) délebbre található, akkor az ÉK-i passzát a homokot DNy-i irányba sodorja Amerika irányába a Karibi-térség felé. Nyáron, amikor a termikus egyenlítő északabbra tolódik, már a közép-troposzférikus szaharai légréteg szállítja mintegy 5 km magasan a port, melyet a Száhel-övezetben kialakult erős konvekció és felszíni szél kavart fel. Európa tekintetében egy Észak-Afrika térségében tartózkodó ciklon előoldala, Csád északi részén elterülő Bodele síkság feletti depresszió, avagy a közel-keleti központtal rendelkező anticiklon hátoldala teremthet kedvező feltételeket a sivatagi por szállítására (Pey et al., 2013).

5.1. Mediterrán ciklonok

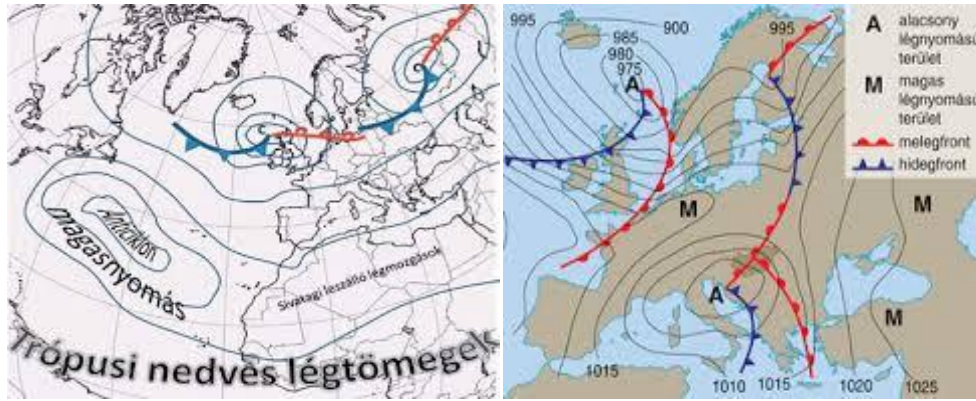
A ciklonok Földünk éghajlatát, illetve különböző területeinek időjárását nagyban befolyásolják. Alacsony légnyomású képződmények, melyek az útjukba eső területekre mindig változékony időjárást hoznak, az energiatranszport is bennük, általuk valósul meg. A mediterrán ciklon a ciklonok egyik fajtája, mint ahogy arról a neve és a definíció is árulkodik. Nevét a keletkezése helyéről kapta: mediterrán ciklonnak nevezünk minden, a mediterrán térségben képződött, vagy ide áthelyeződött, zárt izobárokkal rendelkező, szinoptikus, illetve szubszinoptikus skálájú alacsonynyomású képződményt.

A mediterrán ciklonok képződésének fő színterei a Földközi-tenger medencéjében található öblök, beltengerek (3. ábra).

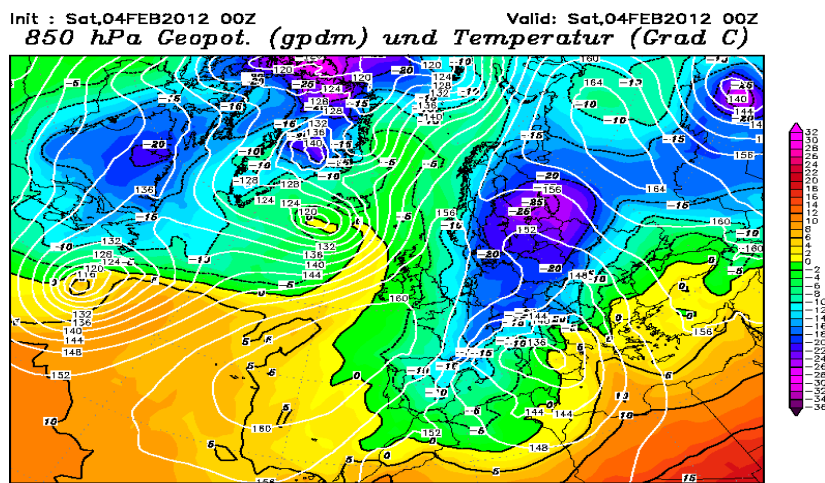


3. ábra: A Földközi-tenger medencéje (forrás: Google)

Az egyik legismertebb képződési hely a Genovai-öböl; az itt keletkező genovai ciklonok hazánkban télen nagyobb havazásokat is okozhatnak. Emellett természetesen még számos helyen képződhetnek, mint például a Ligur-tengeren, Adriai-tengeren, a Baleár-tengeren. Fontos megemlíteni a hazánktól keletre található képződési helyeket is, noha ezen a ciklonok esetében jóval ritkább az előoldali helyzetet Magyarországon. Ilyen térség például az Égei-tenger, vagy a Fekete-tenger térsége. A mediterrán ciklonok képződése a hideg száraz levegő, illetve a Földközi-tenger felett található meleg, páradús levegő keveredéséhez köthető, amely létrejöhet atlanti ciklonok révén, az Alpokat nyugat felől megkerülve (4. ábra), illetve kelet felől beáramló hideg levegő révén is (5. ábra).

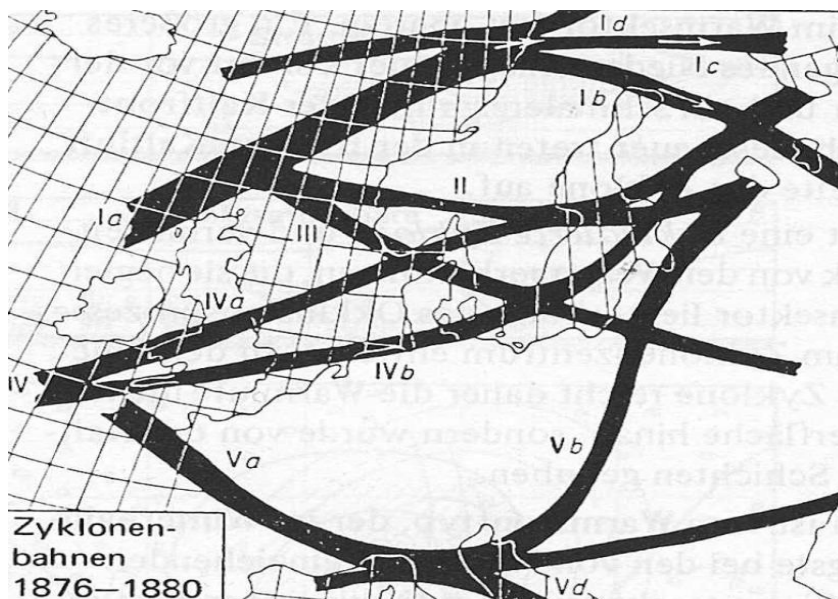


4. ábra: Mediterrán ciklonok keletkezése atlanti ciklonok által (forrás: Google)



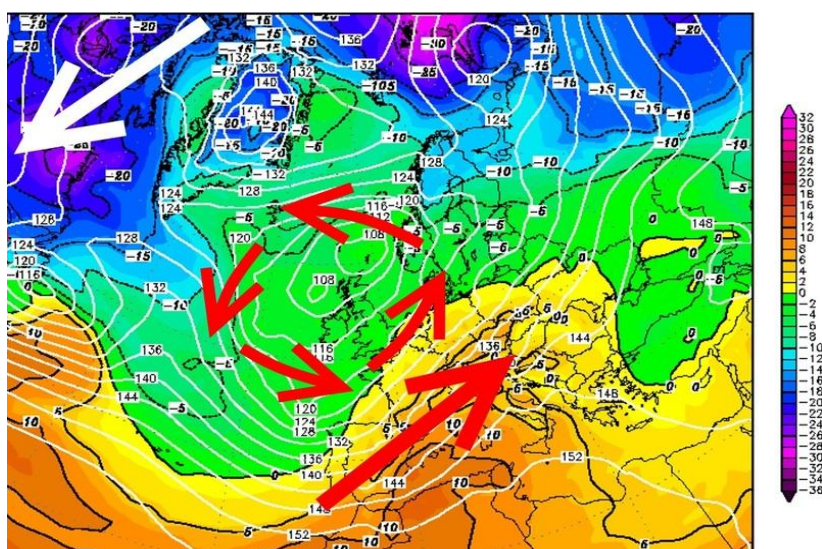
5. ábra: Mediterrán ciklon keletkezése kelet felől betörő hideg által (forrás: www2.wetter3.de)

A mediterrán ciklonok túlnyomórészt az október–március időszakban jellemzőek, mivel nyáron az atlanti ciklonpályák sokkal északabbra tolódnak, így a hideg sarkvidéki levegő nem tud eljutni a Mediterráneumba. A ciklonok pályáját a Földközi-tenger hűtőpótlása adja, valamint szárazföld fölé érve sem feltétlenül veszítenek erejéből. Életük folyamán erősödhetnek, gyengülhetnek (mélyebbek, sekélyebbek lehetnek). Keletkezésük helye igen közel van a Kárpát-medencéhez, ezért pályájukat nagyon nehéz előre meghatározni. Osztályozásuk is megfigyeléseken alapszik: Hirsch például azt figyelte, hogy hat magyarországi körzet legalább egyikében a napi csapadékösszeg területi átlaga elérte-e az 5 mm-t (*Hirsch and Babocsai, 2013*). Mások a ciklon középpontja, illetve a pályája alapján osztályozták a mozgásrendszereket. Az egyik legelterjedtebb felosztás a van Bebber által készített besorolás (6. ábra) (*van Bebber, 1981*)



6. ábra: Van Bebbler féle osztályozás (forrás: Google)

A pálya osztályozása alapján egyes területek kerülhetnek a ciklon előoldalára, vagy a hátoldalára, melyben a ciklon mozgása is jelentős szerepet játszik. Egyes régiók így akár előoldalra kerülhetnek, retrográd pálya esetén ennek ellentettje is bekövetkezhet. De mit is jelent ez a valóságban, miért fontos a szaharai por útvonalát tekintve?



7. ábra: Ciklon elő- és hátoldala (forrás: Google)

A ciklon hátoldalán (a 7. ábrán a fehér nyíllal jelölt terület) a hideg szektor található, ahova hideg sarkvidéki eredetű levegő áramlik. Így ezeken a területeken jellemzően északias a szélirány, illetve téli időszakban megjelenhet a szilárd

halmazállapotú csapadék. Az előoldal esetében viszont (a 7. ábrán a vastagabb piros nyíllal jelzett terület) az áramlás inkább délies, az említett zónában melegebb levegő áramlik a térségbe. Télen jellemzően eső, nyáron pedig záporok, zivatarok alakulhatnak ki ebben a szektorban a ciklonon belül. Ugyancsak ebben az esetben lehet kedvező a saharai por szállítására a szélmező. Fontos, hogy a teknő elég mély legyen ahhoz, hogy afrikai forrástól egészen Európáig nyúljon, illetve, hogy a szélesség is elegendő legyen a különböző szemcsék felkapásához és transzportjához.

6. A HYSPLIT modell

A HYSPLIT (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model) modellt az Amerikai Óceán- és Légkörkutató Hivatal Légkör-kutató Laboratóriuma (NOAA ARL) fejlesztette ki, és üzemelteti jelenleg is. A modell, illetve az archív adatok nyilvánosak, tehát ingyenesen elérhetők a <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php> weboldalon. A Hysplit modell egy olyan korszerű rendszer, ami egyszerű trajektóriák modellezése mellett a szennyező anyagok terjedését és ülepedését is képes szimulálni (Sábitz, 2012). A modell rácson tárolt adatokat használ a három konform vetület egyikéből (Polar, Lambert, Mercator) (Sábitz, 2012). Nagy előnye, hogy alapvetően Lagrange-i modell, de ötvözi az ismert euleri és Lagrange-i szemléletmódokat: nyomon követi az adott légrést, tehát számításba veszi az advekciót és a diffúziót is, emellett figyelembe veszi az adott légrést térbeli helyét is egy háromdimenziós rácsba vetítve, vagyis bármely térbeli pontban meghatározhatók az egyes légszennyező anyagok koncentrációi is (Sábitz, 2010).

A Hysplit modell mintegy három évtizedes múltat tekint vissza, mely alatt jelentős fejlődésen ment keresztül. A modell első verzióját Draxler és Taylor fejlesztették ki, ami rádiószondás méréseken alapult, diszperziós része pedig abból indult ki, hogy nappal egyenletes átkeveredés van, amit éjszaka az átkeveredés megszűnése vált fel (Draxler and Taylor, 1982). A szélnyírás okozta terjedések számításához éjszakára be kellett vezetni a nappali réteg vékonyabb rétegekre való feldarabolódását. Az 1980-as évek végére megszületett a második verzió, amelyben már változó keveredési erősséget vezettek be, ami térbeli és időbeli terjedési profilon alapult (Draxler and Stunder, 1988). A harmadik verzióban a rádiószondás adatokat lecserélték más meteorológiai adatbázisból kapott adatokra (rácsokban tárolt adatok), valamint numerikus időjárás-előrejelző modellekből kapott rövidtávú előrejelzésekre (HYSPLIT_3 –Draxler, 1990; 1992). A jelenlegi verzió,

amelyet Draxler és Hess dolgozott ki, két fejlesztéssel bővült: az advekción algoritmus időbeli interpolációval egészült ki, valamint egy háromdimenziós részecske-diszperzió rutin került be a koncentráció-számításba (*HYSPLIT_4 - Draxler and Hess, 1997*)

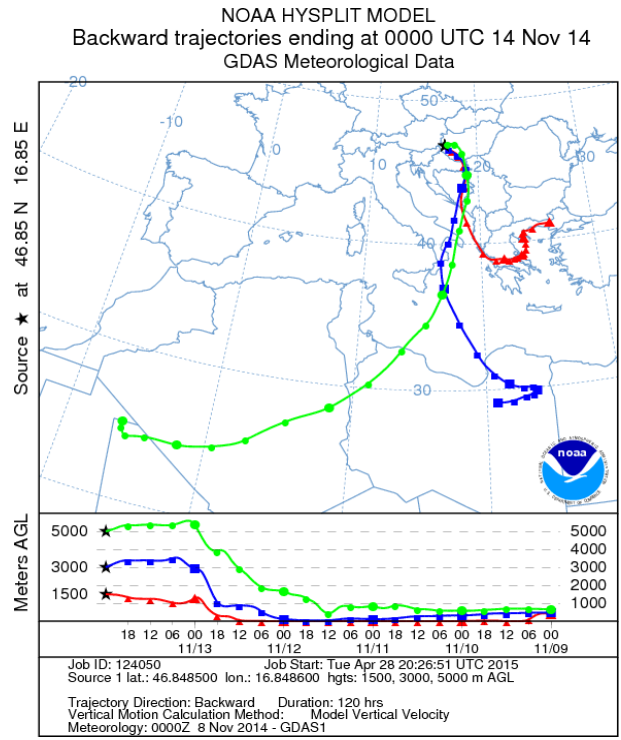
A modellt az ELTE Meteorológiai Tanszékén is alkalmazták, például a Hysplit modell trajektória futásait bemutató munkában (*Szabó, 2004*), valamint a szén-dioxid koncentrációjának változását prezentáló tanulmányban (*Szabó, 2007*). (*Sábitz, 2010, 2012*) vírusok terjedésének vizsgálatára, míg (*Takács, 2013*) a 2012. április 29-i bugaci erdőtűz modellezésére használták fel a modellt.

Kutatásom során a Magyarországra érkező légrész pályáját a Hysplit modell archívumában elérhető, időben visszafelé haladó, ún. backward trajektóriák segítségével követtem nyomon tíz éves adatsort felhasználva négy magyar városra nézve (Budapest, Zalaegerszeg, Pécs, Miskolc).

7. Eredmények

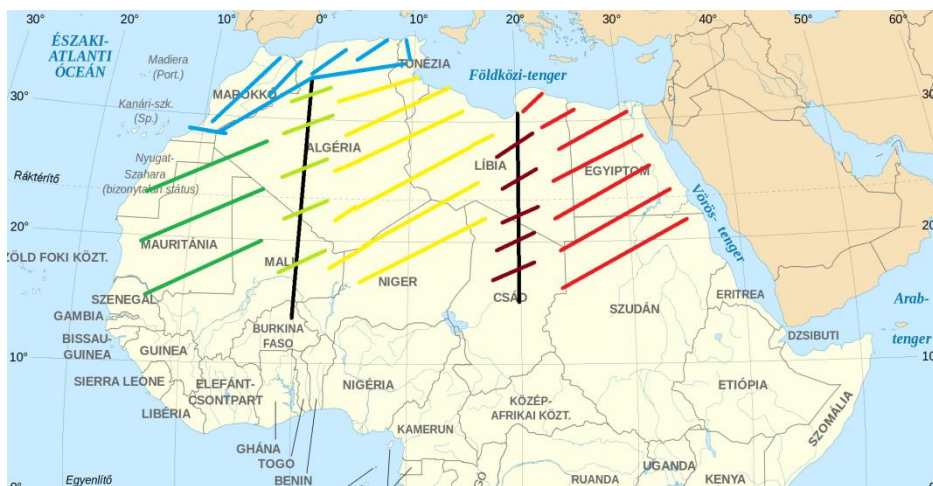
7.1. Trajektóriák elemzése, statisztikai vizsgálatok

A Szaharából Európába érkező sivatagi homok vizsgálatára eddig számos tanulmány született. Célom egy Magyarország területére vonatkozó, minél átfogóbb statisztika és készítése volt a poros eseteket illetően. Ezért tanulmányomban a Hysplit modell segítségével egy 10 éves adatbázist készítettem, melyet úgy nyertem, hogy a modellt 4 városra (Budapest, Zalaegerszeg, Pécs, Miskolc), valamint minden egyes város esetében 3 magasságra (1500 m-re, 3000 m-re, 5000 m-re) futtattam. (8. ábra)



8. ábra: Hysplit modell backward trajektóriája

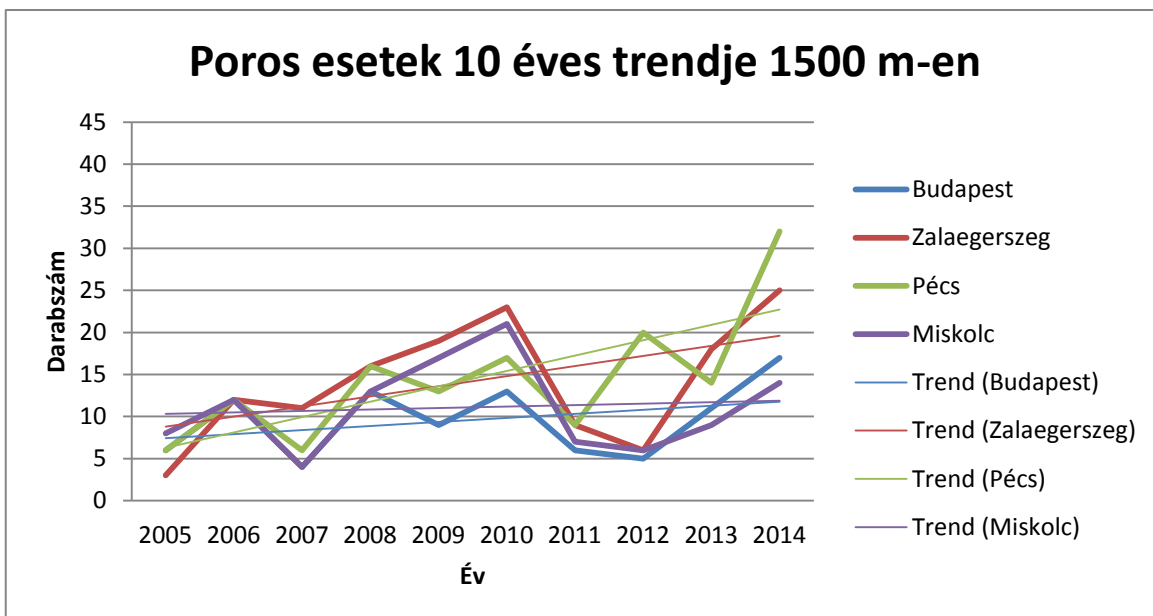
Az egyes eseteket tekintve bevezettem egy forrásterület alapú osztályozást, mégpedig hogy az adott városba, adott magasságban érkező szaharai légtömegek, illetve a por a Szahara mely részéről származnak. Ennek érdekében a Szahara területét négy fő részre osztottam (illetve még plusz kettő átmeneti zónára, tehát összesen hat részre): az Atlasz-hegység területére (9. ábra – térképen kékkel jelölt rész), Nyugat-Szahara területére (a kezdő hosszúsági körtől – 0° hosszúsági körtől – nyugatra található területek, melyet sötétzölddel jelöltem), Közép-Szahara területére (a kezdő hosszúsági kör és a 20° közé eső terület – sárgával jelölve), Kelet-Szahara területére (20° hosszúsági körtől keletre, piros színnel jelölve). Számottevő alkalommal előfordultak olyan pályavonalak is, amelyek több területet érintenek (Nyugat-és Közép-Szahara, Kelet-és Közép-Szahara, mely két átmeneti zóna, világoszöld, illetve bordó színekkel emeltem ki). (9. ábra)



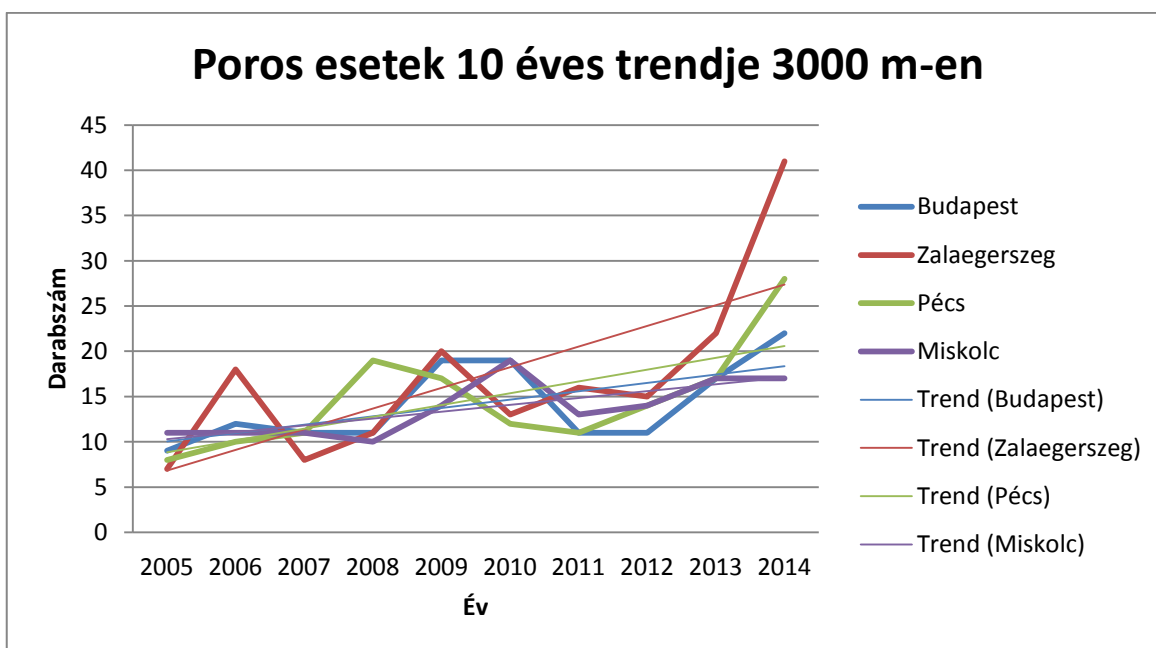
9. ábra: Az elemzések során figyelembe vett forrásterületek

A fentebb említett szempontok alapján a Hysplit modellt futtatva ún. backward trajektóriák segítségével, 120 órára visszamenőleg nyomon követtem az elmúlt 10 év összes napjára vonatkozóan a vizsgált 4 magyar városba érkező légtömegek útját. Kiválasztottam azokat a napokat, amikor a légtömegek a megfigyelt 3 magasság közül legalább az egyik esetében a Szahara (illetve az Atlasz-hegység) területéről, alacsonyabb magasságából (1000 m alatt) indultak. Szaharai por transzportja ugyanis ezen alkalmakkor jöhet létre megfelelő sebességű szél esetén. Összegyűjtöttem e kritériumoknak megfelelő eseteket és rendszereztem egy táblázatban a 10 évre vonatkozó megfigyeléseimet (2005. január 1.–2014. december 31.). Szemléltető példának az adatsorból kiragadtam egy egyhónapos részletet, mely szakdolgozatom végén a Függelék fejezetben megtekinthető (1. táblázat). A teljes időszakra, minden egyes hónapra vonatkozó eredmények táblázatos formában elérhetők a Meteorológiai Tanszék honlapján: <http://nimbus.elte.hu/kutatas/szaharaipor/> weboldalon.

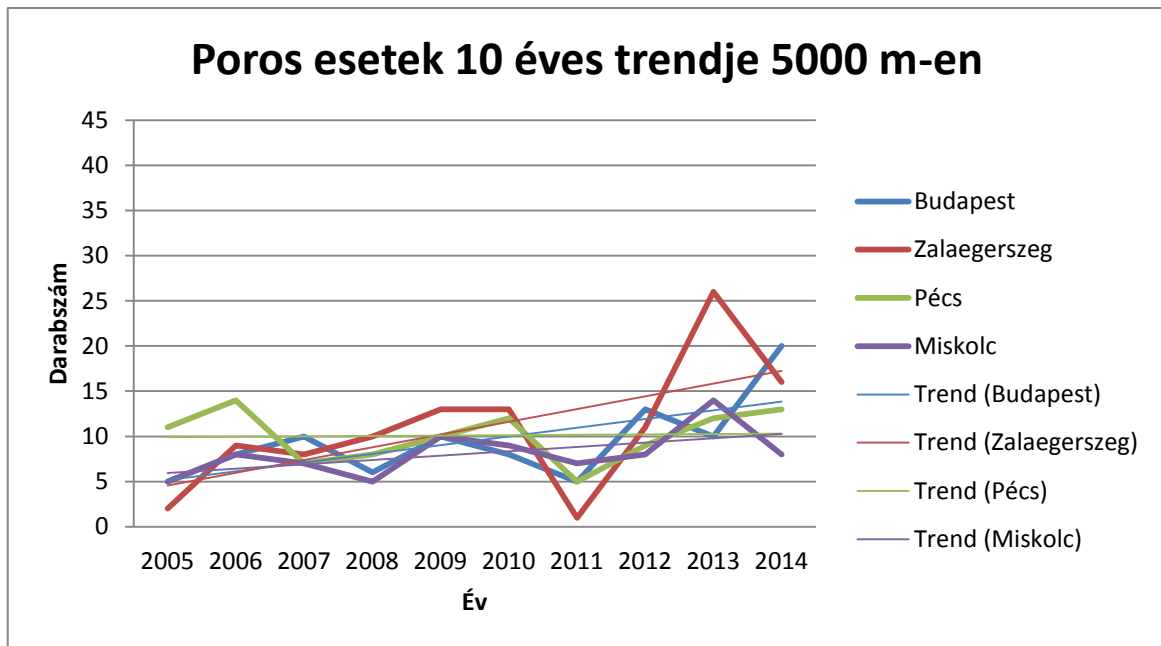
Megvizsgálva a 10 éves adatsort, látható, hogy minél délnyugatabbra helyezkedik el az adott város, annál jobban érvényesül a mediterrán hatás, illetve annál nagyobb az összes vizsgált magassági szintet nézve a kedvező trajektóriák száma (10–12. ábra). Mind a négy városra nézve megállapíthatjuk, hogy az elmúlt tíz év folyamán ugyan nem monoton, de növekedett a portranszportnak kedvező pályavonalak száma. A görbék reprezentálják a szárazabb, illetve a csapadékosabb éveket is (2007, illetve 2011 jellemzően szárazabb év volt az átlagosnál, míg például 2010 kiugróan csapadékos év volt), ezáltal a mediterrán hatás mértékét is az adott években (több, illetve kevesebb napig határozta meg az adott évben mediterrán ciklon hazánk időjárását) (10–12. ábra).



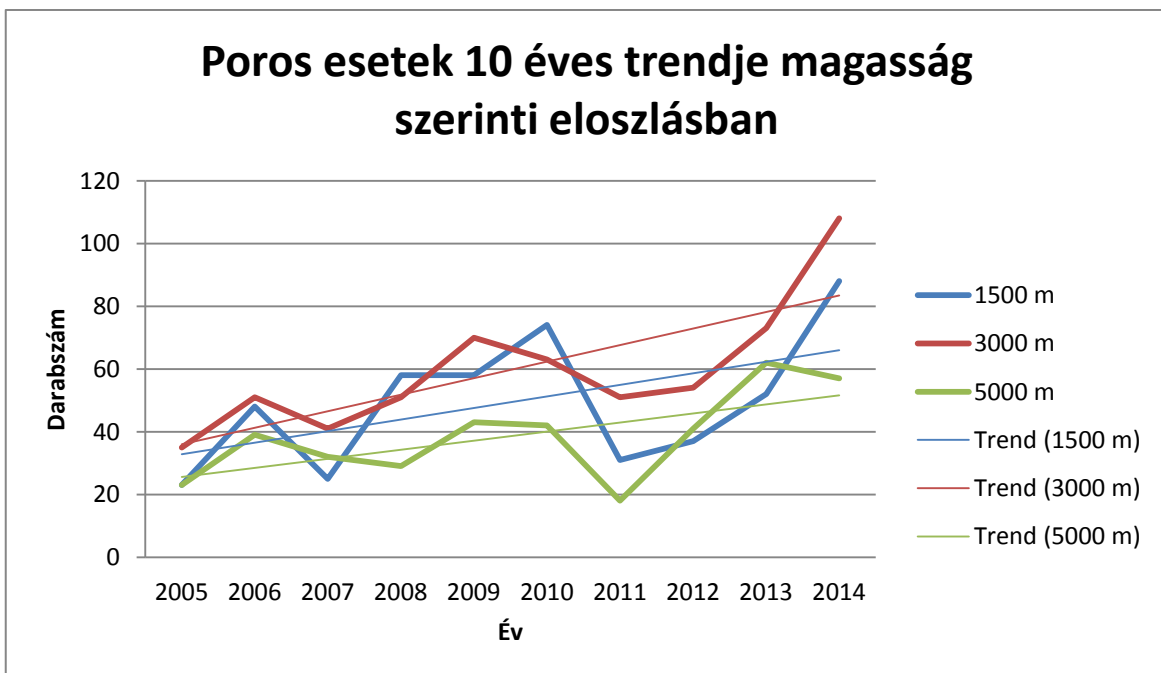
10. ábra: Poros esetek számának alakulása az elmúlt 10 évben 1500 m-es magasságban



11. ábra: Poros esetek számának alakulása az elmúlt 10 évben 3000 m-es magasságban



12. ábra: Poros esetek számának alakulása az elmúlt 10 évben 5000 m-es magasságban

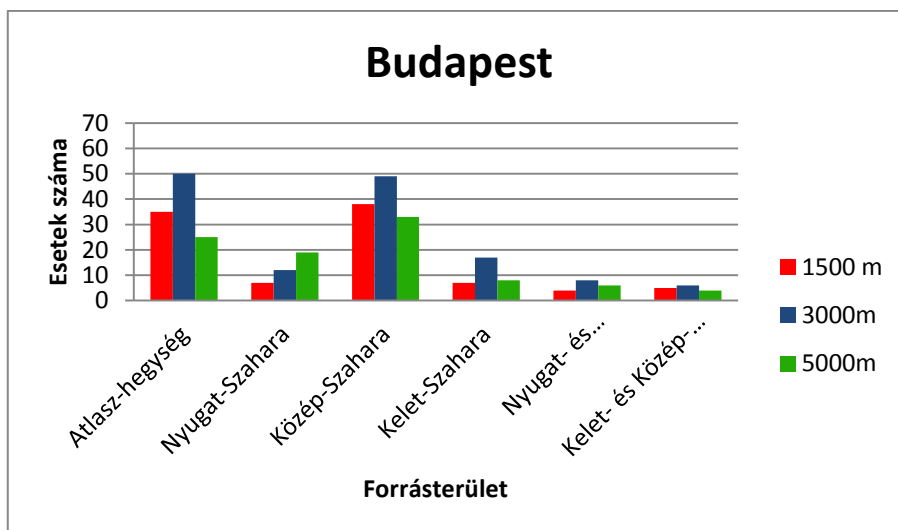


13. ábra: Az általunk vizsgált három érkezési magasságon megfigyelt portranszportnak kedvező esetek száma és azok lineáris trendje

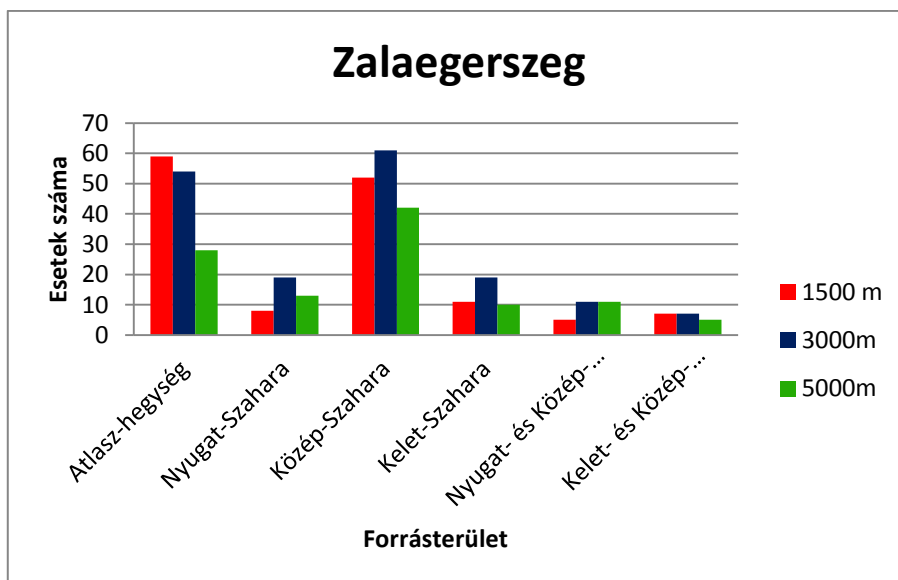
Érkezési magasság szerint csoportosítva a portranszportnak kedvező trajektóriák számát is egyértelmű a növekvő tendencia (13. ábra).

Munkánk során arra a kérdésre is kerestük a választ, hogy vajon a Szahara mely részéről származhat a hazánk területére érkező sivatagi por legnagyobb hányada. Az

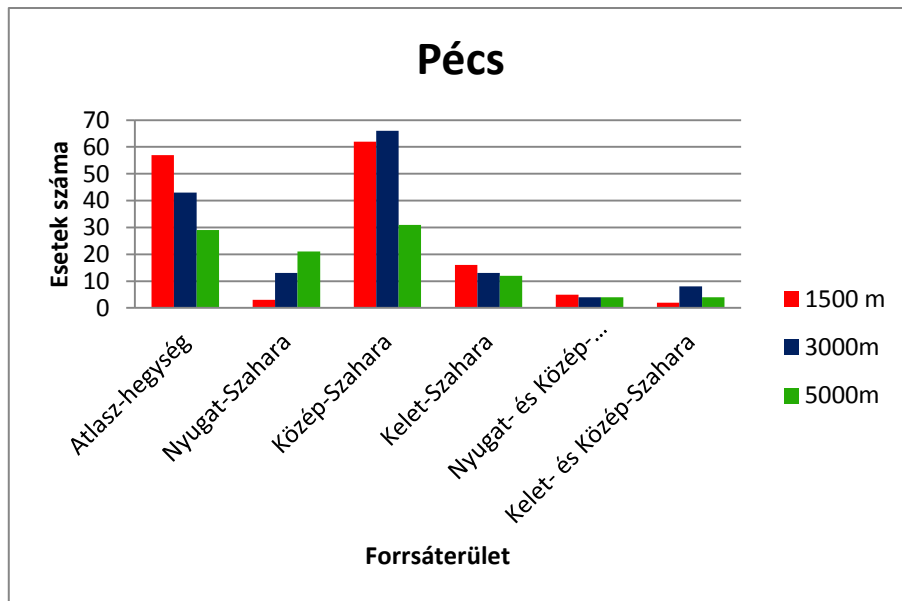
elemzést követően arra az eredményre jutottunk, hogy a Közép-Szahara területéről (0° és a 20° hosszúsági körök közötti területről), azon belül is főként Algéria délkeleti, illetve Líbia nyugati részéről. (14–17. ábra). E tekintetben szintén egyezést tapasztaltunk az összes vizsgált városra.



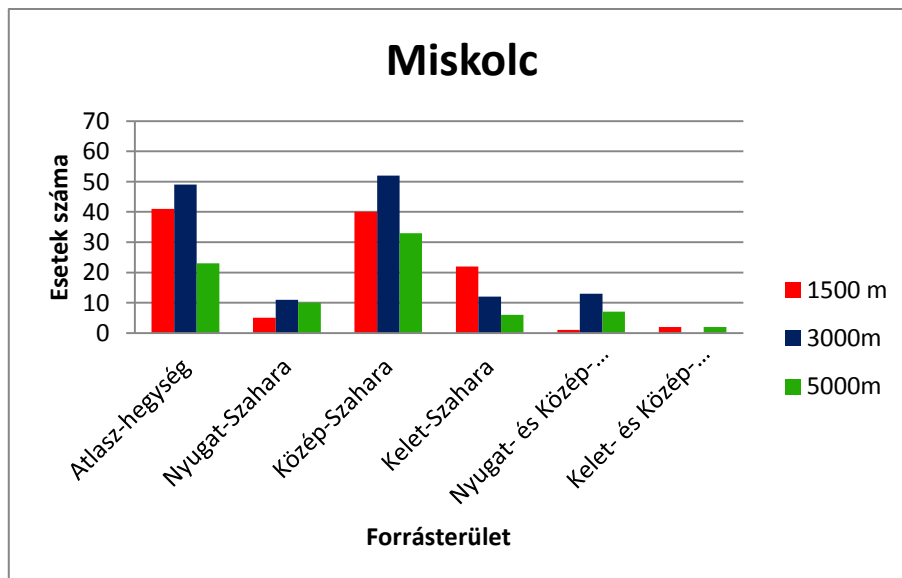
14. ábra: Budapestre különböző magasságban érkező, portranszportnak kedvező trajektóriák forrásterületenkénti eloszlása a 2005 és 2014 közötti időszakban



15. ábra: Zalaegerszegre különböző magasságban érkező, portranszportnak kedvező trajektóriák forrásterületenkénti eloszlása a 2005 és 2014 közötti időszakban



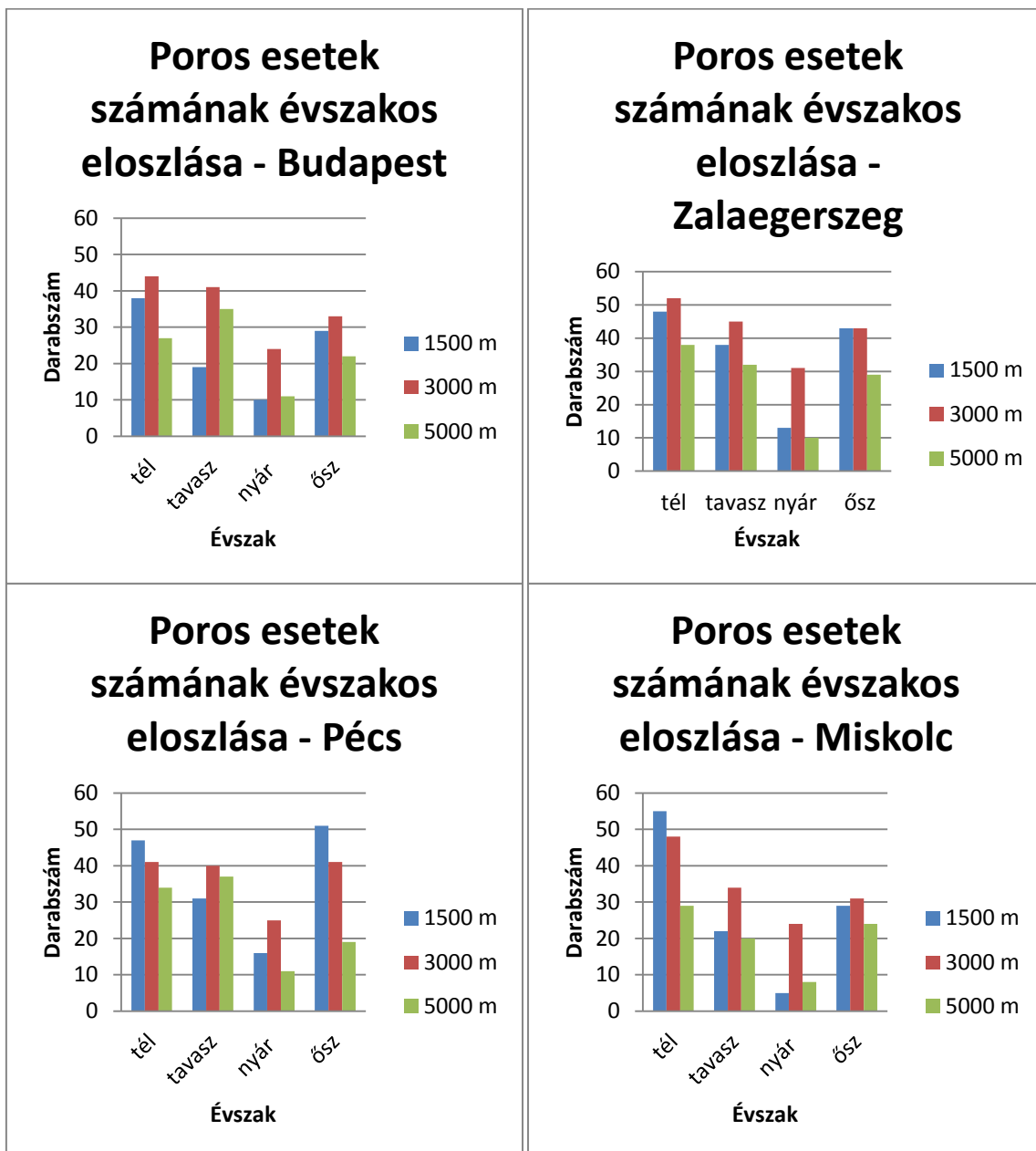
16. ábra: Pécsre különböző magasságban érkező, portranszportnak kedvező trajektóriák forrásterületenkénti eloszlása a 2005 és 2014 közötti időszakban



17. ábra: Miskolcra különböző magasságban érkező, portranszportnak kedvező trajektóriák forrásterületenkénti eloszlása a 2005 és 2014 közötti időszakban

A kapott adatsort évszakok szerint nézve látható, hogy a legkevesebb portranszportnak kedvező trajektória az elmúlt években a nyári hónapokban volt a legkevesebb, a legnagyobb számban pedig késő őszi, téli, illetve kora tavaszi hónapokban fordult elő (18. ábra). A legtöbb alkalommal a 3000 m-es magasságon érkeztek a saharai eredetű légtömegek a vizsgált időszakban a 3 magassági szint közül (14–17. ábra, illetve 18. ábra). E megfigyelés szintén alátámasztja, hogy mediterrán ciklonok áramlási

rendszere jelentős mértékben hozzásegítheti a szaharai por hazánk irányába történő transzportját. E képződmények ugyanis pontosan az említett maximumok időszakában képződnek a legnagyobb számban a Földközi-tenger térségében.



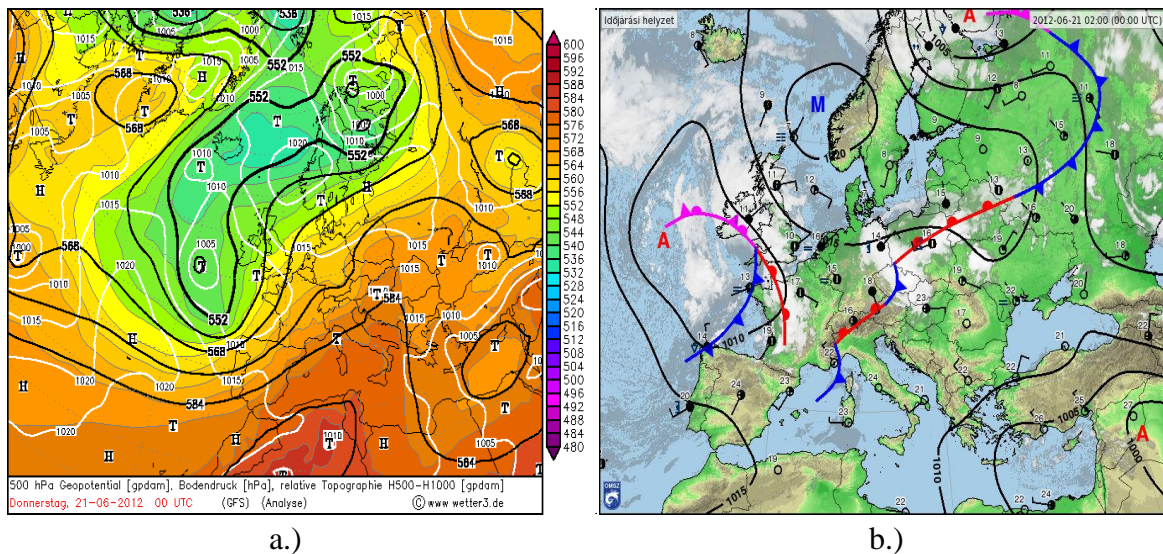
18. ábra: Az egyes városokba különböző magasságokban érkező, portranszportnak kedvező trajektóriák évszakos eloszlása

7.2. Eredmények bemutatása esettanulmányokon keresztül

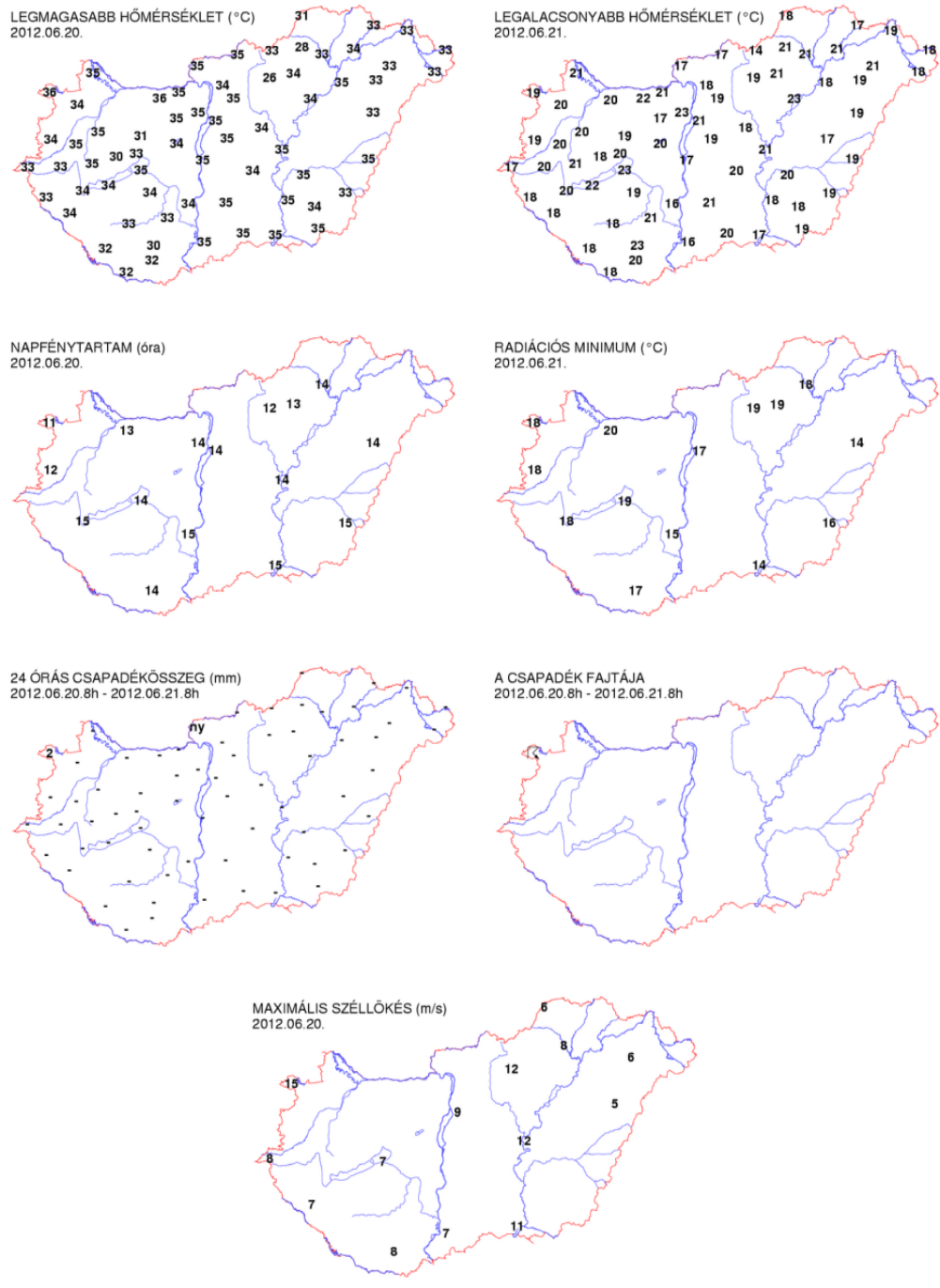
7.2.1. Esettanulmány: 2012. június 21–22.

Első esetként a 2012. június 21–22-i poros helyzetet mutatom be.

Szinoptikai helyzet: Skandinávia északkeleti részén egy ciklon helyezkedett el (19a. ábra), melynek hullámzó frontrendszere határozta meg Európa időjárását. A frontrendszer 02:00 UTC-kor a Milánó–Salzburg–Prága–Varsó vonalon húzódott (19b. ábra), az ettől keletebbre fekvő területeken, a délies áramlásnak köszönhetően, forró nyári idő volt jellemző. Hajnalban 16–23°C-ig hűlt a levegő, míg napközben 31 és 36 °C közé emelkedett a hőmérséklet. (20. ábra) Napközben tehát túlnyomórészt napsütéses, száraz időben volt részünk, legfeljebb az északnyugati határ közelében alakult ki helyenként zápor, zivatar.



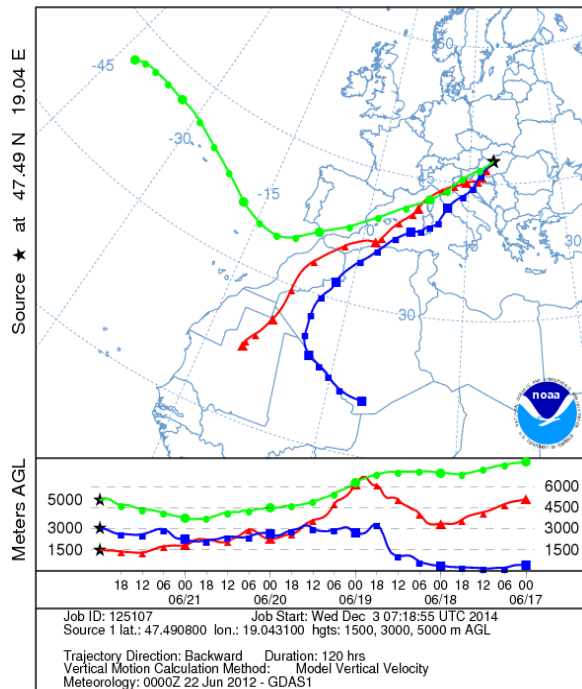
19. ábra: 2012. június 21. szinoptikai helyzet Európában (forrás: www2.wetter3.de, illetve OMSZ)



A kiadványban szereplő adatok csak elsődleges ellenőrzésen estek át, ezért hivatalos igazolásban nem használhatók.

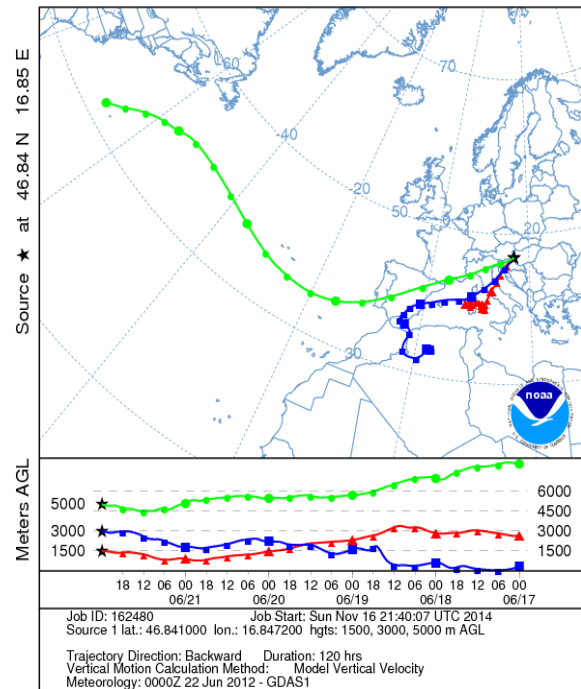
20. ábra: A légköri állapotathatózók értékeinek alakulása 2012.06.21-én (forrás: OMSZ)

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 22 Jun 12
GDAS Meteorological Data



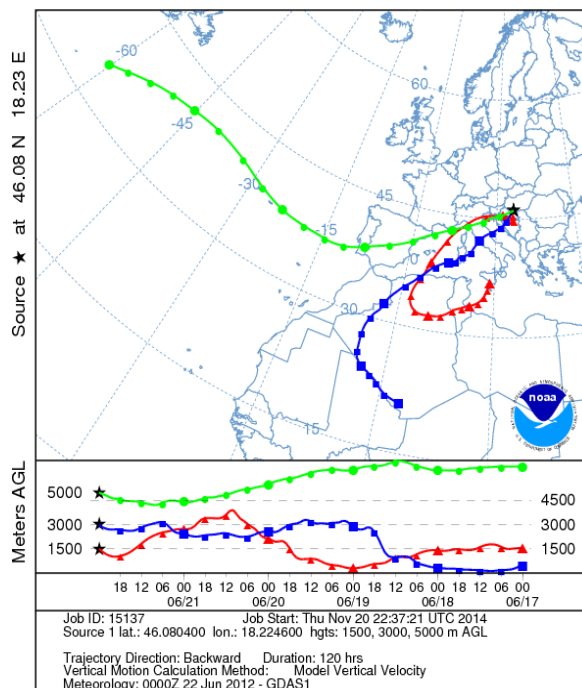
Budapest

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 22 Jun 12
GDAS Meteorological Data



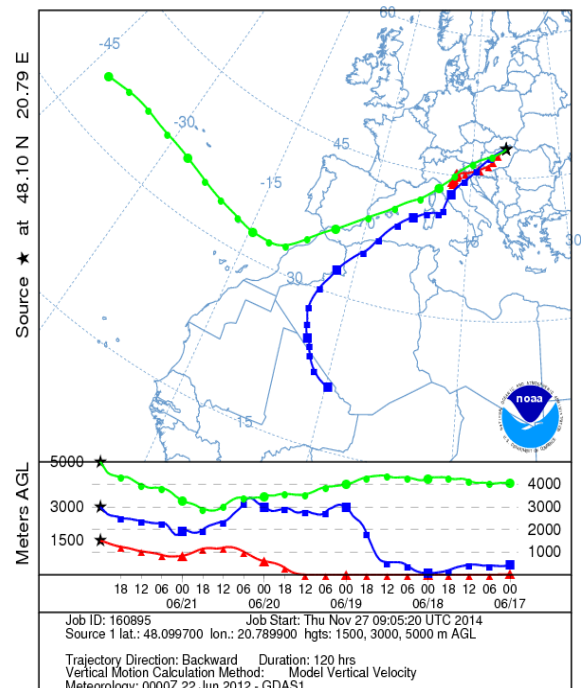
Zalaegerszeg

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 22 Jun 12
GDAS Meteorological Data



Pécs

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 22 Jun 12
GDAS Meteorological Data



Miskolc

21. ábra: HYSPLIT modell futtatásának eredményei. Az ábrákon az ún. backward trajektóriák láthatók négy városra nézve 2012.06.22-én 00:00 UTC-kor. Ez a négy város rendre: Budapest, Zalaegerszeg, Pécs, Miskolc (forrás: NOAA)

Az egyes magyar városokra 120 órára visszamenőleg három különböző magasságra nézve (1500 m-es, 3000 m-es és 5000 m-es magasságban), ún. backward trajektóriákat (időben visszafelé haladó trajektóriákat) futtattam. Június 21-én Budapestre, Zalaegerszegre és Pécsre a Közép-Szahara területéről áramlott a levegő, és egyúttal vele a por is. A száraz időnek köszönhetően a magasabb rétegekben (Budapest fölé 5000 m körül, a dunántúli városokba 3000 m körül) érkezett. Az ezt követő napon (22-én) pedig már mind a négy magyar város feletti légrétegekben jelen volt a por (21. ábra). A forrásterület valamelyest nyugatabbra tolódott, Zalaegerszeg esetében pedig északabbra. Ezen a napon egységesen körülbelül 3000 m-es magasságban történt a transzport, naplementekor szabad szemmel is megfigyelhető volt (22. ábra).



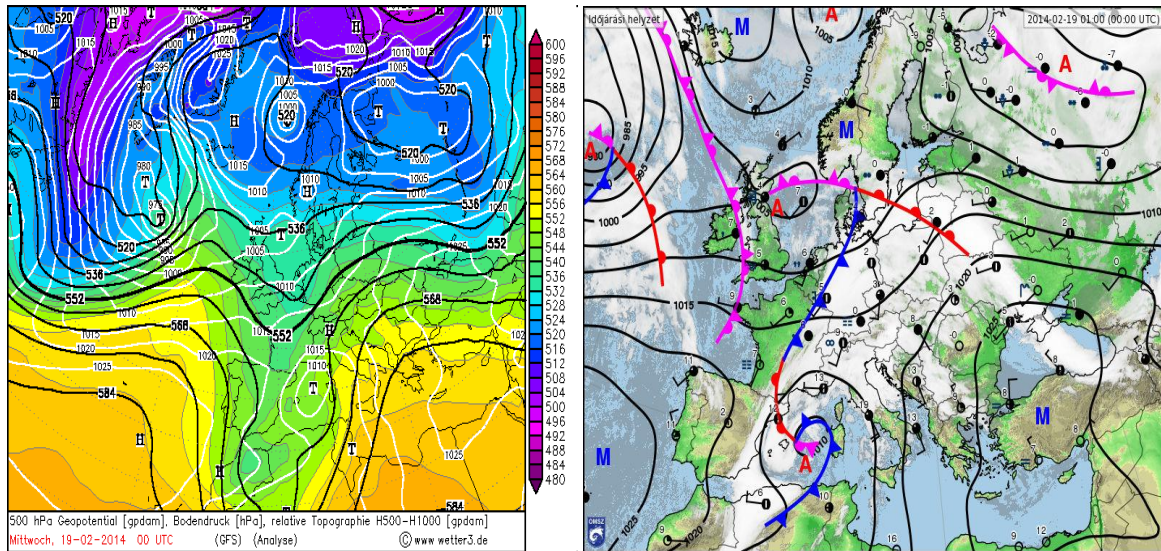
22. ábra: A naplementében megfigyelt szaharai por (Kovács Natália fotója)

7.2.2 Esettanulmány: 2014. február 19–21.

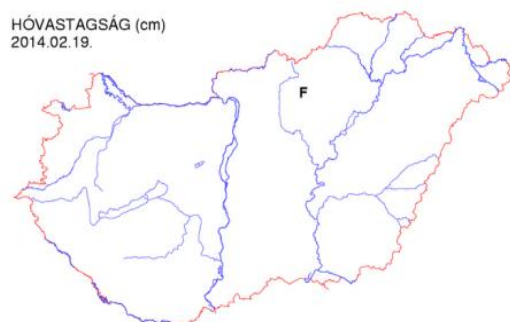
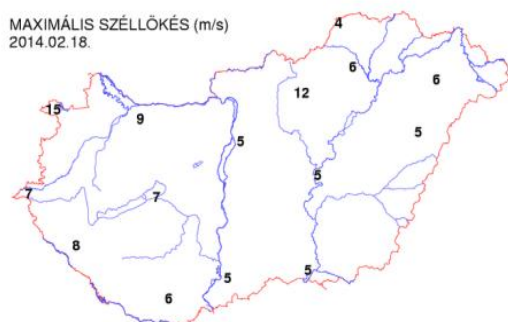
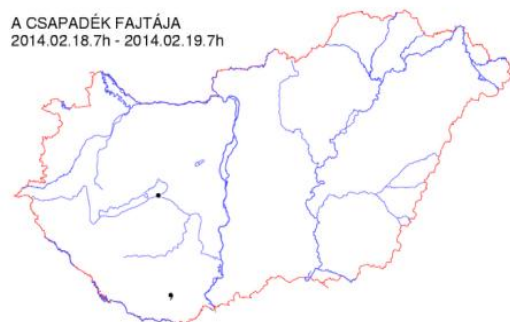
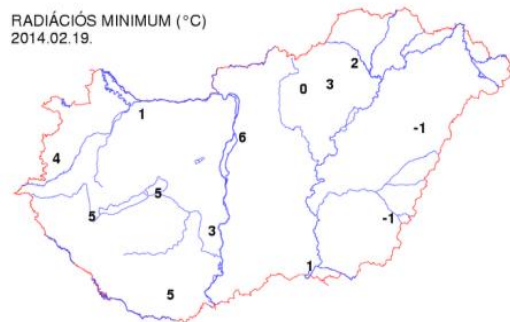
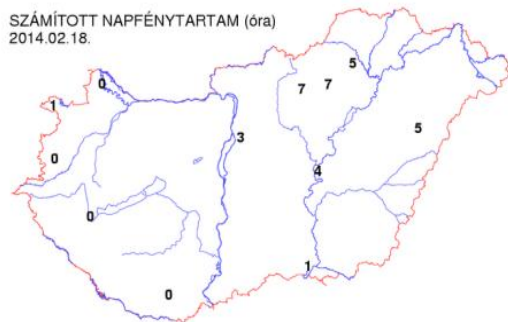
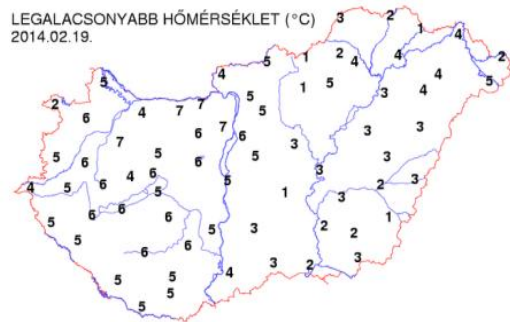
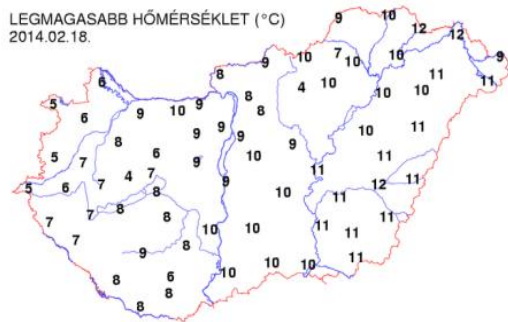
Másodikként egy olyan esetet ismertetek, mely alkalmával már a nedves ülepedés is megfigyelhető a szaharai homok légköri jelenléte mellett.

Szinoptikai helyzet: Kontinensünk éghajlatát egy több középpontú ciklon alakította, amelynek egyik központja a Brit-szigetektől keletre helyezkedett el. E ciklon melegfrontjának felhőzete húzódott a Kárpát-medence felett, így többnyire borús volt az idő (23. ábra). Kisebb eső csak szórványosan fordult elő az ország nyugati részében. A hőmérséklet hajnalban 0, +7 °C, napközben pedig 5–13 °C között alakult, nyugaton volt a hűvösebb (24. ábra). Érdeemes megfigyelnünk a ciklonrendszer másik középpontját a

Földközi-tengeren, a Baleár-szigetektől keletre (23. ábra). Ennek a ciklonnak az előoldala eredményezett hazánkban délies áramlást, melynek eredményeképpen a déli, délkeleti szelet a Fertő tó térségében erős lökések is kísérték, illetve ami lehetővé tette a Szahara felől érkező légtömegek (és a por) beáramlását a Kárpát-medencébe.



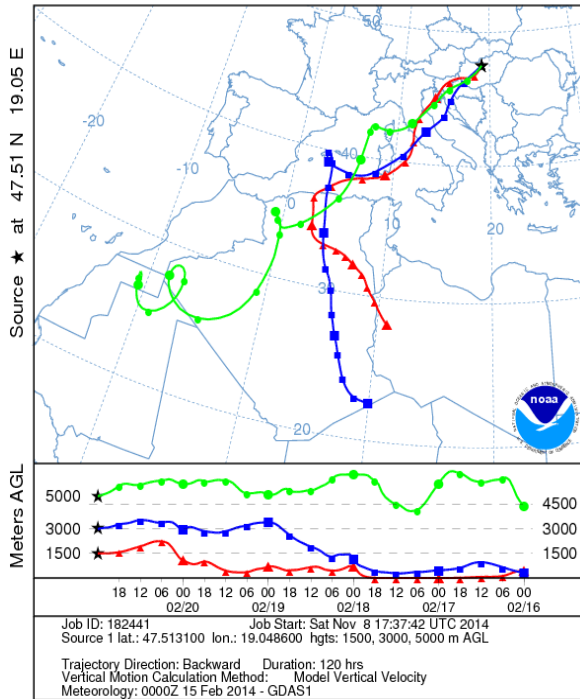
23. ábra: 2014. február 19. szinoptikus helyzet Európában (forrás: www2.wetter3.de, illetve OMSZ)



A kiadványban szereplő adatok csak elsődleges ellenőrzésen estek át, ezért hivatalos igazolásban nem használhatók.

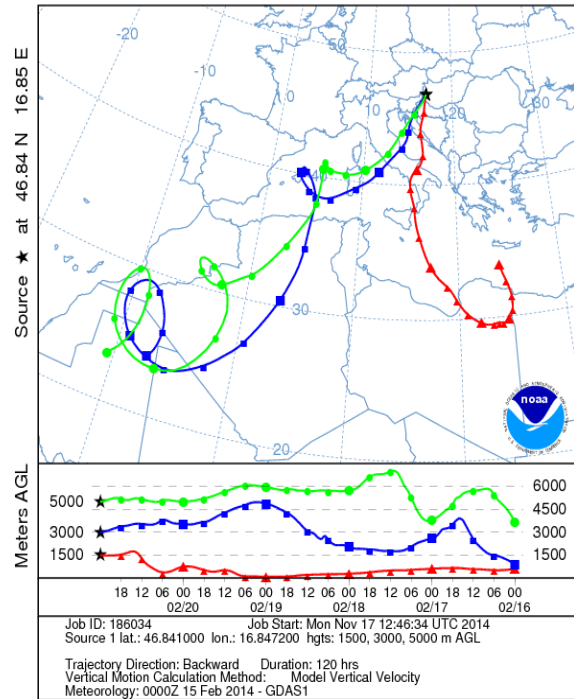
24. ábra: A légköri állapotatózók értékeinek alakulása 2014.02.19-én. (forrás: OMSZ)

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 21 Feb 14
GDAS Meteorological Data



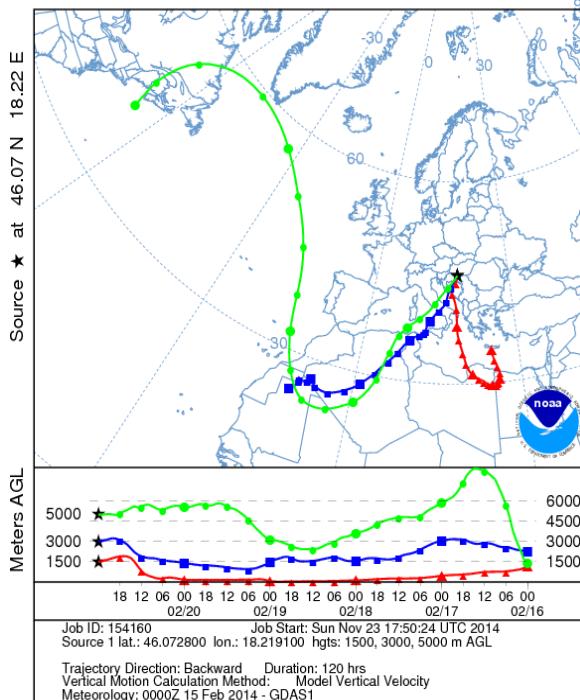
Budapest

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 21 Feb 14
GDAS Meteorological Data



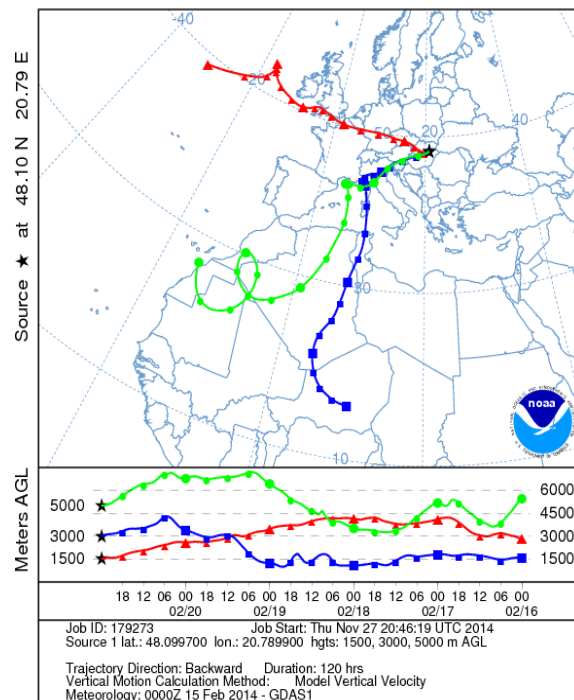
Zalaegerszeg

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 21 Feb 14
GDAS Meteorological Data



Pécs

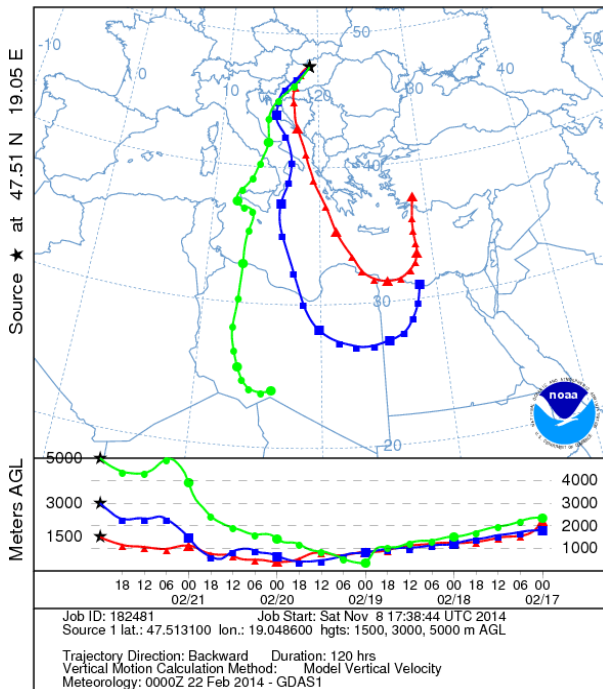
NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 21 Feb 14
GDAS Meteorological Data



Miskolc

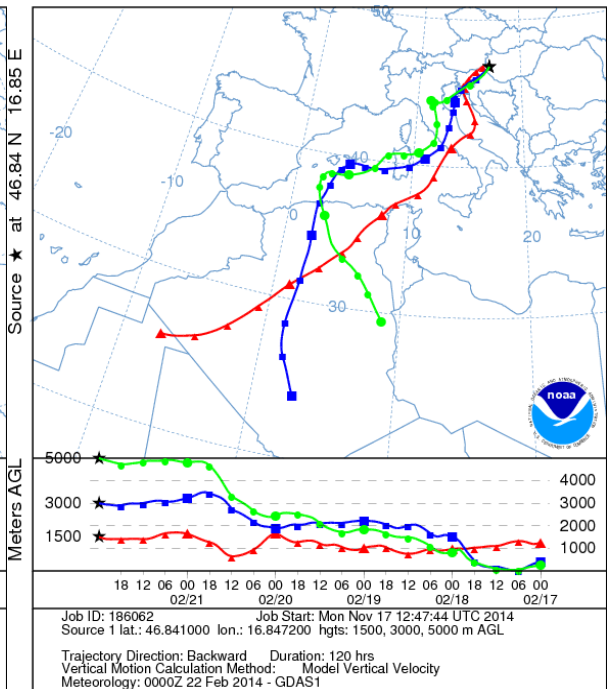
25. ábra: HYSPLIT modell futtatásának eredményei. Az ábrákon ún. backward trajektóriák láthatók négy városra nézve 2014.02.21-én 00:00 UTC-kor. Ez a négy város rendre: Budapest, Zalaegerszeg, Pécs, Miskolc (forrás: NOAA)

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 22 Feb 14
GDAS Meteorological Data



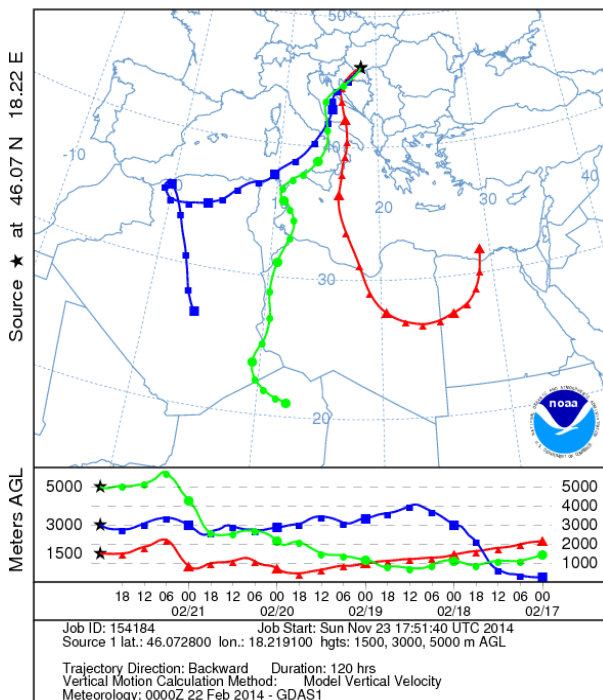
Budapest

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 22 Feb 14
GDAS Meteorological Data



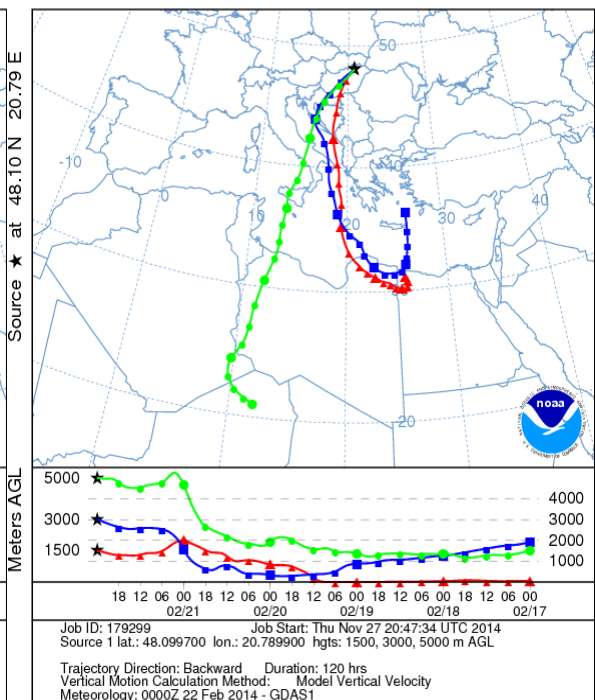
Zalaegerszeg

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 22 Feb 14
GDAS Meteorological Data



Pécs

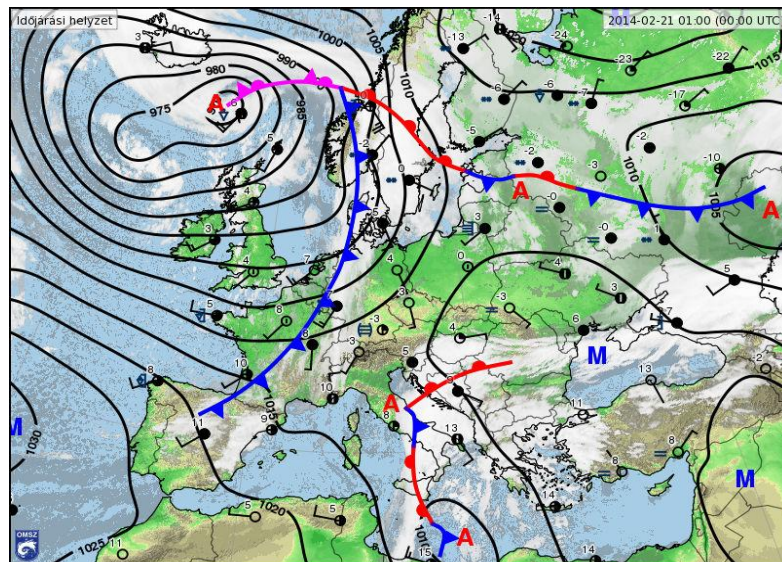
NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0000 UTC 22 Feb 14
GDAS Meteorological Data



Miskolc

26. ábra: HYSPLIT modell futtatásának eredményei. Az ábrákon ún. backward trajektóriák láthatók négy városra nézve 2014.02.22-én 00:00 UTC-kor. Ez a négy város rendre: Budapest, Zalaegerszeg, Pécs, Miskolc (forrás: NOAA)

A fenti trajektóriákból látható (25–26. ábra), hogy az időszak alatt a forrásterület egyre keletebbre tolódott. A kezdeti közép-szaharai forrásterület (Algéria területe) az időszak végére a líbiai-egyiptomi határ közelébe tolódott. Ez egyértelműen a kezdetben a Baleár-szigetektől kicsit keletebbre található mediterrán ciklon mozgásával magyarázható. A ciklon keleti irányba való mozgása egyúttal a trajektória eltolódását eredményezte, keletebbre tolódott az áramlási mező is (27. ábra). Az időszak alatt jellemzően alacsonyabb légrétegekben (1500 m-es magasság) szállítódott a por, de 19-én, Pécsen nagyobb magasságon való transzport is megjelent. Mivel esetünkben a mediterrán ciklon melegfrontjának felhőzete elérte hazánk területét, így kiadós csapadék is hullott. A délies áramlások által szállított saharai por az ország több pontján is sáros eső formájában utalt a légköri jelenlétére (28. ábra).



27. ábra: A keleti irányba elmozduló mediterrán ciklon 2014.02.21-én (forrás: OMSZ)



28. ábra: A saharai por által okozott sáros eső 2014 februárban (Nagy Gábor és „Boodoliver2” fotói)

8. Összefoglalás

Az ásványi por egy parányi részecske, mérete alapján aeroszoknak tekinthetjük. Igen fontos a légkörben betöltött szerepe, hiszen nemcsak a sugárzást módosítja, hanem hatással van az emberi egészségre is. Légúti, illetve szív és érrendszeri betegségek mellett gyulladást is okozhat. A finomabb szemcsék azonban, amelyek nagyobb mennyiségben szállítódnak, nem mutatnak szignifikáns hatást a megbetegedések számában. Egészségügyi szempontból a durvább szemcsék jelentenek nagyobb kockázatot. A legnagyobb forrásterület Földünkön a Szahara, ahonnan jellemzően három kontinens irányába szállítható a por, ezek közül az egyik jellemző célirány Európa. A por légköri ciklusa három szakaszra osztható: por légkörbe jutása, por transzportja, illetve depozíciója. Ahhoz, hogy a szemcsék a levegőbe emelkedhessenek, megfelelő határsebességű szélre van szükség, melynek értéke 6 m/s arid környezetben. A legkönnyebben a 60–100 μm átmérőjű részecskék emelkednek a levegőbe, amelyek a gravitációnak köszönhetően újra becsapódnak a felszínbe. Becsapódáskor számos finom szemcsét (60 μm alatti átmérő) a levegőbe repítenek, amelyet az advekciónak és a turbulencia könnyen tovaszállít nagyobb távolságokra is. A szállítás szempontjából ideális körülmények kialakításában nagy szerepet játszanak egyes légköri képződmények, ezek a ciklonok, teknők, illetve akár az anticiklonok is.

A Hysplit modell segítségével tíz évre visszamenőleg megkerestem azokat az eseteket ún, backward trajektóriák (időben visszafele haladó trajektóriák) alapján, amelyek alkalmával kedvezőek voltak a feltételek a saharai eredetű por hazánk területe fölé történő

transzportjához. A vizsgálat alkalmával 120 órára visszamenőleg négy magyarországi városra futtattam a Hysplit modellt, három különböző magasságban (1500 m, 3000 m, 5000 m). Megfigyeltük, hogy a délnyugati országrészben található városok esetében valamivel magasabb a portranszportnak kedvező trajektóriák száma. A legtöbb ideális pályavonal 3000 m-es érkezési magassággal fordult elő. Fő forrásterület hazánk tekintetében Közép-Szahara, azon belül Algéria délkeleti, illetve Líbia nyugati része. A mediterrán ciklonok fontos szerepet játszhatnak a poros esetek kialakulásában, ugyanis a kedvező légtömegpályák, illetve a mediterrán ciklonok maximuma egyaránt a téli félévre esik.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni témavezetőimnek, Leelőssy Ádámnak és dr. Mészáros Róbertnek a szakmai tanácsokat, útmutatásukat a felmerülő nehéz helyzetek esetén, valamint biztatásukat, mely nélkül ez a munka nem jöhetett volna létre.

Szintén hálával tartozom barátaimnak, szüleimnek, akik végig kitartottak, és támogattak munkámban.

Irodalomjegyzék

Albert Ansmann, Jens Boesenberg, Anatoli Chaikovsky, Adolfo Comero'n, Sabine Eckhardt, Ronald Eixmann, Volker Freudenthaler, Paul Ginoux, Leonce Komguem, Holger Linne', Miguel A 'ngel Lo'pez Ma'rquez, Volker Matthias, Ina Mattis, Valentin Mitev, Detlef Mu"ller, Svetlana Music, Slobodan Nickovic, Jacques Pelon, Laurent Sauvage, Piotr Sobolewsky, Manoj K. Srivastava, Andreas Stohl, Omar Torres, Geraint Vaughan, Ulla Wandinger, and Matthias Wiegner, 2003: Long-range transport of Saharan dust to northern Europe: The 11–16 October 2001 outbreak observed with EARLINET, 108 doi:10.1029/2003JD003757

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

Bell M.L., Samet J.M., Dominici F., 2004: Time-series studies of particulate matter. *Annual Reviews of Public Health* 25, 247–80.

D'Almeida, G. A., 1987: On the variability of desert aerosol radiative characteristics, *J. Geophys. Res.*, 92(D3), 3017-3026, 1987.

Dominici F., Sheppard L., Clyde M., 2003: Health effects of air pollution: a statistical review. *International Statistical Reviews* 71, 243–76.

Draxler, R.R and Hess, G.D., 1997: Description of the HYSPLIT_4 modelling system. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-224, December, 24pp.

Draxler, R.R. and Stunder, B.J.B., 1988: Modeling the CAPTEX vertical tracer concentration profiles. *J. Appl. Meteorol.*, 27, 617-625.

Draxler, R.R. and Taylor, A.D. 1982: Horizontal dispersion parameters for long-range transport modeling. *J. Appl. Meteorol.*, 21, 367–372

Draxler, R.R., 1990: The calculation of low-level winds from the archived data of a regional primitive equation model. *J. Appl. Meteorol.*, 29, 240–248.

Draxler, R.R., 1992: Hybrid single particle Lagrangian integrated trajectories (HY-SPLIT) Version 3.0 – User's guide and model description. NOAA Technical Memorandum ERL ARL-195, 26 p.

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.

Escudero M., A. Stein, R. R. Draxler, X. Querol, A. Alastuey, S. Castillo, and A. Avila, 2006: Determination of the contribution of northern Africa dust source areas to PM10 concentrations over the central Iberian Peninsula using the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory model (HYSPLIT) model, 111, doi:10.1029/2005JD006395

Fiedler S., K. Schepanski, P. Knippertz, B. Heinold, and I. Tegen, 2013: How important are cyclones for emitting mineral dust aerosol in North Africa?, 32483–32528, doi:10.5194/acpd-13-32483-2013

Hirsch Tamás, Babolcsai György, 2013: Téli nagy csapadékos helyzetek, Országos Meteorológiai Szolgálat, pp 84

Israelevich P., E. Ganor, P. Albert, P. Kishcha, A. Stupp, 2012: Predominant transport paths of Saharan dust over the Mediterranean Sea to Europe, *Journal of Geophysical Research*, 117, doi:10.1029/2011JD016482

Iversen, J. D., and B. R. White 1982: Saltation threshold on Earth, Mars and Venus, *Sedimentology*, 29, 111–119.

Jiménez, E., Linares, C., Martínez, D., Díaz, J., 2010: Role of Saharan dust in the relationship between particulate matter and short-term daily mortality among the elderly in Madrid (Spain). *Sci Tot Environ*, 408(23), 5729–5736.

Karanasiou A., Natalia Moreno, Teresa Moreno, Mar Viana, Xavier Querol: Institute of Environmental Assessment and Water Research (IDAEA-CSIC), Barcelona, Spain, 2012: Health effects from Sahara dust particles, European Topic Centre on Air Pollution and Climate Change Mitigation, 2012: ETC/ACM Technical Paper 2011/4

Mallone S., Stafoggia M., Faustini A., 2011: Saharan Dust and Associations between Particulate Matter and Daily Mortality in Rome, Italy. *Environmental Health Perspectives*, doi: 10.1289/ehp.1003026.

Marticorena, B., and G. Bergametti 1995: Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme, *J. Geophys. Res.*, 100 (D8), 16,415–16,430.

McGowan Hamish, Andrew Clark, 2008: Identification of dust transport pathways from Lake Eyre, Australia using Hysplit, *Atmospheric Environment* 42 (2008) 6915–6925

Nagy Andrea, 2009: Magyarország szaharai port szállító időjárási helyzetek elemzése MSG műholdképek alapján, Diplomamunka. Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, pp 82

Pacyna, J. M. 1995: *Sources, Particle Size Distribution and Transport of Aerosol*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Perez L., Tobias A., Querol X., Kunzli N., Pey J., Alastuey A., 2008: Coarse particles from Saharan dust and daily mortality. *Epidemiology* 19, 800–807.

Pey J., X. Querol, A. Alastuey, F. Forastiere, and M. Stafoggia, 2013: African dust outbreaks over the Mediterranean Basin during 2001–2011: PM10 concentrations, phenomenology and trends, and its relation with synoptic and mesoscale meteorology, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1395–1410

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

Sábitz J., 2012: Ensemble clusterezés és terjedési modell eredményeinek összehasonlító vizsgálata. Diplomamunka. Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, pp 61

Sábitz, J., 2010: Légköri szennyezőanyagok diszperziójának vizsgálata a HYSPLIT modell segítségével. Tudományos Diákköri Dolgozat. Budapest, ELTE Meteorológiai Tanszék, pp 35

Samoli E., Kougea E., Kassomenos P., et al. 2011a: Does the Presence of Desert Dust Modify the Effect of PM10 on Mortality in Athens, Greece? *Science of the Total Environment* 409, 2049–2054 .

Schepanski K., 2009: Characterising Saharan Dust Sources and Export using Remote Sensing and Regional Modelling, Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades Der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Shao, Y. 2000: *Physics and Modelling of Wind Erosion*, Kluwer Academic Publishers.

Shao, Y. 2001: A model for mineral dust emission, *J. Geophys. Res.*, 106 (D17), 20,239–20,254.

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.

Szabó, T. 2004: A HYSPLIT_4 trajektória-modell adaptálása és alkalmazása. Tudományos diákköri dolgozat, Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem. pp 35.

Szabó, T. 2007: A szén-dioxid koncentráció változékonyságának vizsgálata európai toronymérések adatai alapján. Diplomamunka. Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem. pp 59.

Takács Dominika, 2013: A 2012. április 29-i bugaci erdőtüz modellezése, Diplomamunka. Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, pp 41

Tobías A., Cayla J.A., Pey J., Alastruey A., Querol X., 2011: Are Saharan dust intrusions increasing the risk of meningococcal meningitis? *International Journal of Infectious Diseases* 15, e503.

Tobías A., Pérez L., Díaz J., Linares C., Pey J., Alastruey A., Querol X., 2011: Short-term effects of particulate matter on total mortality during Saharan dust outbreaks: A case-crossover analysis in Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*

van Bebber, W.J., 1891: Die Zugstraßen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der Deutschen Seewarte für den Zeitraum von 1875–1890. *Meteorol. Zeitschrift*. 8, pp. 361–366

Függelék

Jelmagyarázat:

* : Közép-Szaharát jelöli abban az esetben, ha onnan, és vele együtt egy másik (Nyugat- vagy Kelet-Szaharából érkezik a légrész) területről is érkezik a légrész

KÉK szín: Atlasz-hegység területéről érkezik a légrész

ZÖLD szín: Nyugat-Szahara területéről érkezik a légrész

SÁRGA szín: Csak Közép-Szaharából érkezik a légrész

PIROS szín: Kelet-Szaharából érkezik a légrész

1. táblázat: Portranszportnak kedvező trajektóriákat rendszerző összefoglaló táblázat

2014. november

	1500 m magasan				3000 m magasan				5000 m magasan			
Budapest	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
	9	10	11	12	9	10*	11	12	9	10	11	12
	13	14	15	16*	13	14*	15	16*	13	14	15	16
	17	18	19	20	17	18	19	20	17	18	19	20
	21	22	23	24	21	22	23	24	21	22	23	24
	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28
	29	30			29	30			29	30		
Zalaegerszeg	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	5	6	7	8*	5	6*	7	8*	5	6	7	8*
	9	10	11	12	9	10	11	12	9	10	11	12
	13	14	15*	16	13*	14	15	16	13	14*	15	16
	17	18	19	20	17	18	19	20	17	18	19	20
	21	22	23	24	21	22	23	24	21	22	23	24
	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28
	29	30			29*	30			29	30		
Pécs	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
	9	10	11	12	9	10	11	12	9	10	11	12
	13	14	15	16	13*	14	15	16*	13	14*	15	16
	17	18	19	20	17	18	19	20	17	18	19	20
	21	22	23	24	21	22	23	24	21	22	23	24
	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28
	29	30			29	30			29	30		
Miskolc	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	5	6	7*	8	5	6	7	8	5	6	7	8
	9	10	11	12	9	10	11	12	9	10	11	12
	13	14	15	16	13	14	15	16	13	14	15	16
	17	18	19	20	17	18	19	20	17	18	19	20
	21	22	23	24	21	22	23	24	21	22	23	24
	25	26	27	28	25	26	27	28	25	26	27	28
	29	30			29	30			29	30		